



ESCUELA DE DOCTORADO INTERNACIONAL
DE LA USC

María
Portela Barral

Tesis doctoral

Potencial de técnicas no destructivas en
la estimación de propiedades mecánicas
de la madera de *Quercus robur* a lo largo
de su cadena de transformación

Santiago de Compostela, 2025

TESIS DOCTORAL

**POTENCIAL DE TÉCNICAS NO
DESTRUCTIVAS EN LA
ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES
MECÁNICAS DE LA MADERA DE
QUERCUS ROBUR A LO LARGO
DE SU CADENA DE
TRANSFORMACIÓN**

Autora

María Portela Barral

Directores: Manuel Guaita Fernández y Raquel Gonçalves

Tutor: Manuel Guaita Fernández

PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA PARA EL DESARROLLO RURAL Y CIVIL

Declaración de conflicto de interés:

La presente tesis doctoral ha sido financiada parcialmente por el Convenio de colaboración: *Madeira en Valor 2019-2022*, entre la Axencia Galega da Industria Forestal (XERA) y la Plataforma de Enxeñaría da Madeira Estrutural (PEMADE) de la Universidade de Santiago de Compostela (USC), para la puesta en valor de especies forestales de crecimiento en Galicia y promoción de la madera en la construcción.



AXENCIA GALEGA
DA INDUSTRIA
FORESTAL



AGRADECIMIENTOS

Completar el proceso de una tesis doctoral siempre es motivo de alegría y celebración. Sin embargo, en estas líneas me gustaría celebrar y agradecer no la culminación del proceso, sino el camino en sí y a las personas que me han acompañado a transitarlo durante estos años.

Gracias, Manuel, por ser germen de este proyecto. Por apoyarme incondicionalmente, por confiar en mí y abrirme las puertas de Pemade. Gracias por aquel primer Egurtek al que me invitaste a asistir contigo y con el resto de compañeros; en él descubrí no solo un mundo profesional fascinante, sino algo mucho más valioso que me invitó a quedarme: un grupo de personas excepcional.

Gracias, Raquel, directora y amiga. Por compartir tan generosamente tus conocimientos y, lo más importante, tu tiempo. Gracias por los momentos aprendiendo, celebrando y “sobreviviendo” juntas. Tu entregada dedicación ha hecho que vivir esta experiencia contigo haya sido un auténtico privilegio.

A mis compañeros de Pemade, porque nada de esto sería posible sin vosotros. Jose, Mônica, Manuel R., Manuel G.: en un entorno laboral, no hay muestra de afecto más sincera que luchar por los objetivos de los demás como si fueran los propios. Supongo que por eso compartimos no solo trabajo, sino también vida. Gracias a vuestro esfuerzo y generosidad hemos podido alcanzar este objetivo.

A quienes habéis integrado el equipo de Pemade durante estos años, y a todos los que, desde otros lugares, formáis parte de mi 'familia de la madera'. Gracias por vuestra generosidad infinita y por todo lo aprendido, tanto dentro como fuera del laboratorio.

Gracias, Martina, por tu entrega absoluta y tu búsqueda de la perfección en todo lo que haces. Gracias por compartir calambres bajo la lluvia, bocadillos austeros en el coche y menús excesivos en medio de la jornada. Por las horas compartidas entre campo y conducción, por las charlas, por las risas...Gracias por hacer que los kilómetros, el cansancio y los días grises pesaran siempre la mitad.

Quiero agradecer a todas las personas que durante estos años me han recordado que lo que realmente importa no es solo estar, sino estar presente. A quienes han alentado el objetivo, pero se encargaron de recordarme el porqué de las cosas. Gracias a mis amigas y amigos por recargar mi energía; y gracias a mis sobrinas, Julia y Lola, por dejarme sin ella...pero con el corazón mucho más lleno.

Gracias a mi hermana, Laura. La vida da muchas vueltas, pero me hace feliz ver cómo nosotras las aprovechamos para buscarnos, para acortar distancias y estar cada vez más unidas. Gracias por tomarme el relevo, por ejercer de hermana mayor y sostenerme en mis momentos de desesperación.

Gracias a mi compañero de vida, Fede. Porque siempre traes luz cuando no encuentro la salida. En esos momentos me enseñas la vida a través de tus ojos, donde se ve orden en el caos y donde lo importante rara vez es lo urgente. Gracias por enseñarme a parar cuando es necesario y por darme el impulso que necesito para continuar.

Gracias a mi madre y a mi padre, por ser ejemplo de esfuerzo y entrega. Por enseñarme que si hacemos las cosas con pasión es porque nos hacen felices hoy, no mañana. Gracias por mostrarme la importancia de la constancia, pero, sobre todo, por recordarme que lo que soy es mucho más importante que lo que consigo.

Y muy especialmente, gracias Belén. He tenido la gran suerte de encontrarte en el camino. Llegaste en un momento en el que yo empezaba mi andadura profesional y, para mí, fuiste y siempre serás ejemplo y referencia, amiga y compañera. De esas personas que hacen del mundo un lugar mejor, a las que hay tanto que agradecer...

Gracias por enseñarme que no llega antes quien más corre, sino quien sabe a dónde va.

Gracias por ser paz, porque tu presencia acallaba el ruido que a veces no nos deja escuchar.

Gracias por tu risa contagiosa.

Gracias por ser refugio, incluso en los momentos en los que eras tú la que buscabas uno.

Gracias por escuchar tan bien, por ver tan profundo y por sentir tanto.

Gracias por recordarme que las cosas que importan están pasando a nuestro alrededor sin darnos apenas cuenta.

Gracias por interrumpir mis momentos de angustia delante del ordenador con un ...¿Tomamos un café?

Sí, hoy y mil millones de veces. Tomemos ese café, riámonos un poco de lo que creemos que es importante y compartamos las cosas que de verdad lo son.

El camino ha sido más bonito porque tú has estado en él.

*Torna, roble, árbol patrio, a dar sombra
cariñosa a la escueta montaña
donde un tiempo la gaita guerrera
alentó de los nuestros las almas;
y compás hizo al eco monótono
del canto materno,
del viento y del agua,
que en las noches de invierno al infante
en su cuna de mimbre arrullaban.*

*Que tan bello apareces, ¡oh roble!,
de este suelo en las cumbres gallardas
y en las suaves graciosas pendientes
donde umbrosas se extienden tus ramas,
como en rostro de pálida virgen
cabellera ondulante y dorada,
que en lluvia de rizos
acaricia la frente de nácar.*

*¡Torna presto a poblar nuestros bosques;
y que tornen contigo las hadas
que algún tiempo a tu sombra tejieron,
del héroe gallego
las frescas guirnaldas!*

–Rosalía de Castro. “Los Robles”.

RESUMEN

La madera, un material fundamental en la construcción, presenta una variabilidad intrínseca debido a su naturaleza biológica, heterogénea y anisótropa, lo cual constituye el principal desafío para su uso estructural. Para garantizar la fiabilidad y seguridad, es necesario implementar sistemas de clasificación que permitan segregar el material en clases de calidad. Ante la limitación de los ensayos destructivos, las Técnicas No Destructivas (TND), como los métodos de propagación de ondas acústicas (ultrasonidos, ondas de impacto, vibración), la inspección visual y la Correlación Digital de Imágenes (*Digital Image Correlation*, DIC), se posicionan como herramientas esenciales capaces de evaluar las propiedades sin alterar la estructura.

El objetivo general de esta tesis doctoral fue evaluar la precisión, viabilidad y aplicabilidad de estas diversas TND para la estimación de propiedades mecánicas (Módulo de Elasticidad, MOE y Módulo de Rotura, MOR) de la madera de *Quercus robur* de procedencia gallega en las distintas fases de su procesamiento y transformación, desde el árbol en pie hasta los productos de madera técnica. Los objetivos específicos abordaron la determinación de la fase más fiable para la estimación (árbol, troza o tabla), la viabilidad de obtener parámetros de la matriz de rigidez a partir del árbol en pie, la influencia de factores ambientales, y la capacidad predictiva de las técnicas acústicas y DIC en láminas con uniones dentadas.

El estudio demostró la viabilidad de estimar y clasificar el material desde el árbol en pie al utilizar modelos de regresión múltiple que combinaron la velocidad acústica obtenida con las técnicas de ultrasonidos, ondas de impacto y vibración con parámetros dendrométricos y físicos. Estos modelos combinados, especialmente los centrados en la madera de la troza basal, alcanzaron una alta capacidad predictiva del MOE y MOR, con R^2 ajustados de hasta 95,35% y 94,45 %, respectivamente. La aplicación de estos modelos permitió asignar una clase resistente al material en pie (D18 para la muestra total), resultado que coincide con la clasificación obtenida mediante los ensayos de flexión estática.

Aunque se constataron variaciones ambientales estacionales y diarias estadísticamente significativas, estas no influyeron en las mediciones acústicas. No se encontraron diferencias significativas en las velocidades (obtenidas por ultrasonidos y ondas de impacto) ni entre los distintos momentos del día ni entre los diferentes meses del año. Por tanto, se determina que los factores climáticos y estacionales no afectaron a la fiabilidad de la clasificación estructural del *Quercus robur* realizada mediante TND en el árbol en pie.

Para la caracterización de probetas de pequeñas dimensiones, la geometría poliédrica demostró ser particularmente ventajosa en los ensayos de ultrasonidos. Esta geometría simplificó el proceso al permitir obtener todas las mediciones de rigidez en una sola probeta. Además, evitó las dificultades identificadas en las probetas prismáticas, como la influencia de la inclinación de los anillos de crecimiento en la obtención de mediciones anómalas. Se obtiene equivalencia estadística entre los módulos de elasticidad longitudinales (E_L , E_R) determinados por ultrasonidos y por compresión. Finalmente, esta metodología demostró tener un potencial predictivo sobre el material estructural: los modelos basados en las probetas poliédricas lograron una estimación razonable del MOE_{Global} de las tablas, alcanzando un coeficiente de

determinación (R^2) de casi el 60%. En lo que respecta a los ensayos con la técnica de ultrasonidos aplicada en muestras cilíndricas extraídas del árbol, la investigación encontró una correlación estadísticamente significativa (R^2 del 71 %) entre el coeficiente de Poisson (ν_{LR}), demostrando la viabilidad de estimar propiedades elásticas de la madera, directamente a partir de ensayos no destructivos en pequeñas muestras extraídas del árbol en pie.

En la fase de producto, se evaluó la aplicación de técnicas acústicas (ultrasonidos, ondas de impacto y vibración) y la Correlación Digital de Imágenes (DIC) en láminas de *Quercus robur* con uniones dentadas (*finger-joint*). La unión no afectó significativamente a la rigidez global medida por las TND acústicas. En láminas fabricadas partiendo del mismo material de origen, la velocidad acústica por sí sola fue un predictor robusto del MOE (R^2 de hasta 99,41 %). En láminas de composición heterogénea, el Coeficiente de Rigidez (C_{LL}) fue un predictor superior. Se obtuvieron R^2 máximos del 84,24 % (ondas de impacto) y 95,88 % (ultrasonidos) utilizando tablas de densidad y rigidez variables, respectivamente. En láminas fabricadas a partir de tablas con densidad heterogénea, se confirmó la viabilidad de estimar la rigidez a partir de las mediciones en sus componentes ($R^2 \approx 70$ %), siempre y cuando dichas tablas hayan sido preclasificadas en un rango de rigidez similar. Sin embargo, dicha predicción (basada en el material de origen) no fue viable al mezclar tablas con rigideces dispares.

RESUMO

A madeira, un material fundamental na construción, presenta unha variabilidade intrínseca debido á súa natureza biolóxica, heteroxénea e anisótropa, o que constitúe o principal desafío para o seu uso estrutural. Para garantir a fiabilidade e a seguridade, é necesario implementar sistemas de clasificación que permitan segregarse o material en clases de calidade. Ante as limitacións dos ensaios destrutivos, as Técnicas Non Destructivas (TND), como os métodos de propagación de ondas acústicas (ultrasóns, ondas de impacto, vibración), a inspección visual e a Correlación Dixital de Imaxes (DIC), posicionanse como ferramentas esenciais capaces de avaliar as propiedades sen alterar a estrutura.

O obxectivo xeral desta tese doutoral foi avaliar a precisión, viabilidade e aplicabilidade destas diversas TND para a estimación de propiedades mecánicas (Módulo de Elasticidade, MOE, e Módulo de Rotura, MOR) da madeira de *Quercus robur* de procedencia galega nas distintas fases do seu procesamento e transformación, desde a árbore en pé ata os produtos de madeira técnica. Os obxectivos específicos abordaron a determinación da fase máis fiable para a estimación (árbore, troza ou táboa), a viabilidade de obter parámetros da matriz de rixidez a partir da árbore en pé, a influencia de factores ambientais, e a capacidade predictiva das técnicas acústicas e DIC en láminas con unións dentadas.

O estudo demostrou a viabilidade de estimar e clasificar o material desde a árbore en pé ao empregar modelos de regresión múltiple que combinaron a velocidade acústica obtida coas técnicas de ultrasóns, ondas de impacto e vibración con parámetros dendrométricos e físicos. Estes modelos combinados, especialmente os centrados na madeira da troza basal, alcanzaron unha alta capacidade predictiva do MOE e o MOR, con R^2 axustados de até o 95,35 % e o 94,45 %, respectivamente. A aplicación destes modelos permitiu asignar unha clase resistente ao material en pé (D18 para a mostra total), resultado que coincide coa clasificación obtida mediante os ensaios de flexión estática.

Aínda que se constataron variacións ambientais estacionais e diarias estatisticamente significativas, estas non influíron nas medicións acústicas. Non se atoparon diferenzas significativas nas velocidades (obtidas mediante ultrasóns e ondas de impacto) nin entre os distintos momentos do día nin entre os diferentes meses do ano. Por tanto, determínase que os factores climáticos e estacionais non afectaron á fiabilidade da clasificación estrutural do *Quercus robur* realizada mediante TND na árbore en pé.

Para a caracterización de probetas de pequenas dimensións, a xeometría poliédrica demostrou ser particularmente vantaxosa nos ensaios de ultrasóns. Esta xeometría simplificou o proceso ao permitir obter todas as medicións de rixidez nunha única probeta. Ademais, evitou as dificultades identificadas nas probetas prismáticas, como a influencia da inclinación dos aneis de crecemento na obtención de medicións anómalas. Obtívose equivalencia estatística entre os módulos de elasticidade lonxitudinais (E_L , E_R) determinados por ultrasóns e por compresión. Finalmente, esta metodoloxía demostrou ter un potencial predictivo sobre o material estrutural: os modelos baseados nas probetas poliédricas lograron unha estimación razoable do MOE_{Global} das táboas, alcanzando un coeficiente de determinación (R^2) de case o 60 %. No que respecta aos ensaios coa técnica de ultrasóns aplicada en mostras cilíndricas extraídas da árbore, a

investigación atopou unha correlación estatisticamente significativa (R^2 do 71%) co coeficiente de Poisson (ν_{LR}), demostrando a viabilidade de estimar propiedades elásticas da madeira directamente a partir de ensaios non destructivos en pequenas mostras extraídas da árbore en pé.

Na fase de produto, avalíouse a aplicación de técnicas acústicas (ultrasóns, ondas de impacto e vibración) e a Correlación Dixital de Imaxes (DIC) en láminas de *Quercus robur* con unións dentadas (*finger-joint*). A unión non afectou significativamente á rixidez global medida polas TND acústicas. En láminas fabricadas partindo do mesmo material de orixe, a velocidade acústica por si soa foi un predictor robusto do MOE (R^2 de até o 99,41 %). En láminas de composición variable, o Coeficiente de Rixidez (C_{LL}) foi un predictor superior. Obtivéronse R^2 máximos do 84,24 % (ondas de impacto) e do 95,88 % (ultrasóns) empregando táboas de densidade e rixidez variables, respectivamente. Nas láminas fabricadas a partir de táboas con densidade heteroxénea, confirmouse a viabilidade de estimar a rixidez a partir das medicións nos seus componentes ($R^2 \approx 70\%$) sempre e cando esas táboas fosen preclasificadas nun rango de rixidez similar. Non obstante, esta predición (baseada no material de orixe) non foi viable ao mesturar táboas con rixideces dispares.

ABSTRACT

Wood, a fundamental material in construction, exhibits intrinsic variability due to its biological, heterogeneous and anisotropic nature, which constitutes the main challenge for its structural use. To ensure reliability and safety, it is necessary to implement classification systems that allow the material to be segregated into quality classes. Faced with the limitations of destructive testing, Non-Destructive Techniques (NDT), such as acoustic wave propagation methods (ultrasound, impact waves, vibration), visual inspection and Digital Image Correlation (DIC), emerge as essential tools capable of assessing properties without altering the structure.

The main objective of this doctoral thesis was to evaluate the accuracy, feasibility and applicability of these various NDT for estimating the mechanical properties (Modulus of Elasticity, MOE, and Modulus of Rupture, MOR) of *Quercus robur* wood from Galicia at different stages of its processing and transformation, from the standing tree to engineered wood products. The specific objectives addressed the determination of the most reliable stage for estimation (tree, log or board), the feasibility of obtaining stiffness matrix parameters from the standing tree, the influence of environmental factors, and the predictive capacity of acoustic techniques and DIC on finger-jointed lamellae.

The study demonstrated the feasibility of estimating and classifying the material from the standing tree by using multiple regression models that combined acoustic velocity obtained through ultrasound, impact waves and vibration techniques with dendrometric and physical parameters. These combined models, particularly those focused on basal log wood, achieved high predictive capacity for MOE and MOR, with adjusted R^2 values of up to 95,35 % and 94,45 %, respectively. The application of these models made it possible to assign a strength class to the standing material (D18 for the full sample), a result consistent with the classification obtained through static bending tests.

Although statistically significant seasonal and daily environmental variations were observed, these did not influence the acoustic measurements. No significant differences were found in velocities (obtained by ultrasound and impact waves) between different times of the day or different months of the year. Therefore, it is determined that climatic and seasonal factors did not affect the reliability of the structural classification of *Quercus robur* performed through NDT on the standing tree.

For the characterization of small specimens, polyhedral geometry proved particularly advantageous in ultrasound testing. This geometry simplified the process by enabling all stiffness measurements to be obtained from a single specimen. Additionally, it avoided difficulties identified in prismatic specimens, such as the influence of growth-ring inclination on the appearance of anomalous measurements. Statistical equivalence was obtained between the longitudinal elastic moduli (E_L , E_R) measured by ultrasound and compression. Finally, this methodology showed predictive potential for structural material: models based on polyhedral specimens provided a reasonable estimation of the boards' MOE_{Global} , achieving a coefficient of determination (R^2) of nearly 60 %. Regarding ultrasound tests applied to cylindrical samples extracted from the tree, the research found a statistically significant correlation (R^2 of 71 %) with the Poisson ratio (ν_{LR}), demonstrating the feasibility of estimating elastic properties of

wood directly from non-destructive tests performed on small samples obtained from the standing tree.

In the product phase, the application of acoustic techniques (ultrasound, impact waves and vibration) and Digital Image Correlation (DIC) was evaluated on finger-jointed *Quercus robur* lamellae. The joint did not significantly affect the global stiffness measured by acoustic NDTs. In lamellae manufactured from the same source material, acoustic velocity alone proved to be a robust predictor of MOE (R^2 up to 99,41 %). In lamellae of variable composition, the Stiffness Coefficient (C_{LL}) was a superior predictor. Maximum R^2 values of 84,24 % (impact waves) and 95,88 % (ultrasound) were obtained using boards of variable density and stiffness, respectively. In lamellae manufactured from boards with heterogeneous density, the feasibility of estimating stiffness based on component measurements was confirmed ($R^2 \approx 70$ %), provided that the boards were preclassified within a similar stiffness range. However, this prediction (based on the source material) was not viable when mixing boards with disparate stiffnesses.

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN	1
2 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....	3
2.1 Hipótesis	3
2.2 Objetivos.....	3
2.2.1 Objetivo general	3
2.2.2 Objetivos específicos.....	3
3 ANTECEDENTES.....	5
3.1 Las Técnicas No Destructivas en el análisis de la madera estructural	5
3.2 Métodos de inspección visual	8
3.3 Métodos de propagación de ondas acústicas.....	10
3.3.1 Ondas de ultrasonido.....	13
3.3.2 Ondas de impacto	14
3.3.3 Métodos de vibración	14
3.4 Método de Correlación Digital de Imágenes (DIC).....	15
3.5 Factores de influencia en las mediciones acústicas en la madera	16
3.5.1 Factores inherentes a la madera.....	17
3.5.1.1 Estructura anatómica	17
3.5.1.2 Densidad.....	17
3.5.1.3 Singularidades presentes	18
3.5.1.4 Madera juvenil.....	18
3.5.2 Factores dendrométricos y edad	19
3.5.3 Factores ambientales	19
3.5.3.1 Contenido de humedad y temperatura.....	19
3.5.4 Factores relacionados con el ensayo y la configuración	20
3.5.4.1 Acustoelasticidad	20
3.5.4.2 Dimensiones de las piezas.....	21
3.5.4.3 Configuración del ensayo.....	22
3.5.4.4 Atenuación	22
3.6 Aplicación de las TND a lo largo de la cadena de valor de la madera	23
3.6.1 Análisis del recurso en origen: Árbol en pie y troza	23
3.6.2 Análisis del producto: Láminas y uniones dentadas (<i>finger-joint</i>).....	26
3.6.3 Caracterización elástica de probetas de pequeñas dimensiones	28
3.6.3.1 Obtención de los términos de la matriz de rigidez [C].....	29
3.7 El <i>Quercus robur</i> como caso de estudio	32
3.7.1 La madera de roble en Europa y en España	32
3.7.2 Las especies frondosas como madera estructural.....	33
4 MATERIAL Y MÉTODOS	37
4.1 Equipo humano	37
4.2 Equipo material.....	38
4.2.1 Equipos de ondas acústicas	38
4.2.1.1 Equipos de ultrasonidos	38

4.2.1.2 Equipos de ondas de impacto	39
4.2.1.3 Equipos de vibración	40
4.2.2 Equipo de Correlación Digital de Imágenes (DIC)	43
4.2.2.1 Aramis 3D	43
4.2.3 Máquinas de ensayos estáticos	44
4.2.3.1 Máquina de ensayos de flexión y tracción.....	44
4.2.3.2 Máquina de ensayos de compresión	44
4.2.4 Equipos de medición de la deformación.....	45
4.2.5 Equipo para la fabricación de uniones dentadas.....	45
4.2.6 Equipos de medición del contenido de humedad	47
4.2.6.1 Equipos del método de secado en estufa	47
4.2.6.2 Xilohigrómetro de resistencia eléctrica	48
4.2.7 Equipos y material auxiliar.....	49
4.3 Estimación de propiedades mecánicas de la madera de <i>Quercus robur</i> a partir de mediciones con técnicas acústicas	51
4.3.1 Planteamiento general.....	51
4.3.2 Árbol en pie	52
4.3.2.1 Material de ensayo.....	52
4.3.2.2 Mediciones dendrométricas y no destructivas	54
4.3.3 Troza.....	55
4.3.3.1 Material de ensayo.....	55
4.3.3.2 Mediciones dendrométricas y no destructivas	56
4.3.4 Tabla saturada.....	57
4.3.4.1 Material de ensayo.....	57
4.3.4.2 Mediciones no destructivas	58
4.3.5 Tabla en condición de equilibrio higroscópico.....	59
4.3.5.1 Secado y selección del material.....	59
4.3.5.2 Mediciones no destructivas	59
4.3.5.3 Ensayos físico-estáticos: ensayos de flexión, densidad y contenido de humedad.....	62
4.3.6 Modelos de regresión	65
4.3.6.1 Análisis de la muestra “Conjunto”	65
4.3.6.2 Análisis de la muestra “Troza Basal”	65
4.3.7 Metodología de clasificación del material.....	65
4.4 Parámetros elásticos de la madera de <i>Quercus robur</i> obtenidos en ensayos de probetas de pequeñas dimensiones.....	68
4.4.1 Planteamiento general.....	68
4.4.2 Material de ensayo: prismas y poliedros	69
4.4.3 Material de ensayo: muestras cilíndricas	71
4.4.4 Ensayos de ultrasonidos	72
4.4.5 Ensayos de compresión sobre prismas	74
4.5 Influencia de factores climáticos y estacionales en la aplicación de técnicas acústicas para la estimación de propiedades mecánicas de <i>Quercus robur</i> en el árbol en pie.....	76
4.5.1 Planteamiento general.....	76
4.5.2 Material de ensayo.....	77

4.5.3 Ensayos no destructivos	77
4.6 Posibilidades de aplicación de métodos no destructivos en la evaluación de las propiedades mecánicas de láminas de madera de <i>Quercus robur</i> con uniones dentadas.....	78
4.6.1 Planteamiento general	78
4.6.2 Material de ensayo	79
4.6.3 Ensayos con técnicas acústicas	88
4.6.4 Ensayos de tracción con la técnica DIC	89
4.7 Análisis estadístico	92
5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	95
5.1 Estimación de propiedades mecánicas de la madera de <i>Quercus robur</i> a partir de mediciones con técnicas acústicas	95
5.1.1 Árbol en pie.....	95
5.1.1.1 Parámetros dendrométricos y estado de las parcelas.....	95
5.1.1.2 Parámetros acústicos	97
5.1.2 Troza	98
5.1.2.1 Parámetros dendrométricos	98
5.1.2.2 Parámetros acústicos	99
5.1.3 Tabla.....	101
5.1.3.1 Parámetros acústicos en la tabla saturada.....	101
5.1.3.2 Parámetros acústicos en la tabla en la humedad de equilibrio	101
5.1.3.3 Clasificación visual	102
5.1.3.4 Ensayos de flexión estática	104
5.1.4 Análisis de resultados según el estado del material.....	105
5.1.5 Modelos de regresión para la muestra “Conjunto”.....	107
5.1.5.1 Modelos de regresión a partir de mediciones no destructivas en tabla	107
5.1.5.2 Modelos de regresión a partir de mediciones no destructivas en troza	110
5.1.5.3 Modelos de regresión a partir de mediciones no destructivas en árbol	113
5.1.6 Modelos de regresión para la muestra “Troza Basal”	116
5.1.6.1 Modelos de regresión a partir de mediciones no destructivas en troza	116
5.1.6.2 Modelos de regresión a partir de mediciones no destructivas en árbol	117
5.1.7 Clasificación de la madera de <i>Quercus robur</i>	119
5.1.7.1 Clasificación de la tabla a partir de ensayos destructivos	119
5.1.7.2 Clasificación de la tabla a partir de ensayos acústicos	121
5.1.7.3 Clasificación de la troza a partir de ensayos acústicos.....	124
5.1.7.4 Clasificación del árbol a partir de ensayos acústicos	125
5.2 Parámetros elásticos de la madera de <i>Quercus robur</i> obtenidos en ensayos de probetas de pequeñas dimensiones.....	127
5.2.1 Parámetros de propagación de ondas considerando la ortotropía de la madera	127
5.2.2 Coeficientes de Poisson.....	129
5.2.3 Módulos de cortante y de elasticidad	132
5.2.4 Comparación de metodologías	137
5.2.5 Parámetros elásticos a partir de muestras cilíndricas	142
5.3 Influencia de factores climáticos y estacionales en la aplicación de técnicas acústicas para la estimación de propiedades mecánicas de <i>Quercus Robur</i> en el árbol en pie.....	146

5.3.1	Análisis de las condiciones climáticas durante los ensayos	146
5.3.2	Análisis de parámetros acústicos obtenidos en el registro diario	147
5.3.3	Análisis de parámetros acústicos obtenidos en el registro anual	148
5.4	Posibilidades de aplicación de métodos no destructivos en la evaluación de las propiedades mecánicas de láminas de madera de <i>Quercus robur</i> con uniones dentadas	154
5.4.1	Efecto de la unión dentada en la rigidez de la lámina (Grupo 1).....	154
5.4.2	Estimación de la rigidez en láminas fabricadas con material de densidades variables (Grupo 2).....	162
5.4.3	Estimación de la rigidez en láminas fabricadas con material de velocidades variables (Grupo 3).....	166
5.4.4	Análisis considerando los tres grupos de material.....	170
6	CONCLUSIONES.....	173
6.1	Sobre la exactitud de las técnicas en la clasificación estructural (Desde el árbol a la tabla)	173
6.2	Sobre la caracterización de propiedades elásticas y coeficientes de Poisson.....	173
6.3	Sobre la influencia de factores climáticos en la medición del árbol en pie.....	173
6.4	Sobre la evaluación de productos de madera técnica (Láminas con <i>finger-joint</i>).....	174
6.5	Conclusión General.....	174
7	LIMITACIONES Y OPORTUNIDADES	175
7.1	Marco normativo y estandarización de las TND.....	175
7.2	Caracterización de coeficientes de Poisson y desafíos en <i>Quercus robur</i>	175
7.3	Factores climáticos y robustez en la clasificación temprana.....	175
7.4	Innovación en uniones dentadas y transferencia tecnológica.....	176
7.5	Consideraciones finales.....	176
8	BIBLIOGRAFÍA.....	177
	ÍNDICE DE FIGURAS	197
	ÍNDICE DE TABLAS.....	201
	ANEXO I.....	207
	ANEXO II	209
	ANEXO III	211

1 INTRODUCCIÓN

En el panorama actual de la edificación, la madera ha recuperado su protagonismo transformándose en un material de vanguardia que, gracias a la tecnología y la normalización, cumple con las exigencias industriales y de seguridad más estrictas. Más allá de sus indudables ventajas ambientales como sumidero de carbono, donde 1 m³ puede fijar aproximadamente 1,5 toneladas de CO₂, la madera presenta una eficiencia estructural competitiva. Sin embargo, al tratarse de un material de crecimiento natural, posee una estructura intrínsecamente ortotrópica y heterogénea, cuyas propiedades físicas y mecánicas exhiben una amplia variabilidad influenciada por factores de crecimiento y condiciones ambientales, incluso entre piezas provenientes del mismo árbol. Esta variabilidad natural exige procedimientos rigurosos de clasificación para garantizar un uso seguro y eficiente en aplicaciones estructurales. En este contexto, las Técnicas de ensayo No Destructivas (TND) se han consolidado como herramientas indispensables para estimar las propiedades mecánicas de la madera a lo largo de las diferentes fases de su procesamiento, proporcionando información precisa y necesaria para asegurar la fiabilidad de los elementos constructivos.

El roble europeo (*Quercus robur* L.) es una especie de gran relevancia ecológica y económica tanto en España como en el resto de Europa, siendo muy apreciada para su uso en la construcción debido a su notable resistencia mecánica y durabilidad. Esta frondosa, cuya producción nacional se localiza mayoritariamente en Galicia, se caracteriza por ser una madera pesada de anillo poroso, con características anatómicas y tecnológicas distintas a las de las maderas usualmente explotadas en plantaciones forestales europeas destinadas a fines estructurales. Estas particularidades plantean interrogantes no solo sobre sus propiedades, sino también sobre la aplicabilidad directa de TND desarrolladas y validadas para otras condiciones silvícolas, como especies de crecimiento rápido o materiales provenientes de plantaciones gestionadas de forma intensiva. Por ello, resulta necesario investigar si métodos como la inspección visual, los métodos acústicos y la correlación digital de imágenes presentan un desempeño adecuado para determinar, con la precisión necesaria, los parámetros mecánicos de *Q. robur* a lo largo de toda la cadena productiva, hasta llegar a los productos de madera técnica. Además de su aplicación en procesos de clasificación estructural, los métodos acústicos por ultrasonidos permiten la obtención de las constantes elásticas que describen el comportamiento ortotrópico de la madera. La caracterización de estas doce constantes aporta bases fundamentales para modelos numéricos avanzados, análisis ortotrópicos y una mejor comprensión del comportamiento mecánico intrínseco de la especie. Sin embargo, permanece aún poco explorada la posibilidad de estimar ciertas constantes, como los coeficientes de Poisson, a partir de testigos extraídos del árbol en pie, lo que podría ampliar significativamente el potencial de las TND en las evaluaciones forestales.

Asimismo, es crucial abordar la influencia de las variaciones climáticas y estacionales en las mediciones acústicas del árbol en pie. Las fluctuaciones de temperatura y humedad relativa pueden alterar la velocidad de propagación de las ondas, afectando la estimación de las

propiedades mecánicas. Por tanto, cuantificar la magnitud de estas alteraciones resulta indispensable para determinar si comprometen la clasificación del material y garantizar así la robustez de las TND en evaluaciones de campo.

Finalmente, la creciente demanda de madera técnica estructural plantea la necesidad de extender el control de calidad a los componentes procesados, específicamente a las uniones dentadas (*finger-joint*). La evaluación de láminas de *Q. robur* con empalmes, utilizando métodos acústicos y correlación digital de imágenes, permite verificar si las TND ofrecen la sensibilidad necesaria para inferir las propiedades mecánicas en productos de madera técnica.

A la luz de lo expuesto, en los apartados siguientes se presenta la hipótesis de la tesis. A partir de ella se deriva el objetivo general, el cual se desglosa en fines específicos estructurados en cuatro ejes principales. La articulación de estos ejes proporciona una visión integral del potencial y las limitaciones de las técnicas no destructivas aplicadas a la madera de *Quercus robur* de procedencia gallega, con el fin de mejorar las prácticas de clasificación estructural e impulsar el uso de la especie en aplicaciones de mayor valor añadido. Para una mejor comprensión del contexto general de la tesis, se ha incluido un apartado previo denominado "Antecedentes", en el que se exponen, entre otras cuestiones, los aspectos teóricos básicos de las técnicas empleadas, esenciales para la comprensión de la metodología y la posterior discusión de los resultados.

2 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

2.1 HIPÓTESIS

La presente tesis doctoral se articula en torno a la siguiente hipótesis:

Considerando las particularidades de la madera de *Quercus robur* de procedencia gallega, se plantea que diversas técnicas no destructivas (TND), ya consolidadas en otros tipos de plantaciones y condiciones silvícolas, pueden aplicarse con precisión para estimar las propiedades mecánicas relevantes para el uso estructural en las distintas fases del procesamiento y transformación de la madera.

2.2 OBJETIVOS

2.2.1 Objetivo general

En coherencia con la hipótesis planteada, se define el siguiente objetivo general:

- Evaluar, a lo largo de las diferentes etapas de la cadena productiva y de su empleo en productos de madera técnica, la precisión y la aplicabilidad de técnicas no destructivas para la estimación de propiedades mecánicas de la madera de *Quercus robur* de procedencia gallega.

2.2.2 Objetivos específicos

Este objetivo general se desglosa en las siguientes metas operativas, que abarcan secuencialmente desde la caracterización del material en origen hasta el producto procesado:

- Determinar la exactitud de diferentes técnicas no destructivas (inspección visual y métodos acústicos) para la clasificación estructural de la madera de *Quercus robur*, empleando el Módulo de Rotura (MOR) y el Módulo de Elasticidad (MOE) como referencia y abarcando distintas etapas del proceso (árboles en pie, trozas, tablas saturadas y tablas secas).
- Caracterizar de forma completa las propiedades elásticas (doce constantes) de la madera de *Quercus robur* mediante métodos acústicos (ultrasonidos) y verificar la viabilidad de estimar los coeficientes de Poisson asociados al estado de tensiones en árboles en pie (v_{LR} y/o v_{LT}) a partir de testigos cilíndricos extraídos mediante barrena de incremento.
- Investigar si los factores climáticos y estacionales provocan variaciones en los parámetros acústicos capaces de afectar a la clasificación de la madera realizada directamente sobre el árbol mediante métodos no destructivos.
- Verificar la idoneidad de las técnicas no destructivas (métodos acústicos y correlación digital de imágenes) para la estimación del MOE en láminas de *Quercus robur* con uniones dentadas (*finger-joint*).

3 ANTECEDENTES

3.1 LAS TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS EN EL ANÁLISIS DE LA MADERA ESTRUCTURAL

La madera es un material natural, orgánico, ortótropo y renovable que posee excelentes propiedades ecológicas, actuando como sumidero de carbono y caracterizándose por una baja energía incorporada. La madera se ha consolidado a lo largo de la historia como un material estructural milenario que, lejos de quedar obsoleto, en el contexto actual de búsqueda de la sostenibilidad y la bioeconomía, ha resurgido como una solución de vanguardia (Arriaga et al., 2023).

Sin embargo, su condición de material biológico le confiere una variabilidad intrínseca que representa el principal desafío para su uso en aplicaciones estructurales. A diferencia de materiales industriales como el acero, las propiedades mecánicas de la madera, como su resistencia a la rotura (MOR, Módulo de Rotura) y su rigidez (MOE, Módulo de Elasticidad), presentan una notable variabilidad. Esta heterogeneidad no solo deriva de factores macroscópicos evidentes, como el tamaño y posición de los nudos, la densidad o la desviación de la fibra, sino también de aspectos microscópicos y químicos influenciados por la genética, el ambiente y el manejo silvícola. El grado de dispersión es tal que dos piezas provenientes del mismo árbol pueden diferir más en sus propiedades mecánicas y físicas clave para la construcción que dos piezas pertenecientes a especies distintas (Ridley-Ellis et al., 2016).

Para gestionar esta variabilidad y garantizar la seguridad y fiabilidad de las estructuras, la industria y la normativa exigen sistemas de clasificación que permitan segregar el material en clases de calidad con propiedades mecánicas definidas y homogéneas.

Tradicionalmente, la caracterización mecánica se ha basado en el ensayo destructivo, un procedimiento normalizado y preciso que, por su propia naturaleza, resulta inviable para la inspección de la totalidad de la producción debido al coste asociado y a la pérdida de material (Turkot et al., 2020). Sin embargo, dado que el uso seguro de la madera estructural exige la evaluación de cada pieza individual (Arriaga et al., 2023), este requisito solo puede cumplirse mediante Técnicas de ensayo No Destructivas (TND), quedando los métodos destructivos relegados a la caracterización de muestras representativas para la validación del sistema o el control de calidad estadístico.

Las TND se han posicionado como herramientas indispensables en la ciencia y la industria de la madera. Estas tecnologías se definen como aquellas capaces de evaluar las propiedades de un material sin alterar su estructura ni su capacidad para el servicio futuro (Ross y Pellerin, 1994a). El principio subyacente a la mayoría de estas técnicas es la existencia de correlaciones empíricas, más o menos robustas, entre una propiedad física, fácil de medir de forma no invasiva, y una propiedad mecánica de interés. Esto permite calcular el coeficiente de rigidez (C_{LL}), parámetro que, en la literatura relacionada con los ensayos no destructivos de la madera, generalmente se reconoce como módulo de elasticidad dinámico (MOE_{din}). El coeficiente de rigidez calculado a partir de las TND, está fuertemente correlacionado con el módulo de

elasticidad estático (MOE_{est} o E) (Bucur, 2006) y, en menor medida, con la resistencia a la rotura (MOR).

Las TND se utilizaron por primera vez durante la Revolución Industrial como técnicas de inspección primaria. Las prácticas iniciales se basaron en gran medida en la inspección visual y en pruebas mecánicas básicas, que, aunque útiles, eran limitadas en alcance y precisión (Azzi et al., 2025). A principios del siglo XX, las dos Guerras Mundiales impulsaron rápidos avances tecnológicos para satisfacer las demandas militares. Un hito significativo fue la adaptación de la radiografía de rayos X y el surgimiento del ensayo por ultrasonido.

Para las décadas de 1960 y 1970, las TND se habían consolidado como una disciplina profesional, mejorando la fiabilidad de su aplicación mediante metodologías estandarizadas, programas de certificación y sistemas de formación. Esta profesionalización coincidió con una ampliación del alcance de estas técnicas para incluir materiales no metálicos como plásticos, cerámicas y compuestos, lo que reflejaba las diversas necesidades de las industrias modernas de ingeniería y fabricación (Hellier, 2013). El final del siglo XX trajo consigo avances transformadores impulsados por la computación y los sensores, incluyendo innovaciones como la radiografía digital y el georradar (GPR).

Durante las últimas cinco décadas, la investigación en torno a la industria de productos forestales ha desarrollado herramientas no destructivas aplicables desde la clasificación de la madera estructural hasta la evaluación de elementos en estructuras (Ross y Pellerin, 1994b). Se ha desarrollado una amplia gama de metodologías y equipos no destructivos, que van desde la inspección visual hasta tecnologías instrumentales avanzadas, aplicables en distintas fases de transformación del recurso y su uso. La disponibilidad de diversas técnicas supone una ventaja para la clasificación y evaluación de la madera, dado que su combinación permite obtener estimaciones más precisas (Divós y Tanaka, 1997; Vössing y Niederleithinger, 2018).

Considerando el foco de esta tesis doctoral, las investigaciones recientes en el ámbito de las TND aplicadas en madera se han centrado en la caracterización de propiedades mecánicas, desde el árbol en pie, probetas de pequeñas dimensiones y productos derivados de la madera, la evaluación de estructuras existentes y el análisis del estado sanitario del arbolado urbano.

La clasificación del arbolado en pie, fundamental para la industria maderera, se ha visto potenciada por el uso de las TND. La capacidad de estas técnicas para proporcionar una evaluación de la calidad permite categorizar los fustes en origen según su aptitud tecnológica. De hecho, la estimación de las propiedades mecánicas a partir de árboles en pie o trozas verdes ofrece ventajas competitivas a toda la cadena de valor; al permitir decisiones basadas en la calidad desde las etapas iniciales, se logran ahorros significativos en los costes de producción y procesamiento (Llana et al., 2020b). La atractiva naturaleza de estas evaluaciones (reducción de costes, recolección de datos en tiempo real y facilidad de medición) ha contribuido considerablemente a la caracterización de la calidad de la madera en árboles en pie, trozas y madera aserrada (Schimleck et al., 2019; Bertoldo, 2014; Ramos et al., 2024; Papandrea et al., 2022a, 2022b; Sirswal et al., 2025; Wang et al., 2008).

La mayoría de los estudios iniciales se centraron en coníferas, pero en los últimos años, las TND se han empleado cada vez más en la evaluación de las propiedades mecánicas de especies frondosas (Llana et al., 2020b; Rais et al., 2022). Por ejemplo, Nop et al. (2024) investigaron las propiedades estáticas de flexión de madera verde de haya y roble mediante técnicas no destructivas de vibración y Correlación Digital de Imágenes (*Digital Image Correlation*, DIC). Estos autores encontraron correlaciones significativas entre los módulos de elasticidad dinámico y estático obtenidos con ambas técnicas ($R = 0,81$, para la madera de roble). Sin embargo, la determinación del módulo de rotura (MOR) a partir del MOE_{din} solo fue posible para el haya. Esto sugiere que la posibilidad de determinar propiedades estáticas a partir de la

aplicación de TND se ve afectada por factores anatómicos específicos de cada especie. Otros autores, como Oberhofnerová et al. (2016), analizaron la madera de roble con técnicas de onda ultrasónica, vibración y ensayos estáticos. La mejor correlación entre el MOE_{din} y el MOE_{est} se obtuvo para la distancia de medición de los transductores más larga (565 mm), alcanzando un coeficiente de correlación de $R = 0,70$.

La aplicación de TND en probetas de pequeñas dimensiones y libres de defectos es fundamental en el ámbito de la investigación, ya que permite la caracterización precisa de las propiedades elásticas del material, minimizando la influencia de las singularidades. Vázquez et al. (2015) aplicaron la técnica de onda ultrasónica para analizar las propiedades mecánicas de la madera de *Castanea sativa* Mill. y comparar estos resultados con los obtenidos utilizando los métodos tradicionales estáticos de compresión y flexión. Las constantes elásticas determinadas mediante ultrasonidos sobre probetas poliédricas y prismáticas no mostraron diferencias estadísticamente significativas en comparación con los métodos estáticos. El coeficiente de rigidez (C_{LL}) obtenido mediante ultrasonidos mostró una alta correlación con el módulo de elasticidad obtenido por flexión estática ($R^2 = 0,89$). En un estudio con probetas de *Eucalyptus globulus*, Crespo et al. (2017) compararon tres técnicas para obtener sus valores elásticos: ultrasonidos, ensayos de compresión con galgas extensométricas (medición local) y ensayos de compresión con la técnica DIC (medición de campo completo), concluyendo que los métodos de medición local tienden a subestimar la elasticidad en materiales no homogéneos, como la madera.

Las técnicas no destructivas se han utilizado, no solo en el caso de madera maciza, sino también en productos derivados de la madera, como la madera laminada encolada, madera microlaminada, madera contralaminada o tableros (Dill-Langer et al., 2005; Vafadar et al., 2024; Fink et al., 2015; Rescalvo et al., 2023; Llana et al., 2022; Najafi, 2005).

Las TND también se utilizan frecuentemente para evaluar la capacidad portante y el estado de conservación de estructuras históricas y elementos de gran escuadría. Las evaluaciones *in situ* se complementan con el uso de técnicas basadas en ondas de impacto, ultrasonidos, vibración, perforación y clasificación visual resistente (*Visual Strength Grading*, VSG) (Osuna et al., 2019; Sousa et al., 2018; Íñiguez et al., 2015). Investigaciones recientes, teniendo en común el roble como especie de estudio, se han centrado en la evaluación de madera recuperada para reutilización (Íñiguez et al., 2019), en la selección de vigas para proyectos de restauración, como la reconstrucción de la Catedral de Notre-Dame, donde se emplearon tomografía de rayos X, fotogrametría y ensayos de flexión *in situ* (Thibaut et al., 2024), y en el planteamiento de una metodología exhaustiva para evaluar vigas históricas incluyendo la clasificación visual, los ultrasonidos, la resistografía y pruebas destructivas (Marzo et al., 2024).

En el entorno urbano, las TND son fundamentales para la seguridad pública al detectar la pudrición y los defectos en los árboles. Xu (2021) evaluó comparativamente múltiples técnicas para detectar defectos internos en árboles históricos y estructuras antiguas de madera, concluyendo que la tomografía de onda de tensión, el resistógrafo y la inspección visual son altamente eficaces. La técnica de ondas de tensión *Arbotom* ha demostrado ser un método de diagnóstico confiable para medir la pudrición, alcanzando una precisión de hasta el 92% en el chopo (Aishan et al., 2024). Linhares et al. (2021) concluyen que las herramientas no destructivas son esenciales para la gestión forestal urbana y que la tomografía acústica se revela como la técnica más efectiva para la detección, localización y estimación de defectos internos. La revisión de Li et al. (2022) concluyó que la tendencia futura en la evaluación de riesgos arbóreos busca aumentar la objetividad y cuantificación del riesgo mediante el uso de herramientas no destructivas y el modelado refinado con elementos finitos para integrar la forma irregular del tronco y los defectos internos.

La evaluación no destructiva de materiales, especialmente de la madera, está en constante evolución (Brashaw et al., 2009). A diferencia de los ensayos estáticos, la mejora en el rendimiento de estas técnicas está íntimamente ligada al avance tecnológico de los equipos. Esta investigación continua ha dado lugar a nuevos dispositivos portátiles y metodologías que han generado resultados muy positivos y nuevas líneas de investigación (Vössing y Niederleithinger, 2018; Gil-Martin et al., 2025). Los modelos desarrollados en los trabajos de investigación permiten estimar con precisión parámetros relevantes como la densidad, el módulo de elasticidad y los valores de resistencia de diversas especies. En España, entre 1992 y 2019, se desarrollaron numerosos modelos estadísticos lineales para la estimación de propiedades mecánicas (111 modelos basados en técnicas acústicas), la mayoría orientados a madera aserrada nueva (Llana et al., 2020a). Para mejorar la capacidad y precisión de estas técnicas, es esencial unificar procedimientos, como los factores de ajuste por contenido de humedad, el número de mediciones y la forma de realizarlas (Llana et al., 2020a).

3.2 MÉTODOS DE INSPECCIÓN VISUAL

La clasificación visual (VSG) es el método de evaluación no destructiva más antiguo y fundamental en la industria de la madera, destacando por su versatilidad, sencillez y bajo coste. Su metodología se basa en la premisa de que la presencia y magnitud de ciertas singularidades anatómicas y defectos en una pieza de madera aserrada están directamente relacionadas con una merma en su resistencia mecánica. La clasificación visual intenta prever el comportamiento mecánico de la madera en función de la combinación de las singularidades visibles de la pieza y su importancia relativa respecto a sus dimensiones (Riesco, 2001).

En España, la clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural se regula mediante la Norma UNE 56544:2022 para coníferas y la Norma UNE 56546:2024 para frondosas. La UNE 56544:2022 establece calidades específicas para coníferas españolas como el *Pinus sylvestris* L., *Pinus nigra* Arnold subsp. *salzmannii* (Dunal) Franco, *Pinus pinaster* Ait., y el *Pinus radiata* D. Don. Para uso estructural define tres calidades: ME-1 (Madera Estructural de primera calidad) y ME-2 (Madera Estructural de segunda calidad) para piezas con grosor menor o igual a 70 mm; y la calidad MEG (Madera Estructural de Gruesa escuadría) para aquellas piezas con espesor mayor que 70 mm. De manera análoga, la UNE 56546:2024 establece un sistema de clasificación visual aplicable a especies frondosas españolas, como *Eucalyptus globulus* Labill., *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden, *Castanea sativa* Mill. y *Populus x euramericana* (Dode) Guinier clones *MC* y *Luisa Avanzo*. En esta norma se establecen calidades diferentes basadas en criterios específicos para cada especie de madera. Para los eucaliptos y el chopo canadiense, se define una calidad denominada MEF (Madera Estructural de Frondosas). Para la madera de castaño se establece una calidad MEF (para piezas con grosor menor o igual a 70 mm) y MEF-G (para gran escuadría, es decir, piezas con espesor mayor que 70 mm).

Para la asignación a estas clases, el proceso normativo es riguroso y se enfoca en objetivar la inspección, limitando la presencia y magnitud de diversas singularidades: nudos, fendas de secado, acebolladuras, madera de tracción, desviación de la fibra, gemas, alteraciones biológicas y deformaciones.

La versatilidad que ofrece esta metodología la hace operativa en diversos campos de aplicación, no solo para la clasificación de madera aserrada en la industria o laboratorio, sino también para su aplicación sobre piezas estructurales en uso. En este contexto, la definición de una metodología adaptada es relevante, puesto que la aplicación de la clasificación visual estricta puede llevar a que piezas antiguas, que permanecen en uso, sean rechazadas debido a la presencia de singularidades no aceptadas en la normativa. Arriaga et al. (2005) propusieron un

procedimiento simplificado para la evaluación de piezas de gran escuadría de estructuras existentes, limitado a la medición de los parámetros principales como nudos e inclinación de la fibra. En este trabajo se propone la inclusión de la velocidad de propagación de ondas de ultrasonidos como un parámetro añadido a la clasificación visual, con el fin de superar la limitación de la inspección visual, que lleva al rechazo de una cantidad excesiva de material. Estudios complementarios han analizado la influencia de otros defectos, concluyendo que singularidades como las gemas y las fendas tienen una influencia prácticamente nula sobre las propiedades mecánicas (Arriaga et al., 2007; Esteban et al., 2010).

Si bien la clasificación visual destaca por su simplicidad y bajo coste, al no requerir equipos sofisticados, presenta limitaciones significativas que han impulsado el desarrollo de técnicas instrumentales alternativas. Su principal desventaja radica en la alta subjetividad, ya que es una técnica cualitativa fuertemente dependiente de la experiencia del clasificador. Además, resulta insuficiente para la evaluación de estructuras existentes, pues es incapaz de detectar daños internos ocultos (Cruz et al., 2014). Desde el punto de vista mecánico, su capacidad predictiva se limita casi exclusivamente a la resistencia (MOR), gobernada por defectos locales como los nudos. Sin embargo, el método resulta poco fiable para estimar la rigidez (MOE), ya que esta es una propiedad global influenciada por la microestructura y la densidad, características no evaluables a simple vista (Hanhijärvi et al., 2005; Johansson, 2003). La débil correlación existente entre las clases visuales y el MOE se ha puesto de manifiesto en diversos estudios (Riesco, 2001; Llana et al., 2016). A esto se suma que las normativas de clasificación visual tienden a ser muy conservadoras, penalizando excesivamente el material y reduciendo el rendimiento, lo que implica el rechazo de madera apta para aplicaciones estructurales de mayor valor añadido (Íñiguez, 2007).

Para mitigar esta ineficiencia en el aprovechamiento del recurso, se ha impulsado la búsqueda de métodos de clasificación más precisos y objetivos (Hanhijärvi et al., 2005). La solución más efectiva ha sido el establecimiento de métodos de clasificación mixtos. De hecho, varios estudios han combinado parámetros visuales con otras TND, mejorando la estimación de propiedades; por ejemplo, la inclusión de parámetros de nudos junto con resultados de velocidad de propagación de la onda resultó en un aumento significativo del coeficiente de determinación (R^2) del MOR (Hermoso, 2001; Íñiguez, 2007; Arriaga et al., 2014).

Los estándares nacionales de clasificación visual deben seguir los requisitos mínimos establecidos por la norma europea EN 14081-1. Dado que cada país posee sus propias calidades visuales basadas en sus tradiciones y especies, se dispone de la norma EN 1912, que homogeniza el mercado al vincular esas clases visuales nacionales con las clases resistentes universales, definidas por la EN 338, la cual especifica los valores de resistencia, rigidez y densidad para cada clase. En la norma EN 1912:2025, se recogen ocho especies españolas. La introducción de nuevas especies en los estándares de clasificación visual es un proceso riguroso que siempre requiere su caracterización previa.

A pesar de la existencia de la norma UNE 56546:2024 para frondosas, la clasificación visual de la madera de roble (*Quercus robur* L.) para usos estructurales todavía no está normalizada en España. Esta falta de normalización es un obstáculo para la asignación de esta madera nacional al sistema europeo de clases resistentes (EN 338) y dificulta su exportación (Riesco, 2025). Este vacío normativo obliga a buscar referencias en la normativa de otros países europeos con mayor tradición en el uso estructural del roble (Riesco, 2001). El ejemplo más recurrente en la bibliografía es la norma francesa NF B52-001-1:2018, que define el sistema de clasificación visual para “maderas aserradas francesas resinosas y frondosas” destinadas a uso estructural. Algunas de las especies incluidas en esta norma son: chopo en los clones *Robusta*, *I 214*, *I 4551*, Dorskamp; *Abies alba*; *Picea abies*; *Pseudotsuga menziesii* Franco; *Pinus*

sylvestris; *Pinus nigra*; *Pinus pinaster*; *Larix decidua* Miller; *Picea sitchensis*; *Quercus petraea* y *Quercus robur*. La norma NF B52-001-1 establece tres clases visuales de calidad para el roble estructural: Clase 1, Clase 2 y Clase 3. Estas categorías se corresponden con las clases de resistencia mecánica de la Norma EN 338 de la siguiente manera: la Clase 1 se asigna a D30; la Clase 2 a D24 y la Clase 3 a D18. Los criterios de clasificación varían ligeramente dependiendo de la escuadría de la pieza, distinguiéndose entre piezas con espesor ≤ 100 mm y piezas con espesor > 100 mm. Los criterios recogidos en esta norma incluyen la anchura de los anillos de crecimiento, los nudos, la desviación de la fibra, las acebolladuras, las fendas, la presencia de albura y las deformaciones. Esta norma limita la anchura de anillos de crecimiento a menos de 10 mm para cualquier sección y calidad considerada. Respecto a este criterio, estudios realizados con madera de roble de procedencia española proponen considerar la homogeneidad en la anchura de los anillos de crecimiento como un parámetro adicional en el proceso de clasificación visual de esta especie para usos estructurales (Riesco, 2001; Riesco, 2025).

3.3 MÉTODOS DE PROPAGACIÓN DE ONDAS ACÚSTICAS

Después de la clasificación visual, los métodos acústicos son las técnicas de clasificación no destructiva más antiguas. Hoy en día, son un pilar fundamental para la evaluación de la madera, destacando por su facilidad y rapidez de aplicación, y por ofrecer resultados objetivos (Montero, 2015; Íñiguez, 2007).

En la ciencia de los materiales, las numerosas técnicas basadas en la propagación de ondas acústicas son difíciles de clasificar. Esto se debe a que varían enormemente según la fuente del impulso, la configuración del ensayo, la respuesta medida y el procesamiento de la señal recibida, todo ello condicionado por el material investigado (Íñiguez, 2007).

Físicamente, la propagación de ondas en la madera es un proceso complejo y dinámico, controlado por la orientación, las propiedades, la microestructura de la fibra y por la forma geométrica del material (Wang et al., 2007a). Al aplicar una fuerza sobre un medio sólido y elástico, la perturbación se propaga como una onda de tensión (Meyers, 1994), generando principalmente tres tipos de ondas (Figura 1): la Onda Longitudinal (o de Compresión, *Onda P*), donde la oscilación de las partículas es paralela a la propagación; la Onda de Cortante (o Transversal, *Onda S*), en la que el movimiento de las partículas es perpendicular a la dirección de propagación de la onda; y la Onda Superficial (u *Onda Rayleigh*), en la que la perturbación se restringe a la región adyacente a la superficie, donde las partículas se mueven siguiendo trayectorias elípticas. Las *ondas P* se asocian a tensiones normales y las *S* a tensiones tangenciales. Las *ondas P* son las que viajan más rápido, siendo las más utilizadas para caracterizar la madera.

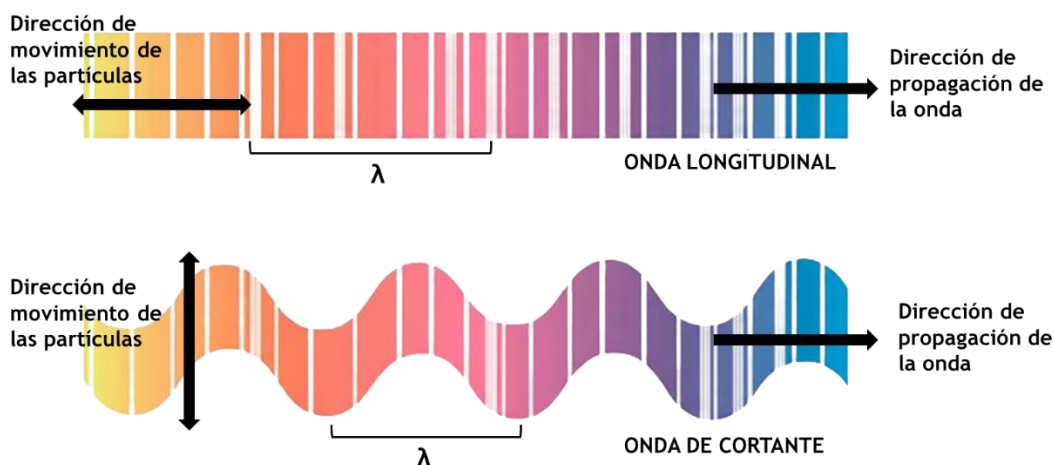


Figura 1. Propagación de ondas longitudinales y de cortante (Adaptado de Bucur, 2023).

La teoría de propagación de ondas permite una comprensión básica de la relación entre las propiedades de la madera y la propagación de ondas longitudinales. Para un medio finito, como placas o barras, la tensión y la inercia en la dirección transversal pueden ser desestimadas, permitiendo que la onda longitudinal se propague como una onda plana. Bajo esta condición (unidimensional), la velocidad de la onda es independiente del coeficiente de Poisson. En este caso, la velocidad de propagación de la onda longitudinal (V_p) se determina mediante la Ecuación 1, conocida como la ecuación de la onda unidimensional.

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Siendo

E el módulo de elasticidad longitudinal;

ρ la densidad del material.

La propagación de las ondas P en un medio infinito, ortotrópico y elástico, como es la madera, es un fenómeno más complejo. En este caso, el frente de onda longitudinal no recorre el medio como un plano. La propagación de la onda es regida por la Ecuación 2, conocida como la ecuación de onda tridimensional longitudinal (Meyers, 1994), la cual indica que, en ese caso, la velocidad es también dependiente del coeficiente de Poisson.

$$V_p = \sqrt{\frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \cdot \frac{E}{\rho}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Siendo

V_p la velocidad de propagación de la onda longitudinal;

ν el coeficiente de Poisson;

E el módulo de elasticidad longitudinal;

ρ la densidad.

Dado que la rigidez y la densidad son excelentes indicadores del comportamiento mecánico, la velocidad se convierte en un parámetro de gran poder predictivo. Al conocer la velocidad de propagación longitudinal y la densidad, se calcula el Coeficiente de Rigidez (C_{LL}). Este valor representa uno de los términos de la matriz de rigidez [C] de la madera, específicamente el término C_{11} , considerando la dirección 1 como la dirección longitudinal (L). Este coeficiente se obtiene a partir de la relación entre la velocidad de propagación de la onda longitudinal (V_{LL}) y la densidad del material (ρ), mediante la Ecuación 3.

$$C_{LL} = \rho \cdot V_{LL}^2 \cdot 10^{-6} \quad \text{Ecuación 3}$$

Siendo

ρ la densidad de la madera, expresada en kg m^{-3} ;

V_{LL} la velocidad de propagación de la onda longitudinal, expresada en m s^{-1} .

El Coeficiente de Rigidez (C_{LL}) es un concepto fundamental en la caracterización elástica de la madera, un material ortotrópico, mediante métodos de propagación de ondas acústicas. Sin embargo, en la bibliografía sobre ensayos no destructivos, es común emplear el término Módulo de Elasticidad Dinámico (MOE_{din} o E_{din}) para referirse, en realidad, a este coeficiente de rigidez. Esta nomenclatura puede inducir al lector a asumir erróneamente que el MOE_{din} es igual al módulo de elasticidad estático (MOE_{est} o E), lo cual es incorrecto si se tienen en cuenta las bases teóricas del ensayo de propagación de ondas. Para obtener el módulo de elasticidad (E_{11}) por el método de propagación de ondas es necesario obtener toda la matriz de rigidez y no solamente el primer término (C_{11}). El módulo de elasticidad se obtiene con la inversión de la matriz de rigidez, en cuyo proceso, todos los coeficientes de Poisson están involucrados (Ecuación 4). Por lo tanto, la magnitud de las diferencias entre C_{11} y E_{11} son dependientes de la magnitud de los coeficientes de Poisson. Como observaron Keunecke et al. (2007), los valores de ambos (C_{11} y E_{11}) solo se aproximan cuando los coeficientes de Poisson son pequeños.

$$C_{11} = \frac{1 - \nu_{23} \cdot \nu_{32}}{[1 - 2 \cdot \nu_{12} \cdot \nu_{23} \cdot \nu_{31} - \nu_{12} \cdot \nu_{21} - \nu_{13} \cdot \nu_{31} - \nu_{23} \cdot \nu_{32}]} \cdot E_1 \quad \text{Ecuación 4}$$

Siendo

$\nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{21}, \nu_{23}, \nu_{31}, \nu_{32}$ los coeficientes de Poisson;

E_1 el módulo de elasticidad.

El coeficiente de rigidez C_{LL} siempre será superior al MOE_{est} , ya que el primero se obtiene de un ensayo adiabático (propagación de ondas) y el segundo de uno isotérmico (estático) (Bucur, 2025).

Para una correcta comprensión de los resultados presentados en esta tesis doctoral, es importante señalar que se utiliza el término C_{LL} para referirse al valor obtenido a partir de la velocidad de propagación de la onda longitudinal (V_{LL}) y la densidad del material (ρ). Sin embargo, al citar los resultados presentados en la bibliografía de referencia, se conservará la nomenclatura original utilizada por los autores en cada caso.

Existen dos métodos principales para medir la velocidad acústica: los métodos de vibración (resonancia acústica) y los métodos basados en el tiempo de vuelo (*Time of Flight*, ToF), que incluyen las ondas de ultrasonido y las ondas de impacto. El método ToF mide el tiempo que tardan las ondas de tensión en propagarse a través del material. Ross y Pellerin (1994a) concluyeron que este es un método no destructivo aplicable a la madera, reportando coeficientes de correlación (R) de 0,87 a 0,99 entre los módulos de elasticidad estáticos y los medidos con

esta técnica. Los métodos de vibración, en cambio, evalúan la respuesta vibratoria global de la pieza, basándose en que su frecuencia natural de resonancia está directamente relacionada con sus propiedades elásticas. Esta metodología ha mostrado un alto coeficiente de determinación (R^2), llegando hasta el 91 % en la estimación del MOE y hasta el 70 % en la predicción del MOR (Llana, 2016).

3.3.1 Ondas de ultrasonido

La técnica de ultrasonido emplea ondas acústicas de alta frecuencia, por encima del umbral de audición humano (> 20 kHz). El sistema de medición consta de un generador de pulsos y dos transductores piezoeléctricos. El transductor emisor, al ser excitado por un pulso eléctrico, vibra a alta frecuencia y genera una onda ultrasónica que se propaga a través de la madera. En el extremo opuesto, a una distancia conocida y medida con precisión (L), el transductor receptor detecta la llegada de la onda y la convierte de nuevo en una señal eléctrica. Un cronómetro de alta precisión, sincronizado con el emisor, mide el tiempo de vuelo (ToF) que la onda ha tardado en recorrer esa distancia. La velocidad de propagación de la onda (V) se calcula mediante la Ecuación 5.

$$V = \frac{L}{\text{ToF}} \quad \text{Ecuación 5}$$

Siendo

L la distancia de medición, en m;

ToF el tiempo de vuelo, en s.

El uso de los ultrasonidos como técnica de evaluación no destructiva se originó en la metalurgia y, a finales de la década de 1930, se extendió al hormigón. Su aplicación en la madera es más reciente: comenzó en los años 50 integrada en procesos de clasificación y, a partir de los años 70, se expandió para incluir la inspección de estructuras existentes (Ross, 2015).

En el ámbito científico, los estudios se centran en determinar el término C_{LL} , el cual, como se explicó anteriormente, es un predictor fiable del MOE_{est} , alcanzando un R^2 de hasta el 98 % en probetas libres de defectos. Más allá de esta aplicación predictiva, la tecnología ultrasónica se utiliza para la caracterización elástica completa de la madera como material ortotrópico, permitiendo la determinación de las 12 constantes elásticas (módulos de Young, módulos de cortante y coeficientes de Poisson). Para este fin, se emplean geometrías especializadas, como prismas, discos de caras múltiples o poliedros de 18 o 26 caras, y transductores de alta frecuencia, generalmente 1 MHz (Riesco, 2001; Vázquez et al., 2015; Crespo et al., 2017; Trinca, 2011; Gonçalves et al., 2014; Gonçalves et al., 2011b).

Asimismo, las ondas ultrasónicas tienen la capacidad de detectar defectos internos como grietas, huecos o áreas de pudrición que, aunque pueden no ser visibles externamente, podrían comprometer la integridad estructural. Esto convierte al ultrasonido en una técnica eficaz para la inspección sanitaria de árboles y elementos estructurales en servicio. Su aplicación abarca madera maciza, productos derivados, trozas, árboles en pie y componentes estructurales (Conde et al., 2007; Lourenço et al., 2007; Ross et al., 1998; Dill-Langer et al., 2005; Najafi, 2005; Bucur, 2005; Hermoso et al., 2007; Hasenstab y Hillemeier, 2005; Basterra et al., 2009).

Sin embargo, la técnica presenta limitaciones, principalmente la necesidad de un buen acoplamiento acústico entre los transductores y la superficie, lo que a menudo exige el uso de material acoplante o superficies lisas. Además, al tratarse de ondas de alta frecuencia, son más

susceptibles a la atenuación y dispersión, especialmente en maderas muy heterogéneas o con alto contenido de humedad.

3.3.2 Ondas de impacto

Las técnicas de ondas de impacto comparten el fundamento físico del ultrasonido, pero se distinguen por generar ondas de baja frecuencia, dentro del espectro audible, mediante un impacto mecánico controlado. El procedimiento consiste en aplicar un golpe con un martillo instrumentado y registrar el tiempo de tránsito del frente de onda entre dos acelerómetros acoplados a la madera. A partir de la velocidad obtenida y conociendo la densidad, es posible calcular el coeficiente de rigidez y estimar las propiedades mecánicas del material (Ecuación 3).

La principal ventaja de esta metodología reside en que las ondas de baja frecuencia son mucho menos sensibles a la atenuación y dispersión causadas por las heterogeneidades naturales de la madera. Gracias a esta robustez, su uso ha predominado históricamente sobre los ultrasonidos en la inspección de árboles en pie y madera en rollo, tales como trozas, postes y pilotes (Virgen-Cobos, 2023).

Reconocida como una de las tecnologías de TND con mayor aplicabilidad en el sector (Wei et al., 2022), esta técnica ofrece resultados sólidos y fiables a pesar de presentar, generalmente, una precisión en laboratorio inferior a la del ultrasonido. En la estimación del MOE, estudios con equipos como el *Microsecond Timer* (MST) reportan coeficientes de determinación (R^2) entre el 91 % y el 94 % (Conde y Machado, 2017). Asimismo, su aplicación en árboles vivos ha demostrado ser un indicador fiable de la rigidez, alcanzando correlaciones significativas con un R^2 de entre el 60 % y el 95 % (Virgen-Cobos, 2023).

3.3.3 Métodos de vibración

Los métodos de vibración se basan en la identificación de las frecuencias naturales de resonancia de una pieza excitada. Estas frecuencias están directamente relacionadas con el MOE, lo que proporciona un indicador fiable de la rigidez media del elemento. El método de vibración transversal en una viga biapoyada se aborda mediante la ecuación de Timoshenko (Ross, 2015). No obstante, aunque la vibración transversal fue la más utilizada inicialmente, la vibración longitudinal se ha consolidado como un proceso más rápido y apto para aplicaciones industriales.

En la vibración longitudinal, la velocidad de onda (V) se determina a partir de la frecuencia natural de vibración fundamental (f) y la longitud de la pieza (L), utilizando la Ecuación 6 (Bucur, 2006).

$$V = 2 \cdot f \cdot L \quad \text{Ecuación 6}$$

Una vez obtenida la velocidad (V), el C_{LL} se calcula a partir de la relación entre la velocidad de propagación de la onda y la densidad (ρ), tal y como se indica en la Ecuación 3. El ensayo destaca por su simplicidad: la respuesta vibratoria de la pieza, excitada mediante un impacto, es capturada por un sensor sin contacto (micrófono), y un software procesa la señal para identificar la frecuencia fundamental y calcular el C_{LL} .

La gran ventaja de este método reside en su rapidez y precisión para determinar el MOE, lo que lo ha convertido en la tecnología por excelencia para la clasificación automática de madera estructural en aserraderos de alta producción (Biechele et al., 2011). Sin embargo, su aplicación suele restringirse a piezas de geometría regular y sección constante. Además, el uso de métodos de vibración en estructuras *in situ* es limitado, ya que la pieza a ensayar debe estar aislada de otros elementos constructivos para no alterar su modo de vibración. No obstante, sí

tienen una aplicación práctica en trabajos de restauración o para la caracterización de madera recuperada de demoliciones.

En cuanto a la medición de trozas, Wang et al. (2007b) destacan la precisión y robustez de la técnica de vibración frente al método de tiempo de vuelo (ToF). A diferencia de este último, el enfoque por resonancia estimula cientos de reverberaciones de pulsos acústicos dentro de la troza. Este fenómeno permite obtener mediciones de velocidad de alta precisión y repetibilidad.

El uso de la técnica de vibración, mediante la aplicación del equipo Timber Grader MTG, ha sido analizado por Posta et al. (2016), obteniendo altos coeficientes de determinación ($R^2 = 0,97$) entre el MOE_{din} y los valores obtenidos mediante ensayos de flexión. Asimismo, Krzosek y Grześkiewicz (2008) demostraron cómo, en procesos de clasificación, este equipo reduce significativamente el rechazo de material en comparación con la clasificación visual.

Investigaciones como las de Roohnia et al. (2014) y Hemmasi et al. (2014) han demostrado su alta eficacia en laboratorio para evaluar las propiedades elásticas de vigas de roble, tanto macizas como con uniones, validando su precisión en frondosas. En esta misma línea, Turkot et al. (2020), analizaron la relación entre el módulo de elasticidad dinámico y las propiedades de flexión estática en las especies *Quercus alba* y *Quercus rubra*, concluyendo que el método de vibración es capaz de predecir eficazmente tanto el MOE como el MOR, siendo el módulo de elasticidad la propiedad mejor estimada para ambas especies con coeficientes de determinación (R^2) entre 0,72 y 0,79.

3.4 MÉTODO DE CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES (DIC)

La Correlación Digital de Imágenes (DIC) se ha consolidado como la técnica de medición de campo completo más extendida en la mecánica experimental, al ofrecer una solución óptica sin contacto (Périé y Passieux, 2020). Esta metodología, robusta y versátil, comenzó su desarrollo en la década de 1980 y ha experimentado desde entonces una notable evolución, resultando en una mayor precisión y una reducción del coste computacional (Pan et al., 2009). Su principal virtud es la capacidad de medir el campo completo de desplazamientos y deformaciones de un objeto, superando las limitaciones de instrumentos que solo proporcionan mediciones localizadas, como la galga extensométrica o el transformador diferencial variable lineal (*Linear Variable Differential Transformer*, LVDT) (Bruck et al., 1989; Sutton et al., 2009; Pan et al., 2009).

El principio fundamental se basa en la comparación de imágenes digitales de la superficie del objeto, capturadas en su estado original y en sucesivos estados deformados bajo carga. Para que el método funcione, es crucial preparar la superficie con un patrón de puntos aleatorio de alto contraste, el cual proporciona características únicas que el software puede rastrear con alta precisión. La calidad, tamaño y distribución de este patrón influyen directamente en la exactitud de las mediciones; un patrón ideal debe ser nítido, de alto contraste y cubrir uniformemente la superficie para garantizar la medición en toda el área de interés (Hua et al., 2011; Lecompte et al., 2006; Yaofeng y Pang, 2007).

El proceso algorítmico de la técnica DIC divide la imagen en pequeños subconjuntos de píxeles, asumiendo que los píxeles dentro de cada uno se mueven y deforman solidariamente. Según Reu (2014), cada subconjunto debe contener al menos dos o tres puntos del patrón. Posteriormente, se aplica una función de mapeo (a menudo de primer orden) para describir el desplazamiento y la deformación de cada subconjunto. Existen dos categorías principales: la correlación digital de imágenes bidimensional (2D-DIC), que utiliza una sola cámara para medir la deformación en el plano; y la tridimensional (3D-DIC o DIC estéreo), que emplea dos o más cámaras para medir tanto la deformación en el plano como fuera de él. Esta última es

ideal para geometrías complejas, aunque requiere una calibración rigurosa del sistema (Solav et al., 2018; Solav y Silverstein, 2022).

A pesar de sus capacidades, la precisión de la técnica DIC depende de factores como la preparación superficial de la probeta, la calidad del patrón, la resolución de la imagen, las condiciones de iluminación y el algoritmo de interpolación elegido (Melinda et al., 2025; Assis y Evangelista Junior, 2017).

La técnica DIC ha encontrado un campo de aplicación idóneo en el análisis de materiales ortotrópicos y heterogéneos como la madera, donde las mediciones localizadas a menudo subestiman los valores reales (Avril et al., 2008; Dahl y Malo 2009; Majano-Majano et al., 2012; Xavier et al., 2012). Se ha utilizado eficazmente para evaluar productos derivados como la madera contralaminada (CLT) (Navaratnam et al., 2020) y la madera microlaminada (LVL) (Bakalarz y Tworzewski, 2023; Melinda et al., 2023; Melinda et al., 2024). Asimismo, esta técnica se utiliza ampliamente para investigar las propiedades mecánicas de elementos de madera laminada encolada (*Glued Laminated Timber*, GLT) y la influencia de parámetros como la variación de la rigidez entre tablas, la presencia de nudos y el comportamiento de las uniones dentadas (*finger-joint*). Vafadar et al. (2024) aplicaron el método DIC para investigar la distribución de deformaciones y la rigidez de las uniones dentadas dentro de vigas de madera laminada encolada (MLE) de 5 metros de longitud, validando la fiabilidad de las mediciones mediante comparación con LVDT y obteniendo un coeficiente de correlación $r \geq 0,99$. En la misma línea, Fink et al. (2015) analizaron las propiedades mecánicas de vigas de MLE y su relación con las características de la madera y las uniones dentadas. Timbolmas et al., (2022) utilizaron la técnica DIC para analizar el comportamiento a tracción de uniones dentadas de madera de chopo, demostrando que la presencia de estas uniones reduce el módulo de elasticidad y la resistencia a la tracción. Esta técnica se aplica también para el análisis de adhesivos estructurales, como un aspecto altamente relevante en la resistencia y el comportamiento de las uniones dentadas (Angelidi et al., 2017). También se ha aplicado en la caracterización de especies como *Eucalyptus globulus*, donde los módulos de elasticidad longitudinales y transversales obtenidos mediante esta técnica fueron superiores a los medidos con galgas extensométricas (Crespo et al., 2017).

La técnica es crucial para detectar y predecir patrones de grietas y el progreso de las fisuras en la superficie, incluso antes de que sean visibles. Combinada con otras técnicas como la Emisión Acústica (*Acoustic Emission*, AE), permite correlacionar los eventos de daño a nivel microscópico con las deformaciones observadas a nivel macroscópico, ofreciendo una comprensión profunda de los mecanismos de fallo (Rescalvo et al., 2023).

Si bien su potencial en investigación es enorme, inconvenientes como el coste, la complejidad y el tiempo de procesado limitan actualmente su aplicación para el control de calidad en tiempo real en la industria.

3.5 FACTORES DE INFLUENCIA EN LAS MEDICIONES ACÚSTICAS EN LA MADERA

La precisión y fiabilidad de las mediciones acústicas dependen de la interacción de diversos factores que influyen en la velocidad de propagación de la onda y, por ende, en el coeficiente de rigidez. Si bien la bibliografía cita numerosas variables, esta tesis doctoral se centra en aquellas con mayor influencia sobre los ensayos realizados.

Es crucial destacar que estos factores no deben considerarse limitaciones de la técnica; por el contrario, su dominio y la comprensión integral de la interacción entre ellos resultan indispensables para validar la correlación con las propiedades estáticas.

Las variables tratadas en este apartado se categorizan en tres ejes: inherentes al material, ambientales y de configuración.

- Variables inherentes al material: La estructura anatómica de la madera se erige como la principal fuente de variabilidad. Esto se manifiesta en la marcada anisotropía del material (donde la velocidad de la onda es máxima en la dirección longitudinal y menor en las direcciones radial y tangencial), así como en las variaciones naturales a lo largo del fuste (transición de madera juvenil a madura) y la presencia de singularidades como nudos o madera de reacción, que alteran localmente la trayectoria de la onda.
- Variables ambientales: Incluyen la temperatura y, de forma más determinante, el contenido de humedad (CH). Este último puede introducir fluctuaciones drásticas en la velocidad y en el módulo de elasticidad (MOE) al reducir la rigidez de la pared celular.
- Variables de configuración: Se refieren a las condiciones del ensayo, abarcando desde el complejo estado de tensiones de crecimiento del árbol (acustoelasticidad) y las dimensiones geométricas del elemento, hasta la distancia entre transductores y la calidad del acoplamiento de los sensores, aspecto crítico para la transmisión y recepción adecuada de la señal.

3.5.1 Factores inherentes a la madera

3.5.1.1 Estructura anatómica

La madera es un medio ortótropo, lo que implica que sus propiedades varían significativamente en las tres direcciones principales: longitudinal (L), radial (R) y tangencial (T). El modelado de estas propiedades es complejo debido a los cambios en la simetría del material a diferentes escalas: mientras que componentes moleculares como la lignina son isótropos, la estructura celular y la microestructura exhiben una simetría ortótropa (Katz et al., 2008). Esta configuración geométrica provoca que el sonido se propague a velocidades distintas según la dirección, alcanzando la mayor velocidad en la dirección longitudinal, paralela a la fibra, mientras que la mínima se registra en la dirección tangencial (Bucur, 2006; Hasegawa et al., 2011; Xu et al., 2014; Yaitskova y van de Kuilen, 2014; Palma et al., 2018; Dikrallah et al., 2006; Li et al., 2014).

El efecto principal de la velocidad está determinado por la estructura anatómica de la madera: la proporción de madera temprana y tardía en el anillo de crecimiento, la longitud de las traqueidas o fibras, la presencia de resina en los canales, el tipo de radios medulares y la orientación de las microfibrillas en la pared celular (Bucur, 2025). Específicamente, el ángulo de microfibrillas (*Microfibril Angle*, MFA) fue identificado por Krauss y Kúdela (2011) como el factor determinante de la velocidad ultrasónica y del módulo de elasticidad de la madera. Existe una relación inversa entre ambos: a medida que el MFA aumenta, tanto la velocidad de la onda ultrasónica como el MOE disminuyen (Evans y Ilic, 2001; Lindstrom et al., 2004; Lachenbruch et al., 2010; Hasegawa et al., 2011). Adicionalmente, las dimensiones de las traqueidas también han sido correlacionadas con la velocidad acústica longitudinal (Raczkowski et al., 2004).

3.5.1.2 Densidad

Respecto a la influencia de la densidad, existe cierta discrepancia en la literatura. Mientras que algunos autores reportan que la velocidad ultrasónica aumenta con la densidad (Sandoz y Lorin, 1994; Yamamoto et al., 1998; Moliński y Marcinkowska, 2007), otros estudios niegan dicha relación en la dirección paralela a la fibra (Burmester, 1965; Krauss y Kúdela, 2011).

Bucur (2025) aclara esta controversia señalando que la propagación de ondas presenta variaciones mucho más significativas con la estructura anatómica de la madera que con su densidad. Por tanto, aunque suele existir correlación velocidad-densidad a nivel intraespecífico

(dentro de una misma especie), esta relación tiende a desaparecer a nivel interespecífico (entre diferentes especies), debido al peso predominante de las diferencias anatómicas.

En el caso de árboles vivos, pueden ocurrir variaciones de la densidad aparente a causa del aumento de humedad, sin embargo, dado que este aumento de masa no conlleva un aumento de la rigidez, desde el punto de vista teórico no se esperan variaciones en la velocidad de propagación (Bucur, 2006). No obstante, ciertos procesos fisiológicos relacionados con el fenómeno de cavitación en el árbol en pie sí presentan correlación con la densidad del fuste (Fernández et al., 2019, citado por Palma, 2022), pudiendo afectar indirectamente a la propagación de las ondas (Palma, 2022).

3.5.1.3 Singularidades presentes

En cuanto a los defectos localizados, los nudos y la desviación de la fibra que estos provocan son los principales responsables de la reducción en la resistencia de la madera (Kollmann y Côté 1984). Un nudo aislado presenta una estructura anatómica distinta, caracterizada por ser más densa y rígida que la madera circundante. Por ello, la presencia del nudo *per se* podría sugerir un aumento en la velocidad de propagación (Palma et al., 2018; Riggio et al., 2015).

Sin embargo, el efecto global es complejo y depende del tamaño y número de nudos. A pesar de la mayor densidad del tejido nudoso, las desviaciones en el ángulo de la fibra (inclinación) asociadas al nudo pueden reducir la velocidad de propagación medida (Walker y Nakada, 1999; Chauhan y Walker, 2006; Searles, 2012; Gerhards, 1982; Jones y Emms, 2010). Esto se debe a que el frente de onda de la señal acústica tiende a seguir la dirección de las fibras y a rodear los nudos, recorriendo una trayectoria más larga que reduce la velocidad aparente (Gerhards, 1982).

Por otro lado, la madera de reacción (madera de compresión en coníferas y de tracción en frondosas) constituye un defecto natural indeseable para usos estructurales debido a su fragilidad (Haygreen y Bowyer, 1995). Respecto a su influencia sobre la velocidad ultrasónica, la literatura presenta ciertas discrepancias. Por un lado, Palma et al., (2018) no hallaron diferencias estadísticamente significativas entre la madera de compresión y su opuesta, aunque observaron valores numéricamente superiores en la primera. En contraposición, otros autores han reportado valores de velocidad ligeramente inferiores en la madera de compresión respecto a la madera normal (Bucur y Chivers, 1991; Moliński et al., 2007). Esta última observación resulta coherente con la anatomía de la madera de compresión, cuyas traqueidas son más cortas que en la madera normal, presentan un mayor contenido de lignina y, factor determinante, un ángulo de microfibrillas (MFA) mayor (más plano respecto al eje longitudinal) (Bucur, 2025).

3.5.1.4 Madera juvenil

La madera juvenil se caracteriza anatómica y físicamente por presentar un mayor ángulo de microfibrillas, células más cortas y paredes celulares más delgadas, lo que conlleva una menor densidad en comparación con la madera madura (Haygreen y Bowyer, 1995). Esta variación anatómica radial provoca un aumento progresivo de la rigidez y de la velocidad de propagación desde la médula hacia la corteza (Krauss et al., 2010; Zobel y Sprague, 1998).

Los métodos acústicos corroboran este fenómeno: los valores de velocidad se ven reducidos en las zonas de madera juvenil (Brancheriau et al., 2012; Palma et al., 2018). En este sentido, Liu et al (2021) cuantificaron que el incremento en el contenido de madera juvenil ralentiza la propagación de la onda, estimando que un aumento del 10 % en dicho contenido puede implicar una reducción de 113 m s^{-1} en la velocidad acústica.

Asimismo, análisis mediante tomografía acústica confirman que la velocidad longitudinal de la onda está estadísticamente correlacionada con la posición radial (Mariño et al., 2009). Tanto Grabianowski et al. (2006) como Mariño et al. (2009) observaron que la velocidad aumenta a medida que se incrementa la distancia desde la médula. Esta tendencia es tan marcada que, en árboles jóvenes, la velocidad media de la onda ultrasónica puede ser aproximadamente un 25 % superior en la periferia (anillos 37 - 49) en comparación con la zona cercana a la médula (anillos 2 - 7). Resultados similares obtuvieron Krauss y Kúdela (2011), quienes asociaron el aumento de velocidad directamente con la maduración del tejido leñoso.

Finalmente, respecto a la validación del método en árboles en pie, Grabianowski et al. (2006) hallaron que las mediciones externas en el tronco presentaban una buena correlación con la madera aserrada proveniente de la zona adyacente a la corteza, mientras que la correlación fue menor con las mediciones correspondientes al duramen o zona interna.

3.5.2 Factores dendrométricos y edad

La rigidez de la madera y, en consecuencia, la velocidad acústica, están intrínsecamente ligadas a las dimensiones y a la edad del árbol.

Se ha observado que la velocidad acústica aumenta con la edad del árbol (Chauhan y Walker, 2006; Grabianowski, 2006; Auty y Achim, 2008; Gonçalves et al., 2013; Watson, 2013), proponiéndose incluso modelos no lineales para describir esta relación (Auty y Achim, 2008).

Respecto a las dimensiones del fuste, algunos estudios han señalado una correlación negativa entre la velocidad acústica y el diámetro normal (DAP) para árboles de la misma edad (Lasserre et al., 2004). Liu et al., (2021) concluyen que la propagación de la onda acústica en los árboles depende tanto del diámetro como de la distancia de recorrido, describiendo cómo el frente de onda evoluciona de dilatacional a cuasiplano en función del diámetro.

En el caso de trozas, Wang et al. (2004) indicaron que la velocidad de la onda longitudinal es sensible al tamaño y a las imperfecciones geométricas. Observaron que, a medida que aumenta el diámetro de la troza, se incrementa progresivamente la desviación entre el coeficiente de rigidez y el MOE estático. Por ello, concluyeron que incluir el diámetro en los modelos matemáticos mejora significativamente la estimación del MOE estático.

Aunque la conicidad natural de árboles y trozas implica que el área de la sección transversal difiere en los extremos, Sobue (1990) sugiere que, para fines de clasificación, es admisible modelar el tronco como una viga cilíndrica homogénea con un diámetro equivalente al diámetro medio.

Finalmente, en cuanto a la variación axial, la velocidad acústica fluctúa a lo largo del fuste. Se ha reportado que la velocidad longitudinal disminuye con la altura (Huang et al., 2003; Hsu, 2003; Wang et al., 2013). Sin embargo, otros autores han observado cómo la velocidad puede aumentar inicialmente hasta alcanzar un máximo a pocos metros de altura desde la base para luego disminuir en las zonas superiores (Hsu, 2003; Waghorn et al., 2007; Andrews, 2000, citado por Grabianowski et al., 2006).

3.5.3 Factores ambientales

3.5.3.1 Contenido de humedad y temperatura

La variación de los factores ambientales, como la humedad relativa del aire y la temperatura, condicionan el contenido de humedad de la madera, lo cual, a su vez, modifica sus parámetros acústicos (Bucur, 2023).

El contenido de humedad (CH) es, indudablemente, el factor ambiental más determinante en la velocidad acústica, variando estacionalmente (Hasegawa et al., 2011; Sakai

et al., 1990; Sandoz 1993; Oliveira et al., 2005; Unterwieser y Schickhofer, 2011). Por debajo del Punto de Saturación de la Fibra (PSF) el aumento de humedad plastifica la matriz de lignina y hemicelulosas, reduciendo la rigidez de la pared celular y, consecuentemente, disminuyendo drásticamente la velocidad de la onda y el MOE (Rodríguez-Liñán y Rubio, 2000; Kang y Booker, 2002; Oliveira et al., 2005; Bucur, 2006; Gonçalves y Leme, 2008). Por encima del PSF, el agua se acumula en estado libre en los lúmenes celulares. Su efecto directo sobre la rigidez del material es mínimo, pero sigue influyendo en la velocidad acústica al aumentar la densidad total de la pieza, lo que tiende a reducir la velocidad de propagación (Sotomayor, 2015).

En términos de cuantificación para madera aserrada, se ha estimado que la velocidad de propagación de la onda disminuye aproximadamente 36 m s^{-1} por cada aumento del 1 % en el CH dentro del rango higroscópico (0 % al 25 %) (Han et al., 2006). Llana (2016) corroboró que esta influencia es más acentuada por debajo que por encima del PSF, proponiendo coeficientes de corrección (para un CH de referencia del 12 % y rango 10-30 %) de entre el 0,58 % y el 0,77 % para TND globales. Es importante considerar que, si bien la velocidad longitudinal disminuye al aumentar el CH, las velocidades radial y tangencial pueden presentar comportamientos variables (disminución o aumento) (Wang et al., 2002).

En el árbol vivo, la madera se encuentra saturada (por encima del PSF); sin embargo, el tronco experimenta ciclos diarios de consumo y reposición de las reservas de agua (Schepper et al., 2012). En el caso de *Quercus robur* L., se han documentado pérdidas diurnas de hasta un 15 % del agua almacenada en el fuste, lo que genera variaciones dimensionales en el diámetro (Schepper et al., 2012). Este dinamismo hídrico sugiere que la propagación de ondas acústicas también fluctúa a lo largo del día (Palma, 2022).

Por otra parte, la interferencia de la temperatura es menos significativa que la de la humedad (Pellerin y Ross, 2002; Bucur, 2006). Sandoz (1993) concluyó que el aumento de la temperatura disminuye la velocidad de la onda de forma lineal. A modo de referencia, reportó un descenso de la velocidad de aproximadamente 0,08 % por cada incremento de un 1 °C (en el rango de -20 °C a 60 °C y con un CH del 12 %). Un valor de corrección idéntico fue propuesto por Steiger (1996) para el intervalo entre 20 °C y 40 °C.

Existe una interconexión entre la humedad y la temperatura que puede afectar a la densidad de la madera y, a su vez, al coeficiente de rigidez (Chan et al., 2011). Llana et al. (2013) confirmaron que, en madera seca, la influencia de la temperatura en los ensayos no destructivos muestra una clara tendencia lineal por debajo de 0 °C, pero no significativa por encima de ese umbral. En cambio, en madera verde, aunque la temperatura tiene poca influencia en rangos normales, al acercarse al punto de congelación la velocidad y la pérdida de energía cambian abruptamente (Gao et al., 2011; Guillaume, et al., 2014), fenómeno atribuido al cambio de fase del agua retenida en los lúmenes de las células.

En estudios recientes sobre árboles en pie, Palma (2022) observó cómo el comportamiento diario de la velocidad de propagación medida en la dirección radial se correlaciona directamente con la temperatura e inversamente con la humedad relativa del aire. Las velocidades de propagación de ondas de ultrasonido registraron valores más bajos durante las condiciones de bajo flujo de savia (asociadas a un aumento de la humedad relativa).

3.5.4 Factores relacionados con el ensayo y la configuración

3.5.4.1 Acustoelasticidad

La acustoelasticidad es el fenómeno físico que describe la dependencia de la velocidad de propagación de una onda respecto al estado tensional del material. Esta relación teórica permite estimar el estado de tensiones de una pieza sometida a carga.

En el contexto de los árboles en pie, este fenómeno es inducido por las cargas naturales y, específicamente, por las tensiones de crecimiento. Estas generan un complejo mapa de esfuerzos, caracterizado habitualmente por fibras externas sometidas a tracción y fibras internas bajo compresión, lo cual puede alterar la velocidad medida. Experimentalmente, Hasegawa et al. (2000) observaron que la velocidad longitudinal disminuye con el aumento de la magnitud del esfuerzo, independientemente de si este es de tracción o de compresión. Resultados similares fueron obtenidos posteriormente por Bertoldo (2014).

Bajo esta premisa, el efecto acustoelástico podría actuar mitigando las diferencias de velocidad que teóricamente se esperan, debido al efecto de Poisson, al comparar mediciones entre el árbol en pie (bajo tensión) y la troza o tabla (donde se liberan dichas tensiones).

Además, ensayos preliminares sugieren que la sensibilidad de la velocidad ante variaciones de tensión es mayor en coníferas que en frondosas (Ormonde et al., 2006; Sasaki et al., 1998). Para las frondosas, la velocidad de la onda en la dirección perpendicular aumenta cuando la pieza está sometida a compresión longitudinal y disminuye bajo tracción. Por el contrario, en las coníferas se ha observado el fenómeno inverso.

No obstante, a diferencia de lo que ocurre en materiales homogéneos como los metales, el análisis de estos parámetros en la madera conlleva una elevada complejidad debida a su anisotropía y heterogeneidad, por lo que los resultados disponibles en la literatura aún no se consideran concluyentes.

3.5.4.2 Dimensiones de las piezas

Las ecuaciones teóricas de propagación de ondas presuponen un medio ideal infinito, donde la longitud de onda (λ) es despreciable en comparación con las dimensiones del elemento. Sin embargo, en piezas reales (medios finitos), cuando la longitud de la trayectoria (L) se aproxima a λ , el medio se comporta como dispersivo, y fenómenos como la reflexión y la refracción afectan a la propagación de la onda.

Para garantizar la fiabilidad de las mediciones de velocidad, la distancia recorrida debe ser varias veces superior a la longitud de onda. La literatura establece umbrales mínimos para la relación L/λ . Diversos autores coinciden en que una relación $L/\lambda > 3$ permite obtener velocidades estables, menos afectadas por la condición de medio finito (Bucur, 1984; Trinca, 2008). Este umbral fue corroborado por Oliveira et al. (2006), quienes, al analizar piezas de 0,1 m a 3,0 m, observaron fluctuaciones en la velocidad por debajo de $L/\lambda = 3$, estabilizándose los valores por encima de dicho límite. Otros autores adoptan un criterio más conservador, sugiriendo una relación $L/\lambda > 5$ para evitar totalmente los fenómenos de dispersión (Bartholomeu et al., 2003).

En consecuencia, la frecuencia del transductor utilizado en el ensayo (que determina λ) debe seleccionarse en función de la longitud de medición: las distancias de recorrido cortas exigen el uso de frecuencias más altas. Por ejemplo, la norma brasileña ABNT-NBR 15521:2007, aplicable a ensayos de ondas ultrasónicas, establece las distancias mínimas de medición en función de las frecuencias de los sensores utilizados.

Independientemente de la relación L/λ , la bibliografía señala que la longitud absoluta de la pieza puede influir en la velocidad registrada, existiendo diferencias según la tecnología empleada. Llana (2016) analizó esta variable y observó una tendencia decreciente de la velocidad al aumentar la longitud de la pieza en equipos de ultrasonidos (Sylvatest Duo, USLab, Steinkamp BPV) y de ondas de impacto (MST). Esta variación se estimó entre el 1,8 % y el 2,8 % por cada metro adicional, dependiendo del equipo y la especie. Por el contrario, los equipos basados en frecuencia de resonancia (PLG y MTG), a diferencia de los métodos ultrasónicos y de impacto, no mostraron dependencia significativa de la longitud de medida.

Las dimensiones de la sección transversal también son relevantes en las mediciones, dado que la velocidad longitudinal de ultrasonidos se ve fuertemente afectada por la relación base/altura de la sección (Bucur y Böhnke, 1994). Bucur (1984) obtuvo velocidades máximas cuando dicha relación se encontraba entre 1 y 2. Asimismo, otros autores como Bartholomeu et al. (2003) indican que la velocidad longitudinal se ve menos afectada cuando las relaciones de la sección transversal son del orden de $R/T > 0,3$ o $L/T > 0,75$.

3.5.4.3 Configuración del ensayo

En los ensayos acústicos que emplean un emisor y un receptor, la transmisión directa (con los sensores acoplados en los extremos o testas de la pieza, paralelos a la fibra) se considera teóricamente la configuración más adecuada e ideal (Malhotra y Carino, 2003). Sin embargo, esta disposición no siempre es viable, especialmente en aplicaciones *in situ*, como la inspección de árboles en pie o elementos de estructuras existentes. Para estos casos, existen dos configuraciones alternativas (Malhotra y Carino, 2003): la transmisión semidirecta, en la que los sensores se colocan en caras adyacentes; y la transmisión indirecta, en la que ambos sensores se sitúan sobre la misma superficie. Estas alternativas se consideran menos precisas debido a que la amplitud de la señal recibida es significativamente inferior y la propagación de la onda no es “pura”, produciéndose una mezcla de diferentes modos de onda.

Para comparar estas configuraciones, Llana (2016) analizó el uso de ultrasonidos y ondas de impacto. Sus resultados mostraron que no existían diferencias estadísticamente significativas entre las mediciones realizadas sobre las caras y sobre los cantos, ya fuesen directas o indirectas, para ambas técnicas aplicadas. Sin embargo, específicamente para la técnica de ultrasonidos, las velocidades obtenidas mediante transmisión directa (testa-testa) resultaron estadísticamente diferentes a las registradas mediante transmisión superficial en la cara o el canto de las piezas.

Por su parte, Gonçalves et al. (2014), aplicando la técnica de ultrasonidos, concluyeron que la velocidad superficial era inferior a la directa. Esta diferencia varió según la relación entre la distancia de medida (L) y la longitud de onda (λ): para L/λ entre 3 y 25, la velocidad superficial fue un 10 % menor, pero por encima de $L/\lambda = 25$, la diferencia aumentaba al 30 %, fenómeno que los autores atribuyeron a la dispersión de la onda.

3.5.4.4 Atenuación

La propagación de ondas ultrasónicas en la madera puede verse atenuada por tres factores principales: la geometría del campo de radiación, la dispersión y la absorción (Bucur, 2025).

El factor geométrico está vinculado a las propiedades del campo de radiación del transductor (divergencia del haz y difracción) y a los fenómenos de reflexión y refracción que ocurren en los límites o fronteras macroscópicas del medio. La dispersión y la absorción son fenómenos relacionados con las características del material y su simetría elástica. La atenuación por dispersión se debe a las reflexiones y refracciones en pequeñas interfaces dentro del material, mientras que la atenuación por absorción se genera mediante la conversión de la energía ultrasónica en calor (Vary, 2007).

Existen diversas condiciones experimentales que influyen en la medición de la atenuación, tales como: la viscosidad del acoplante, la presión de contacto entre el transductor y la muestra, la rugosidad superficial y el paralelismo de la muestra, la geometría de la muestra (por ejemplo, cubo o cilindro), el contenido de humedad y la frecuencia de los transductores (Bucur, 2025). Para minimizar la variabilidad, es fundamental asegurar una presión de contacto constante, dado que sus fluctuaciones alteran la transmisión de la señal, lo cual suele

conseguirse mediante dispositivos mecánicos. Asimismo, la rugosidad y el paralelismo deben controlarse mediante una preparación cuidadosa de la probeta.

El acoplamiento de los sensores, especialmente si éstos son planos, es un factor fundamental para evitar la atenuación de la señal (Virgen-Cobos, 2023). El uso de una sustancia acoplante (líquida o pastosa) elimina el aire entre el sensor y la madera; de esta manera se reduce la diferencia de impedancia entre los medios, evitando que la señal sufra una fuerte atenuación debida a fenómenos de reflexión y difracción en la interfaz (Lasaygues, 2007). La elección del tipo de acoplante influye en la medición del coeficiente de atenuación y depende del acabado superficial y del tipo de onda (Gonçalves et al., 2011b; Bucur, 2006). Trinca et al., (2009) evaluaron seis tipos de acoplantes en nueve especies de madera, concluyendo que, aunque ninguno mostró un desempeño superior, el gel Panametrics SWC ofreció los mejores resultados en términos de menor atenuación, independientemente de la especie.

3.6 APLICACIÓN DE LAS TND A LO LARGO DE LA CADENA DE VALOR DE LA MADERA

3.6.1 Análisis del recurso en origen: Árbol en pie y troza

La evaluación temprana de la calidad de la madera se ha vuelto fundamental ante la creciente presión económica por optimizar el aprovechamiento del recurso forestal. Si bien la silvicultura tiene como objetivos centrales garantizar la productividad, el volumen comercial y la sostenibilidad ecológica, son los productos madereros los que constituyen la principal fuente económica para sostenerlos; por ello, evaluar su calidad resulta crítico en toda la cadena de valor.

Históricamente, esta calidad se ha estimado mediante métodos visuales tradicionales basados en la experiencia de los técnicos. Aunque la inspección visual del árbol en pie es el medio clásico para estimar la presencia de defectos y anomalías (Allison y Wang, 2015), no constituye un indicador fiable de las propiedades físicas o mecánicas de la madera. Por otro lado, los ensayos mecánicos convencionales, que implican la tala, aserrado y preparación de probetas, resultan costosos, destructivos y lentos (Fundova et al., 2019; Newton, 2018; Škorpík et al., 2018).

En consecuencia, el desarrollo de un método de cribado rápido para árboles en pie siempre ha sido un objetivo deseable (Matheson et al., 2008; Schimleck et al., 2019), y ha impulsado el interés y posicionamiento por las TND. Diversos estudios han validado la capacidad de las TND para predecir propiedades intrínsecas de la madera de árboles individuales y evaluar la calidad a escala de rodal, empleando herramientas como penetrómetros, resistómetros de perforación, métodos acústicos y análisis de imagen (Pellerin y Ross, 2002; Papandrea et al., 2022b). Estos métodos, al ser rápidos, económicos y aplicables en campo, permiten mejorar la clasificación de trozas y optimizar el aserrado para un uso industrial más eficiente (Ross et al., 2001; Beall, 2001).

Dentro de las TND, los métodos acústicos son ampliamente utilizados. En árboles en pie, la evaluación se basa en el método del tiempo de vuelo (ToF) de una onda generada por un actuador (Arciniegas et al., 2014). Como se ha indicado anteriormente, las técnicas de ondas ultrasónicas y de impacto, empleadas en esta investigación, operan bajo este principio. Investigaciones recientes sobre el alcance del método ToF aplicado en árboles en pie, indican que la propagación de la onda es controlada por las propiedades de toda la sección transversal, por lo que la velocidad medida en el árbol refleja las propiedades globales del material en el tramo de medición (Liu et al., 2021).

En trozas o madera aserrada, además de las citadas técnicas basadas en ToF, se aplica la técnica de vibración (Arciniegas et al., 2014; Legg y Bardley, 2016). Los fundamentos de estos distintos métodos ya han sido descritos en apartados anteriores de este documento.

La investigación desarrollada con relación al uso de TND ha validado consistentemente su aplicación para la gestión y clasificación de la madera en origen. Bertoldo y Gonçalves (2015) examinaron la relación entre la velocidad de propagación de ondas ultrasónicas medida en árboles en pie y en trozas de varias especies. Las conclusiones indicaron que, si bien la velocidad en el árbol y la troza son numéricamente diferentes, las velocidades obtenidas para las trozas de la base están mejor correlacionadas con las mediciones en el árbol; no obstante, la inclusión del diámetro normal (DAP) en los modelos de predicción mejoró la precisión para equiparar la velocidad de las trozas obtenidas de todo el árbol, mientras que la inclusión de la densidad en verde no mejoró las estimaciones. Otros estudios, aplicando la técnica de onda ultrasónica, han demostrado el potencial de los ultrasonidos para la estimación del MOE y MOR en árboles a partir de mediciones sobre plántulas (Gonçalves et al., 2018). Estos autores obtuvieron modelos de regresión para la predicción del MOE combinando la velocidad de ondas ultrasónicas y la altura de la plántula, explicando el 98,5 % de la variabilidad. En un estudio similar realizado con plántulas, Gonçalves et al. (2019) analizaron la evolución de las propiedades de la madera de *Eucalyptus* desde esta etapa inicial hasta la edad de corte, con el fin de estimar la calidad futura de los clones. Los autores observaron que la velocidad de propagación de ondas ultrasónicas mantenía diferencias coherentes entre los clones a lo largo de todo el ciclo, lo que demuestra su potencial para la diferenciación temprana del material. Wang et al. (2000) evaluaron la resistencia y rigidez de árboles en pie utilizando ondas de impacto y obtuvieron una fuerte correlación (R^2 entre 0,87 y 0,99), lo que valida el método para la clasificación de la madera en pie. De manera similar, Auty y Achim (2008), utilizando el equipo Hitman ST300 en pino silvestre, concluyeron que las velocidades medidas en los árboles son un indicador confiable tanto del MOE como del MOR. Más recientemente, Cyriac et al. (2022), en un estudio comparativo en *Pinus contorta* y *Picea glauca*, hallaron que la velocidad de onda de tensión demostró ser una variable relevante para estimar el MOE estático en la madera de pino, presentando un coeficiente de determinación R^2 de 89 %. La capacidad de correlacionar las propiedades del árbol con la madera aserrada fue también demostrada por Merlo et al. (2014), quienes utilizaron la técnica no destructiva de ondas de tensión en árboles de *Pinus pinaster* y lograron estimar el MOE de las tablas aserradas con un R^2 del 55 %, con la velocidad acústica como principal variable explicativa en el modelo. En la misma línea, Chen et al. (2015) estimaron las propiedades de la madera aserrada a partir de la velocidad de propagación de ondas obtenida en árboles en pie de *Picea abies*. Además, Virgen-Cobos et al. (2022) correlacionaron las propiedades mecánicas (resistencia a la flexión y rigidez) con las acústicas en seis árboles urbanos. Los resultados mostraron correlaciones significativas (coeficientes de determinación entre 0,30 y 0,94) entre el MOE estático y el dinámico del árbol en pie, lo que confirma la utilidad de los métodos no destructivos para estimar estas propiedades.

Respecto a la influencia de las prácticas silviculturales, algunos autores estudiaron el uso de TND para evaluar sus efectos (Auty y Achim, 2008). Wang et al. (2001) indicaron que las velocidades registradas en ensayos de ondas de tensión proporcionan información precisa sobre las propiedades de la madera obtenida, alcanzando coeficientes de correlación de 0,66 para la rigidez y de 0,64 para la resistencia, lo que les permitió concluir que los efectos de las prácticas silviculturales de control de densidad de la plantación pueden identificarse a través del ensayo no destructivo. La aplicación de TND también se ha extendido para evaluar defectos, como la nudosidad. Hausle et al. (2023) evaluaron el uso de la velocidad acústica como medición indirecta de la ramificación en *Pinus palustris*, y hallaron que la presencia de ramas con diámetros superiores a 25,4 mm presenta una correlación negativa y significativa con la velocidad. Por otro lado, Ramos et al. (2024) aplicaron un método acústico de tiempo de vuelo

en árboles de *Pinus montezumae* Lamb., y concluyeron que la sección superior (2–4 m) producía madera estructural de mayor calidad.

La aplicación de métodos acústicos en trozas puede utilizarse para predecir la resistencia y la rigidez de piezas estructurales (Wang et al., 2007a). Tsehaye et al. (2000b) concluyeron que la clasificación de las trozas a través de la velocidad de propagación de ondas permitió clasificar la madera para fines estructurales. Esto sugiere que el método podría usarse para la selección previa al aserrado de aquellas trozas con potencial para producir madera de calidad superior. Esta efectividad fue respaldada por Amishev y Murphy (2008), quienes observaron en madera de *Pseudotsuga menziesii* que las tablas mejor clasificadas provenían de las regiones que presentaban mayores valores de velocidad promedio en las trozas.

Al comparar metodologías en trozas, Yin et al. (2010) analizaron tres métodos de medición acústica en trozas de abeto chino (*Abies Cunninghamia*). Sus resultados mostraron que la vibración longitudinal fue el método más preciso y confiable para evaluar las propiedades mecánicas de las trozas ($R = 0,77$), superando significativamente a las ondas de impacto ($R = 0,57$) y al ultrasonido ($R = 0,45$). Grabianowski et al. (2006), midiendo en *Pinus radiata*, encontraron que las velocidades superficiales en las trozas fueron un 12 % mayores que las longitudinales (de extremo a extremo). Carter et al. (2005) concluyeron también que la técnica de vibración en trozas es una forma confiable de obtener resultados de resistencia y rigidez.

En busca de una mayor precisión en la predicción del MOE de la madera aserrada, Wang et al. (2013) encontraron que los modelos obtenidos mejoraron significativamente al combinar la velocidad en la troza con su diámetro ($R = 0,50$) o con su posición en el árbol ($R = 0,67$), resultados que superaron el uso de la velocidad en la troza, como parámetro aislado ($R = 0,40$). Por lo tanto, los modelos de regresión múltiple resultaron ser más eficaces para la clasificación de trozas de mejor calidad.

Vega et al. (2017) estimaron el MOE de trozas secas de castaño de pequeño diámetro con un R^2 del 64 % y del 67 %, utilizando la velocidad del equipo MST y el MOE_{din} , respectivamente. Hermoso et al. (2007) estimaron el MOE en madera en rollo de pino nigra con un R^2 del 68 % a partir del MOE_{din} . Específicamente en el clon I-214 de *Populus × euroamericana*, Papandrea et al. (2022a) revelaron una fuerte correlación entre las velocidades de onda de tensión y el MOE estático en ensayos tanto en árbol como en trozas. Continuando con esta especie, Gallego et al. (2021) encontraron altos coeficientes de correlación ($R \approx 0,70$) al correlacionar el MOE_{din} de la troza con el MOE de la madera aserrada. En clones híbridos de eucalipto, Doan y Schimleck (2022) obtuvieron una correlación muy alta ($R = 0,93$) entre el MOE_{din} y el MOE estático. Sirswal et al. (2025) observaron en trozas de *Eucalyptus nitens* que el MOE dinámico sobreestimó consistentemente el MOE estático en un rango de 10,81 % a 24,66 %. Llana et al. (2020b) aplicaron las técnicas de ondas tensión en árboles en pie y vibración en trozas de diferentes especies frondosas irlandesas. Los modelos obtenidos, que incluyen la especie arbórea y el diámetro, permiten estimar de forma fiable las propiedades mecánicas de la madera aserrada ($R = 0,59$ para el MOE y de 0,44 para el MOR). Un hallazgo relevante en este estudio fue que los resultados de los modelos de estimación basados en datos de velocidad acústica (sin necesidad de medir la densidad de la madera) no difirieron significativamente de los obtenidos a partir del MOE_{din} (que sí requiere la medición de densidad). Esto supone un ahorro considerable de tiempo y costes en el proceso de evaluación de la calidad de la madera.

A pesar de la utilidad de estas técnicas en ambas etapas (árbol y troza), investigaciones realizadas por Tsehaye et al. (2000a, 2000b), Wang et al. (2007b), Wang et al. (2004), Wang et al. (2000), y Gonçalves et al. (2011a) demostraron que existen diferencias entre la velocidad de propagación de la onda medida en el árbol en pie y en la troza. En general, las velocidades en

el árbol son superiores a las de la troza. Estas variaciones pueden estar vinculadas a los mecanismos de propagación de las ondas, influenciados por la forma de medición (indirecta en el árbol vs. directa en la troza), el diámetro y la edad de los árboles, así como la propia estructura estática del árbol (empotrada-libre), que genera un estado de tensión del que la troza está libre. Wang et al. (2007b) estudiaron esta relación en cinco especies de coníferas, observando que la velocidad fue significativamente superior en el árbol que en la troza en la mayoría de los casos. Los valores para la relación promedio entre velocidades (árbol/troza) variaron de 1,07 (*Pinus radiata*) a 1,36 (*Pinus ponderosa*). Chauhan y Walker (2006) también señalaron que la velocidad en el árbol fue mayor que en las trozas; dicha diferencia se acentuó con el aumento de la edad y del diámetro del árbol. Mora et al. (2009) observaron en *Pinus radiata* que la velocidad en el árbol fue, en promedio, un 32 % superior a la de la troza. Llana et al. (2020) observaron también mayores velocidades en las mediciones en el árbol en pie, indicando diferencias en los valores de velocidad desde el 12,7 % al 25,1 %.

3.6.2 Análisis del producto: Láminas y uniones dentadas (*finger-joint*)

La disponibilidad creciente de madera de frondosas en los bosques europeos contrasta con su limitada utilización en aplicaciones estructurales de alto valor, un ámbito dominado tradicionalmente por las coníferas. Aunque se han desarrollado recientemente productos de madera técnica (*Engineered Wood Products*, EWP) a partir de frondosas, la industria aún posee menos experiencia en su procesamiento, especialmente en la tecnología de unión dentada (*finger-joint*), que es crucial para los procesos de empalme longitudinal.

La unión dentada es un desarrollo clave para la producción de láminas continuas a partir de piezas más cortas. Este proceso no solo permite alcanzar las dimensiones requeridas para productos como la madera laminada encolada (MLE), sino que también facilita un proceso de saneado para eliminar defectos limitantes, como nudos o desviación de la fibra. De esta manera, esta técnica de valorización transforma madera de calidad baja o media en un producto de madera técnica con propiedades mecánicas fiables y predecibles.

La fabricación de uniones dentadas de alto rendimiento en frondosas, como el *Quercus robur* (una especie de media-alta densidad), exige un conocimiento preciso de las propiedades específicas de la especie y ajustes tecnológicos. De manera general, la alta densidad y resistencia de las frondosas imponen mayores exigencias a la maquinaria y las herramientas de corte, haciendo que la calidad de la superficie mecanizada sea un factor crucial. Además, parámetros como la geometría del dentado, el tipo de adhesivo, la presión de encolado y la compatibilidad con la especie son determinantes para la resistencia y rigidez de la unión (Jokerst, 1981).

En este contexto de producción, la aplicación de las técnicas de ensayo no destructivas se establece como una herramienta útil para el control de calidad en la línea de fabricación. Técnicas como la propagación de ondas acústicas permiten una estimación rápida y fiable del Módulo de Elasticidad (MOE).

Sin embargo, la presencia de una unión dentada transforma una sección de madera homogénea en un sistema compuesto discontinuo. Esto altera la propagación de las ondas acústicas mediante tres mecanismos físicos interrelacionados:

- Desajuste de impedancia acústica: La unión genera una discontinuidad entre la madera y el adhesivo. Al cruzar esta interfaz de materiales con distinta rigidez y densidad, parte de la energía de la onda se refleja, provocando atenuación y modificando el tiempo de vuelo, lo que resulta en una velocidad "aparente" del sistema en lugar de la velocidad intrínseca del material (Bucur, 2005).

- Dispersión geométrica: La compleja configuración de los dientes actúa como fuente de dispersión, contribuyendo a una mayor atenuación de la señal (Divos y Tanaka, 2005).
- Defectos de interfaz: Imperfecciones como micro-vacíos o una aplicación deficiente del adhesivo actúan como barreras de alta impedancia, provocando reflexiones casi totales y atenuando severamente la señal. Esto puede forzar a la onda a seguir trayectorias alternativas más largas, lo que típicamente reduce la velocidad medida (Serrano y Gustafsson, 1999).

En consecuencia, la velocidad medida en una pieza con unión dentada deja de ser exclusivamente una propiedad del material para convertirse en un indicador de la calidad e integridad estructural de la propia unión (Biechele et al., 2011).

Diversos trabajos han demostrado que las técnicas no destructivas acústicas pueden utilizarse para la clasificación de madera con uniones *finger-joint* con el mismo grado de precisión que en el caso de la madera aserrada maciza. Estudios en frondosas tropicales, como el desarrollado por Karlinasari y Bahtiar (2011), se han centrado en evaluar la efectividad de las uniones dentadas y de tipo *scarf* en distintas especies de madera de meranti (*Shorea spp.*). En este trabajo se emplearon ondas ultrasónicas para evaluar si la unión afectaba a la predicción de propiedades de flexión estática (MOE y MOR). Se observó que, aunque las velocidades de propagación ultrasónica eran ligeramente superiores para la madera con uniones dentadas, no se detectaron diferencias significativas en las velocidades ni en el módulo de elasticidad antes y después de realizar la unión. Estos autores concluyeron que el ultrasonido es una técnica fiable para estimar la rigidez, encontrándose una correlación fuerte y positiva entre el C_{LL} y el MOE estático (Karlinasari y Bahtiar, 2011).

Otra línea de investigación ha explorado la fiabilidad de las TND en relación al número de uniones dentadas presentes en la pieza, como el trabajo realizado por Biechele et al. (2011) en madera de picea negra (*Picea mariana*). Los investigadores analizaron tres grupos de material (madera maciza sin uniones, madera con 2-3 uniones y madera con 5-7 uniones) aplicando técnicas de vibración y ensayos estáticos. Los resultados mostraron que, en comparación con la madera maciza, las piezas con uniones dentadas presentaron valores de MOE consistentemente más bajos, independientemente de la técnica empleada. Además, se observó que la rigidez tendía a disminuir a medida que aumentaba el número de uniones. Los autores confirmaron la fiabilidad de las técnicas de vibración para clasificar la madera, con coeficientes de correlación altos y similares entre los grupos (Biechele et al., 2011).

Como señaló Jokerst (1981), la geometría de la unión dentada determina la resistencia de la unión y, en consecuencia, la resistencia de la probeta final. Entre los hallazgos reportados hasta la fecha, se ha comprobado que la longitud del diente es el factor que más influye en la resistencia de la unión dentada, mientras que el paso del diente tiene un efecto despreciable. Además, el espesor de la punta y el ángulo del diente tienen un impacto notable en la resistencia (Strickler, 1980). Estos parámetros están interrelacionados, de modo que un cambio en uno influye en los demás, lo que complica la investigación del efecto de un único parámetro en la resistencia (Jokerst, 1981). Ayarkwa et al. (2000) evaluaron la efectividad de la técnica de vibración longitudinal como método no destructivo para predecir el módulo de elasticidad y la resistencia última a tracción en madera de tres especies de frondosas tropicales africanas. Para este estudio se utilizaron tres perfiles de diente con longitudes de 10 mm, 18 mm y 20 mm. Se encontró una buena correlación lineal y significativa entre el MOE dinámico y el MOE en el ensayo de tracción, y el perfil de diente de 18 mm arrojó los coeficientes de correlación más altos. Además, las correlaciones con respecto a la resistencia a la tracción fueron superiores en el caso del MOE_{din} que con el MOE estático. Esto sugiere que el MOE_{din} es un indicador más robusto de la resistencia de la unión (Ayarkwa et al., 2000). En la misma línea de la evaluación

geométrica, otros estudios se enfocaron en las propiedades elásticas de vigas de *Quercus castaneifolia* macizas y con uniones, utilizando la técnica de vibración longitudinal (Yavari et al., 2015). Estos autores observaron que las vigas con uniones presentaban un módulo de elasticidad inferior en comparación con la madera maciza de referencia. En particular, se observó que las uniones dentadas con dientes más largos (10 mm) resultaron en propiedades elásticas superiores a las de dientes más cortos (5 mm), acercándose más al comportamiento de la madera maciza. Estos resultados respaldan lo observado previamente por Hemmasi et al. (2014), quienes reportaron una disminución notable de la rigidez en la madera con uniones dentadas, y recomendaron el uso de dientes de 10 mm frente a los de 5 mm para minimizar dicha pérdida y obtener mejores propiedades elásticas.

Para un análisis más detallado del comportamiento mecánico y el inicio del fallo, se han empleado métodos de campo completo de deformaciones y modelos numéricos. Timbolmas et al. (2022) compararon madera maciza de chopo con probetas con uniones dentadas sometidas a tracción, utilizando la técnica de Correlación Digital de Imágenes (DIC) para detectar las deformaciones y un Modelo de Elementos Finitos (MEF) para simular el proceso. La presencia de la unión redujo el MOE (entre un 11 % y un 19 %) y la resistencia a tracción (aproximadamente un 27,5 %). La técnica DIC demostró ser una herramienta potente para visualizar las altas concentraciones de deformación que se producen en la base y punta de los dientes, que son las zonas de inicio del fallo.

Ampliando las herramientas de diagnóstico, otros investigadores han evaluado el comportamiento mecánico de uniones dentadas en madera de chopo combinando DIC con Emisión Acústica (EA) durante un ensayo de tracción uniaxial (Rescalvo et al., 2023). Esta combinación permitió, por un lado, mapear las deformaciones (DIC) y, por otro, detectar en tiempo real la aparición y evolución de micro-roturas (EA). El estudio confirmó la reducción de propiedades mecánicas. La resistencia a tracción disminuyó un 28 % y el MOE un 15 %, destacando que la combinación de DIC (muestra dónde se concentra la deformación) y EA (indica cuándo y cómo ocurre el daño microscópico) es una herramienta muy potente para el análisis detallado de los procesos de fallo.

El análisis de la rigidez de las uniones dentadas se ha llevado a cabo, también, dentro de su contexto estructural final. Vafadar et al. (2024) analizaron la rigidez de las uniones dentadas en vigas de MLE de picea ensayadas a flexión. Utilizando DIC para medir las distribuciones de deformación, se observó que las uniones dentadas mostraban un comportamiento más homogéneo que otros defectos, como los nudos, y generalmente no causaban picos de concentración de deformación, salvo que fuesen de baja calidad o estuvieran cerca de otros defectos. En promedio, la rigidez aparente de las uniones fue un 15 % inferior a la rigidez media de las tablas conectadas. Este estudio subraya el potencial del DIC para cuantificar el comportamiento local de los defectos dentro de grandes componentes estructurales, algo que los métodos de ensayo convencionales no pueden hacer (Vafadar et al., 2024).

3.6.3 Caracterización elástica de probetas de pequeñas dimensiones

En las aplicaciones de ingeniería, el uso de modelos macroscópicos precisos es esencial para el análisis numérico, típicamente realizado mediante el Método de Elementos Finitos (*Finite Element Method*, FEM) (Schmidt y Kaliske, 2009). Estos modelos requieren constantes elásticas que representen fielmente el comportamiento lineal-elástico de la madera en el régimen de pequeñas deformaciones (Gibson y Ashby, 2001). Si bien la madera es un material anisótropo, su análisis mecánico suele simplificarse asumiendo un comportamiento ortótropo, definido por tres planos de simetría y sus direcciones principales: longitudinal (L), radial (R) y tangencial (T).

Tradicionalmente, los parámetros de la matriz de flexibilidad se determinan mediante ensayos mecánicos estáticos, donde la carga y la geometría de la probeta se alinean con las direcciones del material (Sliker et al., 1994; Aira et al., 2014). Sin embargo, el uso de técnicas no destructivas, como el ultrasonido, ha ganado relevancia para la obtención de la matriz de rigidez (Gonçalves et al., 2001, 2011b, 2014; Hering et al., 2012).

En este contexto, un aspecto importante para mejorar los modelos de estimación de la calidad de la madera a partir de mediciones de propagación de ondas en árboles es la incorporación del coeficiente de Poisson (Bertoldo, 2014). La determinación del coeficiente de Poisson requiere la caracterización completa del material, ya sea obteniendo la matriz de rigidez (ensayos dinámicos) o la de flexibilidad (ensayos estáticos) en probetas extraídas del árbol.

Con el objetivo de caracterizar la madera directamente desde el árbol en pie, investigaciones recientes se centran en obtener el coeficiente de Poisson a partir de pequeños testigos cilíndricos. Si algún parámetro obtenido en el ensayo de la muestra cilíndrica presenta correlación significativa con los coeficientes de Poisson ν_{LR} o ν_{LT} , esta relación podría integrarse en modelos predictivos de resistencia o módulo de elasticidad (MOR o MOE) de la madera procedente de una parcela forestal. En esta línea, Silva et al. (2020) lograron predecir de forma preliminar, pero significativa, el coeficiente de Poisson en el plano RL (ν_{RL}). Este hallazgo es relevante, ya que dicho coeficiente se puede utilizar para estimar la velocidad del ultrasonido en trozas y tablas a partir de mediciones realizadas en árboles en pie.

3.6.3.1 Obtención de los términos de la matriz de rigidez [C]

La caracterización del comportamiento lineal elástico ortótropo de la madera libre de defectos requiere la determinación de 12 constantes elásticas. Estas pueden obtenerse a partir de la matriz de flexibilidad (ensayos estáticos) o la matriz de rigidez (ensayos dinámicos de propagación de ondas). Al aplicar las condiciones de simetría, estas matrices se reducen a 9 constantes independientes. Una vez obtenida la matriz de rigidez, con su inversión se puede acceder a la matriz de flexibilidad, de la cual se derivan los 3 módulos de elasticidad longitudinal (E_L , E_R , E_T), 3 módulos de cortante (G_{LR} , G_{LT} , G_{RT}) y 6 coeficientes de Poisson (ν_{LR} , ν_{LT} , ν_{RT} , ν_{RL} , ν_{TL} y ν_{TR}).

El procedimiento para obtener estas constantes elásticas mediante ultrasonidos sigue protocolos establecidos (Gonçalves et al., 2011b; Vázquez et al., 2015). Para hallar los términos de la diagonal, se utilizan las ecuaciones del tensor de Christoffel, que relacionan la teoría de la elasticidad con la de propagación de ondas (Bucur, 2006). De manera práctica, para los tres primeros elementos de la diagonal de la matriz de rigidez (C_{11} , C_{22} , C_{33}) es necesaria la utilización del transductor de onda longitudinal (propagación y polarización en la misma dirección). Para la obtención de los otros tres elementos de la diagonal de la matriz de rigidez (C_{44} , C_{55} , C_{66}) se requiere el uso de un transductor de ondas de cortante (propagación en una dirección y polarización en la dirección perpendicular). Estas configuraciones de ensayo y las expresiones matemáticas correspondientes se resumen en la Tabla 1 (Gonçalves et al., 2014). En las ecuaciones de la tabla, ρ representa la densidad del material (kg m^{-3}) y V la velocidad de la onda (m s^{-1}). El primer subíndice de esta última corresponde a la dirección de propagación y el segundo a la dirección de polarización. Por lo tanto, V_{LL} , V_{RR} y V_{TT} son las velocidades de las ondas longitudinales medidas en las tres direcciones axiales. Asimismo, V_{RT} , V_{TR} , V_{LT} , V_{TL} , V_{LR} y V_{RL} son las velocidades de las ondas transversales medidas en las direcciones axiales, con polarización a lo largo de los ejes perpendiculares.

Tabla 1. Obtención de los términos de la diagonal de la matriz de rigidez de la madera con ensayos de ultrasonidos.

Coeficientes	Tipo de onda	Dirección de propagación	Dirección de polarización	Ecuación (N mm ⁻²)
C ₁₁	L	L	L	C ₁₁ = ρ·V _{LL} ²
C ₂₂	L	R	R	C ₂₂ = ρ·V _{RR} ²
C ₃₃	L	T	T	C ₃₃ = ρ·V _{TT} ²
C ₄₄	C	R o T	T o R	C ₄₄ = ρ·V _{RT} ² C ₄₄ = ρ·V _{TR} ²
C ₅₅	C	L o T	T o L	C ₅₅ = ρ·V _{LT} ² C ₅₅ = ρ·V _{TL} ²
C ₆₆	C	L o R	R o L	C ₆₆ = ρ·V _{LR} ² C ₆₆ = ρ·V _{RL} ²

Leyenda: L:longitudinal; R: radial; T: tangencial; C: cortante; ρ: densidad aparente de la madera al 12 %; V_{ij}: velocidad de propagación de la onda ultrasónica.

Para obtener los coeficientes fuera de la diagonal (C₁₂, C₁₃, C₂₃), es necesario que la propagación de la onda se produzca fuera de los ejes principales de simetría. Para esto se utilizan transductores transversales, emitiendo ondas cuasi-transversales medidas con un desplazamiento angular α° dentro del plano ortótropo correspondiente (LR, LT o RT). Los ángulos de 45° generan el menor error relativo (Bucur y Archer, 1984) y simplifican las ecuaciones, de manera que son más utilizados.

Estos términos fuera de la diagonal se calculan utilizando las ecuaciones derivadas del tensor de Christoffel (resumidas en la Tabla 2). En estas ecuaciones, V_α corresponde a la velocidad de la onda que se propaga en la dirección α. Así, V_{QLR}, V_{QLT} y V_{QRT} denotan la velocidad de una onda cuasi-transversal propagada a 45° con respecto a los ejes ortotrópicos del plano correspondiente.

Tabla 2. Obtención de los términos externos a la diagonal de la matriz de rigidez con ensayos de ultrasonidos.

Coeficientes	Expresión
C ₁₂	$(C_{12} + C_{66})n_1n_2 = \pm \sqrt{[(C_{11}n_1^2 + C_{66}n_2^2 - \rho V_\alpha^2)(C_{66}n_1^2 + C_{22}n_2^2 - \rho V_\alpha^2)]}$ $n_1 = \cos \alpha; n_2 = \sin \alpha; n_3 = 0$
C ₁₃	$(C_{13} + C_{55})n_1n_3 = \pm \sqrt{[(C_{11}n_1^2 + C_{55}n_2^2 - \rho V_\alpha^2)(C_{55}n_1^2 + C_{33}n_2^2 - \rho V_\alpha^2)]}$ $n_1 = \cos \alpha; n_2 = 0; n_3 = \sin \alpha$
C ₂₃	$(C_{23} + C_{44})n_1n_3 = \pm \sqrt{[(C_{11}n_1^2 + C_{44}n_2^2 - \rho V_\alpha^2)(C_{44}n_1^2 + C_{33}n_2^2 - \rho V_\alpha^2)]}$ $n_1 = 0; n_2 = \cos \alpha; n_3 = \sin \alpha$

Leyenda: plano 12 = LR; plano 13 = LT; plano 23 = RT.

Los términos de la matriz de flexibilidad [S] están relacionados con los términos de la matriz de rigidez [C] por medio de su inversa [C]⁻¹. Con los términos de la matriz de flexibilidad se obtienen los parámetros de ingeniería asociados al material (Figura 2): los módulos de Young E_L, E_R y E_T, en las direcciones longitudinal, radial y tangencial, respectivamente; los módulos de corte G_{RT}, G_{LT} y G_{LR} en los planos radial-tangencial, longitudinal-tangencial y longitudinal-

radial, respectivamente; y, los coeficientes de Poisson ν_{LR} , ν_{LT} , ν_{RT} , ν_{RL} , ν_{TL} y ν_{TR} , para cada uno de los planos.

$$[C]^{-1}=[S]=\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{RL}}{E_R} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LR}}{E_L} & \frac{1}{E_R} & -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & -\frac{\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} \end{bmatrix}$$

Figura 2. Matriz de flexibilidad [S].

Para relacionar los resultados dinámicos (matriz de rigidez) con los estáticos (matriz de flexibilidad), se emplean ecuaciones obtenidas a partir de la inversa de la matriz (Tabla 3). Al analizar las ecuaciones de la Tabla 3, se hace evidente que los valores de los módulos de elasticidad longitudinales obtenidos en los ensayos estáticos (E_L , E_R y E_T) no son numéricamente iguales a los coeficientes de la matriz de rigidez obtenidos por ultrasonido (C_{11} , C_{22} , C_{33}), respectivamente. La magnitud de esta diferencia depende del coeficiente de Poisson. Keunecke et al. (2007) indican que las diferencias pueden ser del orden del 50 % para coeficientes de Poisson de 0,40. Este concepto, de diferenciación entre los parámetros obtenidos en cada uno de los ensayos (estático y ultrasonidos), se adelantó en el apartado 1.3. para justificar el empleo del término Coeficiente de Rigidez (C_{LL}) como parámetro obtenido en los ensayos no destructivos de la presente tesis doctoral.

Tabla 3. Ecuaciones para el cálculo de los coeficientes de rigidez obtenidos por ultrasonido.

$C_{11} = C_{LL} =$	$(1 - \nu_{RT} \cdot \nu_{TR}) [E_R \cdot E_T \cdot /S/]^{-1}$
$C_{22} = C_{RR} =$	$(1 - \nu_{LT} \cdot \nu_{TL}) [E_L \cdot E_T \cdot /S/]^{-1}$
$C_{33} = C_{TT} =$	$(1 - \nu_{LR} \cdot \nu_{RL}) [E_L \cdot E_R \cdot /S/]^{-1}$
$C_{12} = C_{LR} =$	$(\nu_{RL} + \nu_{RT} \cdot \nu_{TL}) [E_R \cdot E_T \cdot /S/]^{-1}$
$C_{13} = C_{LT} =$	$(\nu_{TL} + \nu_{LR} \cdot \nu_{RT}) [E_R \cdot E_L \cdot /S/]^{-1}$
$C_{23} = C_{RT} =$	$(\nu_{TR} + \nu_{TL} \cdot \nu_{LR}) [E_L \cdot E_T \cdot /S/]^{-1}$
$C_{44} = G_{RT} =$	G_{RT}
$C_{55} = G_{LT} =$	G_{LT}
$C_{66} = G_{LR} =$	G_{LR}

Siendo

$$/S/ = [1 - \nu_{LR} \cdot \nu_{RL} - \nu_{RT} \cdot \nu_{TR} - \nu_{LT} \cdot \nu_{TL} - 2 \nu_{RL} \cdot \nu_{TR} \cdot \nu_{TL}] (E_1 \cdot E_2 \cdot E_3)^{-1}$$

Por lo tanto, solo es posible obtener los valores exactos de los parámetros elásticos de la madera por ultrasonido si se determina la matriz de rigidez completa y se realiza su inversión, o si se conocen previamente los coeficientes de Poisson de la especie. Si no se cumplen estas condiciones, no se deben esperar valores numéricamente iguales entre los coeficientes obtenidos por ultrasonido y los obtenidos por ensayo estático, aunque sí se podrá establecer una correlación entre ellos. Dicha correlación puede utilizarse, entonces, para estimar los resultados del ensayo estático a través del ensayo de ultrasonido.

3.7 EL *QUERCUS ROBUR* COMO CASO DE ESTUDIO

3.7.1 La madera de roble en Europa y en España

El roble (*Quercus robur* L.) es una especie arbórea caducifolia ampliamente distribuida en la Europa templada, con presencia en toda la región norte de la Península Ibérica.

En España, la madera de roble es una de las especies más valoradas por su calidad. Históricamente, se ha utilizado en estructuras de fábrica o piedra para fabricar vigas, correas y elementos de cerchas de cubiertas, gracias a su alta resistencia mecánica y gran durabilidad (Van Acker et al., 1999; Jablonski et al., 1998, citado por Riesco, 2025). De hecho, la madera aserrada de roble con calidad estructural fue la segunda más demandada en España por proyectistas y prescriptores en 2022, solo por detrás de la madera de pino insigne (*Pinus radiata* D. Don), según indica Riesco (2025), citando a López-Corralo (2022). El duramen constituye el principal componente de los productos de madera de roble, ya que la albura solo se acepta en pequeñas proporciones y para productos de menor valor (Riesco, 2001).

A nivel nacional, la superficie ocupada por robledales de *Q. robur* y/o *Q. petraea* es de 246.579 hectáreas, con unas existencias de 49.060.448 m³ de volumen con corteza (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico - MITECO, 2023). La especie también tiene una gran importancia económica, registrando un volumen anual de corta de 148.121 m³ en 2023, con un precio estimado en pie de 58,9 €/m³ (MITECO, 2023).

En el contexto regional, el roble es el árbol caducifolio más extendido en Galicia (noroeste de España), donde ocupa aproximadamente 125.000 ha en masas puras (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente - MAGRAMA, 2011-2017). Esta especie se distribuye principalmente en las zonas interiores de la comunidad, sin influencia marítima directa, aunque dentro de la región atlántica. Además de las masas puras, en las provincias orientales gallegas, donde las especies de producción son menos abundantes, el *Quercus robur* aparece en mezcla con otras frondosas autóctonas como el melojo (*Quercus pyrenaica*), el castaño (*Castanea sativa*) y el abedul (*Betula spp.*), cubriendo 122.000 hectáreas. Estos bosques mixtos son importantes desde el punto de vista de la biodiversidad, ocupando aproximadamente la misma extensión en Galicia que los robledales puros de *Q. robur*, y representan un 9 % de los pies mayores de la comunidad. También se halla en masas mixtas con otras frondosas como *Eucalyptus spp.*, y con coníferas como *Pinus pinaster*, alcanzando una superficie de aproximadamente 125.000 hectáreas. Considerando estos datos de existencias, el *Quercus robur* representa alrededor del 26 % de la superficie forestal total de Galicia (MAGRAMA, 2011-2017).

Aunque el roble tiene usos variados, su aprovechamiento es desigual. Los troncos se clasifican visualmente para identificar el uso más adecuado. Los de mayor tamaño (más de 2,5 m de longitud) y con menos defectos externos son solicitados por la industria del chapeado para aplicaciones decorativas. Sin embargo, el principal mercado para los troncos nacionales es la industria del aserrado, que utiliza troncos de baja calidad para fabricar productos como traviesas de ferrocarril y, ocasionalmente, vigas para construcción. Algunos aserraderos también producen parquet, duelas para tonelería, muebles, elementos de carpintería y quillas de barcos,

entre otros productos de alto valor añadido (Pastor y Salgado, 1999). A pesar de esta versatilidad, solo el 10 % de la madera de roble cortada en España es apta para tonelería o muebles, el 50 % se destina a traviesas o suelos, y el 40 % restante se considera residuo y se utiliza como leña (Riesco Muñoz, 2001).

A nivel europeo, el consumo de madera de roble es relativamente estable. El interés mostrado por arquitectos y diseñadores en su uso para construcción y suelos compensa la reducción en el consumo de madera aserrada por parte de la industria del mueble. No obstante, el abastecimiento de esta especie de madera no está asegurado en Europa. Esta situación se debe a varios factores críticos, como la reducción en la oferta de roble francés para estructuras, la intensa exportación de trozas de roble europeo hacia China, y el déficit general en madera de frondosas generado por la destrucción de los bosques proveedores fuera de Europa y la guerra entre Rusia y Ucrania, dos grandes productores de madera de roble (López-Corralo 2022, citado en Riesco, 2025). Por consiguiente, la madera aserrada de roble de procedencia española presenta un mercado potencial en Europa (Riesco, 2025).

3.7.2 Las especies frondosas como madera estructural

Históricamente, el suministro de madera para la construcción en Europa ha estado dominado tradicionalmente por especies de coníferas, y, consecuentemente, la normalización europea en este ámbito está más desarrollada (Catterou et al., 2022).

La creciente atención hacia las frondosas como recurso renovable y abundante ha marcado una transformación significativa en el sector maderero europeo. La idoneidad de estas especies ante el cambio climático, junto con el aumento de la demanda mundial de recursos locales y la necesidad de bosques más biodiversos, está incrementando el interés por las especies de frondosas como fuente de madera para la construcción (Aicher et al., 2016; Morin-Bernard et al., 2020a, b). La intensificación de la conversión de plantaciones de monocultivo hacia bosques mixtos conduce a un cambio en la composición de las especies disponibles (Buschalsky et al., 2022). Esta tendencia continuará en las próximas décadas, influenciando la disponibilidad de materias primas para la industria maderera.

Esta situación motiva la sustitución sustancial de maderas de coníferas por maderas de frondosas, lo que representa una oportunidad para desarrollar nuevos productos con propiedades y características únicas. Por ejemplo, ya se han estudiado enfoques innovadores de modificación, mediante tratamientos hidrotérmicos, recubrimientos superhidrofóbicos o retardantes de fuego, para mejorar las propiedades de las frondosas. Asimismo, se han realizado numerosos estudios sobre las interacciones adhesivo-madera en productos de madera estructural fabricados con especies frondosas.

La abundante riqueza de especies de árboles caducifolios ofrece una extraordinaria variedad de materiales, lo que conlleva un vasto potencial de investigación y aplicación. Además, la madera de especies frondosas suele presentar mejores propiedades mecánicas que las coníferas y, en general, poseen mayor resistencia a la intemperie, al fuego y un mejor acabado estético (Linsenmann, 2016).

Las frondosas tienen también potencial de aplicación en la fabricación de productos de madera de ingeniería (EWP), como la madera microlaminada, la madera laminada encolada o la madera contralaminada. El panorama de la investigación sobre CLT de madera de frondosas se ha expandido considerablemente en los últimos años, con un número creciente de investigadores y empresas que exploran la inclusión de especies de madera de frondosas en la producción de CLT (Espinoza y Buehlmann, 2018). Cabe destacar que algunos grupos han iniciado proyectos que combinan tanto especies frondosas como coníferas en la fabricación de CLT (Brunetti et al., 2020; Hematabadi et al., 2021; Ma et al., 2021), lo que pone de manifiesto

un interés creciente en diversificar los materiales que integran los paneles de madera contralaminada.

Además, la creciente demanda de materiales de base biológica, sumada a la disminución esperada en la disponibilidad de madera de frondosas y a la intensificación de la competencia con el sector energético, impulsan la necesidad de valorizar este recurso (Németh, 2022). El aprovechamiento de las especies frondosas en productos de madera para la construcción, de alto valor añadido y larga vida útil, resulta fundamental en un escenario de mitigación del cambio climático. El trabajo realizado por Landry et al. (2021) evalúa el potencial de mitigación de carbono del manejo forestal en una simulación a 100 años, poniendo de manifiesto cómo el escenario de cambio climático provoca el aumento de especies frondosas a expensas de las coníferas. El estudio concluye que es fundamental adaptar la red industrial hacia una mayor capacidad de procesamiento de las frondosas para generar productos de larga vida útil, ya que esto es crucial para compensar las emisiones y preservar el potencial de mitigación del sector ante el cambio climático.

A pesar del potencial ya mencionado, las frondosas siguen estando subutilizadas en la práctica, dejando un potencial sin explotar en el mercado (Hansmann y Rosenfeld, 2022). Para avanzar en su uso, los fabricantes deben abordar cuestiones relacionadas con las diferencias en las propiedades del material entre maderas coníferas y frondosas, así como los retos que estas diferencias plantean en los procesos de producción, especialmente en la optimización de las tecnologías de desintegración, los procedimientos de clasificación de la madera aserrada y las tecnologías de secado (Hansmann y Rosenfeld, 2022).

Debido al aumento continuo del precio de las materias primas, la escasez ocasional en el mercado y la creciente demanda de los usuarios finales, la industria secundaria de la madera está impulsada a mejorar su rendimiento y aprovechamiento. En consecuencia, es crucial encontrar nuevas aplicaciones para las piezas pequeñas o de baja calidad, siendo el encolado una de las posibilidades más relevantes. Según Linsenmann (2016), en el futuro, la madera de frondosas se utilizará predominantemente en productos para la construcción. Es probable que los mayores volúmenes de tablas pequeñas se empleen en productos híbridos de madera laminada encolada (GLT) o madera contralaminada (CLT). Sin embargo, para este fin, es necesario determinar los límites de defectos admisibles en la madera que permitan fabricar un producto estructural que cumpla con las normas y requisitos de aplicación vigentes.

Un desafío técnico fundamental se relaciona con la clasificación. La resistencia a la flexión, o módulo de rotura (MOR), desempeña un papel vital en el diseño de estructuras de madera portantes. No obstante, algunos autores señalan la necesidad de revisión y adaptación de las normas de clasificación de la madera aplicables a especies de frondosas (Linsenmann, 2016). Además, la reutilización de residuos es clave, ya que se generan grandes cantidades de ellos, y existen pocos estudios dedicados al análisis de subproductos industriales de madera de pequeño tamaño o de tablas preclasificadas negativamente (Frühwald y Schickhofer, 2004, citado por Horváth y Fehér, 2022). La investigación preliminar indica que las tablas de roble de baja calidad, que actualmente se consideran residuos industriales, son adecuadas para su uso en madera laminada encolada (GLT) o madera contralaminada (CLT) estructural. Esta oportunidad de aprovechamiento ha sido explorada por distintos autores. Por ejemplo, el trabajo de Hofmann et al. (2022) se centró en el uso de pies de *Quercus petraea* de pequeño diámetro procedentes de Alemania, elementos que a menudo no se utilizan o solo se destinan a leña. La investigación se centró en la determinación de diversas propiedades de la madera. Mediante tomografía y escaneo 3D, se evaluaron características físicas como la densidad, la nudosidad y la presencia de defectos internos. Por otro lado, las propiedades mecánicas (MOE y MOR) se determinaron aplicando tanto la técnica de vibración (equipo Viscan) como ensayos de flexión

estática. Los resultados obtenidos indican que esta metodología de ensayo ofrece un potencial prometedor para la preclasificación de trozas de roble de pequeño diámetro. Horváth y Fehér (2022) investigaron el potencial de tablas de madera de roble, consideradas residuos de la producción industrial, para fabricar productos estructurales encolados (como GLT o CLT). Sus resultados indicaron que la totalidad de la muestra analizada podría clasificarse en la clase de resistencia D35 según la norma EN 338.

Otros trabajos se han centrado en la clasificación o mejora directa de los componentes estructurales. El roble fue una de las cuatro especies de frondosas (junto con el haya, el chopo y el castaño) incluidas por Thomas Catterou et al. (2022) en una gran base de datos francesa de ensayos de madera laminada encolada (GLT). El roble fue clasificado en la clase de resistencia D30 y sus datos experimentales se utilizaron para desarrollar un modelo numérico que predice la rigidez y la resistencia característica de las vigas GLT de frondosas. Por su parte, Straže y Novak (2022) analizaron trozas de roble europeo (*Q. robur* y *Q. petraea*) de alta calidad, confirmando una correlación positiva entre la calidad visual, el precio, y parámetros acústicos no destructivos, como la velocidad de onda y la eficiencia acústica relativa (*Relative Acoustic Conversion Efficiency*, RACE). Estos hallazgos validan el potencial de la evaluación acústica como una herramienta eficaz para la preclasificación y la valorización del recurso maderero. En cuanto a la mejora de propiedades, Novosel et al. (2021) realizaron un estudio comparativo sobre el refuerzo de vigas laminadas de madera de roble utilizando fibras de carbono. Los resultados reportaron un incremento de hasta el 105 % en la capacidad de carga y del 94 % en la rigidez.

Para optimizar el aprovechamiento industrial de las maderas de especies frondosas, resulta imprescindible abordar las dificultades que emanan de su compleja estructura anatómica y su química superficial, especialmente en lo relativo a la efectividad de la adhesión. El potencial de aplicación de la madera está íntimamente vinculado a sus características anatómicas y morfológicas (Pushkin et al., 2015). La madera de coníferas se caracteriza por una anatomía más sencilla, compuesta primordialmente por traqueidas axiales (Livani et al., 2021). En contraposición, las frondosas presentan una estructura significativamente más compleja, en la que se organizan células fibrosas densamente agrupadas junto a elementos vasculares encargados de la conducción de agua, cuyo tamaño y distribución son variables (Ramage et al., 2017). Esta complejidad inherente y la mayor densidad de las frondosas afectan de manera directa su composición química superficial, lo cual complica su uso en comparación con las coníferas (Musah et al., 2021). Este desafío es particularmente relevante en los procesos de fabricación de productos de madera que requieren una adhesión eficiente. La alta concentración de sustancias intrínsecas a la madera, conocidas como extractos, es un factor determinante que influye en la interacción entre la madera y el adhesivo (Musah et al., 2021). Los extractos tienen la capacidad de modificar propiedades superficiales, tales como la polaridad, la humectabilidad y la permeabilidad, obstaculizando de manera directa el adecuado fraguado y curado del adhesivo empleado (Bockel et al., 2019). Por lo tanto, para asegurar la plena incorporación de las frondosas como materia prima en la producción de productos avanzados, se requiere el conocimiento y control de estos aspectos relacionados con la anatomía y naturaleza del material, permitiendo así una unión robusta y fiable de los componentes.

No obstante, a pesar de los mencionados retos, y como se ha demostrado a partir de la bibliografía de referencia, existe un creciente interés en el uso de especies frondosas como materia prima para productos de madera técnica (Blanchet et al., 2025).

4 MATERIAL Y MÉTODOS

4.1 EQUIPO HUMANO

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo con el equipamiento y la infraestructura disponibles en la Plataforma de Enxeñaría da Madeira Estrutural (PEMADE), plataforma tecnológica perteneciente a la Universidade de Santiago de Compostela y ubicada en la Escola Politécnica Superior de Enxeñaría del Campus de Lugo.

El desarrollo del trabajo contó con la participación del personal de PEMADE, en concreto: Manuel Guaita Fernández, director científico de PEMADE y el equipo técnico de investigación formado por Belén Feijóo Lombao, Jose Antonio Lorenzana Fernández, Manuel Rodríguez Buján y Mónica Ruy.

Asimismo, durante la fase experimental en campo, aserradero y laboratorio, colaboraron las técnicas de investigación Andreina Vargas Carrion, Daniela Lourenço dos Santos, Helga Peral Varela y Martina Fernández Campos.

Para algunas tareas específicas, se contó con la colaboración de diversas entidades y profesionales:

- Ensayos de campo y aserradero: Esther Merlo Sánchez y Miguel Piñeiro (directora y técnico de la empresa Madera Plus) llevaron a cabo los ensayos con los equipos Hitman ST300 y Hitman HM220.
- Procesamiento forestal: El personal de la empresa Maderas Exfopino S.L. ejecutó la corta, saca y aserrado de los pies.
- Secado: Esta fase se realizó en el laboratorio de la Escola de Enxeñaría Forestal de Pontevedra, perteneciente a la Universidade de Vigo, con la participación del profesor Óscar González-Prieto.
- Preparación de probetas: Participaron Manuel Goyanes González, carpintero colaborador en PEMADE, y el Centro Integrado de Formación Profesional, Politécnico de Lugo, a través del profesor José Castor Corral Domínguez.
- Ensayos de compresión: Los ensayos de probetas prismáticas se ejecutaron en el Laboratório de Materiais e Estruturas (LME) de la Faculdade de Engenharia Agrícola de la Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), por el técnico Paulo Gustavo Krejci Nunes y bajo la supervisión de Raquel Gonçalves y Rafael Gustavo Mansini Lorensani.

4.2 EQUIPO MATERIAL

4.2.1 Equipos de ondas acústicas

4.2.1.1 Equipos de ultrasonidos

4.2.1.1.1 USLab

El USLab (*Ultrasound Laboratory*) es un equipo portátil de ensayo no destructivo diseñado por la empresa Agricef (Campinas, Brasil) para la medición del tiempo de transmisión de onda ultrasónica.

El sistema consta de una consola portátil con pantalla digital que muestra las mediciones en tiempo real en microsegundos (μs), con una resolución de $0,1 \mu\text{s}$. Permite la conexión de un osciloscopio y opera mediante dos sensores piezoeléctricos intercambiables de diferentes frecuencias. El equipo se alimenta mediante una batería interna, aunque también puede conectarse a la red eléctrica a través de un transformador.

El equipo permite la incorporación de sensores de punta cónica o planos. Si se utilizan sensores de punta cónica, es imprescindible realizar taladros en la madera para asegurar un acople correcto. Por otro lado, si se opta por sensores planos, el acople se garantiza mediante el uso de gel. Para esta tesis doctoral, se utilizaron sensores planos y cónicos de 45 kHz fabricados por la empresa UltraTest (Achim, Alemania). En el caso de los sensores planos, se utilizó gel ecográfico medicinal como acoplante.

Respecto a la distancia de medición, la longitud mínima de uso viene dada por la frecuencia de los sensores utilizados. Por ejemplo, para sensores de frecuencia entre 41 y 50 kHz, como los utilizados en esta investigación, la norma brasileña ABNT-NBR 15521:2007 establece esta longitud mínima en aproximadamente 30 cm.

En esta tesis doctoral el equipo USLab se utilizó para medir la velocidad de propagación de la onda en árboles en pie, trozas, tablas y láminas mediante configuraciones directas (testa-testa) e indirectas (superficiales).

4.2.1.1.2 Epoch 600

El equipo EPOCH 600, fabricado por la empresa Olympus (Tokio, Japón), es un equipo portátil de ultrasonidos para ensayos no destructivos, apto para su uso tanto en interiores como en exteriores. Mediante el método de transmisión directa (emisor-receptor), determina el tiempo de vuelo (ToF) de la onda.

El equipo está dotado de una pantalla LCD a color VGA (640 x 480 píxeles) y opciones de alimentación flexibles (red eléctrica, pilas o batería recargable con 12-13 horas de autonomía). Una limitación operativa crítica es la necesidad de un acoplamiento riguroso mediante material de contacto para garantizar la calidad de la medición.

Este equipo admite sensores de diferentes frecuencias. Para los ensayos realizados en esta tesis se utilizan transductores planos Panametrics-NDT Olympus (Massachusetts, EE.



Figura 3. Equipo USLab.

UU.) de ondas longitudinales (modelo A103S) y transversales (modelo V153), ambos con una frecuencia nominal de 1,0 MHz y un diámetro externo de 15 mm. Como acoplante se utilizó glucosa de almidón puro, lo que facilitó mantener una presión constante durante el ensayo.

Este equipo se destinó a las mediciones en probetas pequeñas libres de defectos (prismas y poliedros).



Figura 4. Equipo Epoch 600.

4.2.1.2 Equipos de ondas de impacto

4.2.1.2.1 *MicroSecond Timer*

El MicroSecond Timer (MST), fabricado por la empresa Fakopp Enterprise, (Sopron, Hungría), es un dispositivo portátil diseñado para medir el tiempo de vuelo (ToF) de una onda acústica generada por impacto mecánico.

El sistema utiliza dos sensores (emisor y receptor) con forma de pincho o punzón que se insertan en la madera entre 1 y 2 cm, generalmente mediante golpes con un martillo de goma. A diferencia de los equipos de ultrasonidos, el MST no requiere pretaladros ni gel de acople.

La medición se inicia con un golpe limpio de un martillo de 100 g sobre el sensor emisor, generando un frente de ondas con una frecuencia acústica de 23 kHz. El receptor piezoeléctrico detecta el tiempo de llegada de la onda. El equipo registra este tiempo de transmisión en microsegundos (μs), ofreciendo una resolución de $1 \mu s$ en la lectura de los datos. La consola portátil del MST, donde se reflejan las mediciones en una pantalla numérica, se alimenta mediante una batería de 9 V.

El equipo MST se empleó para medir la velocidad de propagación de la onda en árboles en pie, trozas, tablas y



Figura 5. Equipo Microsecond Timer.

láminas, utilizando configuraciones directas e indirectas.

4.2.1.2.2 *Hitman ST300*

El Hitman ST300 fabricado por la empresa Fibre-gen (Christchurch, Nueva Zelanda), es un equipo portátil de ondas de impacto diseñado principalmente para la evaluación de árboles en pie.

El sistema consta de una sonda transmisora (Tx), una sonda receptora (Rx) y un registrador de datos inalámbrico. Las sondas se insertan en el fuste alineadas verticalmente, manteniendo una distancia que oscila generalmente entre 0,5 y 1,5 m. Con la cara de acero del martillo que acompaña al equipo se golpea sobre la cabeza de la sonda Tx, un segundo golpe registra una lectura. Al igual que el MST, no requiere gel ni pretaladros.

El equipo determina el tiempo que tarda el impulso en recorrer la distancia entre los puntos de medición para calcular la velocidad de propagación de la onda, la cual puede emplearse para estimar el coeficiente de rigidez.

Una característica distintiva y facilitadora del Hitman ST300 es la medición automatizada de la distancia entre transductores mediante láser. Esta función supone una ventaja significativa, ya que elimina una potencial fuente de error frecuente en métodos manuales.

El equipo Hitman ST300 utilizado en esta tesis doctoral pertenece a la empresa Madera Plus, responsable de su utilización para la realización de las mediciones en árbol, troza y tabla verde.

4.2.1.3 Equipos de vibración

4.2.1.3.1 *Timber Grader MTG*

El Timber Grader MTG (*Mobile Timber Grader*), fabricado por la empresa Brookhuis Applied Technologies (Enschede, Países Bajos), es un equipo portátil basado en la técnica de vibraciones inducidas (resonancia) para la clasificación de madera aserrada.

El dispositivo mide la frecuencia natural del primer modo de vibración longitudinal mediante un acelerómetro de contacto integrado en la consola. Para su operación, el operador debe introducir los datos de la especie, el contenido de humedad, y las dimensiones de la pieza en el software del equipo. Adicionalmente, puede conectarse a dos balanzas (capacidad 200 kg, resolución 10 g) para registrar la masa y calcular la densidad, siempre que se introduzcan previamente las dimensiones en el software.

El ensayo consiste en presionar la consola contra la testa de la pieza y activar el percutor interno (o usar un martillo externo si es necesario). El software proporciona la frecuencia natural (resolución 1 Hz), el coeficiente de rigidez longitudinal (C_{LL}) y la clase resistente. Se recomienda una temperatura de funcionamiento entre -10 y 40°C.

El equipo MTG presenta varias limitaciones operacionales, de medición y de software. En el ámbito operativo, el equipo no puede ser utilizado si pierde la conexión



Figura 6. Equipo Hitman ST300.

inalámbrica a un ordenador, cuyo alcance máximo es de 100 metros; además, las balanzas necesitan conexión por cable y la consola no opera conectada a la red eléctrica si la batería se agota. En cuanto a las restricciones físicas de la pieza, el método exige que la madera esté libre de coacciones para poder vibrar, y el programa del MTG no permite su uso con el percutor interno en piezas de longitud menor a 1,5 metros.

En la presente tesis se empleó el modelo MTG 960 para determinar la velocidad de propagación de la onda en trozas, tablas y láminas, mediante mediciones directas (testa-testa).



Figura 7. Equipo Timber Grader MTG y detalle del extremo de la consola en la zona de salida del percutor interno.

4.2.1.3.2 Hitman HM220

El Hitman HM220 (Fibre-gen) es un dispositivo portátil de vibración inducida diseñado para medir la velocidad acústica en trozas y vigas.

El equipo integra un acelerómetro de contacto y un software que calcula automáticamente la velocidad tras introducir la longitud de la pieza. La medición se realiza golpeando la testa con un martillo mientras el equipo registra la información de la frecuencia natural de la pieza. El ensayo se realiza en una sola sección transversal del material, donde el impacto y la captación del resultado de la vibración se realizan en la misma cara de la pieza. Esto permite que el ensayo sea ejecutado por un solo operador, incluso en piezas de grandes dimensiones (rango operativo de 2 a 50 m).

Como método de vibración, el ensayo requiere que la pieza se encuentre biapoyada y libre de coacciones, eliminando interferencias externas para que pueda vibrar libremente.

El equipo Hitman HM220 utilizado en esta tesis doctoral pertenece a la empresa Madera Plus, responsable de su utilización para la realización de las mediciones en troza y tabla verde.



Figura 8. Equipo Hitman HM220.

4.2.1.3.3 Portable Lumber Grader

El Portable Lumber Grader (PLG), fabricado por la empresa Fakopp Enterprise, es un sistema portátil de vibraciones inducidas destinado a la clasificación de madera aserrada estructural. Su principal función es medir la frecuencia natural de vibración de la madera, tanto longitudinal como transversal.

El equipo se compone de varios elementos esenciales diseñados para facilitar la medición en laboratorio o industria: incluye una balanza con una capacidad máxima de 125 kg y una resolución de 10 g, un amplificador de señal para la balanza, y una base de madera acolchada para apoyar la pieza. La captación de la señal se realiza mediante un micrófono unidireccional, que funciona como un sensor sin contacto, con un rango de frecuencias de 100 a 15.000 Hz y una sensibilidad de -56 dB. El martillo proporcionado con el equipo es de 200 g de masa.

Para el ensayo, se coloca la pieza sobre la base acolchada y la balanza, se introducen los datos dimensionales, el contenido de humedad (CH) y el CKDR (*Concentrated Knot Diameter Ratio*), y se golpea con el martillo. El micrófono registra la presión sonora y el software aplica la transformada rápida de Fourier para obtener la frecuencia natural del primer modo de vibración longitudinal, con una resolución de 1 Hz. Una vez obtenida la frecuencia y la densidad, el programa calcula el módulo de elasticidad dinámico y asigna la clase resistente. Se recomienda su uso en temperaturas entre 5 y 40 °C.

Una limitación fundamental de esta técnica es que la pieza ensayada debe estar libre de coacciones para vibrar sin restricciones.

El equipo PLG se empleó para medir la velocidad de propagación de la onda en las tablas a la humedad de equilibrio higroscópico (12 %).



Figura 9. Equipo Portable Lumber Grader.

4.2.2 Equipo de Correlación Digital de Imágenes (DIC)

4.2.2.1 Aramis 3D

El equipo ARAMIS 3D, fabricado por ZEISS (anteriormente GOM GmbH; Oberkochen, Alemania), es un sistema óptico sofisticado cuyo funcionamiento se fundamenta en la técnica de Correlación Digital de Imágenes (DIC). Esta tecnología permite medir coordenadas tridimensionales para calcular las deformaciones de una probeta mediante un método “sin contacto” e independiente del material analizado.

El sistema opera mediante un módulo óptico de estereovisión, compuesto por dos cámaras de alta tecnología con sensores de alta resolución. El equipo puede trabajar con lentes desde 8 mm a 100 mm de distancia focal. En esta investigación se utilizó el modelo ARAMIS 12M rev 03. Este equipo consta de dos cámaras de 12 megapíxeles (resolución de 4096 x 3072 píxeles) equipadas con lentes Titanar B de 24 mm.

Las cámaras, de distancia focal fija, se encuentran instaladas sobre un soporte que permite el movimiento de las mismas en caso de necesidad. Este soporte está calibrado para facilitar la medida de la base (distancia entre las dos cámaras) y está unido a un sistema de sujeción mediante un cabezal que permite dirigir el sistema de cámaras hacia la zona de interés. Todo el conjunto descansa sobre un trípode regulable para su nivelación y estabilización.

Para la iluminación, el equipo incorpora un foco LED azul de alta intensidad, en este caso se utiliza el modelo Multiled LT-VP de la marca GS Vitec (Bad Soden-Salmünster, Alemania). El foco se posiciona enfrente a la probeta de ensayo. Las lentes de las cámaras llevan incorporados filtros de paso de banda. Estos filtros están calibrados para bloquear activamente todas las longitudes de onda de la luz, excepto la longitud de onda específica de la luz azul que el sistema está emitiendo. La luz azul mejora la nitidez y resolución espacial de las imágenes capturadas, reduce los efectos de difracción y reflexión indeseados en comparación con fuentes de luz blanca y aumenta el contraste del patrón de puntos o marcadores circulares utilizados para el análisis DIC. Así, el foco actúa como un sistema activo de filtrado de ruido óptico, garantizando que los desplazamientos medidos por el software de DIC se deban exclusivamente a la deformación mecánica de la madera y no a interferencias lumínicas o térmicas del entorno del ensayo.

El sistema utiliza su propio método de calibración interna, constituido por un patrón de calibrado que puede presentarse en forma de panel o cruz. Estos objetos de calibración presentan una rejilla regular de puntos y marcadores codificados auto-detectables, junto con un procedimiento de calibración específico basado en el método de *Bundle Adjustment* (BA), la identificación de esos puntos codificados permite reconocer las posiciones teóricas del resto de puntos del patrón, e incluso alertar al técnico en caso de que el patrón no se encuentre en la posición adecuada en cada paso del proceso. Existen diferentes tipos de objetos de calibración, cuya selección depende del área de medición. En esta tesis doctoral, al medir las deformaciones



Figura 10. Equipo Aramis 3D.

sobre un objeto de longitud máxima 2,5 m (lámina), es necesario que las cámaras estén más lejos y abarquen un campo de visión amplio, por ello la calibración del sistema Aramis 3D se realiza con el objeto: CC20/MV2000 x 2000. Esta cruz de calibración permite la medición sobre un volumen máximo de 2000 x 1500 mm. Esta cruz de calibración consiste en dos elementos rectangulares alargados, también denominados brazos. Ambos brazos están conectados entre ellos en un punto central y están fabricados con fibra de carbono.

Un patrón de puntos aleatorio o marcadores circulares aplicados en la superficie permiten el seguimiento preciso del comportamiento del material. El análisis de la deformación geométrica se realiza a través de un *software* específico, que, en el caso de esta investigación, se trata del software GOM Correlate, en la versión 2017 (2017 Hotfix 7, Rev 113517), desarrollado por GOM GmbH.

4.2.3 Máquinas de ensayos estáticos

4.2.3.1 Máquina de ensayos de flexión y tracción

Los ensayos estáticos realizados en el laboratorio de PEMADE se ejecutan empleando una máquina multiensayos, fabricada por la empresa Microtest S.A. (Madrid, España), equipada con un actuador eléctrico al que se acopla una célula de carga con una capacidad máxima de 200 kN (modelo PB2-F/200, fabricada por Microtest S.A.) y una precisión de 0,01 kN. Las células de carga utilizadas están calibradas por un laboratorio acreditado por la Entidad Nacional de Acreditación (ENAC), clasificada como Clase 0,5 con una incertidumbre de medición $(U) \leq 0,5 \%$.

La programación del método de ensayo, el control de parámetros en el transcurso del ensayo y la adquisición de datos, se realizó mediante el software Microtest (versión 1.0.108).



Figura 11. Máquinas de ensayo en el laboratorio de PEMADE.

4.2.3.2 Máquina de ensayos de compresión

Los ensayos de compresión sobre probetas prismáticas se llevaron a cabo en el Laboratorio de Materiais e Estruturas (LME) de la Faculdade de Engenharia Agrícola de la Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

Para la ejecución experimental se empleó una máquina universal de ensayos DL 30000 de la empresa EMIC (actualmente Instron; Paraná, Brasil), ajustando la placa de compresión a un transductor de carga de 50 kN, modelo U10 de la marca Grupo HBM (Darmstadt, Alemania) y disponiendo de una placa inferior para el apoyo de la probeta. El control de parámetros en el transcurso del ensayo y la adquisición de datos se lleva a cabo a través del software CatmanEasy (versión 3.3.3.51; HBM).

4.2.4 Equipos de medición de la deformación

En los ensayos de flexión a cuatro puntos, la determinación del módulo de elasticidad global (MOE_{global}) y local (MOE_{local}) se realizó mediante sensores de desplazamiento LVDT, de la empresa Schreiber Messtechnik GmbH (Oberhaching, Alemania). Estos sensores electromecánicos convierten desplazamientos lineales en señales eléctricas proporcionales. En concreto se empleó un sensor de desplazamiento de 60 mm con resolución 0,01 mm (modelo SM260.100.2.ST), para la medición del MOE_{global} y dos sensores de desplazamiento de 10 mm con resolución de 0,001 mm (modelo SM222.4.2.S), para la medición del MOE_{local} . Todos los dispositivos cuentan con calibración ENAC, clasificados como Clase 0,5.

Por otro lado, en los ensayos de compresión estática, la medición de deformaciones se efectuó mediante galgas extensométricas adheridas a las probetas prismáticas. Las galgas utilizadas, de la empresa Micro-Measurements Group (Carolina del Norte, EE. UU.), fueron del tipo C2A-13-125LW-350 simple, con una longitud efectiva de 3,18 mm y un ancho efectivo de 1,78 mm y galgas dobles del tipo C2A-13-125LT-350, cada una con una longitud efectiva de 3,18 mm y un ancho efectivo de 3,81 mm.

4.2.5 Equipo para la fabricación de uniones dentadas

La fabricación de las láminas con uniones dentadas (*finger-joint*) se llevó a cabo en las instalaciones del laboratorio de PEMADE. Para ello, se empleó una línea automatizada modelo Ultra de la empresa Weinig Grecon GmbH & Co.KG (Tauberbischofsheim, Alemania).

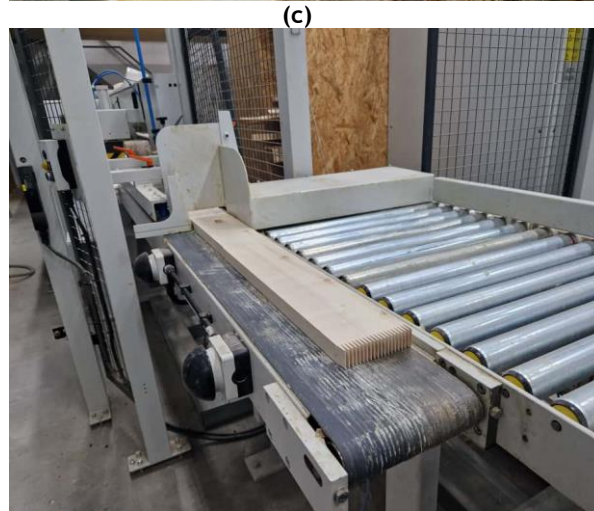
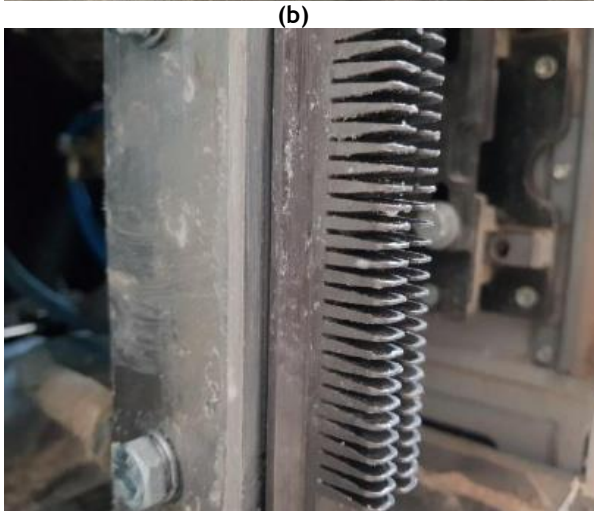
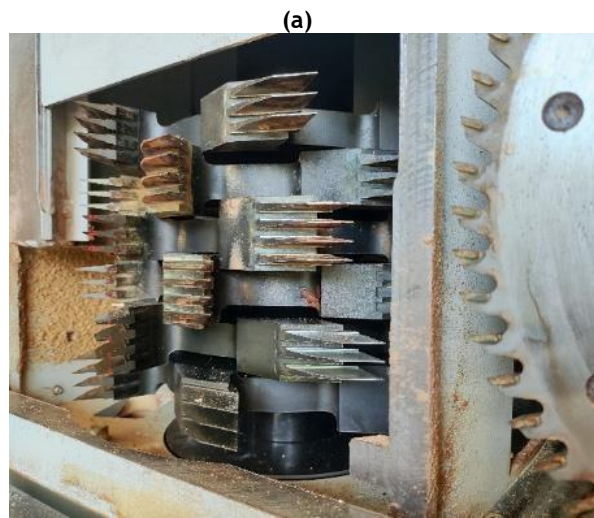
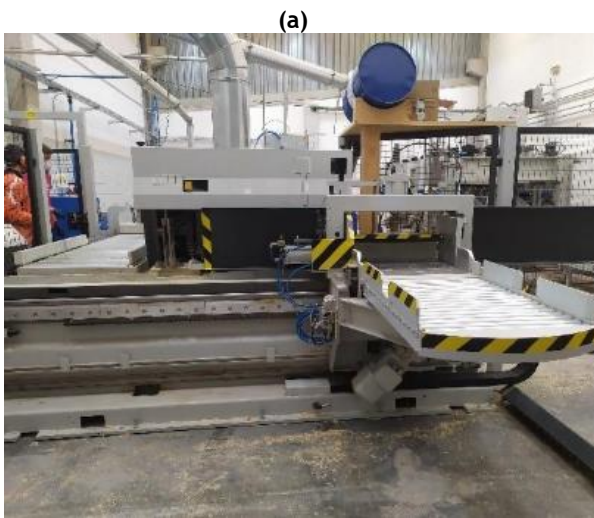
La línea de *finger-joint* es un equipo que permite el empalme de testa de piezas de madera de corta-media longitud, posibilitando la fabricación de láminas que luego podrán ser utilizadas en la producción de productos estructurales. El equipo utilizado en este trabajo de investigación permite la fabricación de láminas de hasta 6 m de longitud.



Figura 12. Línea para fabricación de uniones dentadas (*finger-joint*) disponible en el laboratorio de PEMADE.

La línea de *finger-joint*, de manera general, está compuesta por los siguientes módulos con sus correspondientes características técnicas:

- a. Máquina fresadora tipo *finger-joint* con mesa giratoria: Fresadora individual tipo *finger-joint* con cinta transportadora, mesa de rodillos rotativa de giro manual (Figura 13a). Guía de rodillos para el desplazamiento preciso de la mesa fresadora y aplicación de presión en las piezas de trabajo mediante dispositivos horizontales y verticales.
- b. Sistema encolador para cola de poliuretano (PUR): Sistema encolador con cabeza encoladora ajustable y giratoria (Figura 13b).
- c. Unidad de ensamble: vía de rodillos en la zona de entrada y cinta transportadora para el montaje de la lámina. Pulsador manual para solicitar la entrada de tablas para la alimentación de la prensa (Figura 13c).
- d. Prensa y salida de prensa (Figura 13d).



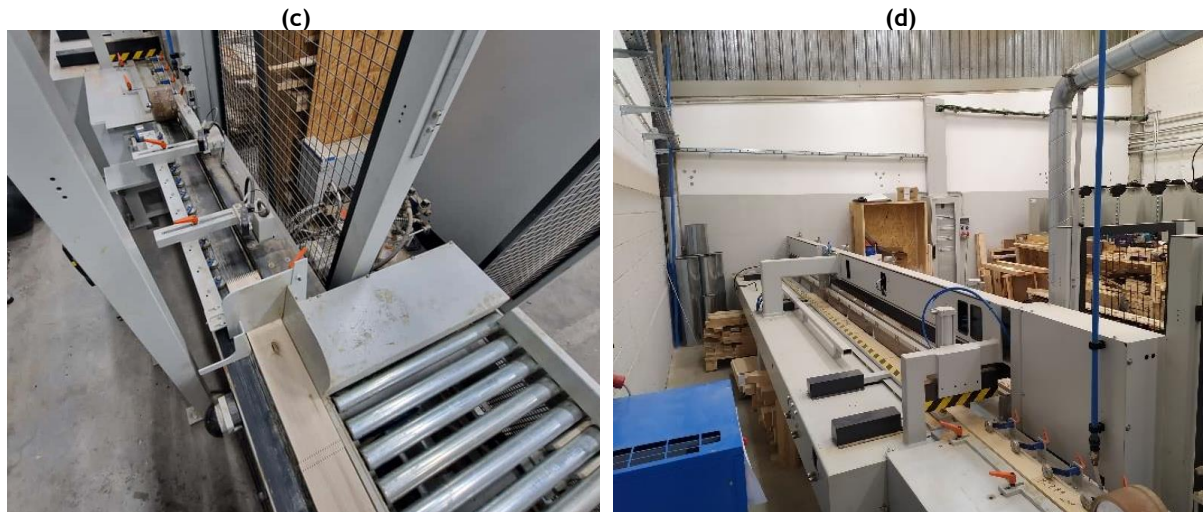


Figura 13. Línea para fabricación de uniones dentadas (*finger-joint*): (a) detalle de la la cinta transportadora y máquina fresadora; (b) detalle del sistema encolador; (c) unidad de ensamble; (d) prensa y salida de prensa.

4.2.6 Equipos de medición del contenido de humedad

4.2.6.1 Equipos del método de secado en estufa

La determinación del contenido de humedad (CH) mediante el método de secado en estufa se realizó siguiendo las directrices de la norma UNE-EN 13183-1:2002. El proceso de secado en estufa para la determinación del contenido de humedad (CH) de una pieza de madera aserrada requiere de una estufa de circulación forzada, una balanza de alta precisión, y equipos auxiliares para la preparación de las muestras y medición de sus dimensiones, estos últimos indicados en el apartado 3.2.5.

Se utiliza una estufa de secado modelo DAF-635 de la marca Raypa (Barcelona, España), con rango de medida de 5°C a 250°C, y división de escala de 1°C. Este equipo está calibrado por un laboratorio acreditado ENAC para la temperatura de ensayo. Para obtener el peso anhidro, las muestras se introducen en la estufa a una temperatura de 103 ± 2 °C hasta que alcanzan masa constante.

La medición de la masa se llevó a cabo mediante una balanza electrónica digital modelo AV2102CM de la marca Ohaus (Nueva Jersey, EE.UU.), con un rango de medida de 0,5 g a 2100 g y una resolución de 0,01g. Esta resolución garantiza un error máximo del 0,1 %, cumpliendo con los requisitos normativos. Este equipo está también calibrado por un laboratorio acreditado ENAC en todo el rango de medida.

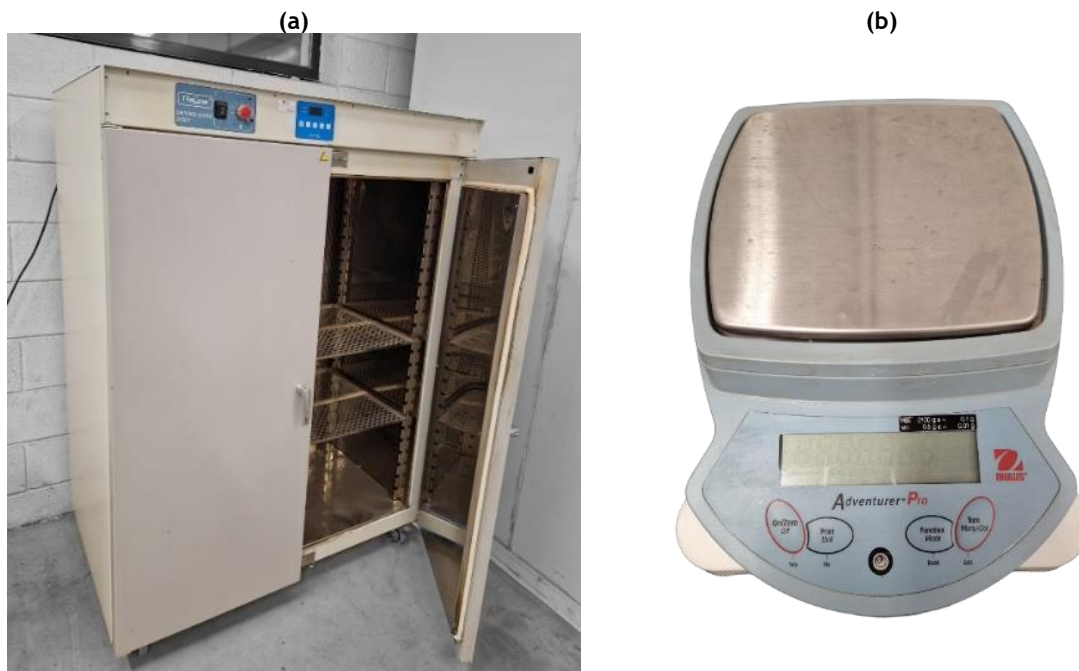


Figura 14. Equipos para la determinación del contenido de humedad: (a) estufa de circulación forzada y (b) balanza de precisión.

4.2.6.2 Xilohigrómetro de resistencia eléctrica

La estimación no destructiva del contenido de humedad (CH) se llevó a cabo mediante un xilohigrómetro de resistencia eléctrica modelo Hydromette RTU 600, fabricado por Gann Mess-u. Regeltechnik GmbH, (Gerlingen, Alemania), siguiendo las directrices de la norma UNE-EN 13183-2:2002. El principio de funcionamiento se basa en medir la resistencia de la madera al paso de una corriente eléctrica, siendo este valor proporcional al CH.

El equipo consta de una unidad central alimentada por batería (9 V) a la que se conectan dos electrodos acoplados en dos clavos aislados. Se recomienda utilizar electrodos aislados, ya que la humedad superficial puede ejercer una fuerte incidencia en la lectura. En este caso se han utilizado clavos del modelo M18 – Teflón (Gann Mess-u. Regeltechnik GmbH), de 60 mm de longitud.

La inserción de los clavos se realiza mediante el sistema de impacto integrado en la empuñadura, o con una herramienta externa para montajes permanentes.

Para realizar la medición del contenido de humedad, es necesario seleccionar la especie de madera y la temperatura ambiente en la consola previamente. Los electrodos se deben introducir hasta una profundidad de un tercio del grueso (canto) de la pieza, y deben estar



Figura 15. Xilohigrómetro de resistencia eléctrica.

separados una distancia de 30 mm entre ellos. Es fundamental que la medición se realice en una zona de la cara de la pieza que esté libre de defectos (como nudos o bolsas de resina) y separada al menos 30 cm del extremo (testa). La inserción de los electrodos debe hacerse perpendicularmente al eje longitudinal de la pieza, o en la dirección de las fibras si el manual no especifica lo contrario. La lectura del CH se toma tras un tiempo de espera de 2 s a 3 s.

El equipo está diseñado para operar correctamente en temperaturas ambientales que oscilan entre -10 °C y 60 °C. Dispone de un sensor para medir la humedad relativa y la temperatura ambiente.

Se debe considerar que la presencia de productos protectores en la madera, como sales hidrosolubles o ignífugas, puede afectar a la lectura del aparato. Finalmente, este método de estimación solo es válido cuando el contenido de humedad se encuentra entre el 7 % y el 30 %, y se recomienda no medir humedades superiores al 30 % debido a que las medidas pueden ser menos exactas.

4.2.7 Equipos y material auxiliar

Además de los principales equipos descritos anteriormente se hace uso de instrumentación complementaria para la medición, extracción y preparación de muestras y ejecución de los ensayos.

- Equipos de medición dimensional y masa:
 - Forcípula marca Gottlieb NESTLE GMBH (Dornstetten, Alemania) modelo Waldmeister de 600 mm y forcípula de la marca Haglöf (Långsele, Suecia) de 500 mm, para la medida del diámetro del fuste en el árbol en pie y de las trozas extraídas. Ambos equipos son propiedad del Departamento de Ingeniería Agroforestal de la EPS de Lugo.
 - Flexómetros Stanley Black & Decker (Connecticut, EE. UU.) de 3 y 5 metros. Equipos con resolución de 0,1 mm y con certificado de calibración ENAC. Utilizados para mediciones del diámetro de copa en campo, longitud de las trozas en aserradero, y medida de la longitud de tablas y láminas. Este equipo se utiliza también para el posicionamiento del equipamiento de ensayos estáticos de flexión y tracción.
 - Hipsómetro modelo VERTEX 5, de la marca Haglöf, para la medición de la altura de copa y altura total de los pies. Este equipo pertenece al Departamento de Ingeniería Agroforestal.
 - Calibre digital modelo 500-184-30, del fabricante Mitutoyo (Kanagawa, Japón), para la medida de las dimensiones de las tablas, rebanadas y probetas pequeñas. Con un rango de medida hasta 150 mm y división de escala de 0,01 mm. Equipo con certificado de calibración ENAC e incertidumbre de medición $U \leq 0,01$ mm.
 - Calibre digital Mitutoyo, Digimatic Caliper, para la medición de las dimensiones de los prismas ensayados a compresión.
 - Balanza para la determinación de la masa de las tablas, modelo Ranger RD35LD, marca Ohaus (Nueva Jersey, EE. UU.), con rango de medida hasta 35 kg y división de escala de 0,001 kg. Equipo con certificado de calibración ENAC para todo el rango de medida.
 - Balanza modelo AS 2000C, del fabricante Marte Científica (Minas Gerais, Brasil) para el pesaje de las probetas prismáticas.
- Equipos para la regulación y control ambiental:
 - Cámara climática de la empresa Dycometal (Barcelona, España), modelo CM 0/42555M, para el acondicionamiento de las probetas de manera previa al ensayo. Equipo con certificado de calibración ENAC para temperatura y humedad en los puntos 20 °C y 65 %.

- Termohigrómetros marca Testo (Titisee-Neustadt, Alemania) modelo 175-H1, para el registro de las condiciones ambientales en el transcurso de los ensayos estáticos, en el interior de la cámara climática de acondicionamiento, para la comprobación de la temperatura previa a la medición con el xilohigrómetro y durante el proceso de fabricación de uniones dentadas. Equipos con certificado de calibración ENAC para temperatura y humedad en los puntos 20 °C y 65 %.
- Equipos de extracción de muestras y preparación de probetas:
 - Barrena Pressler, de la marca Haglöf, para la extracción de testigos cilíndricos en el árbol en pie.
 - Equipos de carpintería para la extracción de rebanadas, preparación de probetas pequeñas y saneado de tablas previo a la fabricación de uniones dentadas: tronadora abatible modelo TM33W de la marca Virutex (Barcelona, España); tupí-escuadradora modelo Minimax st 3c, del fabricante SCM Group (Rimini, Italia).
 - Fresas de longitud 20 mm del fabricante Leuco (Horb am Neckar, Alemania) para la fabricación de la unión dentada.
- Material auxiliar:
 - Taladro modelo GSB 18V-55, marca Bosch (Gerlingen, Alemania), con broca cónica. Utilizado para hacer las cavidades en las que se insertó el transductor cónico del equipo USLab en las mediciones en árbol, troza, tabla y lámina.
 - Báscula de gancho modelo PCE-CS 1000 del fabricante PCE Instruments (Hochsauerland, Alemania) para la obtención del peso de las tablas saturadas en aserradero.
 - Escuadras universales de carpintería de diferentes longitudes, utilizadas para marcar las piezas ensayadas y en el proceso de clasificación visual.
 - Galga de espesor 0,2 mm para medir la profundidad de las fendas.
 - Gel ecográfico de uso medicinal como sustancia acoplante en los ensayos con los equipos de ultrasonidos.
 - Puente grúa para el movimiento del material (madera y útiles de ensayo) en el interior del laboratorio.
 - Trazador, utilizado para la medición de la desviación de la fibra.
 - Percha metálica como elemento de anclaje del sensor de desplazamiento, utilizado para la obtención del módulo de elasticidad local en el ensayo de flexión.
 - Puntas metálicas para el apoyo de la percha.
 - Angulares metálicos, que sirven como punto de contacto para la medición del captador de desplazamiento.
 - Apoyos metálicos para el ensayo de flexión.
 - Puente de flexión y 2 cargas.
 - Placas metálicas posicionadas debajo de las cargas, para evitar el aplastamiento de la probeta en el ensayo de flexión.
 - Mordazas para la sujeción de láminas en el ensayo de tracción.
- Material consumible:
 - Pintura en aerosol para la identificación de árboles en campo y de trozas en aserradero.
 - Rotuladores indelebles para la codificación de las tablas y probetas pequeñas, y el marcaje de singularidades en el proceso de fabricación de láminas.

- Lijas de óxido de aluminio con diferente número de grano para la preparación de superficies en probetas pequeñas.
- Adhesivo Loctite® HB S709 Purbond, un adhesivo monocomponente a base de poliuretano (PUR), cuyo fraguado se produce por reacción con la humedad de la madera y la humedad ambiental, utilizado para la fabricación de la unión dentada.
- Adhesivo de cianoacrilato para la colocación de galgas extensométricas en las probetas prismáticas.
- Marcadores circulares para la identificación de los puntos de referencia en el ensayo con Aramis 3D.

4.3 ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE *QUERCUS ROBUR* A PARTIR DE MEDICIONES CON TÉCNICAS ACÚSTICAS

4.3.1 Planteamiento general

Los trabajos desarrollados se centran en la estimación de propiedades mecánicas de la madera de *Quercus robur* mediante el uso de técnicas acústicas, correlacionando los resultados obtenidos en diferentes etapas de procesamiento del material con los ensayos estáticos finales. Este proceso se desarrolló en una secuencia temporal, comenzando con el estudio del árbol en pie, siguiendo con la troza, y finalizando con el análisis de la tabla aserrada, tanto en condiciones de saturación como en equilibrio higroscópico.

La investigación se inició en la fase de árbol en pie mediante la selección de 62 individuos de *Quercus robur* procedentes de tres parcelas de estudio localizadas en diferentes ayuntamientos de Galicia. En esta etapa inicial, se realizaron mediciones dendrométricas y ensayos no destructivos utilizando técnicas de ondas de impacto y ondas de ultrasonidos. Paralelamente, y mediante barrena de Pressler, se extrajeron testigos cilíndricos de cada árbol para determinar la densidad individual.

Posteriormente, se procedió a la fase de troza, seleccionando 5 árboles por parcela (15 árboles en total). De estos árboles se extrajeron entre 1 y 3 trozas, obteniendo un total de 33 trozas. Sobre estas trozas se llevaron a cabo mediciones longitudinales (directas) utilizando técnicas de ultrasonidos, ondas de impacto y vibración, así como mediciones superficiales (indirectas) con las técnicas de ultrasonidos y ondas de impacto.

A continuación, el material fue aserrado para obtener 487 tablas de dimensiones nominales 25 mm x 95 mm x 2550 mm. Una vez aserradas y codificadas, se realizaron mediciones longitudinales no destructivas sobre ellas, repitiendo las técnicas de ultrasonidos, ondas de impacto y vibración, además de registrar las dimensiones y el peso.

Tras un proceso de secado controlado en la Escuela de Ingeniería Forestal de Pontevedra (Universidad de Vigo), durante el cual la humedad de las tablas se redujo del 74,5 % al $13,3 \pm 2$ %, se llevó a cabo una selección de 254 tablas para la aplicación de métodos acústicos (ondas de tensión, ultrasonidos y vibración). A continuación, se seleccionó una submuestra aleatoria de 75 tablas (25 por parcela). Sobre estas 75 piezas se realizó la clasificación visual conforme a los criterios de calidad definidos en las normas españolas (UNE 56544, UNE 56546, aplicando criterios para coníferas de calidad ME-2 y castaño de calidad MEF, respectivamente) y de la norma francesa NF B 52-001-1 (considerando los criterios para la madera de roble francés de Clase 3).

Sobre estas 75 tablas se aplicó, también, el equipo Portable Lumber Grader (PLG). El trabajo concluyó con los ensayos físico-estáticos de flexión según la norma UNE-EN 408:2011+A1:2012, determinando la resistencia a la flexión, los módulos de elasticidad local y global, la humedad y la densidad de la probeta.

Siguiendo la metodología definida en la norma UNE-EN 384:2016+A2:2023 se determina la clase resistente de la madera de *Quercus robur* ensayada a flexión, conforme a la norma UNE-EN 338:2016, que fue considerada la referencia para la comparación de resultados entre técnicas. Para las fases de árbol, troza y tabla húmeda, se planteó una metodología de clasificación basada en los modelos de correlación entre los parámetros acústicos y el MOR o MOE obtenidos en los ensayos de flexión. Cuando no fue posible disponer de modelos con una buena capacidad predictiva, el material se clasificó considerando el resultado de la velocidad de propagación de la onda y aplicando la norma brasileña ABNT-NBR 15521:2007. Este análisis se llevó a cabo sobre dos muestras de material: 1) *Muestra conjunto*, en la que se considera el conjunto completo de datos obtenidos de todos los árboles, trozas y tablas; y 2) *Muestra troza basal*, en la que se consideran los datos obtenidos de todos los árboles, trozas basales y tablas extraídas de la troza basal.

4.3.2 Árbol en pie

4.3.2.1 Material de ensayo

Se seleccionaron 3 parcelas de estudio, localizadas en diferentes ayuntamientos de Galicia (Figura 16); cada una de estas parcelas es identificada con una letra. La parcela M (ayuntamiento de Rois) está formada por una masa de pies de *Quercus robur*, mientras que las parcelas Q (ayuntamiento de Rois) y S (ayuntamiento de Santiago de Compostela), son masas mixtas de roble y pino.

Tras la identificación de las parcelas se escogieron aquellos pies con características apropiadas para la obtención de piezas estructurales, con fustes rectos e intentando evitar la presencia de abundantes ramificaciones, que conducen a la aparición de nudos en la madera. En total se analizaron 62 árboles; parcela M, 31 árboles; parcela Q, 11 árboles y parcela S, 20 árboles.

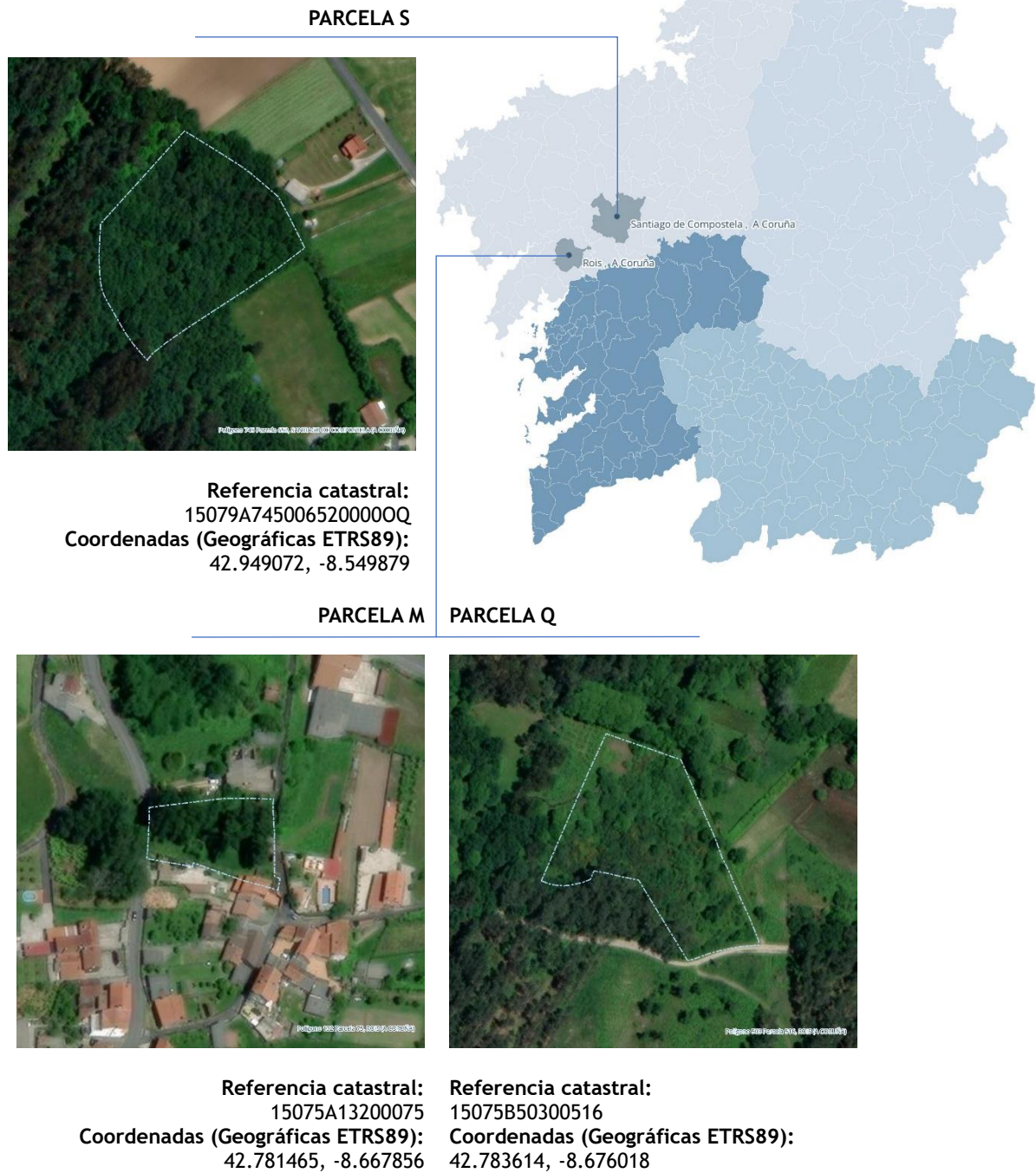


Figura 16. Ortofotos de las tres parcelas de estudio y su localización. Parcelas M y Q, situadas en el ayuntamiento de Rois (A Coruña); Parcela S, situada en el ayuntamiento de Santiago de Compostela (A Coruña).

4.3.2.2 Mediciones dendrométricas y no destructivas

Se prosiguió con mediciones de parámetros geométricos de los pies: diámetros normales (a 1,3 m del suelo), diámetros basales, diámetros y altura de copa y altura total de los pies (Figura 17).

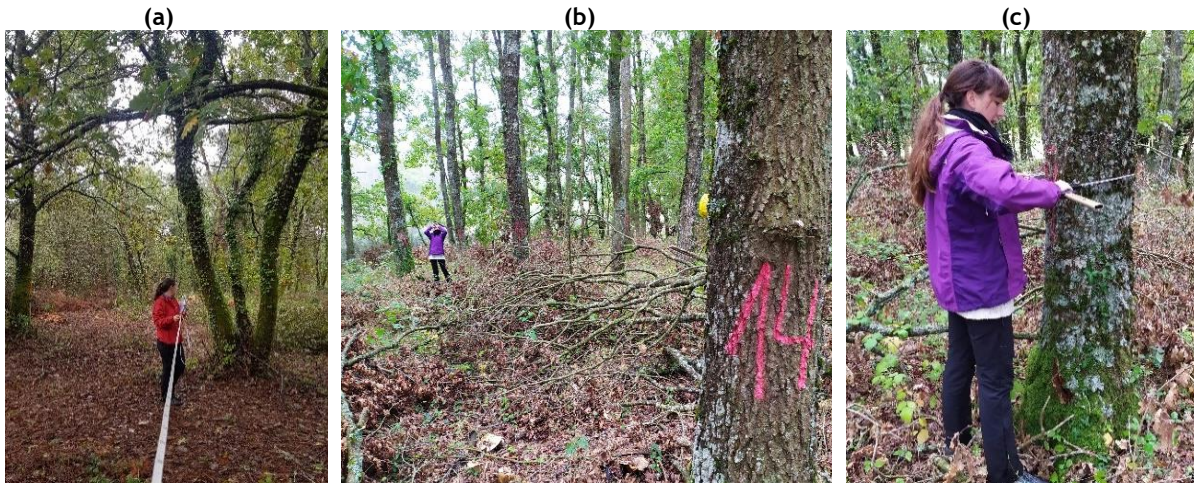


Figura 17. Proceso de mediciones dendrométricas realizadas en una parcela de *Quercus robur*: (a) medición del diámetro de copa; (b) medición de altura del árbol y (c) medición del diámetro normal.

Para todos los individuos escogidos (62 árboles), se realizaron mediciones no destructivas con las técnicas de ultrasonidos, con el equipo USLab y ondas de impacto, con los equipos MST y Hitman ST300. Para ambas técnicas se efectuaron mediciones indirectas en los fustes, con una distancia entre transductores de 0,4 m y con una inclinación de 45° (Figura 18).



Figura 18. Mediciones sobre pies de *Quercus robur*: (a) ondas de ultrasonidos, con el equipo USLab; y (b) ondas de impacto, con el equipo MST.

Los valores del tiempo de vuelo de la onda sónica (ToF_{USLab}; ToF_{MST}; ToF_{Hitman}), obtenidos del equipo, se asociaron a la distancia entre los transductores para el cálculo de la velocidad de propagación de la onda en el árbol (V_a) (Ecuación 5).

Se extrajeron testigos cilíndricos de cada uno de los árboles para la determinación de la densidad de cada individuo, utilizando la barrena de Pressler (Figura 19). Este instrumento consta de tres componentes: una broca con el extremo afilado, un soporte tubular cilíndrico y un extractor. Para obtener un testigo, se introduce el barreno en el tronco, perpendicular al eje vertical del árbol, realizando movimientos circulares en la varilla del equipo. A continuación, se extrae el testigo con el extractor.



Figura 19. Extracción de testigo cilíndrico en un pie de *Quercus robur*.

Se realizaron mediciones de las dimensiones y el peso de los testigos para calcular la densidad verde. Posteriormente, tras el secado en estufa, se obtuvo la masa seca de la muestra, con la que se determinó la densidad básica. Los datos de la densidad del árbol obtenidos a partir de testigos cilíndricos se asociaron a la velocidad de transmisión de la onda con las diferentes técnicas y equipos utilizados (USLab, MST y Hitman) para la obtención del valor del coeficiente de rigidez en el árbol en pie ($C_{LL,a}$) (Ecuación 3).

Estos testigos, posteriormente, también fueron empleados para los ensayos con la técnica de onda ultrasónica en probeta pequeña (apartado 5.2.5.).

4.3.3 Troza

4.3.3.1 Material de ensayo

De los 62 árboles analizados, se realizó una selección de 5 árboles por parcela, que fueron cortados para la obtención de la madera para las siguientes fases del estudio. La selección de los árboles a extraer se basó en los resultados de velocidad obtenidos mediante métodos no destructivos aplicados al árbol en pie. Se eligieron así aquellos ejemplares representativos de la masa, incluyendo los de velocidad máxima, mínima y promedio. Además, se consideraron características del fuste, como su rectitud y la posibilidad de obtener de él el mayor número de tablas.

Para cada árbol se extrajeron entre 1 y 3 trozas, en función de la altura del árbol, características del tronco y sus posibilidades de aserrado, con longitud aproximada de 2,5 m cada una de ellas, obteniendo un total de 33 trozas. En el momento de la corta y troceado del fuste se identificó cada troza con la letra correspondiente a la parcela de estudio (M, Q, S), el número de árbol y una letra que indica la altura correspondiente de cada una de las trozas extraídas (A-troza basal, hasta 2,5 m de altura del pie; B- de 2,5 m de altura a 5 m; C- de 5 m de altura a 7,5 m) (Figura 20).



Figura 20. Corta de pies de *Quercus robur* en la parcela M e identificación de las tres trozas extraídas para el árbol 7.

4.3.3.2 Mediciones dendrométricas y no destructivas

En todas las trozas extraídas se midieron los diámetros en ambos extremos (d_1 y d_2) para el cálculo de la conicidad de la troza. Asimismo, se realizaron mediciones longitudinales (directas, de testa a testa), con tres técnicas no destructivas: ultrasonidos (equipo USLab), ondas de impacto (equipo MST) y vibración (equipo Hitman HM220 y equipo MTG). En el caso de los equipos USLab y MST, se realizaron 3 mediciones por troza, posicionando los transductores en un punto central del diámetro del tronco, más próximo a la médula (M), un punto intermedio entre el punto central y la corteza, en la zona de madera de duramen (I) y un último punto más próximo a la corteza (C), en zona de madera de albura (Figura 21a y b). La velocidad de propagación de la onda, considerada para la medición longitudinal en la troza ($V_{t,lon}$), fue el resultado del valor promedio de las tres mediciones realizadas. Para el equipo USLab, se utilizaron los transductores cónicos, para lo cual fue necesario hacer perforaciones con el taladro en las cabezas de las trozas.

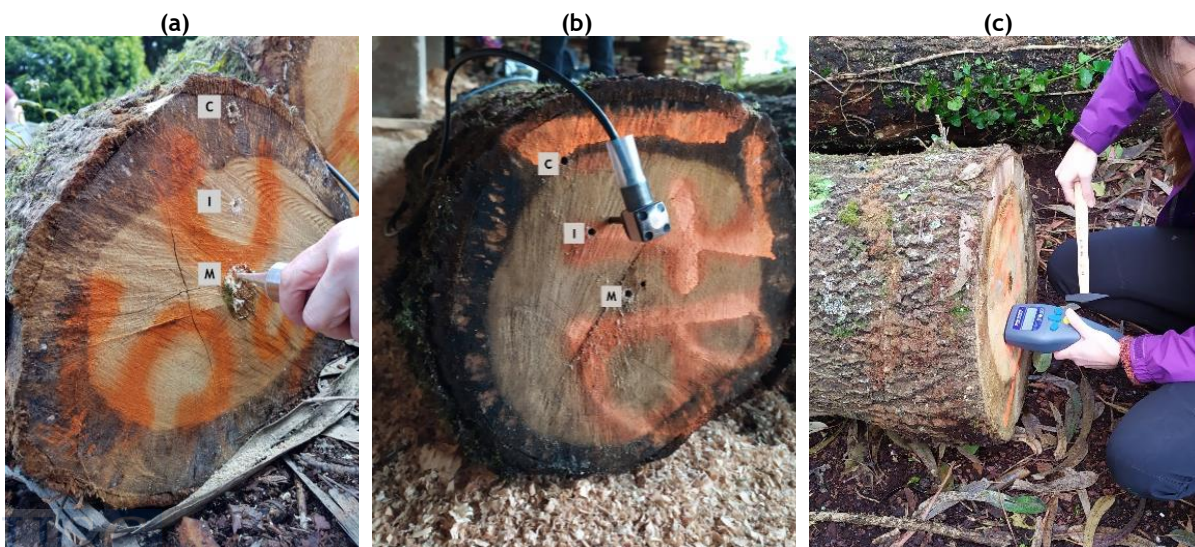


Figura 21. Mediciones longitudinales realizadas sobre las trozas: (a) ondas de ultrasonidos (USLab); (b) ondas de impacto (MST); y (c) vibración (MTG).

Para los equipos USLab y Microsecond Timer, se realizaron también mediciones indirectas (superficiales), en tramos de 2 metros y 0,4 metros de longitud; este último tramo, simulaba las condiciones de medición indirecta realizada en el árbol en pie (Figura 22).



Figura 22. Mediciones superficiales realizadas sobre las trozas: (a) ondas de ultrasonidos (USLab), y (b) ondas de impacto (MST).

4.3.4 Tabla saturada

4.3.4.1 Material de ensayo

El aserrado de las trozas se llevó a cabo en la empresa Maderas Exfopino S.L. (Figura 23). El despiece adoptado buscó obtener el mayor número de tablas con orientación radial de los anillos de crecimiento, y el mayor aprovechamiento del material disponible, adaptándose a la geometría de la troza, en algún caso demasiado irregular.



Figura 23. Procesado de trozas en las instalaciones de Maderas Exfopino S.L.: (a) aserrado de trozas y (b) obtención de tabla.

Una vez aserradas las trozas extraídas de las 3 parcelas objeto de estudio, se obtuvieron un total de 487 tablas de dimensiones nominales 25 mm x 95 mm x 2550 mm (Figura 23b). Las tablas fueron codificadas siguiendo un sistema que permitiera mantener la trazabilidad del material a lo largo de todo el proceso (Tabla 4).

Tabla 4. Codificación aplicada en las tablas y ejemplo de etiquetado del material.

Codificación de tabla:		PAATNN
P	Identificación de parcela	Letra (M/Q/S), según parcela de procedencia
AA	Identificación de nº de árbol	Numérico (01-31), según árbol de origen
T	Identificación de troza	Letra (A/B/C), según troza de origen
NN	Identificación de nº de tabla	Numérico (01-44), consecutivo según aserrado de la troza



4.3.4.2 Mediciones no destructivas

Las mediciones longitudinales se realizaron sobre las tablas recién aserradas, en condiciones de saturación, utilizando las técnicas de ultrasonidos, ondas de impacto y vibración (Figura 24), obteniendo la velocidad de propagación de la onda en cada caso (V_{th}). En paralelo, se obtuvieron las dimensiones y el peso de cada tabla ensayada.

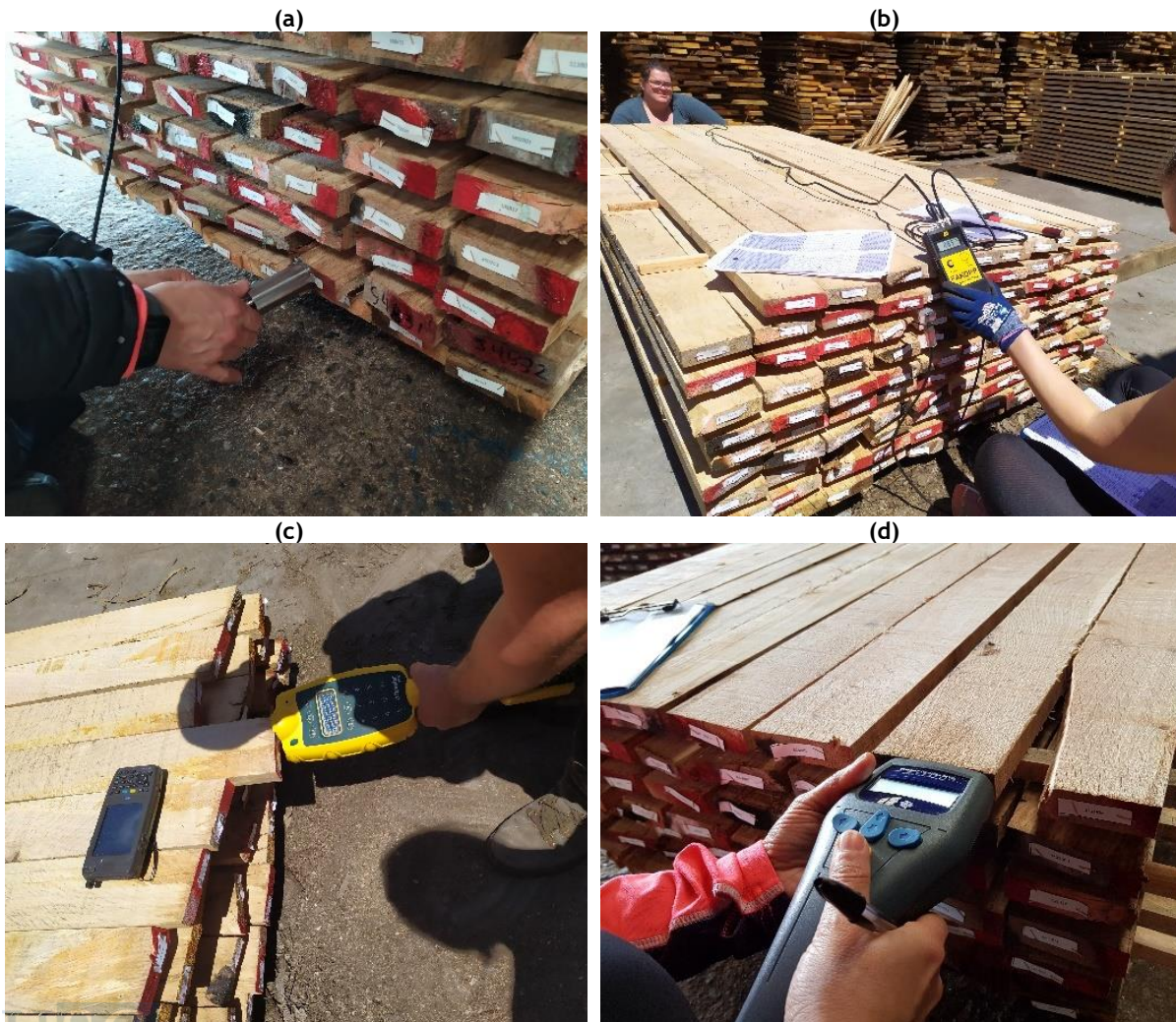


Figura 24. Mediciones longitudinales realizadas sobre las tablas saturadas: (a) ondas de ultrasonidos (USLab); (b) ondas de impacto (MST); (c) vibración con el equipo Hitman y (d) vibración con el equipo MTG.

4.3.5 Tabla en condición de equilibrio higroscópico

4.3.5.1 Secado y selección del material

El secado del material se llevó a cabo en el secadero de la Escola de Enxeñaría Forestal de Pontevedra, perteneciente a la Universidade de Vigo (Figura 25), durante el período que va desde el 30/06/2020 al 28/09/2020. La humedad media de la madera al inicio del proceso era de 74,5 %, y al finalizar el secado fue de $13,3 \pm 2$ %, con un ratio de secado de 0,84 %/día.



Figura 25. Secado de madera de roble en el secadero de la Escola de Enxeñaría Forestal de Pontevedra.

Tras el secado, se seleccionaron las tablas de *Quercus robur* aptas para las siguientes fases del análisis, descartando las que presentaban una deformación excesiva. En total, se obtuvieron 254 tablas, que fueron cepilladas a una sección final de 20 x 80 mm.

4.3.5.2 Mediciones no destructivas

Sobre las 254 tablas seleccionadas se aplicaron las técnicas de propagación de ondas de ultrasonidos, ondas de impacto y de vibración (equipos USLab, MST y MTG respectivamente) (Tabla 5; Figura 26). De manera previa a la aplicación de las diferentes técnicas acústicas, se obtuvieron las dimensiones y el peso de todas las tablas, para el cálculo de la densidad, así como se determinó el contenido de humedad, obtenido con xilohigrómetro de resistencia eléctrica.

Tabla 5. Número de tablas ensayadas en la condición de equilibrio higroscópico y técnicas aplicadas en cada caso.

Material	P	Ultrasonidos	Ondas de impacto	Vibración		CV	ED
		USLab	MST	MTG	PLG		
Tabla seca	M	139	139	139	25	25	25
	Q	41	41	41	25	25	25
	S	74	74	74	25	25	25

Leyenda: P: parcela; CV: clasificación visual; ED: ensayo destructivo.

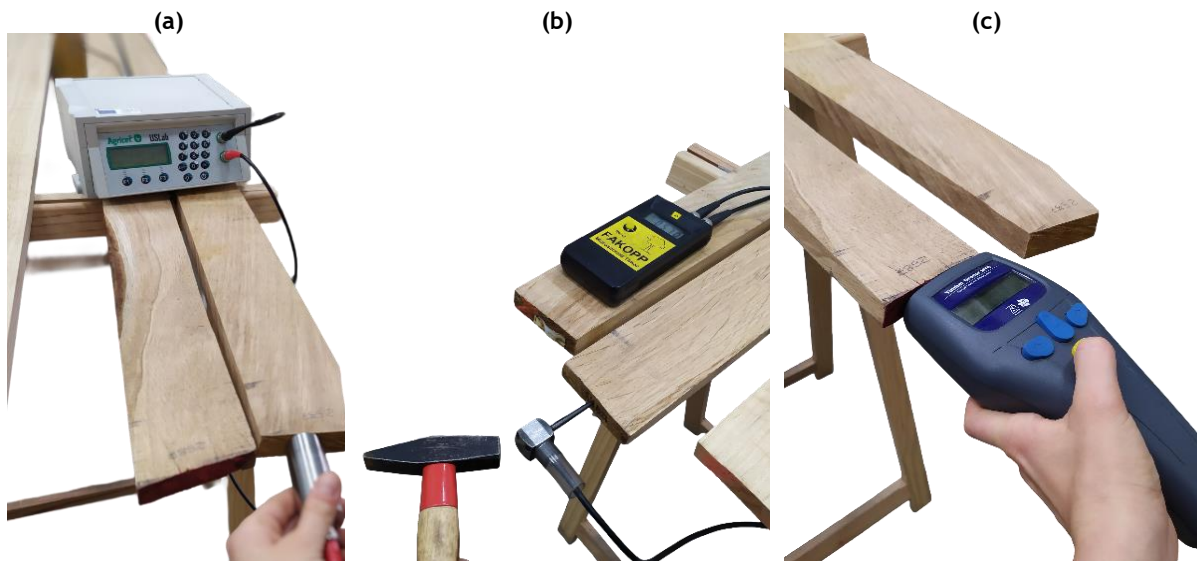


Figura 26. Mediciones longitudinales realizadas sobre las tablas en la condición de equilibrio higroscópico: (a) ondas de ultrasonidos (USLab); (b) ondas de impacto (MST); y (c) vibración (MTG).

Del conjunto total de tablas ensayadas acústicamente (USLab, MST y MTG), se extrajo una submuestra aleatoria de 75 tablas (25 por parcela) (Tabla 5). Esta submuestra se ensayó con el equipo PLG (Figura 27), se clasificó visualmente y, por último, se sometió al ensayo de flexión estática.



Figura 27. Mediciones realizadas sobre las tablas en la condición de equilibrio higroscópico con la técnica de vibración (PLG).

Para los ensayos acústicos sobre tabla seca, los valores de las velocidades se corrigieron en función del contenido de humedad del material al valor de referencia del 12 % ($V_{ts,12}$) (Ecuación 7) (Kollmann y Krech, 1960; citado por Llana et al., 2022).

$$V_{ts,12} = \frac{V_u}{[1-0,008(u-12)]} \quad \text{Ecuación 7}$$

Siendo V_u la velocidad obtenida al contenido de humedad de la madera en el momento del ensayo; u el contenido de humedad de la madera en el momento del ensayo.

Estos resultados se asociaron a valores de densidad del material para el cálculo del coeficiente de rigidez de la tabla en la condición de equilibrio higroscópico ($C_{LL,12}$), que se empleó para la predicción de las propiedades de interés estructural.

La clasificación visual fue realizada sobre un total de 75 piezas, donde se midieron todas las singularidades presentes según los criterios establecidos en las normas españolas UNE 56544:2022 y UNE 56546:2022 y en la norma francesa NF B 52-001-1:2018 (Figura 28). Se aplicaron los criterios de clasificación para madera de coníferas con grosor menor o igual a 70 mm (Anexo I) para la clase de calidad ME-2, de la norma UNE 56544, y los criterios de calidad para el castaño (*Castanea sativa Mill.*) de calidad MEF, recogidos en la norma UNE 56546 (Anexo II). Para esta última norma no se aplicaron los criterios de calidad establecidos para el eucalipto, ya que, en lo que respecta a la evaluación de los nudos se establecen criterios más exigentes y, teniendo en cuenta el estado del material utilizado en esta investigación, se obtendría un mayor porcentaje de rechazo. En el momento de ejecución de estos ensayos, la norma UNE 56546 no incluía criterios de clasificación visual para la madera de chopo.

Se analizaron también los datos de las singularidades medidas siguiendo los criterios de calidad recogidos en la norma francesa NF B52-001-1 para el *Quercus robur*. La norma francesa establece tres clases visuales para el roble francés, denominadas Clase 1, Clase 2 y Clase 3. En este caso, se aplicaron las características admisibles para la Clase 3, que es la menos exigente (Anexo III).

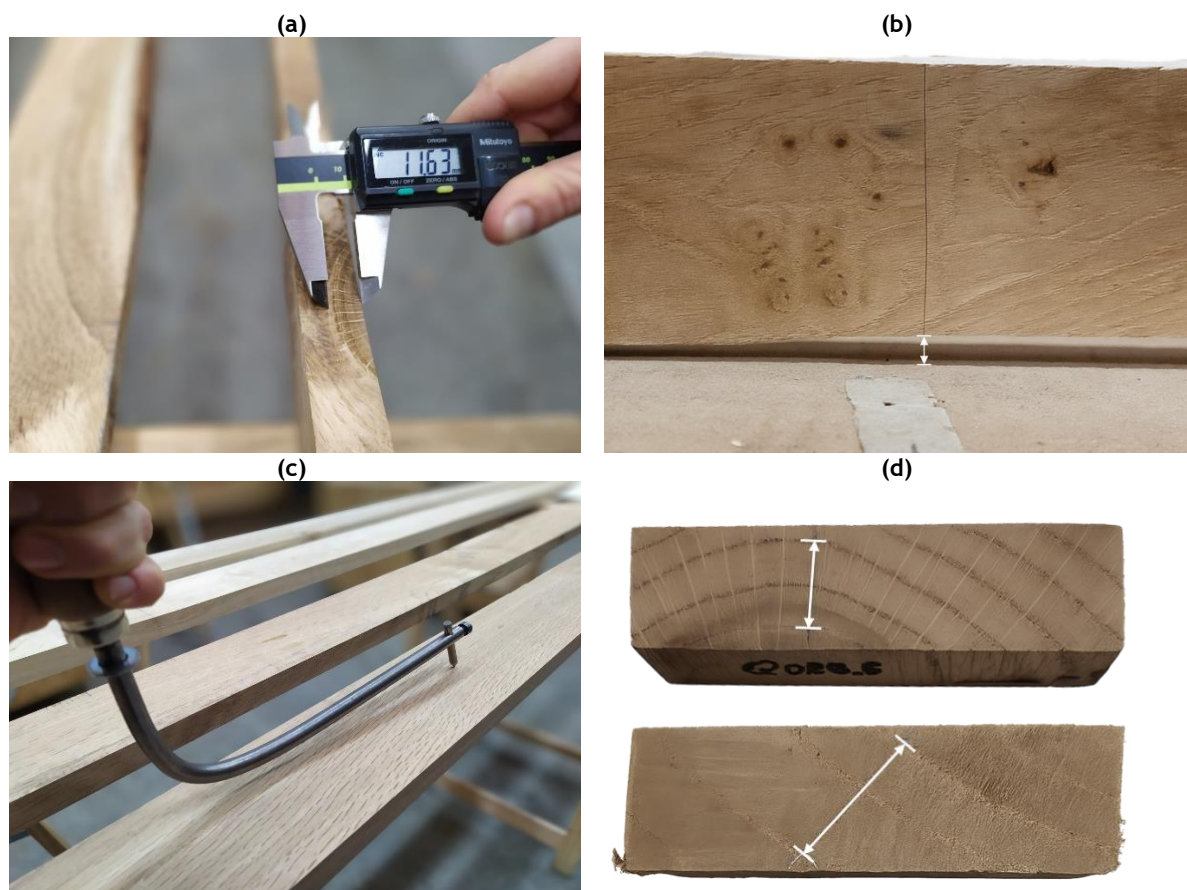


Figura 28. Algunas de las singularidades medidas en el proceso de clasificación visual: (a) medición de nudo de canto; (b) medición de curvatura de canto; (c) medición de desviación de la fibra con trazador; y (d) medición de anchura del anillo de crecimiento.

4.3.5.3 Ensayos físico-estáticos: ensayos de flexión, densidad y contenido de humedad

Para este análisis se utilizó la misma muestra de material que fue clasificada visualmente de manera previa, 75 tablas provenientes de las tres parcelas (25 tablas por parcela). Se determinaron la resistencia a la flexión axial, los módulos de elasticidad local y global y la densidad y la humedad de las tablas según el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 408:2011+A1:2012.

Aunque el material ya presentaba un contenido de humedad en torno al 12 % (medido con xilohigrómetro de resistencia eléctrica), se estabilizó en una cámara climática (20 °C y 65 % HR) antes de los ensayos de flexión. Previamente al ensayo, se verificó que las tablas hubieran alcanzado una masa constante. Posteriormente, se tomaron las medidas de las probetas, anchura (b), altura (h) y longitud (L), con una precisión del 1 %.

El montaje para el ensayo de flexión, que se utilizó tanto para determinar los módulos de elasticidad como la resistencia, implicó cargar la probeta en flexión sobre dos puntos simétricos con una luz (l) igual a 18 veces la altura de la probeta (h). En este caso, teniendo en cuenta la altura de las probetas ensayadas ($h = 80$ mm), la luz de ensayo fue de 1440 mm. Se mantuvo una distancia entre cargas de 480 mm ($6h$).

Se introdujeron placas de acero en los puntos de carga para reducir el aplastamiento de la madera en esas zonas. Además, se emplearon topes laterales para prevenir el pandeo, considerando la esbeltez de las probetas ensayadas ($b = 20$ mm), y asegurando que estos permitieran la deformación de la tabla sin resistencia significativa por rozamiento (Figura 29).

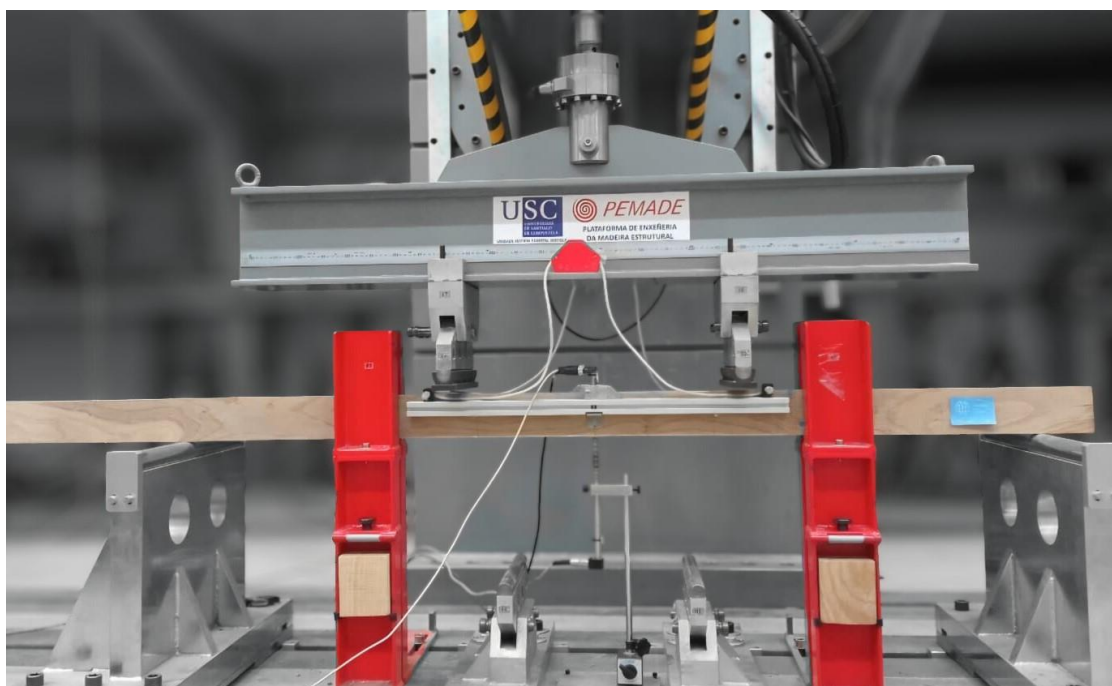


Figura 29. Ensayo a flexión según la norma UNE-EN 408 para obtener el módulo de elasticidad local y global, y la resistencia a la flexión para las piezas de *Q.robur*.

La carga se aplicó con una velocidad de avance constante de la cabeza de carga ($6,2$ mm min^{-1}), regulada para que la carga máxima ($F_{\text{máx}}$) se alcanzase en un tiempo estandarizado de 300 ± 120 segundos y para que no se superara el valor de $0,003h$ mm s^{-1} ($0,24$ mm s^{-1}), indicado en la norma de ensayo. Se aplicó una ligera precarga de $0,2$ kN.

Para la determinación del módulo de elasticidad local ($\text{MOE}_{\text{Local}}$), la deformación (w) se midió específicamente en el eje neutro, posicionando, en ambas caras de la probeta, dos

sensores de desplazamiento de 20 mm de recorrido en el punto medio de un segmento de longitud igual a cinco veces la altura de la probeta ($l_1 = 400$ mm) (Figura 29 y Figura 30). Se tomó el valor medio de la deformación medida por ambos sensores.

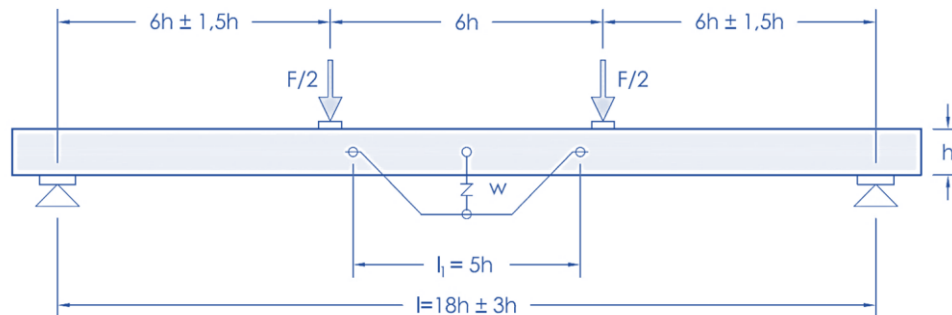


Figura 30. Esquema de ensayo para la determinación del módulo de elasticidad local a flexión según la norma UNE-EN 408.

El módulo de elasticidad se calculó mediante un análisis de regresión lineal sobre el gráfico de carga-deformación, utilizando el tramo comprendido entre $0,1F_{\text{máx}}$ (F_1) y $0,4F_{\text{máx}}$ (F_2), prestando atención a que el coeficiente de correlación en este tramo fuera de 0,99 o mejor. En aquellos casos en los que fue necesario retirar los sensores de desplazamiento de manera previa a la retirada programada en el método, se ajustó el tramo de carga-deformación atendiendo a que, al menos, incluyera el tramo entre el $0,2F_{\text{máx}}$ y $0,3F_{\text{máx}}$. El MOE_{Local} fue calculado aplicando la Ecuación 8.

$$MOE_{\text{Local}} = \frac{a \cdot l_1^2 \cdot (F_2 - F_1)}{16I \cdot (w_2 - w_1)} \quad \text{Ecuación 8}$$

Siendo

a la distancia entre el punto de carga y el apoyo más próximo, en mm;

l_1 la longitud base del segmento sobre el cual se mide el módulo de elasticidad local, en mm;

$F_2 - F_1$ el incremento de carga en la recta de regresión con un coeficiente de correlación de 0,99 o mejor, en N;

I el momento de inercia, en mm^4 ;

$w_2 - w_1$ el incremento de deformación correspondiente a $F_2 - F_1$, en mm.

Para el cálculo del módulo de elasticidad global (MOE_{Global}), la deformación se midió en el centro de la luz y en el centro del borde traccionado de la probeta posicionando un sensor de desplazamiento de 60 mm de recorrido en ese punto (Figura 29 y Figura 31). De forma análoga al caso del MOE_{Local} , este cálculo se realizó mediante un análisis de regresión lineal sobre el gráfico carga-deformación, utilizando el intervalo comprendido entre $0,1F_{\text{máx}}$ (F_1) y $0,4F_{\text{máx}}$ (F_2) y aplicando la Ecuación 9.

$$MOE_{\text{Global}} = \frac{3 \cdot a \cdot l^2 - 4 \cdot a^3}{2 \cdot b \cdot h^3 \cdot \left(2 \cdot \frac{(w_2 - w_1)}{(F_2 - F_1)} - \frac{6 \cdot a}{5 \cdot G \cdot b \cdot h} \right)} \quad \text{Ecuación 9}$$

Siendo

l la luz de ensayo, en mm;

b la menor dimensión de la sección transversal (anchura de la probeta), en mm;

h la mayor dimensión de la sección transversal (altura de la probeta), en mm;

G el módulo de elasticidad transversal, en N mm^{-2} .

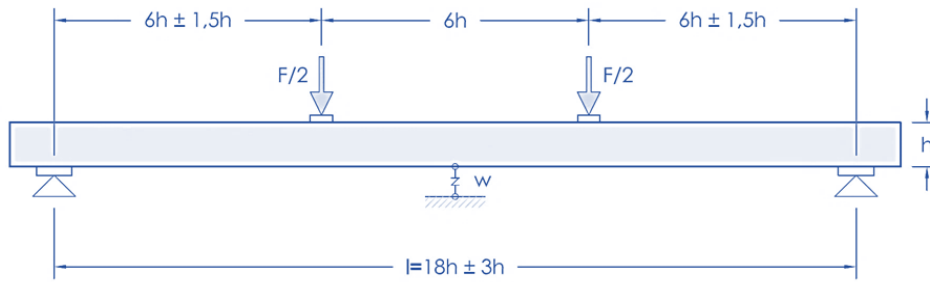


Figura 31. Esquema de ensayo para la determinación del módulo de elasticidad global a flexión según la norma UNE-EN 408.

Para los cálculos realizados en este estudio, el módulo de elasticidad transversal, G , se tomó como infinito, considerando la indicación de la norma UNE-EN 408:2011+A1:2012 en lo referente a la determinación de la clase resistente.

Una vez superado el tramo elástico se retiraron los sensores de desplazamiento para llevar la probeta hasta la rotura. Se registró la carga máxima de flexión ($F_{\text{máx}}$), y la resistencia a la flexión (MOR) se calculó utilizando esta carga junto con las dimensiones de la sección, con una precisión del 1 %, según la Ecuación 10.

$$MOR = \frac{3 \cdot F_{\text{máx}} \cdot a}{b \cdot h^2} \quad \text{Ecuación 10}$$

Se calculó la densidad (ρ) y la humedad (CH) a partir de rebanadas extraídas de cada tabla una vez finalizadas las pruebas de flexión estática. Cada una de las rebanadas fue tomada de la sección completa, sin incluir singularidades tales como nudos o corteza. Se pesaron las rebanadas inmediatamente después de haberlas tomado y a continuación se introdujeron en la estufa a una temperatura de $103 \pm 2^\circ\text{C}$. Se mantuvieron en la estufa hasta que la diferencia de masa entre dos pesadas sucesivas realizadas en un intervalo de 2 horas fue menor del 0,1 %, según el procedimiento indicado en la norma EN 13183-1:2002 para el cálculo de la humedad.

Los valores de módulo de elasticidad y de densidad se corrigieron a las condiciones de humedad de referencia ($MOE_{\text{Global},12}$; $MOE_{\text{Local},12}$; ρ_{12}), con las expresiones establecidas en la norma UNE-EN 384: 2016+A2:2023, de forma individual, según las ecuaciones 11 y 12.

$$MOE_{12} = MOE_u \cdot (1 + 0,01 \cdot (u - 12)) \quad \text{Ecuación 11}$$

$$\rho_{12} = \rho_u \cdot (1 + 0,005 \cdot (u - 12)) \quad \text{Ecuación 12}$$

Siendo

MOE el módulo de elasticidad en flexión paralela a la fibra;

ρ la densidad;

u el contenido de humedad en el momento del ensayo ($8 \% \leq u \leq 18 \%$).

La resistencia a flexión se corrigió a un canto de referencia de 150 mm dividiendo por el factor k_h obtenido en la Ecuación 13 (UNE-EN 384:2016+A2:2023) y cuyo valor está limitado a 1,3. En este caso, el canto (h) es de 80 mm, por lo tanto $k_h = 1,1$.

$$k_h = \left(\frac{150}{h}\right)^{0,2} \quad \text{Ecuación 13}$$

Siendo h es el canto de la probeta.

Se eliminaron del estadístico un total de 11 ensayos debido a roturas producidas fuera del tiempo definido en la norma de aplicación (300 ± 120 segundos), y 3 ensayos por registros anómalos de los sensores de desplazamiento, disponiendo de un muestreo final de 61 piezas.

4.3.6 Modelos de regresión

4.3.6.1 Análisis de la muestra “Conjunto”

Inicialmente, se evaluó la viabilidad de clasificación aplicando las TND directamente sobre la totalidad de las tablas ensayadas ($n = 61$). El análisis (regresión simple) se planteó considerando las dos condiciones de humedad:

- Condición de saturación (tabla verde): Se utilizaron modelos basados únicamente en la velocidad de propagación de la onda (V_{th}). Teniendo en cuenta las bases teóricas del ensayo, el coeficiente de rigidez presenta mejores correlaciones con las propiedades mecánicas obtenidas en ensayos estáticos, ya que incorpora la densidad (Bucur, 2025). Sin embargo, en el caso de las tablas húmedas, la incorporación de la densidad saturada no es adecuada, pues físicamente el valor de la densidad aumenta mucho debido al peso del agua, que a su vez no contribuye en la resistencia ni en la rigidez (Bucur, 2025). Por este motivo se descartó el uso del C_{LL} en condición saturada.
- Condición de equilibrio higroscópico (12 %, tabla seca): Se analizaron tanto la velocidad ($V_{ts,12}$) como el coeficiente de rigidez ($C_{LL,12}$), calculado con la densidad al 12 %.

El mismo procedimiento se aplicó a los conjuntos de datos de trozas ($n = 20$) y árboles ($n = 15$) para evaluar las correlaciones indirectas con las propiedades de las tablas. No obstante, hubo una diferencia en las variables predictoras: mientras que para las trozas se generaron modelos de regresión simple considerando la velocidad de propagación de la onda y el C_{LL} de forma independiente, en el caso de los árboles se optó por regresiones múltiples, integrando la velocidad de propagación junto con otras variables dendrométricas.

4.3.6.2 Análisis de la muestra “Troza Basal”

A continuación, se repitió todo el proceso estadístico utilizando solo el material de la "troza basal" (20 tablas de 7 trozas, provenientes de 7 árboles), evaluando nuevamente el parámetro de velocidad de onda y del coeficiente de rigidez. El objetivo fue verificar si el análisis de la zona basal perfeccionaba los modelos de predicción entre las mediciones indirectas (árbol y troza) y los resultados del ensayo estático. Cabe señalar que esta segmentación no fue necesaria para el análisis a nivel de tabla, dado que en este caso las mediciones no destructivas y destructivas realizaron sobre la misma pieza (análisis directo).

4.3.7 Metodología de clasificación del material

Considerando los resultados obtenidos en cada una de las fases de transformación del recurso, se procedió a la asignación de la clase resistente del material ensayado según la norma UNE-EN 338:2016.

La norma UNE-EN 338 define un sistema de clases resistentes para madera de coníferas (clases C) y de frondosas (clases D) (Tabla 6). La asignación de una pieza a una clase resistente se basa en el cumplimiento simultáneo de tres propiedades fundamentales, obtenidas según los procedimientos de la norma UNE-EN 384: 2016+A2:2023, que son:

- El valor característico del percentil 5 de la resistencia a flexión ($f_{m,k}$),

- El valor característico medio del módulo de elasticidad en flexión paralela a la fibra ($E_{m,0,mean}$) y,
- El valor característico del percentil 5 de la densidad (ρ_k).

El principio de clasificación es conservador: la pieza se asigna a la clase resistente más alta para la cual cumple o supera los tres requisitos. Si uno solo de los parámetros no alcanza el valor mínimo exigido, la pieza es asignada a una clase inferior o rechazada.

Tabla 6. Sistema de Clases Resistentes para Madera de Frondosas según UNE-EN 338:2016 (Extracto).

Clase Resistente	Resistencia a Flexión ($f_{m,k}$) (N mm ⁻²)	Módulo de Elasticidad Medio ($E_{m,0,mean}$) (N mm ⁻²)	Densidad Característica (ρ_k) (kg m ⁻³)
D18	18	9500	520
D24	24	10000	540
D27	27	10500	550
D30	30	11000	560
D35	35	12000	580
D40	40	13000	620
D50	50	15000	700

A partir de los ensayos de flexión realizados se procedió a determinar, según las normas UNE-EN 384: 2016+A2:2023 y UNE-EN 14358:2016 el valor característico de la resistencia y densidad, y el valor medio del módulo de elasticidad, para poder comprobar la clase resistente en la que se situaría el *Q.robur* analizado en la presente tesis, según la norma UNE-EN 338.

Para propiedades críticas que determinan la seguridad frente al colapso, como la resistencia, se adopta un enfoque conservador. El valor característico no es la media, sino una estimación del percentil 5 inferior de la población. Esto significa que se espera, con un 75 % de confianza, que el 95 % de las piezas de esa población tengan una resistencia superior a dicho valor característico. La norma establece que, por defecto, la resistencia debe modelarse con una distribución log-normal, mientras que la densidad debe modelarse con una distribución normal. Para distribuciones normal o log-normal, la determinación paramétrica del percentil 5 se hace con las Ecuaciones 14 (log-normal) o 15 (normal).

$$m_k = \exp \cdot (\bar{y} - k_s(n)s_y) \quad \text{Ecuación 14}$$

$$m_k = \bar{y} - k_s(n)s_y \quad \text{Ecuación 15}$$

Siendo

m_k el valor característico (el percentil 5);

\bar{y} la media de los datos en una distribución normal, o la media de los logaritmos neperianos en la distribución log-normal;

s_y la desviación estándar de los datos en una distribución normal, o de los logaritmos neperianos en la distribución log-normal;

k_s un factor que depende del número de probetas (n) y del tipo de distribución. Este factor fue calculado a partir de la siguiente expresión:

$$k_s(n) = \frac{6,5 \cdot n + 6}{3,7 \cdot n - 3} \quad \text{Ecuación 16}$$

Para las propiedades de rigidez, como el Módulo de Elasticidad (MOE), el enfoque es diferente. En los cálculos estructurales se utiliza el valor medio, ya que esta propiedad está relacionada con la deformación y no con la rotura, el objetivo es obtener una estimación segura del valor medio de toda la población. Es importante señalar que el valor característico del MOE no es simplemente la media de la muestra, sino una estimación ligeramente penalizada de la media de la población, para tener un 75 % de confianza en que el valor real de la población no es inferior al calculado. Para muestras grandes ($n \rightarrow \infty$), el factor $k_s(n)$ tiende a cero y el valor característico se aproxima a la media de la muestra. Para las propiedades de rigidez, se asume siempre una distribución normal, aplicando la siguiente fórmula:

$$m_{\text{medio}} = \bar{y} - k_s(n)s_y \quad \text{Ecuación 17}$$

Siendo

m_{medio} el valor característico medio;

\bar{y} la media de los datos;

s_y la desviación estándar de los datos;

k_s un factor que depende del número de probetas (n). Este factor fue calculado a partir de la siguiente expresión:

$$k_s(n) = \frac{0,78}{n^{0,53}} \quad \text{Ecuación 18}$$

Para las fases de árbol, troza y tabla húmeda, se planteó una metodología de clasificación basada en los modelos de correlación entre los parámetros obtenidos mediante la aplicación de métodos acústicos y el módulo de rotura o de elasticidad obtenidos en ensayos de flexión, cuando se dispone de una buena capacidad predictiva (R^2 altos); en caso contrario, se aplicó una clasificación basada en parámetros de propagación de la onda acústica.

Dado que no existe una norma europea que contemple la clasificación de piezas de madera a partir de parámetros de propagación de ondas (velocidad o coeficiente de rigidez), en esta tesis doctoral se aplicaron dichos parámetros según los criterios de la norma brasileña ABNT-NBR 15521:2007 para maderas tropicales de frondosas.

La norma brasileña ABNT NBR 15521:2007 presenta un enfoque innovador y pragmático, especialmente adaptado para la gran diversidad de maderas tropicales. A diferencia de la norma europea, permite una clasificación directa utilizando parámetros obtenidos por métodos no destructivos, con el uso de la velocidad de propagación de ondas en condición saturada (V_{sat}) o del coeficiente de rigidez a la humedad de referencia del 12 % ($C_{LL,12}$). Este sistema elimina la necesidad de realizar ensayos destructivos para la clasificación rutinaria, permitiendo un control de calidad rápido y eficiente en la línea de producción. Asimismo, el uso de la variable V_{sat} abre la posibilidad teórica de aplicar esta clasificación directamente en árboles en pie. La norma define varias clases de calidad (UD), donde cada una se asocia a un rango de velocidad o rigidez y, a su vez, a valores esperados de propiedades mecánicas tales como el módulo de elasticidad a flexión (Tabla 7), así como la resistencia y el módulo de elasticidad a compresión.

Tabla 7. Sistema de clasificación para frondosas según ABNT NBR 15521 (Adaptado).

Clase de Calidad	Velocidad en condición saturada (V_{sat}) ($m s^{-1}$)	Coefficiente de Rigidez ($C_{LL,12}$) ($N mm^{-2}$)	Módulo de Elasticidad esperado ($E_{m,12}$) ($N mm^{-2}$)
UD-25	3040	10620	6750
UD-30	3690	13000	10420
UD-35	3950	15400	13020
UD-40	4140	17800	14920
UD-45	4300	20150	16520
UD-50	4390	22500	17420
UD-55	4490	24900	18420
UD-60	4600	27300	19120

4.4 PARÁMETROS ELÁSTICOS DE LA MADERA DE *QUERCUS ROBUR* OBTENIDOS EN ENSAYOS DE PROBETAS DE PEQUEÑAS DIMENSIONES

4.4.1 Planteamiento general

En este apartado se desarrolla la metodología de trabajo para la caracterización de los parámetros elásticos de la madera de *Quercus robur*, con la aplicación de métodos de ensayo no destructivos y destructivos sobre probetas de distintas geometrías. El material de ensayo procedió de 15 árboles talados, extraídos de las tres parcelas de estudio. Inicialmente, se obtuvieron tablones de la zona basal del árbol de 90 x 100 x 2550 mm, cuidando rigurosamente que la orientación de los ejes de simetría elástica de la madera coincidiera con los ejes longitudinal (L), radial (R) y tangencial (T) de la pieza. Estos tablones fueron secados hasta alcanzar un contenido de humedad promedio de $13,3 \pm 2\%$.

A partir de este material seco, se procedió a la elaboración de probetas prismáticas y probetas poliédricas libres de defectos. Para cada árbol, se prepararon 6 probetas prismáticas con dimensiones de 20 x 20 x 60 mm, disponiendo de un total de 90 probetas. Adicionalmente, se fabricaron 15 probetas poliédricas de 26 caras (una probeta por cada árbol), cuyo diseño permite obtener todos los términos de la matriz de rigidez partiendo de una única probeta. Finalmente, el muestreo se complementó con la extracción de 15 muestras cilíndricas (una por árbol), obtenidas a la altura del pecho mediante la barrena de Pressler, con un diámetro de aproximadamente 3 mm y una longitud de 20 mm, las cuales fueron ensayadas en estado saturado.

El proceso experimental seguido consistió en dos fases principales de ensayo: ultrasonidos y compresión estática, ambos aplicados sobre las probetas prismáticas, mientras que los poliedros y las muestras cilíndricas se ensayaron exclusivamente con ultrasonidos. Para los ensayos de ultrasonidos, se utilizó el dispositivo portátil Olympus Epoch 600, determinando los coeficientes de la matriz de rigidez [C] mediante las ecuaciones de Christoffel. Posteriormente, la inversión de esta matriz permitió obtener la matriz de flexibilidad [S]. Respecto a las muestras cilíndricas, la técnica de ultrasonidos permitió calcular las velocidades de cortante, las cuales, junto con la densidad básica, condujeron a la determinación de los coeficientes de rigidez (C_{44} , C_{55} , C_{66}).

Se realizaron ensayos de compresión estática sobre las mismas probetas prismáticas que se utilizaron en los ensayos de ultrasonidos. Estos ensayos se llevaron a cabo siguiendo las normas ISO 13061-17:2017 e ISO 13061-5:2020, aplicando cargas en seis configuraciones diferentes: compresión paralela a la fibra, compresión perpendicular en direcciones radial y tangencial, y

compresión oblicua. Mediante galgas extensométricas, esta etapa permitió el cálculo directo de los módulos de elasticidad en las direcciones L, R y T, los coeficientes de Poisson y los módulos de cortante.

Los valores obtenidos a través de las mediciones de compresión estática sobre las probetas prismáticas se utilizaron para la comparación con los parámetros de caracterización del *Quercus robur* que fueron determinados mediante la matriz de flexibilidad [S] derivada de los ensayos de ultrasonido realizados sobre los poliedros de 26 caras.

4.4.2 Material de ensayo: prismas y poliedros

Durante el proceso de aserrado del material y, para los 15 árboles cortados de las 3 parcelas, se extrajeron tablones de 90 x 100 x 2550 mm correspondientes a la troza basal (Figura 32), teniendo especial cuidado en que la orientación de los ejes de simetría elástica de la madera coincidiera con los ejes longitudinal, radial y tangencial de la pieza. Previamente a la preparación de las probetas, estos tablones se secaron en el secadero de la Escola de Enxeñaría Forestal de Pontevedra, perteneciente a la Universidade de Vigo, lo que resultó en un contenido de humedad promedio de $13,3 \pm 2 \%$.



Figura 32. Extracción de tablón para la obtención de probetas de pequeñas dimensiones.

Una vez finalizado el proceso de secado de los tablones se extrajeron probetas prismáticas y poliédricas. Tres de las probetas prismáticas elaboradas se orientaron según las principales direcciones ortótropas: longitudinal (L), radial (R) y tangencial (T) (probetas 1, 2 y 3, respectivamente). Las otras tres probetas se orientaron a 45° respecto a los planos LR (longitudinal-radial), LT (longitudinal-tangencial) y RT (radial-tangencial) (probetas 4, 5 y 6, respectivamente) (Figura 33). Las probetas prismáticas tenían dimensiones de 20 x 20 x 60 mm. Se extrajeron 6 probetas por árbol; considerando las 15 muestras de material disponible, se obtuvo un total de 90 probetas prismáticas.

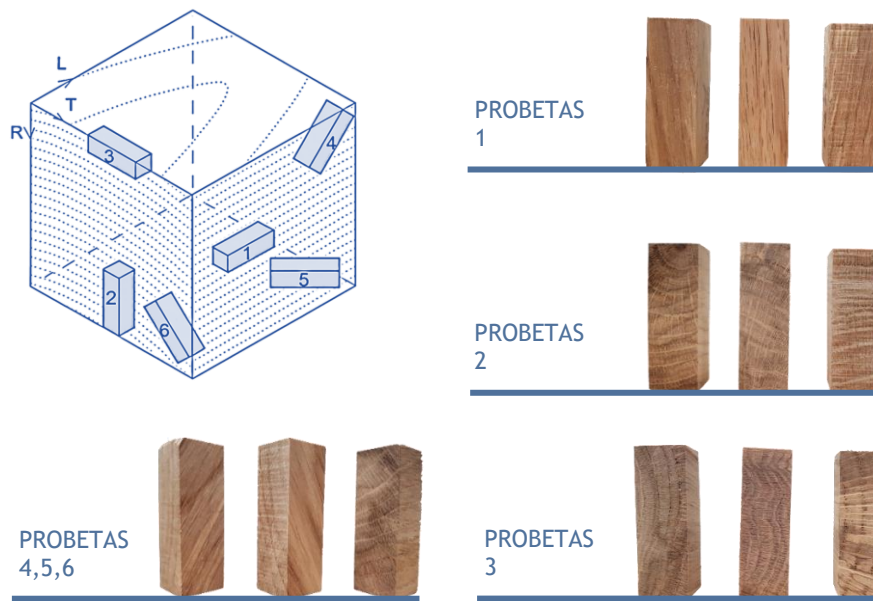


Figura 33. Orientación de las probetas sobre el material inicial (adaptado de Crespo et al., 2017), y ejemplo de probetas extraídas en las distintas direcciones: 1- probetas extraídas en la dirección longitudinal; 2- probetas extraídas en la dirección radial; 3- probetas extraídas en la dirección tangencial; 4,5,6- probetas extraídas a 45°.

El poliedro de 26 caras, propuesto por François (1995), citado por Trinca (2011), permite obtener todos los términos de la matriz de rigidez utilizando una única probeta. Para su obtención, se procedió a escuadrar los tablones extraídos de las trozas basales dejándolos a una sección de 50x50x500 mm. Estas piezas rectangulares se mecanizaron en la tupí, apoyando las caras LT y LR y girando la pieza, de esta manera se eliminaron las aristas de estas mismas caras y se obtuvo una pieza de sección octogonal. A continuación, se cortó la pieza a una longitud de 50 mm y, en la tronzadora abatible, en donde se disponía de un molde para su sujeción, se realizaron cuatro cortes a 45°. Se giró la pieza y se repitió el procedimiento en el otro extremo, hasta generar finalmente el poliedro de 26 caras, con simetría hemisférica (Figura 34). Con esta geometría se elaboraron 15 probetas.

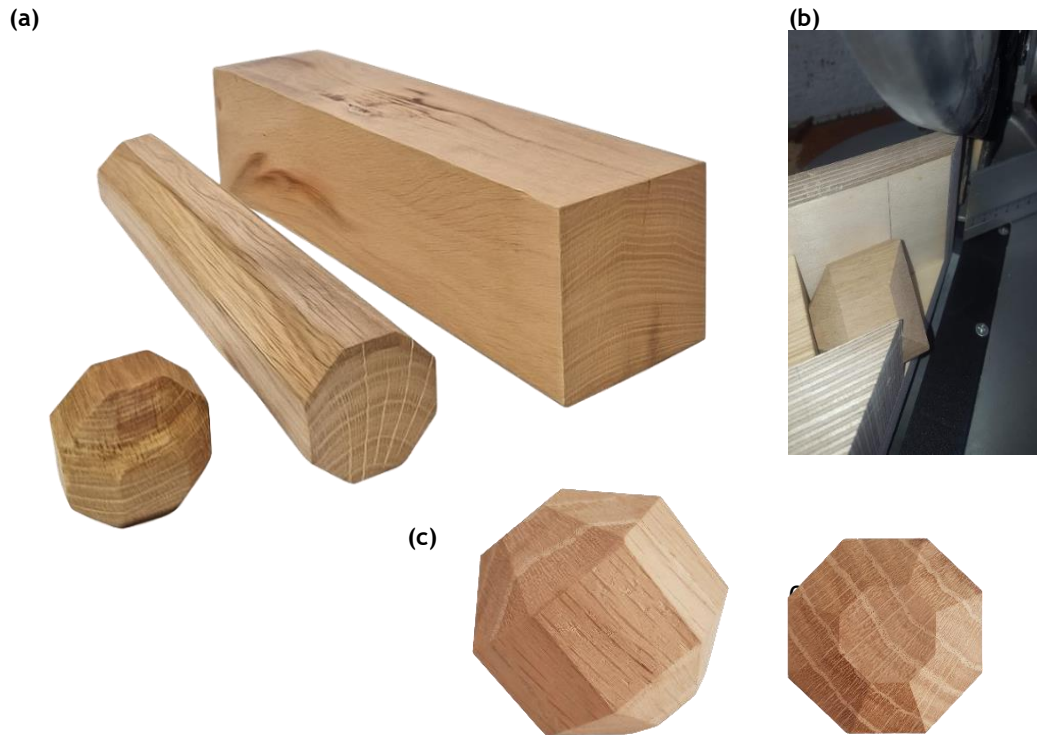


Figura 34. Material durante el proceso de mecanizado de las probetas poliédricas: (a) pieza de sección rectangular original, pieza de sección octogonal al salir de la tupí y poliedro final; (b) corte a 45° en la tronadora abatible; (c) poliedros de *Quercus robur* con la geometría final.

4.4.3 Material de ensayo: muestras cilíndricas

De los 15 árboles seleccionados para su corta, se extrajeron también muestras cilíndricas. De cada árbol se extrajo una muestra cilíndrica a la altura del pecho (1,30 m sobre el suelo), utilizando la barrena de Pressler, con un diámetro aproximado de 3 mm y una longitud aproximada de 20 mm (Figura 35). Al finalizar, las 15 muestras fueron debidamente identificadas, colocadas en bolsas plásticas selladas y almacenadas en el congelador para mantener su humedad.



Figura 35. Muestras cilíndricas de *Quercus robur*.

4.4.4 Ensayos de ultrasonidos

Para realizar los ensayos de ultrasonidos sobre probetas prismáticas, poliedros y muestras cilíndricas, se utilizó el dispositivo portátil Olympus Epoch 600 (Figura 36), haciendo uso de los transductores planos de ondas longitudinales y transversales.

Para mejorar el acoplamiento en la medida de lo posible, se utilizó glucosa pura de almidón entre los transductores y las probetas (Figura 36), con el fin de minimizar las atenuaciones de la señal en función de las diferencias de impedancia (Gonçalves et al., 2011b).



Figura 36. Realización de ensayo con Olympus Epoch 600: (a) ensayo en probeta prismática y (b) ensayo en probeta poliédrica.

Para caracterizar las probetas prismáticas, se midieron sus dimensiones con un calibre y se determinó su masa en una balanza. A partir de estos datos, se calcularon el volumen y la densidad de cada muestra ensayada. Las dimensiones y las constantes elásticas evaluadas se recogen en la Tabla 8.

No obstante, la obtención de resultados de ensayo no fue viable para la totalidad de las muestras. La ejecución del ensayo y la consecuente obtención de resultados válidos se vieron dificultadas en ciertos casos por factores como la confusa orientación de los anillos de crecimiento, diversas irregularidades en la madera y una acusada desviación de la fibra de algunas de las probetas.

Tabla 8. Dimensiones de las probetas prismáticas extraídas y coeficientes elásticos obtenidos en cada caso.

Nº probeta	Cantidad	Ancho (mm)	Alto (mm)	Longitud (mm)	Coefficientes Ensayo de Ultrasonidos
1	5	20	20	60	C_{11} , C_{55} , C_{66}
2	5	20	20	60	C_{22} , C_{44} , C_{66}
3	5	20	20	60	C_{33} , C_{44} , C_{55}
4	5	20	20	60	C_{12}
5	5	20	20	60	C_{13}
6	5	20	20	60	C_{23}

En el caso de las probetas poliédricas, para el cálculo de las velocidades longitudinales (V_{LL} , V_{RR} y V_{TT}) se determinó la longitud del recorrido de la onda y, utilizando el transductor de onda longitudinal, se midió el tiempo de propagación en las direcciones L, R y T, respectivamente. Considerando las mismas direcciones, pero utilizando el transductor de onda transversal, se calcularon las velocidades transversales (V_{LR} , V_{LT} , V_{RL} , V_{RT} , V_{TR} y V_{TL}). Para la determinación de las velocidades correspondientes a la propagación de la onda fuera de los ejes de simetría, el tiempo de propagación de la onda se tomó en las caras que representan ejes inclinados 45° con respecto a cada plano.

Siguiendo el procedimiento sugerido por Bucur (2006), los valores de velocidad obtenidos en los dos tipos de probeta (prismas y poliedros), para una misma dirección de propagación, fueron evaluados para determinar los errores absolutos (en velocidad) y relativos (en porcentaje). Bucur (2006) propone que el error absoluto (e) se determine mediante la Ecuación 19, mientras que el error relativo se calcula como la razón entre el error absoluto y la media. La variabilidad de los resultados fue calculada mediante el coeficiente de variación (CV).

$$e = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad \text{Ecuación 19}$$

Siendo
 s desviación estándar;
 n número de mediciones.

Con las velocidades obtenidas, se determinaron los coeficientes de la matriz de rigidez [C] mediante las ecuaciones de Christoffel. Posteriormente, esta matriz [C] fue invertida utilizando métodos matemáticos y, con dicha inversión, se obtuvo la matriz de flexibilidad [S], que contiene todos los parámetros elásticos que se deseaba determinar.

Las muestras cilíndricas fueron ensayadas en condición saturada. Para el uso del equipo de ultrasonidos, fue fundamental conocer la orientación exacta de la muestra con respecto al eje longitudinal del árbol. La Figura 37 muestra los planos y direcciones utilizados en los ensayos, los cuales se determinaron de acuerdo con la dirección de las fibras de la madera. Para los cálculos, cuando la propagación ocurrió en la dirección radial, se utilizó la longitud de la muestra, y, cuando la propagación ocurrió en las direcciones tangencial o longitudinal, se utilizó la anchura (diámetro) de la muestra, siendo estas direcciones perpendiculares entre sí.



Figura 37. Direcciones radial, tangencial y longitudinal sobre muestra cilíndrica extraída del árbol en pie.

Todas las muestras fueron reducidas a una longitud aproximada de 10 mm, siguiendo el procedimiento indicado por Silva et al. (2020). En el citado trabajo se reduce la longitud de las muestras después de que las mediciones iniciales, realizadas sobre elementos de 80 mm de longitud, concluyesen que no era posible la lectura del tiempo propagación de la onda en el sentido radial.

Antes del ensayo de ultrasonido, se realizaron mediciones de las dimensiones y del peso de las muestras cilíndricas. Con un calibre se obtuvo el diámetro y la longitud de cada muestra, y mediante una balanza digital se determinó la masa de las muestras en estado saturado. De esta forma se obtuvieron la masa y el volumen inicial/saturado (m_{sat} y v_{sat}). Con las dimensiones de la longitud recorrida por la onda (longitud de la muestra o diámetro) y el tiempo de propagación de las ondas de cortante obtenidos mediante el ensayo de ultrasonido, fue posible calcular la velocidad en los tres ejes de simetría de la madera (Ecuación 5). De este modo, se pudieron calcular las velocidades de cortante en los planos Radial (R) / Longitudinal (L) - V_{RL} , Longitudinal (L) / Radial (R) - V_{LR} , Radial (R) / Tangencial (T) - V_{RT} , Tangencial (T) / Radial (R) - V_{TR} , Tangencial (T) / Longitudinal (L) - V_{TL} , y Longitudinal (L) / Tangencial (T) - V_{LT} .

Después del ensayo de ultrasonido, las muestras fueron sometidas a un proceso de secado en estufa para obtener la masa seca. Durante el secado, las muestras permanecieron en la estufa a una temperatura de 103 ± 2 °C hasta que la diferencia entre dos lecturas consecutivas de masa fuera inferior al 0,5 % (conforme a la norma UNE-EN 13183-1:2002), obteniéndose así la masa final/seca (m_{seca}). Con los datos de masa seca y volumen saturado (v_{sat}) fue posible determinar la densidad básica (ρ_B) de las muestras, utilizando la Ecuación 20.

$$\rho_B = \frac{m_{seca}}{v_{sat}} \quad \text{Ecuación 20}$$

Con los resultados de velocidad y densidad básica (ρ_B), se obtuvieron los coeficientes de rigidez (C_{44} , C_{55} , C_{66} ; Ecuaciones 21, 22 y 23).

$$C_{44(RT)} = \rho_B \cdot \left(\frac{V_{RT} + V_{TR}}{2} \right) \quad \text{Ecuación 21}$$

$$C_{55(LT)} = \rho_B \cdot \left(\frac{V_{TL} + V_{LT}}{2} \right) \quad \text{Ecuación 22}$$

$$C_{66(RL)} = \rho_B \cdot \left(\frac{V_{RL} + V_{LR}}{2} \right) \quad \text{Ecuación 23}$$

Siendo

V_{RT} la velocidad de cortante en el plano Radial (R) / Tangencial (T);

V_{TR} la velocidad de cortante en el plano Tangencial (T) / Radial (R);

V_{TL} la velocidad de cortante en el plano Tangencial (T) / Longitudinal (L);

V_{LT} la velocidad de cortante en el plano Longitudinal (L) / Tangencial (T);

V_{RL} la velocidad de cortante en el plano Radial (R) / Longitudinal (L);

V_{LR} la velocidad de cortante en el plano Longitudinal (L) / Radial (R).

4.4.5 Ensayos de compresión sobre prismas

Estos ensayos fueron realizados en el Laboratório de Materiais e Estruturas (LME) de la Faculdade de Engenharia Agrícola de la Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

Las mismas probetas prismáticas empleadas en los ensayos de ultrasonidos también se utilizaron en los ensayos de compresión estática. Las dimensiones y constantes elásticas evaluadas para cada probeta se recogen en la Tabla 9.

Tabla 9. Dimensiones de las probetas prismáticas extraídas y coeficientes elásticos obtenidos en cada caso.

Nº probeta	Cantidad	Ancho (mm)	Alto (mm)	Longitud (mm)	Coefficientes Ensayos de Compresión
1	5	20	20	60	E_L, ν_{LR}, ν_{LT}
2	5	20	20	60	E_R, ν_{RL}, ν_{RT}
3	5	20	20	60	E_T, ν_{TR}, ν_{TL}
4	5	20	20	60	G_{LR}
5	5	20	20	60	G_{LT}
6	5	20	20	60	G_{RT}

Los ensayos de compresión se realizaron de acuerdo con la norma ISO 13061, utilizando para ello una máquina universal de ensayos, acoplando la placa de compresión a una célula de carga de 50 kN y disponiendo de una placa inferior para el apoyo de la probeta. Ambas superficies se mantuvieron perfectamente paralelas y horizontales durante el ensayo. La velocidad de ensayo estuvo comprendida entre $0,40 \text{ mm min}^{-1}$ y $0,80 \text{ mm min}^{-1}$. Para los ensayos se utilizaron 5 canales del sistema de adquisición de datos: cuatro para las galgas extensométricas y uno para la célula de carga.

Se realizaron seis ensayos mecánicos diferentes: compresión paralela a la fibra, aplicando la carga paralela a la dirección longitudinal (probeta 1) (Figura 38); compresión perpendicular, aplicando la carga en las direcciones radial (probeta 2) y tangencial (probeta 3) y compresión oblicua (probetas 4, 5 y 6) (Figura 38), aplicando la carga en probetas obtenidas con una inclinación de 45° respecto a las tres direcciones de la fibra (Tabla 9).

Para la medición de las deformaciones se pegaron galgas extensométricas en dos caras de las probetas (Figura 38). En el ensayo de compresión paralela a la fibra, se colocó una galga doble (vertical en dirección L y horizontal en dirección R) en la cara frontal y una galga simple (horizontal en dirección T) en una de las caras laterales (Figura 38). Con esta disposición, se obtuvieron los valores de la tensión en el plano longitudinal (σ_L) y de las deformaciones en los planos longitudinal, radial y tangencial ($\epsilon_L, \epsilon_R, \epsilon_T$) para el cálculo del módulo de elasticidad en la dirección longitudinal (E_L), y los coeficientes de Poisson (ν_{LR} y ν_{LT}), según las Ecuaciones 24. Este ensayo se realizó según las indicaciones de la norma ISO 13061-17:2017.

$$E_L = \frac{\sigma_L}{\epsilon_L}; \nu_{LT} = \frac{\epsilon_T}{\epsilon_L}; \nu_{LR} = \frac{\epsilon_R}{\epsilon_L} \quad \text{Ecuaciones 24}$$

En el ensayo de compresión perpendicular a la fibra con la carga en la dirección radial, y realizado según la norma ISO 13061-5:2020, en cada probeta se colocó una galga doble (vertical en dirección R y horizontal en dirección L) en la cara frontal, y una galga simple (horizontal en dirección T) en una cara lateral. Con esta disposición, se obtuvieron los valores de la tensión en la dirección radial (σ_R) y las deformaciones en los planos longitudinal, radial y

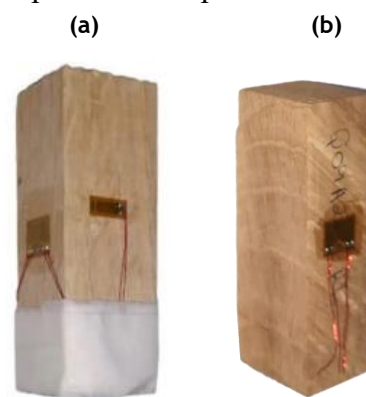


Figura 38. Probetas para el ensayo de compresión: (a) probeta 1 para ensayo de compresión paralela a la fibra y (b) probeta 4, para ensayo de compresión oblicua.

tangencial ($\varepsilon_L, \varepsilon_R, \varepsilon_T$) para el cálculo del módulo de elasticidad en la dirección radial (E_R), y los coeficientes de Poisson (ν_{RL} y ν_{RT}), según las Ecuaciones 25.

$$E_R = \frac{\sigma_R}{\varepsilon_R}; \nu_{RT} = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_R}; \nu_{RL} = \frac{\varepsilon_L}{\varepsilon_R} \quad \text{Ecuaciones 25}$$

Para el ensayo de compresión perpendicular a la fibra con la carga en la dirección tangencial, se fijó una galga doble (vertical en dirección T y horizontal en dirección R) en la cara frontal, y una galga simple (horizontal en dirección L) en una cara lateral. Con el valor de tensión en la dirección tangencial (σ_T) y las deformaciones en las tres direcciones, se calculó el módulo de elasticidad en la dirección tangencial (E_T) y los coeficientes de Poisson ν_{TR} y ν_{TL} (Ecuaciones 26). Al igual que el ensayo de compresión perpendicular a la fibra en la dirección radial, se siguieron las indicaciones de la norma ISO 13061-5:2020.

$$E_T = \frac{\sigma_T}{\varepsilon_T}; \nu_{TR} = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_T}; \nu_{TL} = \frac{\varepsilon_L}{\varepsilon_T} \quad \text{Ecuaciones 26}$$

Los ensayos de compresión oblicua se realizaron utilizando las probetas 4, 5 y 6, (según Tabla 9) con una inclinación de la fibra de 45° respecto a la dirección de la carga, para ello se colocó una galga doble en la cara frontal de cada probeta (Figura 38). El cálculo de los módulos de cortante (G_{TL}, G_{RL}, G_{RT}) se realizó aplicando las Ecuaciones 27, 28, 29, partiendo de los resultados de tensión ($\sigma_{L'}, \sigma_{R'}, \sigma_{T'}$) y las deformaciones en las tres direcciones consideradas ($\varepsilon_{L'}, \varepsilon_{R'}, \varepsilon_{T'}$), que, en ese caso, están inclinadas 45° .

$$G_{TL} = \frac{\sigma_{L'}}{2(\varepsilon_{T'} - \varepsilon_{L'})} \quad \text{Ecuación 27}$$

$$G_{RL} = \frac{\sigma_{R'}}{2(\varepsilon_{R'} - \varepsilon_{L'})} \quad \text{Ecuación 28}$$

$$G_{RT} = \frac{\sigma_{T'}}{2(\varepsilon_{R'} - \varepsilon_{T'})} \quad \text{Ecuación 29}$$

Los valores calculados a partir de los ensayos de compresión sobre probetas prismáticas se utilizaron para la comparación con los parámetros de caracterización del *Quercus robur*, determinados mediante la matriz de flexibilidad obtenida a partir del ensayo con ultrasonidos en poliedros de 26 caras.

4.5 INFLUENCIA DE FACTORES CLIMÁTICOS Y ESTACIONALES EN LA APLICACIÓN DE TÉCNICAS ACÚSTICAS PARA LA ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE *QUERCUS ROBUR* EN EL ÁRBOL EN PIE

4.5.1 Planteamiento general

El material de ensayo estuvo compuesto por un total de seis árboles de *Quercus robur*, localizados en una parcela situada en el municipio de Begonte, en Lugo, Galicia. Sobre estos seis pies seleccionados, se procedió inicialmente a la medición de parámetros dendrométricos y a la extracción de muestras cilíndricas para determinar la densidad.

Los ensayos realizados consistieron en la aplicación de las técnicas de ultrasonidos, utilizando el equipo USLab, y de ondas de impacto, mediante el equipo MST.

La metodología de muestreo se diseñó para capturar la posible variación de la velocidad de propagación de las ondas a lo largo de un ciclo anual completo así como, de manera diaria. Este muestreo estacional se distribuyó en nueve días de medición específicos, con fechas que abarcaron desde enero hasta diciembre de 2020. Para cada día de medición se realizaron mediciones en tres momentos distintos del día: el amanecer, el mediodía y el atardecer. En cada

ocasión de medición se registró información sobre las condiciones climáticas. Las mediciones se realizaron considerando dos distancias entre transductores, 0,4 m y 0,7 m, y se compararon los resultados de velocidad obtenidos en ambos tramos de medición.

4.5.2 Material de ensayo

Se realizaron mediciones sobre un total de 6 árboles de *Quercus robur*, localizados en una “carballeira” ubicada en el municipio de Begonte (Lugo, Galicia) (Figura 39).

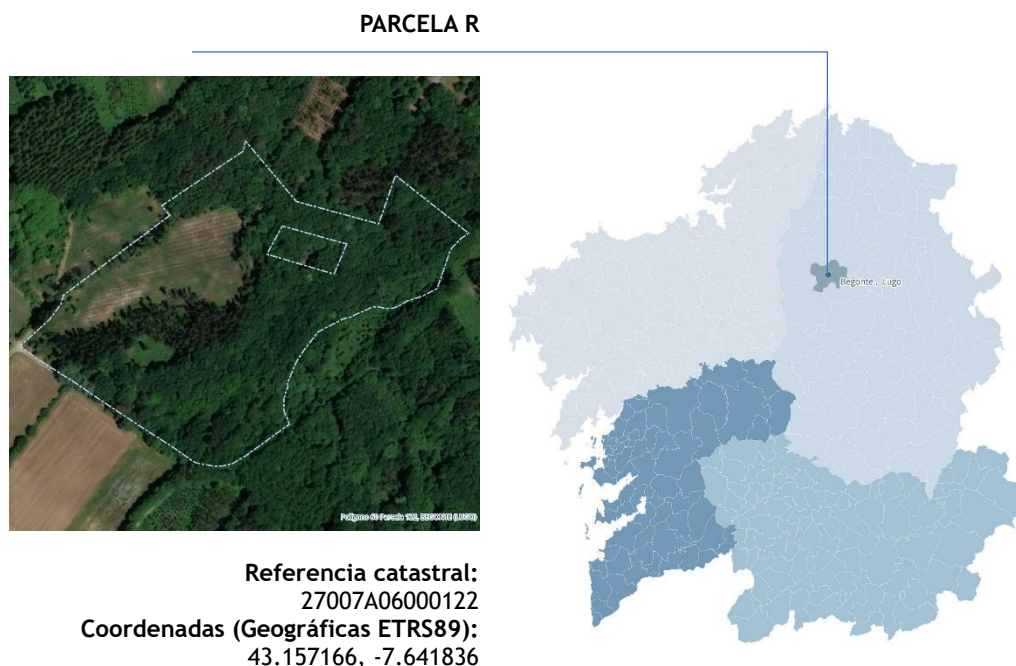


Figura 39. Ortofoto y datos de localización de la parcela de estudio situada en el ayuntamiento de Begonte (Lugo, Galicia).

4.5.3 Ensayos no destructivos

Sobre los 6 pies seleccionados, se registraron los parámetros geométricos: diámetros normales (a 1,3 m del suelo), diámetros basales, diámetros y altura de copa y altura total de los pies. Se extrajeron testigos cilíndricos de cada uno de los árboles para la determinación de la densidad de cada individuo, utilizando la barrena de Pressler.

Los ensayos ejecutados consistieron en la aplicación de dos técnicas acústicas basadas en el tiempo de vuelo: ultrasonidos, con el equipo USLab y ondas de impacto, haciendo uso del equipo MST. La metodología de muestreo temporal consistió en la medición de la velocidad de propagación de la onda a lo largo de un ciclo anual completo, distribuido en nueve jornadas de medición específicas (Figura 40). Además del muestreo estacional, se incluyó un muestreo diario, tomando datos en tres momentos diferentes del día: amanecer, mediodía y atardecer.

Nivel 1: Muestreo estacional	
Día	Fecha
1	17/01/2020
2	14/02/2020
3	28/04/2020
4	02/06/2020
5	08/07/2020
6	30/07/2020
7	24/09/2020
8	29/10/2020
9	03/12/2020



Nivel 2: Muestreo diario	
	Velocidad al amanecer (V_1)
	Velocidad al mediodía (V_2)
	Velocidad al anochecer (V_3)

Figura 40. Muestreos realizados y fechas de ensayo.

Para cada fecha y franja horaria se registraron las condiciones climáticas de temperatura, humedad relativa del aire y velocidad del viento.

El proceso de registro de datos adoptado incluyó la variación de la distancia entre transductores, comparando dos tramos de medición, de 0,4 m y 0,7 m. Inicialmente, se planteó el uso de una distancia entre transductores de 0,4 m, replicando así el procedimiento aplicado en los ensayos realizados sobre árbol en pie en esta investigación. Con esta configuración se dispuso de un total de 162 datos para cada una de las técnicas utilizadas. Posteriormente, a partir del cuarto día de mediciones, se consideró oportuno el aumento de la distancia entre transductores a 0,7 m, con el objetivo de comparar los resultados de velocidad obtenidos en los dos tramos de medición. Para la distancia de 0,7 m se recopilaban un total de 108 datos de velocidad para cada técnica aplicada.

4.6 POSIBILIDADES DE APLICACIÓN DE MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS EN LA EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LÁMINAS DE MADERA DE *QUERCUS ROBUR* CON UNIONES DENTADAS

4.6.1 Planteamiento general

Se definieron tres grupos de material con diferentes características según criterios de clasificación visual (Grupo 1), densidad (Grupo 2) y velocidad de propagación de onda (Grupo 3). El objetivo de esta clasificación previa es el de poder disponer de análisis aislados para determinar la influencia de la unión dentada en la rigidez de la lámina, así como evaluar la aplicabilidad de las técnicas no destructivas en la estimación del módulo de elasticidad en elementos donde el material de origen presentaba densidades variables o velocidades de propagación diferentes.

Para el primer grupo se seleccionaron tablas de sección 80 x 20 mm con alta calidad visual y con densidades comprendidas entre 740 kg m^{-3} y 900 kg m^{-3} . Cada una de estas tablas se dividió en segmentos de igual longitud y se reensambló dando lugar a 8 láminas con uniones dentadas.

El segundo grupo se conformó con tablas con densidades variables y clasificadas en tres bloques según su rango de velocidad de onda. El propósito fue fabricar 10 láminas combinando tablas dentro del mismo intervalo de velocidad, pero con diferentes densidades.

En el tercer grupo se seleccionaron tablas con velocidades variables y se clasificaron en tres bloques según su rango de densidad. El objetivo en este caso fue combinar tablas dentro del mismo intervalo de densidad, pero con diferentes velocidades. Para este tercer lote se obtuvieron también 10 láminas.

En total, se fabricaron 28 láminas considerando las indicaciones recogidas en la norma UNE-EN 15497:2014. Sobre las láminas fabricadas, se ejecutaron ensayos no destructivos con tres técnicas acústicas diferentes: ondas ultrasónicas (USLab); ondas de impacto (MST) y frecuencia natural de vibración (MTG). Con los citados equipos se efectuaron mediciones longitudinales. En el caso del USLab y el MST se realizaron también mediciones superficiales con una inclinación de los transductores de 45°. Estas mediciones indirectas se realizaron de dos maneras: individualmente en cada unión dentada, y de manera progresiva, manteniendo un transductor fijo y recorriendo la tabla con el otro, pasando secuencialmente por todos los empalmes.

Posteriormente, se seleccionaron 20 láminas del conjunto para someterlas a ensayos estáticos de tracción paralela a la fibra. Este ensayo se diseñó para medir la rigidez de la lámina en el rango elástico, sin llevar el material a rotura, utilizando para ello la técnica de correlación digital de imágenes (DIC). Considerando la capacidad de la técnica DIC para sustituir con precisión a los sensores de desplazamiento tradicionales (Vafadar et al., 2024), el módulo de elasticidad obtenido mediante este sistema se empleó como referencia. Dicho parámetro se usó como variable dependiente para generar los modelos de regresión con las mediciones acústicas en tablas y láminas con uniones dentadas.

4.6.2 Material de ensayo

Sobre el conjunto de tablas disponibles tras el proceso de secado comentado en apartados anteriores, se realizó una selección del material dando lugar a los grupos que se describen a continuación. Las tablas seleccionadas para este estudio ya habían sido previamente cepilladas y presentaban una sección de 80 x 20 mm.

GRUPO 1: Se dispuso de un primer lote de tablas de *Quercus robur* que fueron escogidas siguiendo criterios visuales, incluyendo piezas limpias de nudos y de otras singularidades, así como criterios de densidad. Se seleccionaron un total de 8 tablas con una densidad comprendida entre 740 y 900 kg m⁻³ (Tabla 10).

Tabla 10. Tablas pertenecientes al primer grupo de material (Grupo 1), densidades y valores de velocidades obtenidas con los diferentes equipos empleados.

Código	Densidad (Kg m ⁻³)	V _{MST} (m s ⁻¹)	V _{USLab} (m s ⁻¹)	V _{MTG} (m s ⁻¹)
S04A24	823	4253	4221	4317
M02A06	787	4710	4715	4858
S04A07	893	4610	4610	4498
M07C13	795	3991	4043	4169
M07C12	741	4181	4241	4198
S04C06	823	3542	3479	3486
S04A08	853	4421	4475	4316
M07A27	753	3840	3910	4147

A continuación, cada una de las tablas fue dividida en segmentos de 300 mm de longitud, que posteriormente se unieron mediante *finger-joint* para "reconstruir" la tabla original (Figura 41). Dentro de este grupo se fabricaron un total de 8 láminas.

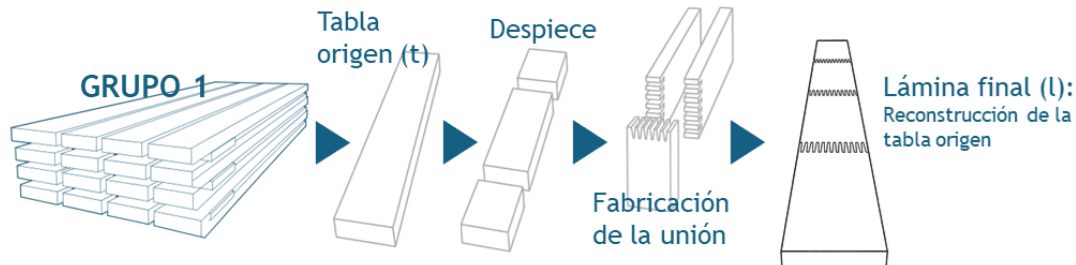


Figura 41. Proceso de fabricación de láminas para el material perteneciente al Grupo 1.

GRUPO 2: se eligieron tablas con densidades variables y se clasificaron en tres bloques según el rango de velocidad (Bloque 2.1: velocidades comprendidas entre 3500 y 4000 m s^{-1} ; Bloque 2.2: velocidades entre 4000 y 4500 m s^{-1} ; Bloque 2.3: velocidades entre 4500 y 5000 m s^{-1}) (Tabla 11). De manera general y para establecer la clasificación según bloques, se tomó como referencia la velocidad obtenida con la técnica de ondas de impacto (V_{MST}).

Estas tablas fueron saneadas y combinadas entre ellas (respetando los bloques indicados en la Tabla 11) para la fabricación de láminas con uniones dentadas que incorporaban elementos dentro del mismo rango de velocidad, pero con diferentes densidades (Figura 42).

Tabla 11. Tablas pertenecientes al segundo grupo de material (Grupo 2), densidades, valores de velocidades obtenidas con los diferentes equipos empleados y su clasificación según bloques.

Bloque	Código	Densidad (Kg m ⁻³)	V _{MST} (m s ⁻¹)	V _{USLab} (m s ⁻¹)	V _{MTG} (m s ⁻¹)
Bloque 2.1	Q07A02	761	3835	3789	3734
	S05A10	913	3840	3811	3513
	S12B20	764	3863	3740	3803
	M07B15	880	3849	3803	3625
	M07A04	812	3872	3887	3503
Bloque 2.2	Q03A03	719	4157	4092	4045
	M21B27	851	4125	4111	4090
	M07C08	776	4102	4128	4138
	M21A23	839	4259	4266	4158
	S04A03	870	4383	4326	4222
	M02B05	795	4464	4518	4546
	M02B03	773	4375	4350	4381
	S13B03	905	4402	4305	4460
Bloque 2.3	S17A10	815	4516	4469	4337
	M23A18	886	4539	4629	4668
	Q07B03	753	4513	4442	4173
	M23A18	886	4539	4629	4668
	M02A04	782	4632	4658	4631
	M02A08	803	4727	4679	4529
	M02A03	803	4727	4679	4529
	Q08B07	716	4785	4638	4547
	M02A05	772	4715	4746	4582

Leyenda: V_{MST}: velocidad con el equipo MST (m s⁻¹); V_{USLab}: velocidad con el equipo USLab (m s⁻¹); V_{MTG}: velocidad con el equipo MTG (m s⁻¹).

Con el material indicado en la Tabla 11 se fabricaron un total de 10 láminas (Figura 42).

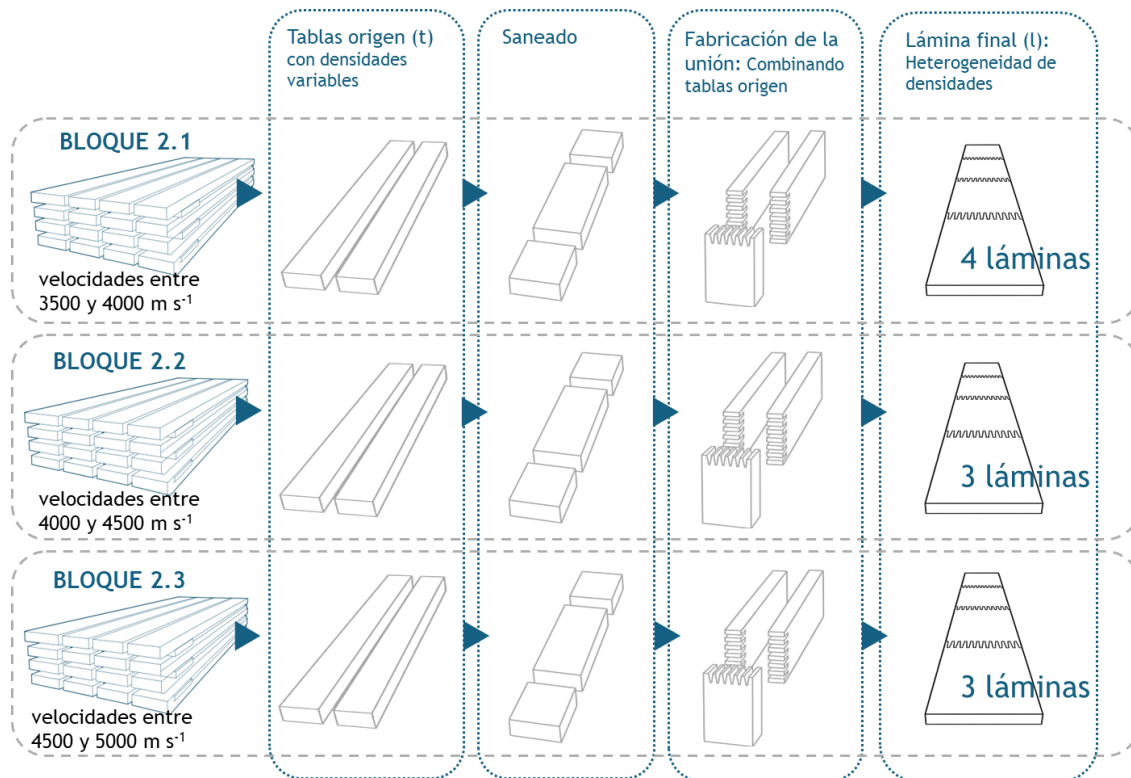


Figura 42. Proceso de fabricación de láminas para el material perteneciente al Grupo 2.

GRUPO 3: se escogieron tablas con velocidades variables y se clasificaron en tres bloques según el rango de densidad (Bloque 3.1: densidades comprendidas entre 700 y 780 kg m^{-3} ; Bloque 3.2: densidades entre 800 y 890 kg m^{-3} ; Bloque 3.3: densidades entre 890 y 1000 kg m^{-3}) (Tabla 12). Estas tablas fueron saneadas y combinadas entre ellas (respetando los bloques indicados en la Tabla 12) para la fabricación de láminas con uniones dentadas que integraban piezas dentro del mismo rango de densidad, pero con velocidades diferentes (Figura 43).

Tabla 12. Tablas pertenecientes al tercer grupo de material (Grupo 3), densidades y valores de velocidad obtenida con los diferentes equipos empleados.

Bloque	Código	Densidad (Kg m ⁻³)	V _{MST} (m s ⁻¹)	V _{USLab} (m s ⁻¹)	V _{MTG} (m s ⁻¹)
Bloque 3.1	Q07B02	735	4279	4229	4078
	M21A29	734	4457	4514	4156
	S13A04	766	4142	4142	4289
	M21A44	710	4042	4094	4035
	S13B02	752	3935	3828	3846
	S17B06	758	4271	4225	4010
	S13A05	754	4046	3958	3953
	M21A27	710	4454	4500	4645
	S13B04	782	3851	3848	3863
Q07B04	757	4250	4161	3955	
Bloque 3.2	S17A09	827	4163	4070	3958
	M21A31	884	4348	4422	4355
	M21A34	847	3759	3734	3435
	S05B12	884	4063	3964	3463
	S17B03	821	3955	3798	3787
	M23A04	851	4392	4434	4235
	S05B12	884	4063	3964	3463
	M23A04	851	4392	4434	4235
	S17A02	833	4039	3918	3759
S13A02	821	4272	4216	4265	
Bloque 3.3	M23A06	894	4075	4095	3978
	M23A02	894	4346	4429	4303
	S05A15	899	4054	4022	3894
	M23A37	980	4182	4234	4167
	S13B01	975	4025	3938	3826
	S05A20	924	4061	4087	3847

Dentro de este tercer grupo se fabricaron un total de 10 láminas (Figura 43).

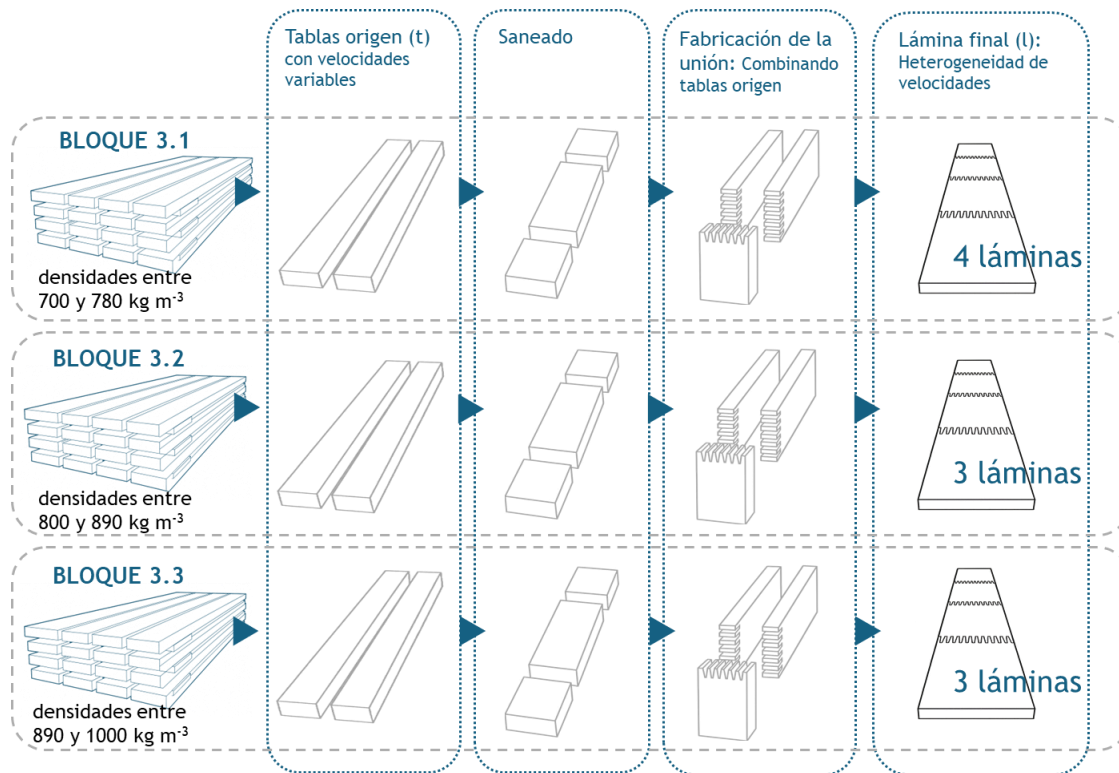
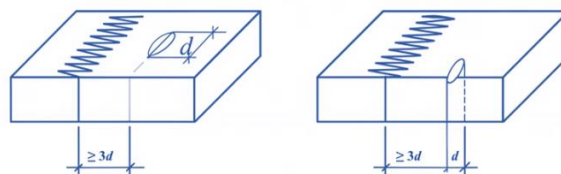


Figura 43. Proceso de fabricación de láminas para el material perteneciente al Grupo 3.

Una vez seleccionado y agrupado el material, se llevó a cabo la fabricación de las láminas empleando el equipamiento disponible en el laboratorio de PEMADE, y descrito en el apartado 4.2.5.

Para el material perteneciente a los grupos 2 y 3, se procedió al saneado de las tablas considerando las indicaciones de la norma UNE-EN 56546:2022, con respecto a la identificación y cuantificación de singularidades, y los criterios de la norma UNE-EN 15497:2014. La norma europea UNE-EN 15497 establece el marco regulatorio para la producción de madera maciza con uniones dentadas. La norma está explícitamente desarrollada para especies de coníferas y chopo. Sin embargo, en su objeto y campo de aplicación (*Capítulo I*), abre la puerta a la fabricación con otras especies de frondosas, siempre que se cumplan los requisitos de rendimiento y fabricación especificados. Considerando los requisitos indicados en la citada norma, y en el momento de proceder al corte de las tablas, se comprobó que la distancia entre un nudo y el punto de corte, en donde se mecanizaría la unión, no fuera inferior a $l_i + 3d$ (donde l_i es la longitud del diente y d es el diámetro del nudo), para garantizar que la fibra se mantuviera suficientemente recta (Figura 44). Se aseguró, también, que no existan gemas o daños que afecten a más de dos aristas en la zona en la que se mecanizaría el dentado.



Considerando lo anterior, se procedió al corte de las tablas a longitudes variables. Cada segmento fue codificado individualmente para garantizar la trazabilidad durante el proceso y se agrupó según los bloques de material predefinidos (Figura 45), quedando las piezas preparadas para la ejecución de la unión dentada.

La norma UNE-EN 15497:2014 indica que, en el momento del montaje, el contenido de humedad de cada pieza deberá estar comprendido entre el 7 % y el 18 %. Además, la diferencia de humedad entre dos tablas a empalmar no debe ser superior al 5 %. Por este motivo, se llevó a cabo la comprobación del contenido de humedad con xilohigrómetro de resistencia eléctrica, verificando que el conjunto de tablas tuviera una humedad homogénea, de 12 ± 2 %.

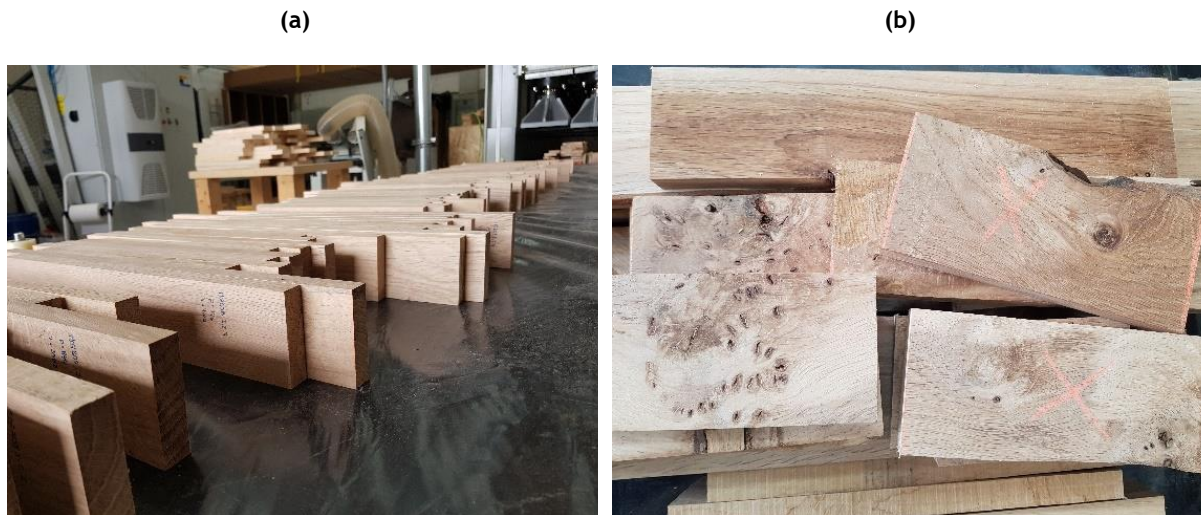


Figura 45. Material saneado: (a) tablas cortadas y agrupadas por bloques de manera previa a la fabricación de las láminas; (b) restos de material rechazado.

La forma y dimensiones de los dientes de la unión son cruciales para la transferencia de esfuerzos, los parámetros geométricos que definen una unión dentada y algunas consideraciones de la norma UNE-EN 15497 incluyen (Figura 46):

- Longitud del diente (l_j), es la distancia desde la base de la entalladura hasta la punta del diente, medida a lo largo de su eje. Debe ser de 10 mm como mínimo.
- Paso del diente (p), es la distancia entre ejes de dos dientes contiguos.
- Ángulo del diente (α), es la pendiente o inclinación de la cara del diente respecto a la perpendicular del eje de la pieza. Para el ángulo del diente (α), esta norma fija un valor $\leq 7,1$.
- Anchura de la punta (b_t), es la anchura del extremo de la punta del diente.
- Factor de reducción (v), es un parámetro adimensional que representa la eficiencia del perfil. Se calcula como la relación entre la anchura en punta y el paso: $v = b_t / p$. Este factor debe ser $v \leq 0,20$. Esto asegura que haya suficiente superficie de encolado en las caras laterales de los dientes.

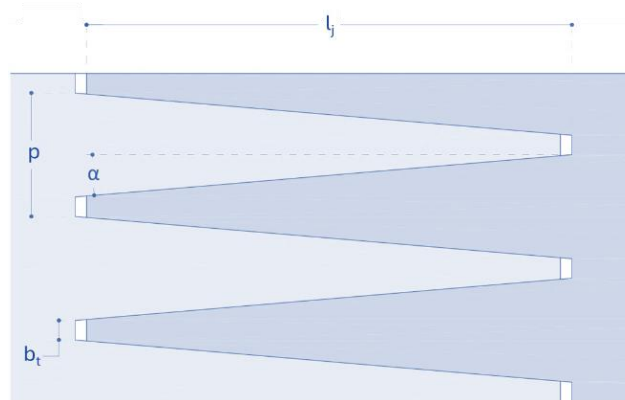


Figura 46. Esquema de unión dentada y parámetros que la definen.

El Anexo G.4.2 de la norma UNE-EN 15497:2014 establece una relación entre la longitud del diente (l_j) y el paso (p), según la Ecuación 30.

$$l_j \geq 4 \cdot p \cdot (1 - 2v) \quad \text{Ecuación 30}$$

Siendo

v factor de reducción

Las fresas utilizadas para el mecanizado de la unión dentada tenían una longitud de 20 mm. La selección de esta longitud se basó en que es una medida habitual en aplicaciones estructurales y, además, cumple sobradamente el requisito mínimo de 10 mm recogido en la norma UNE-EN 15497:2014. La geometría del dentado obtenida con el empleo de estas fresas se ajustó a la geometría recomendada en la norma UNE-EN 15497, con longitud del diente (l_j) de 20 mm, paso (p) de 6,2 mm, anchura del diente (b_t) de 0,9 mm y el factor de reducción (v) de 0,15 mm (Figura 47).

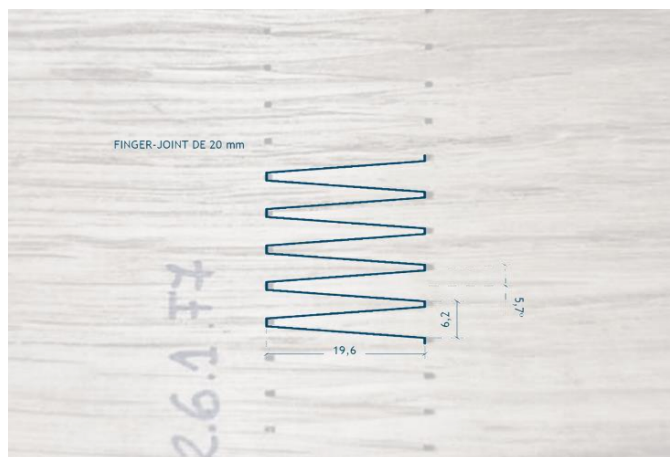


Figura 47. Geometría final de unión dentada en madera de *Quercus robur* (dimensiones en mm).

Se ajustaron también los parámetros del equipo para regular la presión y el gramaje, buscando las condiciones óptimas para conseguir un *finger-joint* estructural adaptado a la especie *Quercus robur* y a la normativa de aplicación. La presión aplicada es fundamental y depende de la geometría, la especie, la humedad y la temperatura. La norma proporciona en una

curva guía de valores recomendados de presión en función de la longitud del diente, que sirve como referencia para el ajuste del proceso. La presión aplicada en este caso fue de $10 - 12 \text{ N mm}^{-2}$.

El adhesivo empleado fue LOCTITE® HB S709 PURBOND, un adhesivo monocomponente a base de poliuretano (PUR), cuyo fraguado se produce por reacción con la humedad de la madera y la humedad ambiental. Por esta razón, fue muy importante mantener las condiciones controladas al máximo posible hasta que se produjera el fraguado completo. La aplicación del adhesivo se realizó a razón de 120 g m^{-2} y se aplicó a una temperatura de $20 \pm 2 \text{ °C}$, con un contenido de humedad de la madera de $12 \pm 2 \%$, cumpliendo con los requisitos del fabricante para su aplicación. La homogeneidad en el contenido de humedad de la madera utilizada aseguró que la diferencia de humedad entre dos piezas encoladas no superara el 4% , según se establece en la ficha técnica del adhesivo.

El proceso que realiza la línea, descrito de forma simplificada, fue el siguiente: se introdujo un paquete de tablas alineadas por testa; se realizó el fresado correspondiente de los dientes en las testas; la mesa con las tablas rotó para repetir el proceso en las testas opuestas; un peine encolador aplicó adhesivo en las testas; las tablas se transfirieron a una posición en fila para finalmente ser empalmadas y prensadas de cabeza en la zona de prensa (Figura 48). Una vez concluido el proceso de fabricación del *finger-joint*, las láminas obtenidas permanecieron a temperatura ambiente en el interior de la nave de fabricación, a 18 °C , evitando vibraciones, movimientos bruscos o entrada en carga de las uniones hasta que el proceso de curado finalizó.

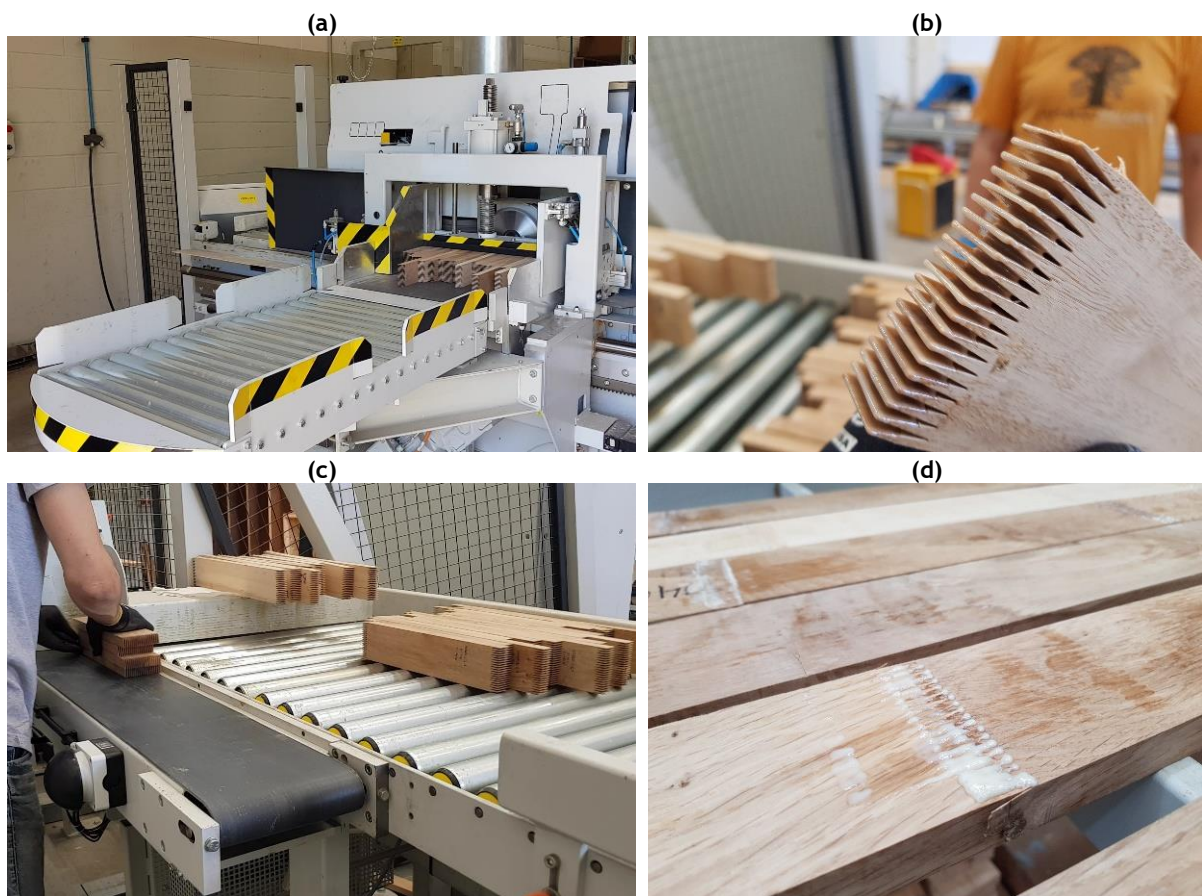


Figura 48. Imágenes del proceso de fabricación de la unión dentada, por orden de ejecución: (a) retestado de tablas y mecanización de la unión; (b) *finger-joint* mecanizado y tras la aplicación del adhesivo; (c) posicionamiento de tablas con *finger-joint* para su ensamble; (d) salida de la lámina fabricada al final de la línea.

4.6.3 Ensayos con técnicas acústicas

Sobre las 28 láminas fabricadas considerando los tres grupos de material, se realizaron ensayos no destructivos mediante las técnicas de propagación de ondas ultrasónicas, con el equipo USLab, ondas de impacto con el equipo MST, y frecuencia natural de vibración, con el equipo MTG. En concreto, se llevaron a cabo los siguientes tipos de medición:

- Mediciones longitudinales, con las técnicas de ultrasonidos, ondas de impacto y vibración (Figura 49). En el caso del equipo USLab, se emplearon tanto los transductores planos como los cónicos.
- Mediciones superficiales considerando la longitud total de la lámina, con las técnicas de ultrasonidos y ondas de impacto.
- Mediciones superficiales a 45° de cada *finger-joint* de forma individual, con las técnicas de ultrasonidos y ondas de impacto (Figura 50a y b).
- Mediciones superficiales “progresivas”, a lo largo de toda la lámina, manteniendo un transductor en un punto fijo (1), mientras el otro se desplazaba secuencialmente, pasando por todas las uniones (Figura 50c). De esta manera se registraron velocidades de propagación de la onda para los tramos 1-2; 1-3; 1-4; 1-5; 1-6 (en función del número de uniones presentes en cada lámina).

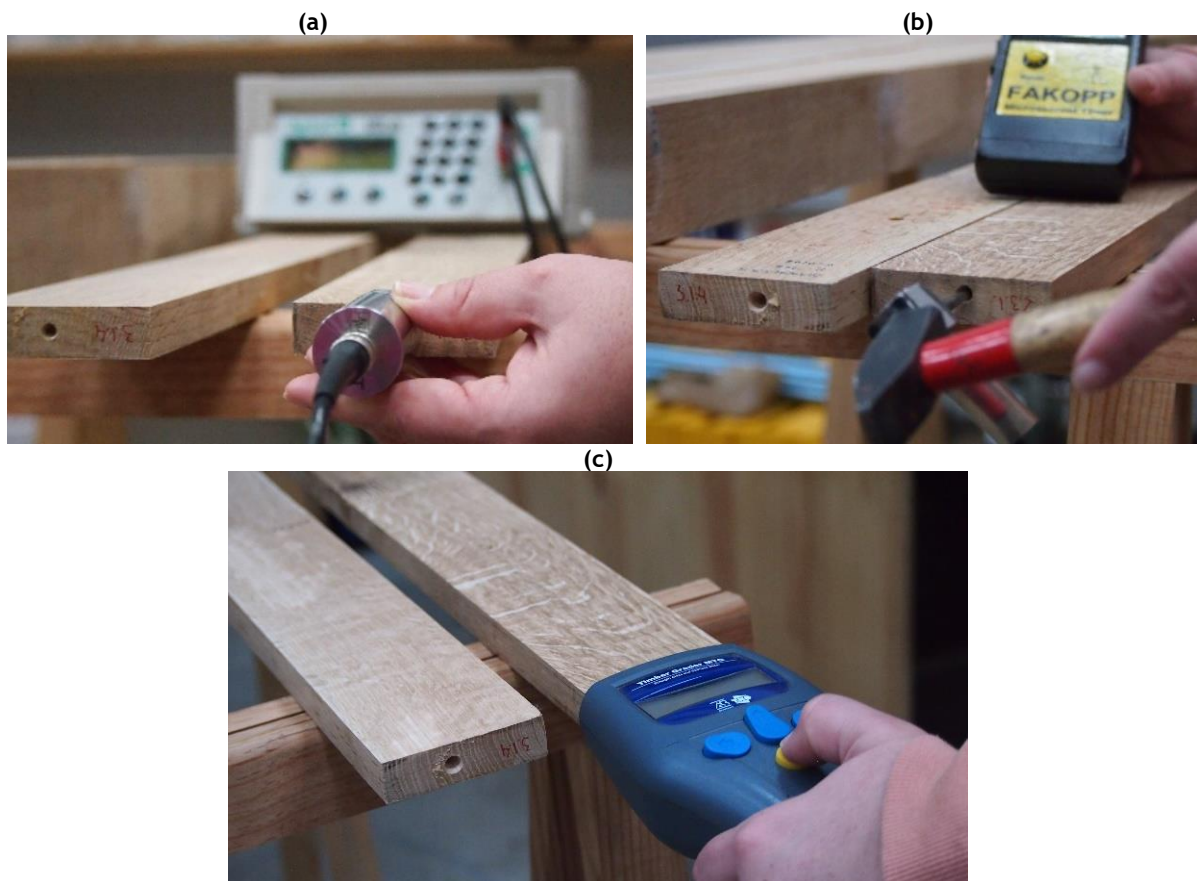


Figura 49. Mediciones longitudinales realizadas sobre las láminas: (a) aplicando la técnica de ultrasonidos; (b) ondas de impacto; y (c) vibración.

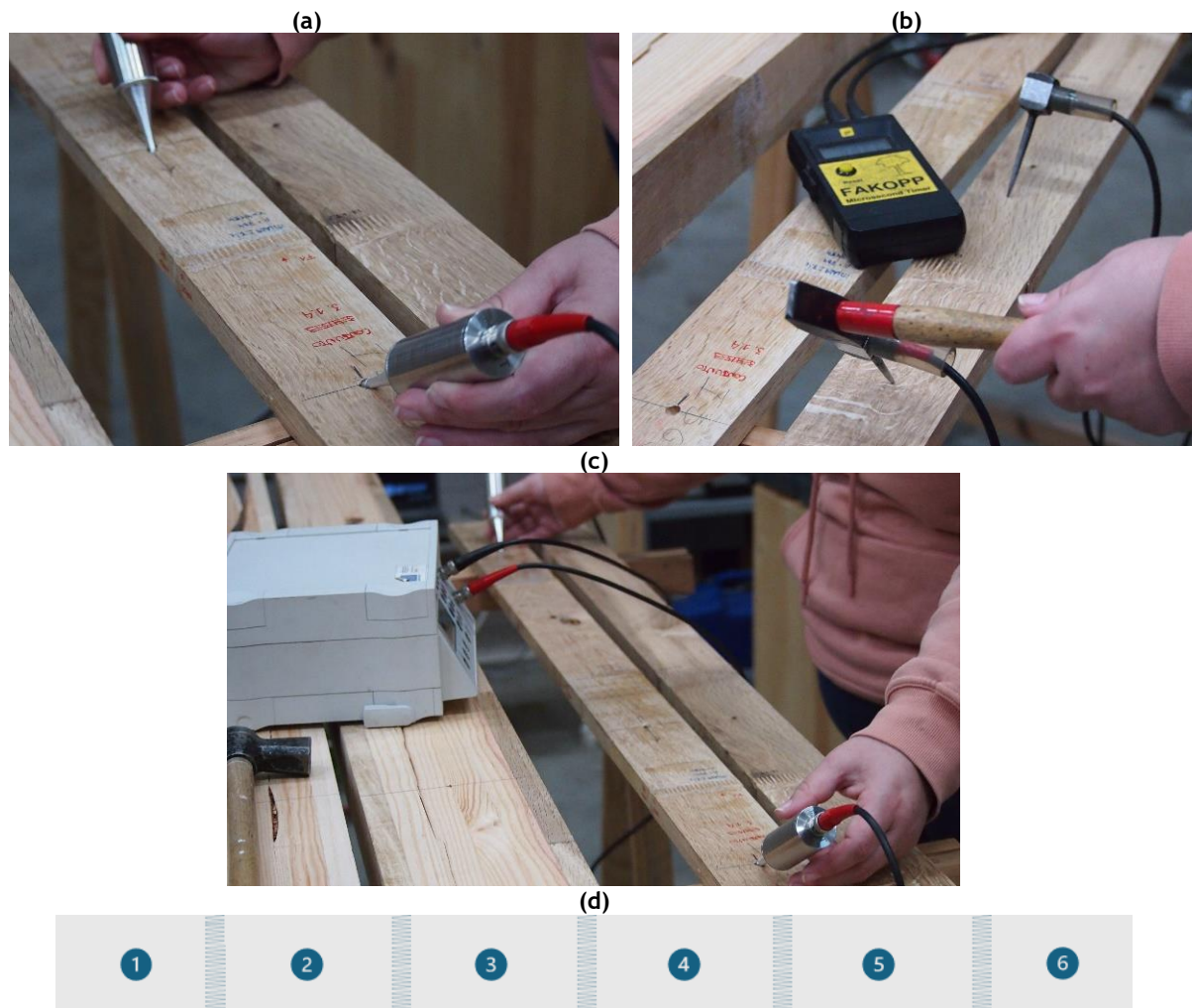


Figura 50. Mediciones superficiales sobre las láminas: (a) medición de la unión aplicando la técnica de ultrasonidos; (b) medición de la unión aplicando la técnica de ondas de impacto; (c) mediciones progresivas con la técnica de ultrasonidos; y (d) representación de la lámina y los puntos de medición.

4.6.4 Ensayos de tracción con la técnica DIC

Del conjunto de láminas fabricadas y ensayadas previamente con métodos acústicos, se escogió un total de 20, para ser sometidas a ensayos de tracción en la dirección de la fibra. El procedimiento se ejecutó para conocer la rigidez de la lámina final a través de un ensayo estático, sin llevar el material a rotura.

La carga se aplicó con una velocidad constante de 1 mm min^{-1} . Para evitar el deslizamiento durante el ensayo, las probetas se fijaron mediante mordazas en una longitud de 150 mm en cada extremo. Para definir la carga máxima del ensayo se llevó a cabo un proceso de estimación de la $F_{\text{máx}}$ considerando la rotura de la probeta, sobre ese valor se calculó el 40 %, teniendo en cuenta que, en el ensayo realizado, solo se determinará el módulo de elasticidad de la lámina en su rango elástico, sin ser necesario llevarla a la rotura. El valor de fuerza máxima para este ensayo quedó establecido en 20 kN ($F_{\text{máx}} = F2$), y el valor inicial de carga de referencia ($F1$), en 7 kN.

Para monitorear las deformaciones a lo largo de la lámina se utilizó el sistema óptico de medición sin contacto, Aramis 3D, aplicando la técnica DIC. El sistema DIC se calibró haciendo uso de la cruz de calibración CC20/MV2000 x 2000 (Figura 51). A partir de esta

calibración, el volumen de medición disponible fue de 1685 x 1360 x 1360 mm, con una desviación de la escala de 0,001 mm y una desviación de la calibración de 0,026 píxeles.



Figura 51. Proceso de calibración de Aramis 3D con el objeto de calibración CC20/MV2000 x 2000.

Sobre las láminas se aplicó un patrón de puntos y se posicionaron marcadores circulares en los extremos (Marcador 1 y Marcador 6), próximos a las mordazas, y en los puntos medios entre cada uno de los *finger-joint* (Marcador 2, 3, 4, 5) (Figura 52). El número de marcadores posicionados en cada caso dependió del número de *finger-joints* presentes en cada lámina. El módulo óptico de Aramis 3D se orientó hacia la superficie de la probeta. Su colocación estuvo condicionada por la distancia de calibración, que en este caso fue de 1900 mm. A esta distancia de medición, los marcadores circulares resultaron fundamentales para disponer de puntos de referencia entre los cuales medir los desplazamientos de la lámina.

El módulo de elasticidad (MOE_I) se determinó considerando las deformaciones registradas por los marcadores circulares posicionados en los extremos de la lámina (Marcador 1 y Marcador 6, Figura 52 y Figura 53a). El módulo de elasticidad de la lámina en tracción se obtuvo según la Ecuación 31.

$$MOE_I = \frac{\sigma}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad \text{Ecuación 31}$$

Siendo

σ la tensión, calculada a partir de la relación F_2 (20 kN) – F_1 (7 kN), que representa el incremento de carga en el tramo lineal de la curva carga-deformación, y A la sección transversal de la probeta, en $N\ mm^{-2}$;

$\varepsilon_2 - \varepsilon_1$ el incremento de deformación unitaria correspondiente a $F_2 - F_1$, obtenida a partir de las mediciones realizadas con el sistema ARAMIS 3D tomando como referencia los marcadores de los extremos de la lámina (Marcador 1 y Marcador 6, en la Figura 53a).

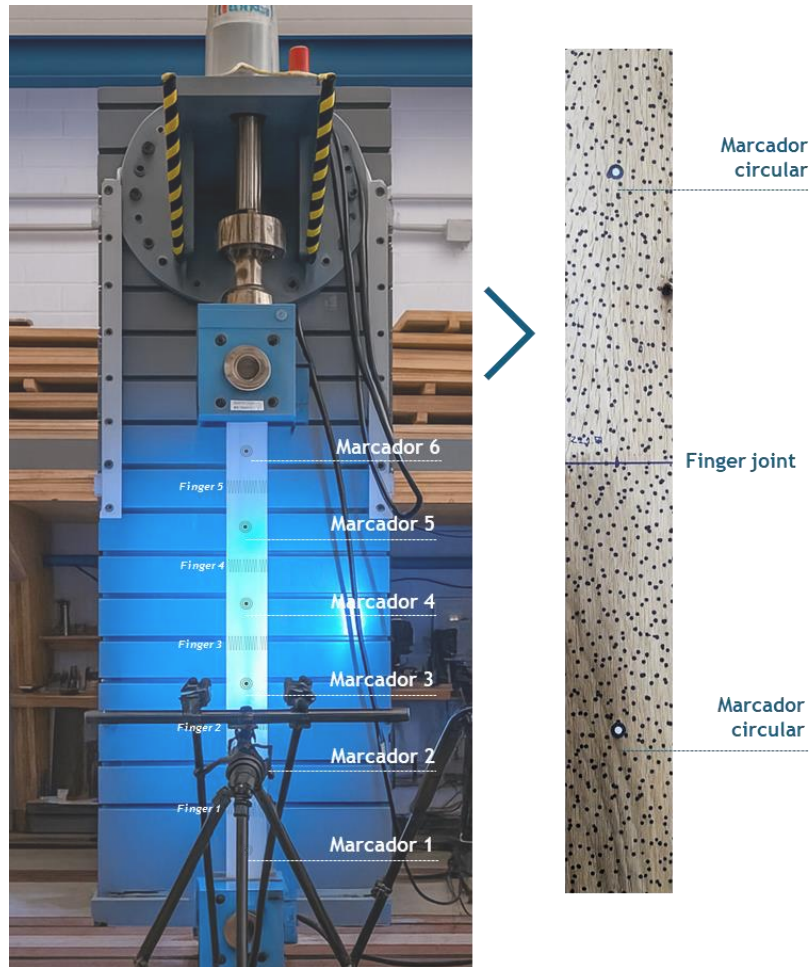


Figura 52. Configuración de ensayo de tracción paralela a la fibra con la técnica de Correlación Digital de Imágenes (DIC) y marcadores circulares posicionados en la lámina de *Quercus robur*.

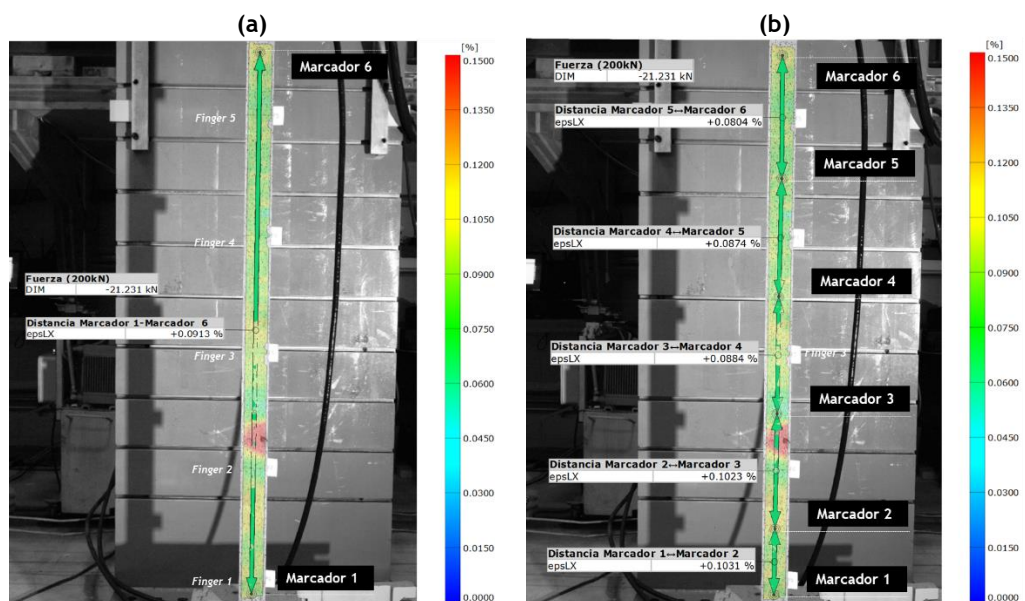


Figura 53. Medición de deformaciones unitarias con DIC en la lámina para F2 (≈ 20 kN): (a) considerando los marcadores 1 y 6; y (b) teniendo en cuenta todos los marcadores, posicionados entre cada *finger-joint*.

Al posicionar marcadores en el punto medio entre cada unión, se puede obtener información específica de cada *finger joint* individual (Figura 53b). Estos marcadores, y al igual que se realizó para las técnicas acústicas, permite calcular el MOE de forma progresiva a lo largo de la lámina. El objetivo es detectar si las características de la madera o alguna unión específica en cada tramo de medición están afectando al valor del MOE de referencia de la lámina. De este modo, se obtuvieron resultados para los siguientes tramos acumulativos (partiendo siempre del Marcador 1): Marcador 1-Marcador 2; Marcador 1-Marcador 3; Marcador 1-Marcador 4; Marcador 1-Marcador 5; Marcador 1-Marcador 6. La posición de los marcadores intermedios (2 al 5) se alineó con los puntos de medición de los ensayos acústicos superficiales. Sin embargo, los marcadores de los extremos (1 y 6) tuvieron que ser desplazados de su posición original (la usada en las mediciones acústicas) debido a la necesidad de sujetar la lámina para el ensayo de tracción.

El módulo de elasticidad (MOE_I) obtenido mediante la técnica DIC se empleó como valor de referencia para la comparación con los métodos de ultrasonidos, ondas de impacto y vibración, aplicados en las láminas y en las tablas de origen.

Es importante señalar una consideración metodológica del ensayo realizado. Si bien la técnica DIC es un método fiable para la obtención de este tipo de resultados, la configuración empleada en este trabajo registra la deformación únicamente en una de las caras de la probeta. Se partió de la hipótesis de que, para los niveles de carga aplicados en el ensayo, la deformación es simétrica y el comportamiento en ambas caras está compensado.

4.7 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El tratamiento estadístico de los datos obtenidos en los diferentes ensayos se llevó a cabo con dos herramientas informáticas: software Microsoft Excel (versión Microsoft 365) (Microsoft Corporation, Redmond, Washington, EE. UU.) y Statgraphics Centurion 19 (StatPoint Technologies, Inc., Warrenton, Virginia, EE. UU.).

Una de las etapas iniciales y fundamentales consistió en la verificación de la normalidad de las variables, un paso crucial para la validación de las pruebas estadísticas posteriores. Se emplearon los coeficientes de asimetría (Skewness) y curtosis, así como el gráfico Q-Q (*Quantile-Quantile*) de normalidad. Para que los datos fueran considerados con distribución normal, los valores de asimetría y curtosis debían situarse entre -2 y +2. En el caso del gráfico, la proximidad de los puntos a una línea recta indicaba el ajuste a una distribución normal. Los resultados de este análisis indicaron que todos los parámetros evaluados podían considerarse con distribución normal.

Posteriormente, se examinaron las diferencias entre las medias de las variables. Para comparaciones de dos grupos (p.ej., velocidad árbol vs. tabla), se utilizó la prueba t para muestras independientes. Se evaluó la significancia estadística tanto mediante el *p*-valor (considerando H_0 rechazada si $p \leq 0,05$) como mediante el intervalo de confianza al 95 % de la diferencia de medias (buscando la no inclusión del cero). Para comparaciones de tres o más grupos, se realizó un análisis de la varianza (ANOVA) de un factor. Cuando el ANOVA resultó significativo ($p \leq 0,05$), se aplicó la prueba de los intervalos LSD de Fisher para identificar qué pares de medias diferían significativamente.

Al comparar la velocidad en el árbol con las velocidades en las trozas o tablas, o con las propiedades de resistencia y rigidez obtenidas, se tomó el valor promedio de esos parámetros por árbol.

Para establecer las relaciones entre las variables y generar modelos predictivos, se emplearon tanto modelos de regresión simple como modelos de regresión múltiple. La significancia de las regresiones generadas se evaluó mediante el *p*-valor, y la adecuación del

modelo se verificó a través de los gráficos de residuos. Además, si el p -valor de la tabla ANOVA era menor o igual a 0,05, se determinó que existía correlación estadística entre los parámetros evaluados, con un nivel de confianza del 95 %. En las regresiones lineales simples, se determinó como indicador principal el coeficiente de determinación (R^2). En las regresiones lineales múltiples, dado que se comparan modelos con distinto número de variables, se utilizó el criterio del coeficiente de determinación ajustado (R_{adj}^2), por ser el estadístico apropiado para esta selección.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE *QUERCUS ROBUR* A PARTIR DE MEDICIONES CON TÉCNICAS ACÚSTICAS

5.1.1 Árbol en pie

5.1.1.1 Parámetros dendrométricos y estado de las parcelas

Considerando las tres parcelas de estudio, se observa que las características dendrométricas de los árboles variaron, registrándose las mayores variaciones para la conicidad (41 %) y el diámetro de la copa (33 %) (Tabla 13). Estadísticamente, los parámetros que variaron entre las parcelas fueron los diámetros en la base (DBA) y normal (DAP), cuyos menores valores se obtuvieron en la parcela Q, y el diámetro de la copa (D_{copa}), cuyo mayor valor se obtuvo en la parcela S (Tabla 13).

Tabla 13. Valores medios de las características dendrométricas de los árboles, con sus respectivos coeficientes de variación (%) para cada parcela.

Parcela	DBA	DAP	C_a	D_{copa}	H_{copa}	H_{total}
M	44,32	35,37	0,069	6,82	11,70	18,78
	(a)	(a)	(b)	(a)	(a)	(a)
	24 %	28 %	32 %	34 %	21 %	15 %
Q	42,17	34,75	0,057	8,04	13,33	18,09
	(a)	(a)	(ab)	(a)	(a)	(a)
	12 %	14 %	39 %	20 %	18 %	16 %
S	45,61	39,64	0,046	11,61	12,46	21,49
	(a)	(a)	(a)	(b)	(a)	(b)
	12 %	13 %	42 %	19 %	17 %	11 %

Leyenda: DBA = diámetro en la base (cm); DAP = diámetro normal (a la altura del pecho) (cm); C_a = conicidad del árbol (DBA-DAP/130); D_{copa} = diámetro de la copa (m); H_{copa} = altura de la copa (m); H_{total} = altura total (m).

Letras iguales indican grupos homogéneos para la columna (sin diferencias estadísticamente significativas al nivel de confianza del 95 %).

Con respecto al diámetro del fuste, las diferencias entre las parcelas pueden deberse a condiciones edáficas (textura y fertilidad del suelo, pH del suelo, disponibilidad de agua), al clima (temperatura, precipitación, humedad relativa del aire e incidencia solar), a la altitud y exposición solar (norte/sur, este/oeste), densidad de plantación, manejo silvícola y genética (Oliver y Larson, 1996; Pretzsch, 2009; Skovsgaard y Vanclay, 2008; Buras et al., 2020). En cuanto a la copa, algunos factores son más determinantes, tales como la disponibilidad de luz, que puede verse muy afectada por la densidad de la plantación. Si bien cada especie posee un genotipo y un modelo arquitectónico que definen su forma potencial (Hallé et al., 1978), la forma real que adopta la copa es una adaptación plástica a la competencia por la luz en el dosel.

Esta adaptación, a su vez, se convierte en una herramienta competitiva, ya que la capacidad de un árbol para interceptar la luz determina su propio crecimiento y limita el de sus vecinos al sombrearlos. Se establece así un mecanismo de retroalimentación esencial que modela la estructura y la dinámica de la competencia en el rodal (Purves et al., 2007). Se ha documentado ampliamente que las copas de los árboles tienden a ser más pequeñas y compactas en lugares expuestos a vientos fuertes. Esto se debe tanto a una estrategia de crecimiento adaptativa para reducir la resistencia aerodinámica como al daño mecánico directo que el viento inflige sobre ramas y brotes (Mitchell, 2013). Asimismo, la disponibilidad hídrica es otro factor de influencia sobre el desarrollo y la expansión de la copa (Corcuera et al., 2004).



Figura 54. Estado general de las tres parcelas de estudio.

En las tres parcelas objeto de estudio no se lleva a cabo ningún tratamiento silvícola orientado a la obtención de madera estructural. Según la información facilitada por los propietarios, en las tres parcelas se realizaron podas de mantenimiento, destinadas en muchos casos al aprovechamiento del material extraído como madera para leña. No obstante, estas intervenciones son más frecuentes en la parcela M. En ella, además, se han ejecutado labores de extracción de pies y limpieza del sotobosque con mayor rigor que en las otras dos parcelas, como se evidencia en la Figura 54. La presencia de hiedra (*Hedera helix*), que coloniza fustes y ramas, es un hecho destacable en las tres parcelas de estudio. Esta situación concuerda con lo reportado para los robledales gallegos en el último informe de la Red Integrada de Seguimiento del estado de los bosques españoles (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto

Demográfico, 2024). El informe señala que, aunque generalmente no es problemática, una invasión severa puede someter al árbol a una intensa competencia, obligándole a secar algunas de las ramas afectadas.

En cuanto a las propiedades físicas, las densidades verde y básica mostraron diferencias significativas entre las parcelas (Tabla 14). Para la densidad verde, la parcela Q presentó un valor significativamente inferior al de las demás parcelas. Para la densidad básica, la parcela Q se diferenció de la parcela M (Tabla 14).

Tabla 14. Valores medios (kg m^{-3}) de la densidad verde ($\text{Dens}_{v,a}$) y densidad básica en el árbol ($\text{Dens}_{b,a}$), con sus respectivos coeficientes de variación (%) para cada parcela y para la muestra total, que incluye todas las parcelas.

Parcela	$\text{Dens}_{v,a}$	$\text{Dens}_{b,a}$
M	1195	635
	(b)	(b)
	2 %	6 %
Q	1153	605
	(a)	(a)
	3 %	5 %
S	1197	634
	(b)	(ab)
	3 %	6 %
Muestra total	3 %	6 %

Legenda: Letras iguales indican grupos homogéneos para la columna (sin diferencias estadísticamente significativas al nivel de confianza del 95 %).

5.1.1.2 Parámetros acústicos

Los parámetros acústicos obtenidos en el árbol en pie (velocidad, V_a y coeficiente de rigidez, $C_{LL,a}$) muestran que, para ninguna técnica no destructiva (ultrasonido - USLab, y ondas de impacto - MST y Hitman), se observan diferencias significativas entre las parcelas (Tabla 15). Al comparar las técnicas, solo en la parcela Q el equipo MST (ondas de impacto) se diferenció de los demás, con valores inferiores (Tabla 15).

Los valores de velocidad de propagación obtenidos en esta investigación (Tabla 15) resultan consistentes con los rangos reportados en la literatura para diversas especies frondosas. En árboles en pie, Llana et al. (2020) emplearon la técnica de ondas de impacto en aliso común, fresno, abedul y arce sicómoro, obteniendo registros entre 3537 y 4928 m s^{-1} , valores que se sitúan en el mismo orden de magnitud que los aquí presentados. En esta misma línea, y aplicando también la técnica de ondas de impacto, Papandrea et al. (2022) reportaron velocidades promedio de 3854 a 4425 m s^{-1} en ejemplares de chopo, mientras que Van Duong y Schimleck (2022) obtuvieron promedios de 3341 m s^{-1} en clones de eucalipto. Por otro lado, Virgen-Cobos et al. (2022), mediante el uso de ondas ultrasónicas registraron velocidades ligeramente inferiores, entre 3011 y 3532 m s^{-1} , en árboles de *Robinia pseudoacacia* y *Platanus hybrida*.

Tabla 15. Valores medios y coeficientes de variación (%) de la velocidad (V_a) y del coeficiente de rigidez ($C_{LL,a}$) en el árbol, para las diferentes técnicas y parcelas.

Parcela	Ultrasonidos		Ondas de impacto			
	USLab		MST		Hitman	
	V_a	$C_{LL,a}$	V_a	$C_{LL,a}$	V_a	$C_{LL,a}$
M	3828	9829	3438	7780	3860	9745
	(a)(1)	(a)(1)	(a)(1)	(a)(1)	(a)(1)	(a)(1)
	21 %	38 %	14 %	26 %	10 %	19 %
Q	4505	12661	3454	7383	3702	8366
	(a)(1)	(a)(1)	(a)(2)	(a)(2)	(a)(1)	(a)(1)
	17 %	37 %	14 %	31 %	9 %	19 %
S	3949	9983	3437	7438	3827	9187
	(a)(1)	(a)(1)	(a)(1)	(a)(1)	(a)(1)	(a)(1)
	15 %	33 %	9 %	22 %	8 %	19 %
Muestra total	18 %	36 %	12 %	25 %	9 %	19 %

Leyenda: V_a : velocidad en el árbol ($m s^{-1}$); $C_{LL,a}$: coeficiente de rigidez en el árbol ($N mm^{-2}$). Letras iguales indican grupos homogéneos para la columna (sin diferencias estadísticamente significativas al nivel de confianza del 95 %), para cada parámetro y entre parcelas; números iguales indican grupos homogéneos para las filas, entre equipos dentro de una misma parcela.

5.1.2 Troza

5.1.2.1 Parámetros dendrométricos

Para las trozas obtenidas de los árboles de cada parcela, no hubo diferencias significativas en la conicidad (C_t) ni en los valores de densidad verde ($Dens_{v,t}$). Solo en la densidad básica ($Dens_{b,t}$) se observó diferencia entre la parcela Q y la parcela M (Tabla 16).

Tabla 16. Valores medios de la conicidad (C_t) y de las densidades verde ($Dens_{v,t}$) y básica ($Dens_{b,t}$) de las trozas, con sus respectivos coeficientes de variación (%), obtenidas de los árboles de cada parcela.

Parcela	C_t	$Dens_{v,t}$	$Dens_{b,t}$
M	0,039	1199	666
	(a)	(a)	(b)
	30 %	2 %	4 %
Q	0,020	1175	602
	(a)	(a)	(a)
	91 %	3 %	6 %
S	0,025	1208	645
	(a)	(a)	(ab)
	22 %	2 %	6 %

Leyenda: C_t = conicidad de la troza ($(d_1-d_2)/250$); $Dens_{v,t}$ = densidad verde de las trozas ($kg m^{-3}$); $Dens_{b,t}$ = densidad básica de las trozas ($kg m^{-3}$). Para las columnas, letras iguales indican grupos homogéneos (sin diferencias estadísticamente significativas entre parcelas, al nivel de confianza del 95 %), y para las filas, números iguales indican grupos homogéneos (sin diferencias estadísticamente significativas dentro de cada parcela, al nivel de confianza del 95 %).

5.1.2.2 Parámetros acústicos

La comparación de las tres mediciones del equipo USLab (longitudinal, superficial en 2 m y superficial en 0,4 m) reveló diferencias estadísticamente significativas. La medición superficial en el tramo corto (0,4 m) registró el mayor valor de velocidad ($V_{t,USLab,sup,04}$), siendo significativamente diferente a las otras dos (Tabla 17). Por el contrario, las velocidades obtenidas en la medición longitudinal y la superficial en el tramo largo (2 m) resultaron estadísticamente equivalentes (Tabla 17). Esto se explica porque en una distancia de 2 m la onda superficial dispone de un recorrido suficiente para que su velocidad tienda a aproximarse a la de la onda longitudinal pura (Dijk et al., 2013).

Tabla 17. Valores medios ($m s^{-1}$) de las velocidades obtenidas en las mediciones longitudinal ($V_{t,USLab,lon}$), superficial en un tramo de 2 m ($V_{t,USLab,sup,2}$), y superficial en un tramo de 0,4 m ($V_{t,USLab,sup,04}$), con sus respectivos coeficientes de variación (%), realizadas en las trozas con la técnica de ultrasonidos.

$V_{t,USLab,lon}$	$V_{t,USLab,sup,2}$	$V_{t,USLab,sup,04}$
3410	3508	4607
(a)	(a)	(b)
8 %	14 %	9 %

Leyenda: Letras iguales indican grupos homogéneos (sin diferencias estadísticamente significativas al nivel de confianza del 95 %).

En el caso de las mediciones con la técnica de ondas de impacto (equipo MST), los tres tipos de mediciones realizadas son estadísticamente equivalentes (Tabla 18), y de igual manera que en el caso de la onda ultrasónica, la velocidad en el tramo de 0,4 metros presenta un valor superior al resto de configuraciones aplicadas.

Tabla 18. Valores medios ($m s^{-1}$) de las velocidades obtenidas en las mediciones longitudinal directa ($V_{t,MST,lon}$), superficial indirecta en un tramo de 2 m ($V_{t,MST,sup,2}$), y superficial indirecta en un tramo de 0,4 m ($V_{t,MST,sup,04}$), con sus respectivos coeficientes de variación (%), realizadas en las trozas con la técnica de ondas de impacto.

$V_{t,MST,lon}$	$V_{t,MST,sup,2}$	$V_{t,MST,sup,04}$
3749	3720	3823
(a)	(a)	(a)
4 %	5 %	8 %

Leyenda: Letras iguales indican grupos homogéneos (sin diferencias estadísticamente significativas al nivel de confianza del 95 %).

Al analizar las velocidades obtenidas en el caso de las mediciones longitudinales y para cada punto de medición: médula- M, duramen- I y albura-C, se observa que, aunque en la médula las velocidades son numéricamente inferiores, no existen diferencias estadísticamente significativas para cada uno de ellos, con los dos equipos utilizados (Figura 55). Este resultado sugiere la posibilidad de simplificar el proceso de toma de datos en los análisis sobre trozas, lo que permite realizar la medición en un único punto. Los menores valores de velocidad observados en la región de la médula están asociados a la menor rigidez mecánica característica de esta zona del árbol y son coherentes con los resultados obtenidos por otros autores, según se recoge en el apartado 3.5.1.4 (Mariño et al., 2009; Grabianowski et al., 2006; Krauss y Kúdela, 2011, entre otros).

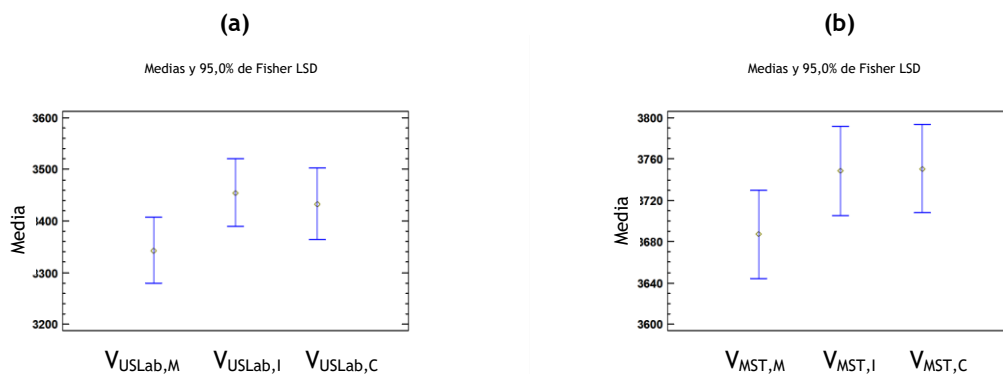


Figura 55. Medias e intervalos de confianza de las velocidades obtenidas en las trozas ($m s^{-1}$), considerando los tres puntos de medición: médula- M, duramen- I y albura-C: (a) con la técnica de ultrasonidos -USLab y (b) con la técnica de ondas de impacto- MST.

Al comparar los parámetros acústicos de las mediciones longitudinales entre parcelas, el ultrasonido (USLab) fue la única técnica que no mostró diferencias significativas entre ellas, ni en el caso de la velocidad ($V_{t,lon}$) ni para el coeficiente de rigidez ($C_{LL,t}$) (Tabla 19). Para los resultados de velocidad y coeficiente de rigidez, las ondas de impacto (MST) y la técnica de vibración con el equipo MTG, indicaron diferencias significativas entre las parcelas M y Q, con valores generalmente más bajos para la parcela Q (Tabla 19), coincidiendo con el menor valor de densidad básica obtenido para esta parcela. Para la técnica de vibración con el equipo Hitman, la parcela M se diferenció de las demás con valores superiores de velocidad y de $C_{LL,t}$, siendo las parcelas Q y S estadísticamente equivalentes.

Tabla 19. Valores medios ($m s^{-1}$) y coeficientes de variación (%) de la velocidad longitudinal ($V_{t,lon}$) y del coeficiente de rigidez ($C_{LL,t}$) en la troza, para las diferentes técnicas y parcelas.

Parcela	Ultrasonidos (USLab)		Ondas de impacto (MST)		Vibración			
	$V_{t,lon}$	$C_{LL,t}$	$V_{t,lon}$	$C_{LL,t}$	$V_{t,lon}$	$C_{LL,t}$	$V_{t,lon}$	$C_{LL,t}$
M	3389	7768	3770	9476	3062	6269	3068	6289
	(a)(1)	(a)(1)	(b)(2)	(b)(2)	(b)(3)	(b)(3)	(b)(3)	(b)(3)
	11 %	19 %	5 %	9 %	5 %	12 %	4 %	11 %
Q	3344	6811	3687	8241	2944	5262	2933	5224
	(a)(1)	(a)(1)	(a)(2)	(a)(2)	(a)(3)	(a)(3)	(a)(3)	(a)(3)
	9 %	20 %	5 %	13 %	6 %	14 %	5 %	13 %
S	3317	7094	3740	9031	3029	5915	2830	5174
	(a)(1)	(a)(1)	(ab)(2)	(ab)(2)	(ab)(3)	(ab)(3)	(a)(3)	(a)(3)
	4 %	12 %	2 %	7 %	5 %	7 %	3 %	9 %
Todas	8 %	16 %	4 %	11 %	5 %	13 %	5 %	14 %

Leyenda: $V_{t,lon}$: velocidad en la troza, obtenida en mediciones longitudinales ($m s^{-1}$); $C_{LL,t}$: coeficiente de rigidez en la troza, partiendo de la velocidad obtenida en la medición longitudinal ($N mm^{-2}$). Para las columnas, letras iguales indican grupos homogéneos (sin diferencias estadísticamente significativas entre parcelas, al nivel de confianza del 95 %), y para las filas, números iguales indican grupos homogéneos (sin diferencias estadísticamente significativas dentro de cada parcela, al nivel de confianza del 95 %).

Los valores de velocidad de propagación de onda obtenidos para las trozas de *Q. robur* guardan una estrecha coherencia con los resultados reportados por otros autores en especies frondosas. En estudios que emplearon la técnica de vibración, destacan los hallazgos de Straže y Novak (2022), quienes en trozas de *Q. robur* y *Q. petraea* obtuvieron velocidades entre 3065 y 3115 m s⁻¹. En esta misma línea técnica, Papandrea et al. (2022) hallaron un rango de velocidades de propagación de onda de 3500 a 5741 m s⁻¹ en trozas de chopo, mientras que Sirswal et al. (2025) reportaron velocidades de 2990 a 4580 m s⁻¹ en trozas de *Eucalyptus nitens*. Por su parte, Llana et al. (2020) emplearon la técnica de ondas de impacto en diversas frondosas y obtuvieron valores entre 3053 y 4185 m s⁻¹, cifras similares al promedio de 3503 m s⁻¹ reportado por Van Duong y Schimleck (2022) en clones de eucalipto. Finalmente, cabe señalar los resultados de Virgen-Cobos et al. (2022), quienes utilizando ultrasonidos observaron un rango de velocidades de propagación de 2255 a 4548 m s⁻¹ en las especies *Robinia pseudoacacia*, *Platanus hybrida*, *Ulmus pumila* y *Populus alba*.

5.1.3 Tabla

5.1.3.1 Parámetros acústicos en la tabla saturada

Al evaluar inicialmente el comportamiento de las velocidades en las tablas saturadas, para las tres técnicas aplicadas y los cuatro equipos, se verifica que existen diferencias estadísticamente significativas entre los equipos, siendo las velocidades obtenidas con la técnica de ultrasonidos ($V_{th,USLab}$) y vibración con el equipo MTG ($V_{th,MTG}$) estadísticamente equivalentes (Tabla 20).

Tabla 20. Valores medios (m s⁻¹) y coeficientes de variación de las velocidades de propagación de ondas en las tablas saturadas (V_{th}) obtenidas mediante las diferentes técnicas.

Ultrasonidos (USLab)	Ondas de impacto (MST)	Vibración	
		(MTG)	(Hitman)
$V_{th,USLab}$	$V_{th,MST}$	$V_{th,MTG}$	$V_{th,Hitman}$
3187	3326	3124	3019
(a)	(b)	(a)	(c)
7 %	6 %	9 %	8 %

Leyenda: $V_{th,USLab}$: velocidad con el equipo USLab en la tabla húmeda (m s⁻¹); $V_{th,MST}$: velocidad con el equipo MST en la tabla húmeda (m s⁻¹); $V_{th,MTG}$: velocidad con el equipo MTG en la tabla húmeda (m s⁻¹); $V_{th,Hitman}$: velocidad con el equipo Hitman en la tabla húmeda (m s⁻¹). Letras iguales indican grupos homogéneos (sin diferencias estadísticamente significativas al nivel de confianza del 95 %).

5.1.3.2 Parámetros acústicos en la tabla en la humedad de equilibrio

Se observó que, al igual que en el caso de las tablas saturadas, las mediciones realizadas con los diferentes equipos presentan diferencias estadísticamente significativas, siendo, en este caso, las velocidades del ultrasonido ($V_{ts,12,USLab}$) y de las ondas de impacto ($V_{ts,12,MST}$) estadísticamente equivalentes (Tabla 21). La velocidad obtenida por la técnica de vibración se diferenció entre ambos equipos (MTG y PLG) (Tabla 21).

Tabla 21. Valores medios ($m s^{-1}$) y coeficientes de variación (%) de las velocidades de propagación de ondas en las tablas en condición de equilibrio higroscópico ($V_{ts,12}$) obtenidas mediante las diferentes técnicas.

Ultrasonidos (USLab)	Ondas de impacto (MST)	Vibración	
		(MTG)	(PLG)
$V_{ts,12,USLab}$	$V_{ts,12,MST}$	$V_{ts,12,MTG}$	$V_{ts,12,PLG}$
4216	4214	4050	3939
(a)	(a)	(b)	(c)
5 %	5 %	11 %	6 %

Leyenda: $V_{ts,USLab}$: velocidad con el equipo USLab en la tabla en equilibrio higroscópico ($m s^{-1}$); $V_{ts,MST}$: velocidad con el equipo MST en la tabla en equilibrio higroscópico ($m s^{-1}$); $V_{ts,MTG}$: velocidad con el equipo MTG en la tabla en equilibrio higroscópico ($m s^{-1}$); $V_{ts,PLG}$: velocidad con el equipo PLG en la tabla en equilibrio higroscópico ($m s^{-1}$). Letras iguales indican grupos homogéneos (sin diferencias estadísticamente significativas al nivel de confianza del 95 %).

5.1.3.3 Clasificación visual

Se aplicaron los criterios de clasificación para madera de coníferas con grosor menor o igual a 70 mm (Anexo I) de la norma UNE 56544, en concreto para una calidad ME-2, y los criterios de calidad para el castaño (*Castanea sativa Mill.*) de calidad MEF, recogidos en la norma UNE 56546 (Anexo II). Siguiendo los criterios de calidad definidos para las coníferas ($b \leq 70$ mm) los resultados obtenidos muestran un total de 52 rechazos, lo que supone un 69 % de las piezas analizadas (Tabla 22). Con los criterios de calidad visual establecidos para *C.sativa* se registró asimismo un gran número de rechazos, resultando en un total de 58 piezas no clasificadas, lo que supone un 77 % del total (Tabla 22). En ambos casos, el alto porcentaje de rechazos obtenido es debido principalmente a los nudos y a las deformaciones. Cabe destacar que la clasificación como ME-2 según la norma UNE 56544 y la clasificación MEF de acuerdo con la norma UNE 56546 comparten el mismo criterio en cuanto al tamaño máximo de nudos de cara y de canto, lo que explica que se hayan obtenido los mismos resultados para esa singularidad.

Asimismo, se analizaron también los datos de las singularidades medidas siguiendo los criterios de calidad recogidos en la norma francesa NF B52-001-1 para el *Quercus robur* y para la Clase 3 (Anexo III) (Tabla 22). Siguiendo estos criterios, los resultados obtenidos muestran un total de 45 rechazos, lo que supone un 60 % de las piezas analizadas. Al igual que con los sistemas de clasificación anteriores, el mayor porcentaje de rechazos se atribuye a los nudos, seguido de las deformaciones (Figura 56 y Figura 57).

Tabla 22. Número total y porcentaje de piezas rechazadas según los criterios de clasificación visual para la madera de coníferas ($b \leq 70$ mm), de calidad ME-2 de la norma UNE 56544; la madera de castaño ($b \leq 70$ mm) de calidad MEF recogidos en la norma UNE 56546; y la madera de roble según la norma NB B52-001-1 para la Clase de calidad 3.

Norma de referencia	UNE 56544		UNE 56546		Norma francesa (NF B52-001-1)	
	coníferas, $b \leq 70$ mm ME-2		<i>Castanea sativa</i> MEF		<i>Quercus robur</i> Clase 3	
Clase de calidad	Rechazos		Rechazos		Rechazos	
Singularidades	Nº	%	Nº	%	Nº	%
Nudos	41	55	41	55	35	47
Fendas de secado	6	8	12	16	6	8
Desviación de la fibra	0	0	0	0	0	0
Gemas	7	9	8	11	0	0
Deformaciones	23	31	34	45	23	31
Total	52	69	58	77	45	60

Las tablas procedentes de las parcelas Q y S presentaron las mayores tasas de rechazo, tal como se observa en la Figura 56. Específicamente, la parcela S alcanzó un máximo del 72 % debido a nudos, mientras que la parcela Q registró un 60 % asociado a nudos y nudos. Por el contrario, la parcela M presentó los valores más bajos de rechazo (máximos del 32 % por nudos y 24 % por deformaciones). Estos resultados son coherentes con la gestión forestal documentada, que fue mucho más intensiva en la parcela M en comparación con las otras, donde las intervenciones silvícolas fueron mínimas.

Por otra parte, la aplicación de la norma NF B52-001-1 al *Quercus robur* analizado en esta investigación permite disminuir ligeramente el porcentaje de piezas rechazadas, ya que considera un criterio menos restrictivo para la medición de los nudos de canto (Anexo III).

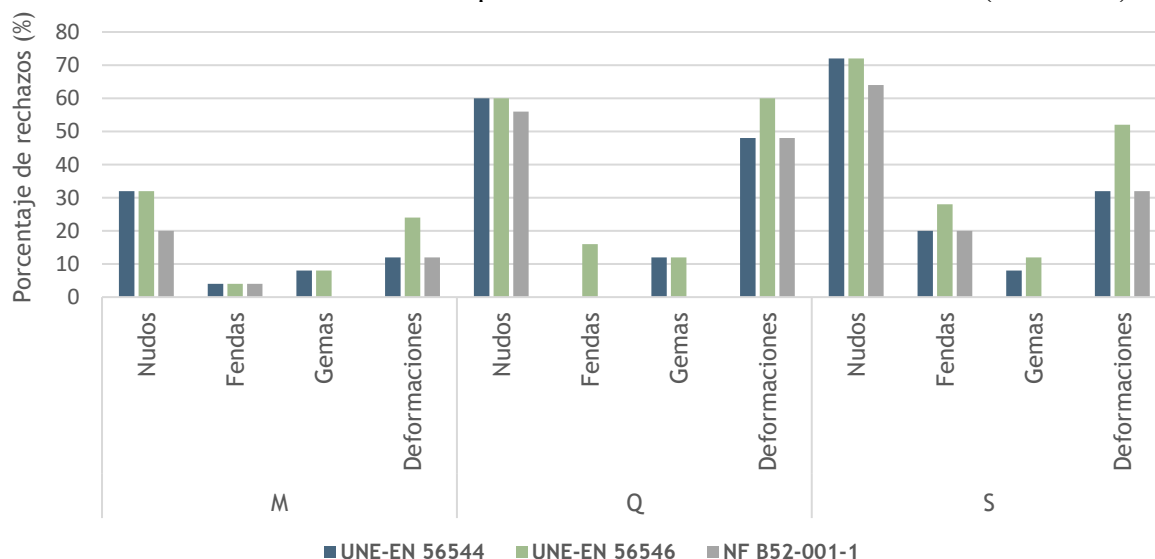


Figura 56. Porcentajes de rechazo por parcela en madera de *Quercus robur*, desglosados según la singularidad determinante detectada y la normativa de aplicación.



Figura 57. Ejemplos de la tipología de nudos presentes en la madera de *Quercus robur* clasificada visualmente.

5.1.3.4 Ensayos de flexión estática

En la Tabla 23 se presentan los resultados obtenidos para el módulo de elasticidad local ($MOE_{Local,12}$), módulo de elasticidad global ($MOE_{Global,12}$), y la densidad (ρ_{12}), corregidos al 12 % de humedad y del módulo de rotura (MOR) para el conjunto de piezas ensayadas a flexión, según la norma UNE-EN 408 (Tabla 23).

Tabla 23. Estadísticos descriptivos de centralización y dispersión de las variables $MOE_{Local,12}$, $MOE_{Global,12}$, MOR, ρ_{12} y humedad.

	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar	CV (%)
$MOE_{Local,12}$ ($N\ mm^{-2}$)	61	5366	16197	11179	2645	24
$MOE_{Global,12}$ ($N\ mm^{-2}$)	61	5900	15429	10503	1924	18
MOR ($N\ mm^{-2}$)	61	13,4	79,6	44,4	16,4	37
ρ_{12} ($kg\ m^{-3}$)	61	616	961	772	69,8	9
Humedad (%)	61	11,0	14,4	12,4	1,0	5

Legenda: N: número de casos; CV (%): coeficiente de variación.

En cuanto a las propiedades mecánicas, los valores medios del módulo de elasticidad (MOE) obtenidos en este estudio se sitúan en el mismo orden de magnitud que los reportados por Turkot et al. (2020) para *Quercus rubra* (12322 N mm⁻²) y *Quercus alba* (10531 N mm⁻²). Por su parte, Riesco (2001) obtuvo para madera de *Quercus robur* ensayada a flexión estática un valor promedio de 9528 N mm⁻², un resultado ligeramente inferior al obtenido en la presente tesis doctoral. Respecto al módulo de rotura (MOR), el valor de 45,2 N mm⁻² reportado por el mismo autor para *Q. robur* resulta consistente con los datos recogidos en la Tabla 23. Finalmente, cabe señalar que las densidades obtenidas en esta tesis doctoral son superiores a las indicadas por Turkot et al. (2020) para *Q. rubra* (682 kg m⁻³) y para *Q. alba* (758 kg m⁻³).

Los resultados organizados según parcelas se presentan en la Tabla 24. Aunque el módulo de rotura (MOR) fue numéricamente inferior en la parcela S, estadísticamente, los valores fueron equivalentes entre las tres parcelas (Tabla 24). No obstante, se observaron coeficientes de variación (CV) elevados, un hecho particularmente acusado en la parcela S (Tabla 24). Esta alta dispersión de los resultados se puede atribuir a la ausencia de manejo forestal, lo que permitió un crecimiento libre de los árboles. Dicha falta de gestión propicia el desarrollo de singularidades morfológicas, como las identificadas en el proceso de inspección visual, que incrementaron la variabilidad en el comportamiento mecánico y el modo de rotura.

Los valores de MOE_{Global,12} y MOE_{Local,12} mostraron menor variabilidad en comparación con la resistencia a la flexión (Tabla 24). Numéricamente, tanto el MOE_{Global,12} como el MOE_{Local,12} fueron menores en la parcela Q (Tabla 24). Estadísticamente, se observaron diferencias significativas entre las parcelas M (con mayor media) y Q para el MOE_{Global,12}, pero para el MOE_{Local,12} todas las parcelas fueron equivalentes (Tabla 24). Las tablas extraídas de los árboles de la parcela Q se diferenciaron estadísticamente de las demás, con el valor más bajo de ρ_{12} (Tabla 24).

Tabla 24. Valores medios y coeficientes de variación (%) para los resultados de densidad (ρ_{12}), módulo de rotura (MOR) y módulos de elasticidad global (MOE_{Global,12}) y local (MOE_{Local,12}) obtenidos en las tablas a la humedad de equilibrio (12 %), para las tres parcelas.

Parcela	ρ_{12} (kg m ⁻³)	MOR (N mm ⁻²)	MOE _{Global,12} (N mm ⁻²)	MOE _{Local,12} (N mm ⁻²)
M	803	49	11156	11681
	(b)	(a)	(b)	(a)
	7 %	26 %	15 %	20 %
Q	709	44	9735	10713
	(a)	(a)	(a)	(a)
	6 %	35 %	18 %	24 %
S	807	39	10629	11138
	(b)	(a)	(ab)	(a)
	8 %	51 %	20 %	27 %

Leyenda: Letras iguales indican grupos homogéneos (sin diferencias estadísticamente significativas al nivel de confianza del 95 %).

5.1.4 Análisis de resultados según el estado del material

El análisis comparativo de las velocidades obtenidas se estructuró en tres fases: árbol en pie (V_a), troza (V_t) y tabla saturada (V_{th}). Para las mediciones en las trozas (mediante ultrasonidos y ondas de impacto), se estableció la velocidad longitudinal como variable de referencia. Respecto al equipo Hitman, conviene distinguir los dos enfoques metodológicos aplicados: en la fase de árbol en pie se empleó la técnica de ondas de impacto (equipo ST300),

mientras que en las trozas se utilizó la técnica de vibración (equipo HM220). A pesar de tratarse de técnicas distintas, se procedió a su comparación (Figura 58c) para evaluar el comportamiento del material en las distintas fases en la condición saturada (árbol, troza y tabla).

Las velocidades medidas con el equipo USLab (Figura 58a) y las obtenidas con el equipo Hitman (Figura 58c) confirmaron lo indicado por otros autores (Wang 2013; Gonçalves et al., 2011a; Bertoldo, 2014): la velocidad en el árbol es mayor que en la troza, incluso recién cortada (con humedades por encima del punto de saturación de la fibra).

Existen diversas razones teóricas que explican por qué los valores de velocidad son superiores en el árbol en pie. El factor principal radica en la naturaleza de la medición: mientras que en las trozas es directa, en el árbol es indirecta. Según Wang et al. (2007b), la medición ToF en árboles está dominada por ondas dilatacionales (o cuasi-dilatacionales) y no por ondas planas unidimensionales. Teóricamente, la velocidad de propagación de estas ondas dilatacionales es superior a la de las ondas longitudinales unidimensionales. Adicionalmente, el estado de tensiones de crecimiento al que está sometido el árbol en pie influye significativamente en el resultado, tal como se detalló en el apartado 1.4.4.

Para las mediciones con ultrasonido, las velocidades de propagación fueron estadísticamente equivalentes entre la troza ($V_{t,USLab} = 3410 \text{ m s}^{-1}$) y la tabla saturada ($V_{th,USLab} = 3187 \text{ m s}^{-1}$). En el árbol en pie, la velocidad fue significativamente mayor ($V_{a,USLab} = 4009 \text{ m s}^{-1}$), siendo aproximadamente 1,18 veces superior a la observada en la troza recién cortada. Aplicando el equipo Hitman (ondas de tensión en árbol en pie y vibración en troza y tabla saturada) las velocidades fueron estadísticamente equivalentes en la troza ($V_{t,Hitman} = 2944 \text{ m s}^{-1}$) y en la tabla ($V_{th,Hitman} = 3019 \text{ m s}^{-1}$), y 1,28 veces superiores en el árbol en pie ($V_{a,Hitman} = 3769 \text{ m s}^{-1}$) en comparación con la troza recién cortada.

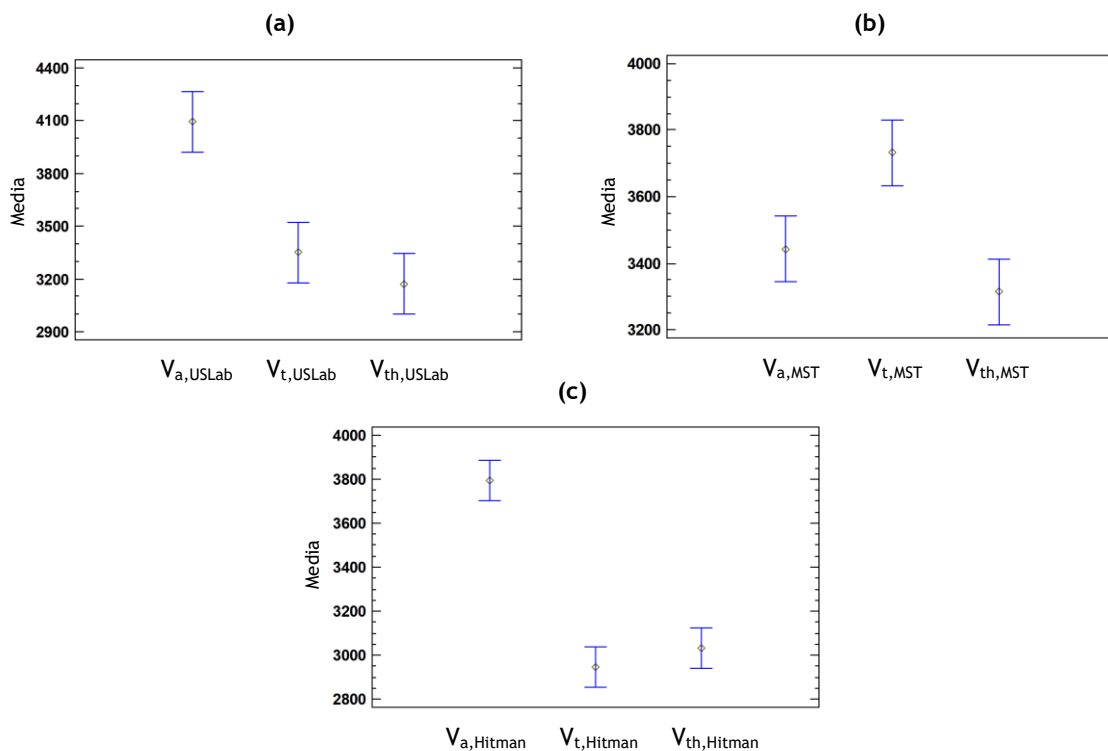


Figura 58. Medias e intervalos de confianza de las velocidades obtenidas en los árboles (V_a), en las trozas (V_t) y en las tablas saturadas (V_{th}) con los tres equipos utilizados: (a) USLab; (b) MST; y (c) Hitman, en m s^{-1} .

En el caso del equipo MST, el comportamiento fue diferente (Figura 58b), registrándose una velocidad en la troza ($V_{t,MST} = 3749 \text{ m s}^{-1}$) 1,10 veces superior a la velocidad en el árbol. Las velocidades en la tabla saturada ($V_{th,MST} = 3326 \text{ m s}^{-1}$) y en el árbol en pie ($V_{a,MST} = 3398 \text{ m s}^{-1}$) fueron estadísticamente equivalentes. Este resultado coincide con lo observado por otros autores como Van Duong y Schimleck (2022) quienes investigaron la estimación de las propiedades de flexión en clones de *Eucalyptus* aplicando la técnica de ondas de impacto con el equipo MST en árboles y trozas. Para todos los clones analizados obtuvieron una velocidad 1,05 veces superior en la troza, diferencias del mismo orden de magnitud que las observadas en esta investigación para el mismo equipo. Para confirmar esta tendencia del MST, se repitió el análisis usando los resultados de velocidad obtenidos en las mediciones superficiales a 0,4 metros sobre las trozas. Los resultados fueron consistentes: la velocidad en la troza se mantuvo 1,10 veces superior a la del árbol.

Las densidades en la condición saturada (Figura 59) en el árbol ($Dens_{v,a} = 1170 \text{ kg m}^{-3}$), en la troza ($Dens_{v,t} = 1194 \text{ kg m}^{-3}$) y en la tabla saturada ($Dens_{v,th} = 1025 \text{ kg m}^{-3}$), se diferenciaron estadísticamente entre ellas, siendo la tabla húmeda la que presentó el valor más bajo.

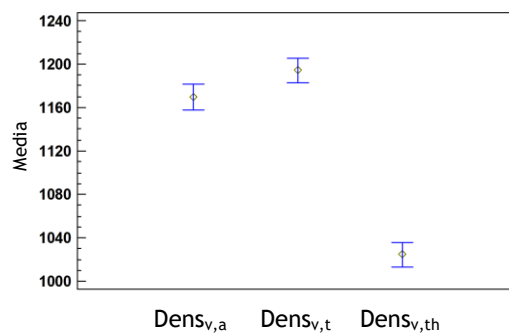


Figura 59. Medias e intervalos de confianza de las densidades en árbol ($Dens_{v,a}$), troza ($Dens_{v,t}$) y tabla ($Dens_{v,th}$) en condiciones de saturación, en kg m^{-3} .

5.1.5 Modelos de regresión para la muestra “Conjunto”

5.1.5.1 Modelos de regresión a partir de mediciones no destructivas en tabla

El primer análisis se llevó a cabo con los resultados obtenidos mediante la aplicación de métodos no destructivos sobre las tablas en condiciones de saturación, de la manera más directa, utilizando únicamente la velocidad de propagación de la onda. En esta primera etapa se utilizaron los datos de todas las tablas ensayadas en flexión estática, estando la muestra constituida por 61 tablas.

Los resultados para esta muestra indican que, para la técnica de vibración con los equipos Hitman y MTG, fue posible establecer un modelo significativo de estimación del módulo de rotura (MOR) en función de la velocidad de propagación de las ondas en la tabla saturada (Tabla 25). Sin embargo, los modelos presentaron baja capacidad predictiva, indicando que solo alrededor del 10 % de la variabilidad del MOR fue explicada por la velocidad de propagación (Tabla 25).

Tabla 25. Modelos de regresión para la estimación del módulo de rotura (MOR) a partir de la velocidad de propagación de la onda obtenida en la medición en la tabla saturada (V_{th}), aplicando diferentes técnicas y equipos.

Técnica	p -valor	Modelo	R^2 (%)
Ultrasonidos (USLab)	0,2384	-	-
Ondas de impacto (MST)	0,1378	-	-
Vibración (Hitman)	0,0073	$MOR = 7,56 + 3,87E-06 * V_{th,Hitman}^2$	12,16
Vibración (MTG)	0,0140	$MOR = (11,26 - 14840,2 / V_{th,MTG})^2$	9,97

Leyenda: $V_{th,Hitman}$: velocidad con el equipo Hitman en la tabla saturada ($m s^{-1}$); $V_{th,MTG}$: velocidad con el equipo MTG en la tabla saturada ($m s^{-1}$).

En general, las mejores correlaciones obtenidas con técnicas no destructivas de propagación de ondas son con propiedades de rigidez y no de rotura (Bucur, 2025). Sin embargo, incluso para los módulos de elasticidad y considerando las técnicas de vibración, que presentaron modelos significativos (p -valor $< 0,05$), los coeficientes de determinación fueron muy bajos (Tabla 26 y Tabla 27), lo que indica un bajo poder predictivo de los modelos presentados.

Tabla 26. Modelos de regresión para la estimación del módulo de elasticidad global (MOE_{Global}) a partir de la velocidad de propagación de la onda obtenida en la medición en la tabla saturada (V_{th}), aplicando diferentes técnicas y equipos.

Técnica	p -valor	Modelo	R^2 (%)
Ultrasonidos (USLab)	0,2197	-	-
Ondas de impacto (MST)	0,0796	-	-
Vibración (Hitman)	0,0274	$MOE_{Global} = 1 / (1,35E-04 - 3,91E-12 * V_{th,Hitman}^2)$	8,39
Vibración (MTG)	0,0209	$MOE_{Global} = 1 / (3,06E-05 + 0,21 / V_{th,MTG})$	8,86

Leyenda: $V_{th,Hitman}$: velocidad con el equipo Hitman en la tabla saturada ($m s^{-1}$); $V_{th,MTG}$: velocidad con el equipo MTG en la tabla saturada ($m s^{-1}$).

Tabla 27. Modelos de regresión para la estimación del módulo de elasticidad local (MOE_{Local}) a partir de la velocidad de propagación de la onda obtenida en la medición en la tabla saturada (V_{th}), aplicando diferentes técnicas y equipos.

Técnica	p -valor	Modelo	R^2 (%)
Ultrasonidos (USLab)	0,2158	-	-
Ondas de impacto (MST)	0,1423	-	-
Vibración (Hitman)	0,1188	-	-
Vibración (MTG)	0,0186	$MOE_{Local} = (149,38 - 138336 / V_{th,MTG})^2$	9,18

Leyenda: $V_{th,MTG}$: velocidad con el equipo MTG en la tabla saturada ($m s^{-1}$).

Teniendo en cuenta que la condición más simple de clasificación de las tablas, después del aserrado y en estado saturado, no resultó viable en la muestra de esta investigación, el siguiente paso se realizó considerando las tablas en condición de humedad de equilibrio (12 %). Para los ensayos en las tablas secas, ninguna de las técnicas presentó regresiones significativas para la estimación de MOR, MOE_{Global} y MOE_{Local} (Tabla 28).

Tabla 28. Valores de *p*-valor obtenidos en las regresiones para la estimación del módulo de rotura (MOR), módulo de elasticidad global (MOE_{Global}) y módulo de elasticidad local (MOE_{Local}), a partir de la velocidad de propagación de ondas en la tabla en condición de equilibrio higroscópico ($V_{ts,12}$), aplicando diferentes técnicas y equipos.

Técnica	Modelo	<i>p</i> -valor
Ultrasonidos (USlab)	MOR	0,1926
	MOE _{Global}	0,6514
	MOE _{Local}	0,2632
Ondas de impacto (MST)	MOR	0,1283
	MOE _{Global}	0,4740
	MOE _{Local}	0,1648
Vibración (MTG)	MOR	0,0574
	MOE _{Global}	0,2081
	MOE _{Local}	0,1459
Vibración (PLG)	MOR	0,1185
	MOE _{Global}	0,5716
	MOE _{Local}	0,1985

Para la tabla en la condición de equilibrio higroscópico se incorpora también el coeficiente de rigidez ($C_{LL,12}$) como variable predictora en los modelos. En este análisis se observa que, para el MOR, las técnicas de vibración presentaron correlación estadísticamente significativa (Tabla 29). Para el MOE_{Global} todas las técnicas presentaron correlaciones significativas (Tabla 30) y para el MOE_{Local} solo las ondas de tensión y de vibración con el equipo PLG (Tabla 31).

No obstante, en todos los casos donde hubo correlación significativa para la estimación de la rigidez, el $C_{LL,12}$ explicó como máximo alrededor del 60 % de la variabilidad del MOE_{Global} (Tabla 30), lo que indica una capacidad predictiva aceptable. En este caso, el comportamiento de las correlaciones se alineó con lo esperado teóricamente. Específicamente, se encontraron las correlaciones más robustas entre los parámetros de propagación de ondas y la rigidez (MOE_{Global}).

Tabla 29. Modelos de regresión para la estimación del módulo de rotura (MOR) a partir del coeficiente de rigidez en la tabla en condición de equilibrio higroscópico ($C_{LL,12}$), aplicando diferentes técnicas y equipos.

Técnica	p-valor	Modelo	R ² (%)
Ultrasonidos (USLab)	0,1223	-	-
Ondas de impacto (MST)	0,0963	-	-
Vibración (MTG)	0,0330	$MOR = \sqrt{7212,23 - 6,66E+07/C_{LL,12,MTG}}$	37,93
Vibración (PLG)	0,0420	$MOR = \exp(7,95 - 51011,1/C_{LL,12,PLG})$	35,20

Leyenda: $C_{LL,12,MTG}$: coeficiente de rigidez con el equipo MTG en la tabla en la humedad de equilibrio ($N\ mm^{-2}$); $C_{LL,12,PLG}$: coeficiente de rigidez con el equipo PLG en la tabla en la humedad de equilibrio ($N\ mm^{-2}$).

Tabla 30. Modelos de regresión para la estimación del módulo de elasticidad global (MOE_{Global}) a partir del coeficiente de rigidez en la tabla en condición de equilibrio higroscópico ($C_{LL,12}$), aplicando diferentes técnicas y equipos.

Técnica	p-valor	Modelo	R ² (%)
Ultrasonidos (USLab)	0,0185	$MOE_{Global} = 1/(-3,83E-05 + 1,88/C_{LL,12,USLab})$	44,13
Ondas de impacto (MST)	0,0055	$MOE_{Global} = 1/(-5E-05 + 2,04/C_{LL,12,MST})$	55,34
Vibración (MTG)	0,0120	$MOE_{Global} = \sqrt{2,53E+08 - 1,83E+12/C_{LL,12,MTG}}$	48,39
Vibración (PLG)	0,0033	$MOE_{Global} = 1/(-7,70E-05 + 2,09/C_{LL,12,PLG})$	59,62

Leyenda: $C_{LL,12,USLab}$: coeficiente de rigidez con el equipo USLab en la tabla en la humedad de equilibrio ($N\ mm^{-2}$); $C_{LL,12,MST}$: coeficiente de rigidez con el equipo MST en la tabla en la humedad de equilibrio ($N\ mm^{-2}$); $C_{LL,12,MTG}$: coeficiente de rigidez con el equipo MTG en la tabla en la humedad de equilibrio ($N\ mm^{-2}$); $C_{LL,12,PLG}$: coeficiente de rigidez con el equipo PLG en la tabla en la humedad de equilibrio ($N\ mm^{-2}$).

Tabla 31. Modelos de regresión para la estimación del módulo de elasticidad local (MOE_{Local}) a partir del coeficiente de rigidez en la tabla en condición de equilibrio higroscópico ($C_{LL,12}$), aplicando diferentes técnicas y equipos.

Técnica	p-valor	Modelo	R ² (%)
Ultrasonidos (USLab)	0,0665	-	-
Ondas de impacto (MST)	0,0378	$MOE_{Local} = 1/(-5,91E-05 + 2,10/C_{LL,12,MST})$	36,39
Vibración (MTG)	0,0715	-	-
Vibración (PLG)	0,0233	$MOE_{Local} = \exp(11,13 - 22007,9/C_{LL,12,PLG})$	41,70

Leyenda: $C_{LL,12,MST}$: coeficiente de rigidez con el equipo MST en la tabla en la humedad de equilibrio ($N\ mm^{-2}$); $C_{LL,12,PLG}$: coeficiente de rigidez con el equipo PLG en la tabla en la humedad de equilibrio ($N\ mm^{-2}$).

5.1.5.2 Modelos de regresión a partir de mediciones no destructivas en troza

Para ninguna de las técnicas (ultrasonido, ondas de impacto y vibración) las mediciones longitudinales directas en las trozas permitieron obtener modelos estadísticamente significativos para la estimación de las propiedades mecánicas (MOR y MOE) de las tablas (Tabla 32).

Tabla 32. Resultados de p -valor obtenidos en las regresiones para la estimación del módulo de rotura (MOR), módulo de elasticidad global (MOE_{Global}) y módulo de elasticidad local (MOE_{Local}), a partir de la velocidad de propagación de ondas en la troza ($V_{t,lon}$), y del coeficiente de rigidez ($C_{LL,t}$) aplicando diferentes técnicas y equipos.

Técnica	VD	VI	p -valor
Ultrasonidos (USLab)	MOR	$V_{t,lon}$	0,6972
		$C_{LL,t}$	0,7459
	MOE_{Global}	$V_{t,lon}$	0,7850
		$C_{LL,t}$	0,5146
	MOE_{Local}	$V_{t,lon}$	0,9434
		$C_{LL,t}$	0,9778
Ondas de impacto (MST)	MOR	$V_{t,lon}$	0,0861
		$C_{LL,t}$	0,1485
	MOE_{Global}	$V_{t,lon}$	0,1394
		$C_{LL,t}$	0,0972
	MOE_{Local}	$V_{t,lon}$	0,1412
		$C_{LL,t}$	0,1640
Vibración (MTG)	MOR	$V_{t,lon}$	0,1605
		$C_{LL,t}$	0,2390
	MOE_{Global}	$V_{t,lon}$	0,7625
		$C_{LL,t}$	0,3696
	MOE_{Local}	$V_{t,lon}$	0,6160
		$C_{LL,t}$	0,7336
Vibración (Hitman)	MOR	$V_{t,lon}$	0,4002
		$C_{LL,t}$	0,4202
	MOE_{Global}	$V_{t,lon}$	0,4148
		$C_{LL,t}$	0,1227
	MOE_{Local}	$V_{t,lon}$	0,3946
		$C_{LL,t}$	0,3370

Leyenda: VD: Variable dependiente; VI: Variable independiente.

Posteriormente, para aquellos equipos que permiten realizar mediciones longitudinales y también mediciones superficiales sobre las trozas (USLab - ultrasonidos y MST - ondas de impacto), se llevó a cabo un análisis del conjunto de datos para conocer en qué casos se produce una mejor correlación entre la velocidad en el árbol y la velocidad en la troza. Este segundo análisis se justifica por los resultados obtenidos para los modelos presentados en el apartado 5.1.6.2, a partir de los cuales se verifica la correlación existente entre las mediciones en el árbol y los resultados de los ensayos de flexión. Con el objetivo de disponer de más información sobre la propagación de la onda en el árbol y la troza, así como la relación entre ambas, se plantea el análisis recogido en la Tabla 33. Para la técnica de ultrasonidos la mejor correlación se consigue con el uso de la velocidad obtenida en la medición longitudinal directa (Tabla 33), mientras que, para las ondas de impacto con el equipo MST, la mejor correlación entre parámetros se obtiene a partir de la medición superficial en el tramo de 2 m sobre la troza (Tabla 33).

Tabla 33. Modelos de regresión para la estimación de la velocidad de propagación de la onda en el árbol a partir de mediciones de velocidad realizadas en las trozas con las técnicas de ultrasonidos (USLab) y ondas de impacto (MST).

Técnica	Tipo de medición	Modelo	p-valor	R ² (%)
Ultrasonidos (USLab)	Longitudinal	$V_{a,USLab} = \sqrt{-1,67E+07 + 2,89 \cdot V_{t,lon,USLab}^2}$	0,0298	39,05
	Superficial 0,4 m	-	0,0592	-
	Superficial 2 m	-	0,4339	-
Ondas de impacto (MST)	Longitudinal	$V_{a,MST} = \sqrt{-1,40E+07 + 1,84 \cdot V_{t,lon,MST}^2}$	0,0095	50,59
	Superficial 0,4 m	$V_{a,MST} = 1 / (5,54E-04 - 1,79E-11 \cdot V_{t,sup,04,MST}^2)$	0,0108	49,37
	Superficial 2 m	$V_{a,MST} = \sqrt{-1,68E+07 + 2,08 \cdot V_{t,sup,2,MST}^2}$	0,0004	73,71

Leyenda: $V_{a,USLab}$: velocidad con el equipo USLab en el árbol ($m s^{-1}$); $V_{t,lon,USLab}$: velocidad longitudinal con el equipo USLab en la troza, obtenida a partir del promedio de las mediciones realizadas en 3 puntos en las testas de las trozas ($m s^{-1}$); $V_{a,MST}$: velocidad con el equipo MST en el árbol ($m s^{-1}$); $V_{t,lon,MST}$: velocidad longitudinal con el equipo MST en la troza, obtenida a partir del promedio de las mediciones realizadas en 3 puntos en las testas de las trozas ($m s^{-1}$); $V_{t,sup,04,MST}$: velocidad superficial en la troza con el equipo MST con transductores a una distancia de 0,4 m ($m s^{-1}$); $V_{t,sup,2,MST}$: velocidad superficial en la troza con el equipo MST con transductores a una distancia de 2 m ($m s^{-1}$).

Considerando el resultado obtenido en el análisis anterior, a partir del cual se verifica que para la técnica de ondas de impacto existe una mayor correlación entre la velocidad en el árbol y la velocidad obtenida en la medición superficial en el tramo de 2 m sobre la troza ($V_{t,sup,2}$), se plantean de nuevo los modelos de regresión entre estas variables. En este segundo análisis se obtienen correlaciones estadísticamente significativas, con R² máximo de 48 % para la estimación del MOE_{Global} a partir del $C_{LL,t}$ (Tabla 34).

Tabla 34. Modelos de regresión para la estimación del módulo de rotura (MOR) a partir de la velocidad de propagación de la onda ($V_{t,sup,2}$) y del coeficiente de rigidez en la troza ($C_{LL,t}$), obtenido en mediciones superficiales en un tramo de 2 m, con la técnica de ondas de impacto.

Técnica	VI	p-valor	Modelo	R ² (%)
Ondas de impacto (MST)	$V_{t,sup,2}$	0,0186	$MOR = 1 / (-0,18 + 760,63 / V_{t,sup,2,MST})$	44,04
	$C_{LL,t}$	0,0399	$MOR = 1 / (-0,05 + 672,12 / C_{LL,t,MST})$	35,78
	$V_{t,sup,2}$	0,0381	$MOE_{Global} = 1 / (-6,90E-05 + 0,61 / V_{t,sup,2,MST})$	36,32
	$C_{LL,t}$	0,0120	$MOE_{Global} = 1 / (1,57E-05 + 0,69 / C_{LL,t,MST})$	48,43
	$V_{t,sup,2}$	0,0146	$MOE_{Local} = 1 / (-1,46E-04 + 0,88 / V_{t,sup,2,MST})$	46,52
	$C_{LL,t}$	0,0313	$MOE_{Local} = 1 / (1,51E-07 + 0,79 / C_{LL,t,MST})$	38,53

Leyenda: VI: Variable independiente; $V_{t,sup,2,MST}$: velocidad superficial de la troza con el equipo MST con transductores a una distancia de 2 m ($m s^{-1}$); $C_{LL,t,MST}$: coeficiente de rigidez de la troza con el equipo MST, calculado a partir de la velocidad obtenida en la medición superficial a 2 m ($N mm^{-2}$).

5.1.5.3 Modelos de regresión a partir de mediciones no destructivas en árbol

Utilizando solamente las técnicas en estudio (ultrasonido y ondas de impacto), aplicadas directamente en árbol como técnica predictora de las propiedades mecánicas determinadas en ensayo de flexión estática, y para los tres equipos utilizados, no se obtienen modelos estadísticamente significativos (Tabla 35).

Tabla 35. Resultados de p -valor obtenidos en las regresiones para la estimación del módulo de rotura (MOR), módulo de elasticidad global (MOE_{Global}) y módulo de elasticidad local (MOE_{Local}), a partir de la velocidad de propagación de ondas en el árbol (V_a), aplicando diferentes técnicas y equipos.

Técnica	VD	p -valor
Ultrasonidos (USLab)	MOR	0,4953
	MOE_{Global}	0,7323
	MOE_{Local}	0,4249
Ondas de impacto (MST)	MOR	0,3250
	MOE_{Global}	0,1411
	MOE_{Local}	0,1652
Ondas de impacto (Hitman)	MOR	0,4141
	MOE_{Global}	0,6630
	MOE_{Local}	0,7461

Leyenda: VD: Variable dependiente.

Considerando que los parámetros dendrométricos del árbol (diámetro normal, DAP, diámetro de la base, DBA, altura total, H_{total} , diámetro de la copa, D_{copa} , altura de la copa, H_{copa} , y conicidad del árbol, C_a) generalmente son relevantes en evaluaciones de la calidad de la madera en pie, se analiza la posibilidad de incorporar estos parámetros en los modelos de regresión múltiples con el objetivo de mejorar las correlaciones entre resultados del ensayo de flexión y las mediciones realizadas en el árbol en pie. La densidad del árbol (obtenida a partir de muestras cilíndricas) también es un parámetro físico importante, ya que aporta características intrínsecas de la madera, además de ser un parámetro que se obtiene de manera habitual en inventarios forestales.

Dado que las variables independientes en un modelo de regresión múltiple no deben presentar correlación entre sí, se realizó un análisis inicial para verificar las relaciones existentes (Tabla 36). Se confirmó que la conicidad no muestra una correlación estadísticamente significativa con los demás parámetros (p -valor $> 0,05$). Por el contrario, los diámetros y las alturas (total y de copa) presentan multicolinealidad, lo que desaconseja su inclusión simultánea en el modelo. Asimismo, aunque la conicidad no mostró una relación lineal significativa, al ser una variable derivada matemáticamente de los diámetros (DAP y DBA), se decidió excluir su uso conjunto con estos para evitar la multicolinealidad estructural y asegurar la robustez del modelo.

Tabla 36. Matriz de correlaciones entre las variables dendrométricas y físicas obtenidas del árbol.

	C_a	DAP	DBA	D_{copa}	$Dens_{v,a}$	H_{total}	H_{copa}
C_a		-0,2017 (20)	0,1562 (20)	-0,4086 (20)	0,2333 (20)	0,0827 (20)	-0,0419 (20)
		0,3937	0,5107	0,0736	0,3222	0,7289	0,8608
DAP	-0,2017 (20)		0,9351 (20)	0,6131 (20)	0,4144 (20)	0,7920 (20)	0,5906 (20)
	0,3937		0,0000	0,0040	0,0693	0,0000	0,0061
DBA	0,1562 (20)	0,9351 (20)		0,4629 (20)	0,4876 (20)	0,8372 (20)	0,5840 (20)
	0,5107	0,0000		0,0399	0,0292	0,0000	0,0069
D_{copa}	-0,4086 (20)	0,6131 (20)	0,4629 (20)		0,3218 (20)	0,3298 (20)	0,0852 (20)
	0,0736	0,0040	0,0399		0,1664	0,1556	0,7210
$Dens_{v,a}$	0,2333 (20)	0,4144 (20)	0,4876 (20)	0,3218 (20)		0,3046 (20)	0,0362 (20)
	0,3222	0,0693	0,0292	0,1664		0,1917	0,8797
H_{total}	0,0827 (20)	0,7920 (20)	0,8372 (20)	0,3298 (20)	0,3046 (20)		0,5322 (20)
	0,7289	0,0000	0,0000	0,1556	0,1917		0,0157
H_{copa}	-0,0419 (20)	0,5906 (20)	0,5840 (20)	0,0852 (20)	0,0362 (20)	0,5322 (20)	
	0,8608	0,0061	0,0069	0,7210	0,8797	0,0157	

Leyenda: Línea 1: correlación; línea 2: tamaño de la muestra; línea 3: p -valor; C_a : conicidad; DAP: diámetro normal; DBA: diámetro basal; D_{copa} : diámetro de la copa; $Dens_{v,a}$: densidad verde del árbol obtenida a partir de muestra cilíndrica; H_{total} : altura total del árbol; H_{copa} : altura de copa del árbol.

A partir de estos parámetros dendrométricos generales, se componen los parámetros H_{copa}/D_{copa} y H_{total}/DAP , siendo la Esbeltez de copa (E_{copa}) y la Esbeltez del fuste (E_{fuste}), respectivamente. Con estos nuevos parámetros se hace nuevamente la evaluación de la correlación entre variables (Tabla 37).

Tabla 37. Matriz de correlaciones entre variables dendrométricas compuestas y variables físicas obtenidas del árbol.

	C_a	E_{copa}	DBA	E_{fuste}	$Dens_{v,a}$
C_a		0,4197 (20)	0,1562 (20)	0,3334 (20)	0,2333 (20)
		0,0654	0,5107	0,1508	0,3222
E_{copa}	0,4197 (20)		-0,6596 (20)	0,5727 (20)	-0,3643 (20)
	0,0654		0,0016	0,0083	0,1143
DBA	0,1562 (20)	-0,6596 (20)		-0,2601 (20)	0,4876 (20)
	0,5107	0,0016		0,2680	0,0292
E_{fuste}	0,3334 (20)	0,5727 (20)	-0,2601 (20)		-0,4716 (20)
	0,1508	0,0083	0,2680		0,0358
$Dens_{v,a}$	0,2333 (20)	-0,3643 (20)	0,4876 (20)	-0,4716 (20)	
	0,3222	0,1143	0,0292	0,0358	

Leyenda: Línea 1: correlación; línea 2: tamaño de la muestra; línea 3: p -valor; C_a : conicidad; E_{copa} : esbeltez de la copa (H_{copa}/D_{copa}); DBA: diámetro basal; E_{fuste} : esbeltez del fuste (H_{total}/DAP); $Dens_{v,a}$: densidad verde del árbol obtenida a partir de muestra cilíndrica.

En el análisis de regresión lineal múltiple, la robustez del modelo depende críticamente de la relación entre el número de observaciones (n) y el número de variables predictoras (k). Esta relación se formaliza en los grados de libertad residuales, calculados según la Ecuación 32, que representan la cantidad de información muestral que excede la necesaria para poder calcular el modelo. Un número escaso de grados de libertad, indicativo de una muestra pequeña en relación al número de variables predictoras, compromete la fiabilidad del modelo, incrementando drásticamente el riesgo de sobreajuste. Un modelo sobreajustado se adapta al ruido aleatorio de la muestra en lugar de a la tendencia subyacente, resultando en métricas de ajuste óptimas (p.ej., R^2) pero comprometiendo la validez predictiva y la capacidad de generalización del modelo.

$$gl = n - k - 1 \quad \text{Ecuación 32}$$

Siendo:

n número de observaciones (12);

k número de variables independientes.

En este caso, el número de observaciones se corresponde con el número de árboles de los que se obtienen las tablas ensayadas a flexión y después de haber eliminado los resultados de ensayo que presentan incidencias en la medición o roturas producidas fuera de tiempo.

Considerando la Tabla 37, es posible una combinación de variables independientes, *Combinación 1*: $C_a + E_{copa} + Dens_{v,a}$. Esta combinación, con cuatro variables independientes, 3 dendrométricas o físicas + 1 velocidad de propagación de la onda en el árbol (V_a), permite obtener un modelo de predicción con 7 grados de libertad (Ecuación 32).

Con la inclusión de la velocidad de onda y de parámetros dendrométricos y físicos, para todas las técnicas y equipos fue posible obtener correlaciones significativas entre los parámetros de propagación de ondas y el MOR (Tabla 38), considerando la combinación 1 de parámetros, con coeficientes de determinación entre 34 % y 39 %. Para los módulos de elasticidad (MOE_{Global} y MOE_{Local}), ninguna de las técnicas presentó modelos de regresión estadísticamente significativos con la introducción de parámetros dendrométricos o físicos.

Tabla 38. Modelos de regresión para la estimación del módulo de rotura (MOR), módulo de elasticidad global (MOE_{Global}) y módulo de elasticidad local (MOE_{Local}), a partir de las combinaciones de velocidad de propagación de ondas y parámetros del árbol, aplicando diferentes técnicas y equipos.

Técnica	VD	VI	p-valor	Modelo	R ² ajustado (%)	Error (N mm ⁻²)
Ultrasonidos (USLab)	MOR	1+ V _{USLab,a}	0,0300	MOR = -107 + 332*C _a + 12,9*E _{copa} + 0,11*Dens _{v,a} - 0,0054*V _{a,USLab}	37,47	10,1
	MOE _{Global}	1+ V _{USLab,a}	0,6102	-	-	-
	MOE _{Local}	1+ V _{USLab,a}	0,8090	-	-	-
Ondas de impacto (MST)	MOR	1 + V _{MST,a}	0,0409	MOR = -114 + 293*C _a + 11,0*E _{copa} + 0,115*Dens _{v,a} - 0,005*V _{a,MST}	34,52	10,3
	MOE _{Global}	1 + V _{MST,a}	0,4399	-	-	-
	MOE _{Local}	1 + V _{MST,a}	0,6476	-	-	-
Ondas de impacto (Hitman)	MOR	1 + V _{Hitman,a}	0,0246	MOR = -22 + 396*C _a + 7,6*E _{copa} + 0,059*Dens _{v,a} - 0,012*V _{a,Hitman}	39,43	9,9
	MOE _{Global}	1 + V _{Hitman,a}	0,5823	-	-	-
	MOE _{Local}	1 + V _{Hitman,a}	0,8336	-	-	-

Leyenda: VD: Variable dependiente; VI:Variable independiente; 1: C_a + E_{copa} + Dens_{v,a}; C_a: conicidad del árbol; E_{copa}: esbeltez de la copa; Dens_{v,a}: densidad verde del árbol (kg m⁻³); V_{a,USLab}: velocidad obtenida con el equipo USLab en el árbol (m s⁻¹); V_{a,MST}: velocidad obtenida con el equipo MST en el árbol (m s⁻¹); V_{a,Hitman}: velocidad obtenida con el equipo Hitman en el árbol (m s⁻¹).

5.1.6 Modelos de regresión para la muestra “Troza Basal”

5.1.6.1 Modelos de regresión a partir de mediciones no destructivas en troza

Considerando los resultados presentados en la Tabla 33, para el análisis de las mediciones realizadas sobre las trozas basales mediante las técnicas de ultrasonidos (USLab), y vibración (MTG y Hitman) se utiliza la velocidad longitudinal, y, en el caso de la técnica de ondas de impacto con el equipo MST, se utiliza la velocidad superficial obtenida en un tramo de 2 m.

Para ninguna técnica y ningún parámetro de propagación de ondas obtenido en las mediciones sobre las trozas basales (V_{tb} y C_{LL,tb}) se dispone de modelos significativos (Tabla 39).

Tabla 39. Resultados de p -valor obtenidos en las regresiones para la estimación del módulo de rotura (MOR), módulo de elasticidad global (MOE_{Global}) y módulo de elasticidad local (MOE_{Local}) a partir de la velocidad de propagación de la onda (V_{tb}) y del coeficiente de rigidez en la troza basal ($C_{LL,tb}$), aplicando diferentes técnicas y equipos.

Técnica	VD	VI	p -valor
Ultrasonidos (USLab)	MOR	$V_{tb,USLab}$	0,6171
		$C_{LL,tb,USLab}$	0,5764
	MOE_{Global}	$V_{tb,USLab}$	0,7596
		$C_{LL,tb,USLab}$	0,6574
	MOE_{Local}	$V_{tb,USLab}$	0,9013
		$C_{LL,tb,USLab}$	0,6816
Ondas de impacto (MST)	MOR	$V_{tb,MST}$	0,8392
		$C_{LL,tb,MST}$	0,8776
	MOE_{Global}	$V_{tb,MST}$	0,4929
		$C_{LL,tb,MST}$	0,4051
	MOE_{Local}	$V_{tb,MST}$	0,9610
		$C_{LL,tb,MST}$	0,7922
Vibración (Hitman)	MOR	$V_{tb,Hitman}$	0,9308
		$C_{LL,tb,Hitman}$	0,8649
	MOE_{Global}	$V_{tb,Hitman}$	0,5179
		$C_{LL,tb,Hitman}$	0,3634
	MOE_{Local}	$V_{tb,Hitman}$	0,3744
		$C_{LL,tb,Hitman}$	0,2847
Vibración (MTG)	MOR	$V_{tb,MTG}$	0,0816
		$C_{LL,tb,MTG}$	0,1423
	MOE_{Global}	$V_{tb,MTG}$	0,4228
		$C_{LL,tb,MTG}$	0,6419
	MOE_{Local}	$V_{tb,MTG}$	0,7193
		$C_{LL,tb,MTG}$	0,5251

Leyenda: VD: Variable dependiente; VI: Variable independiente.

5.1.6.2 Modelos de regresión a partir de mediciones no destructivas en árbol

Al igual que sucede en el caso de las trozas basales, aplicando los resultados obtenidos de las mediciones con técnicas de onda ultrasónica y ondas de impacto en el árbol en pie, no se obtienen modelos estadísticamente significativos (p -valor $> 0,05$).

Se replica el proceso realizado en el apartado 5.1.5.3, en el cual se plantean modelos de regresión múltiple considerando parámetros dendrométricos y físicos. En este caso, se dispone de un número de observaciones $n = 7$, considerando el número de árboles de los cuales fueron obtenidas tablas pertenecientes a la troza basal, y que fueron ensayadas en flexión estática. Utilizando las mismas variables independientes empleadas para toda la muestra en la combinación 1 ($C_a + E_{copa} + Dens_{v,a}$), los grados de libertad pasan de 7 a 2 (Ecuación 32). Para aumentar ligeramente este valor, se suprime el parámetro de conicidad del árbol (C_a), habiendo verificado previamente que esa variable dendrométrica es la que menos aporta a la capacidad de predicción de los modelos (R^2 ajustado), obteniendo finalmente modelos con 3 grados de libertad. La combinación de parámetros utilizada en este caso para el análisis de la troza basal

queda constituida por tres variables independientes: 2 dendrométricas o físicas + 1 velocidad de propagación de la onda (*Combinación 2: $E_{copa} + Dens_{v,a}$*).

Considerando estos parámetros como variables independientes, se verifica que, para las trozas de la base, fue posible obtener modelos de predicción de los parámetros mecánicos (MOR y MOE_{Global}) con todas las técnicas y equipos, a partir de las mediciones en el árbol en pie considerando la combinación 2 (*$E_{copa} + Dens_{v,a}$*) (Tabla 40). Para ninguna técnica se obtuvieron modelos significativos de predicción del módulo de elasticidad local (Tabla 40).

Tabla 40. Modelos de regresión para la estimación del módulo de rotura (MOR), módulo de elasticidad global (MOE_{Global}) y módulo de elasticidad local (MOE_{Local}), a partir de las combinaciones de velocidad de propagación de ondas y parámetros del árbol, aplicando diferentes técnicas y equipos y considerando como variable dependiente los resultados de las tablas de la troza basal.

Técnica	VD	VI	p-valor	Modelo	R ² ajustado (%)	Error (N mm ⁻²)
Ultrasonidos (USLab)	MOR	2+ $V_{a,USLab}$	0,0417	$MOR = -290,16 - 4,14E-03 * V_{a,USLab} + 0,279 * Dens_{v,a} + 15,47 * E_{copa}$	82,80	5,35
	MOE_{Global}	2+ $V_{a,USLab}$	0,0140	$MOE_{Global} = -34502,0 + 37,553 * Dens_{v,a} + 500,305 * E_{copa} + 6,93E-02 * V_{a,USLab}$	91,76	359,70
	MOE_{Local}	2+ $V_{a,USLab}$	0,1091	-	-	-
Ondas de impacto (MST)	MOR	2 + $V_{a,MST}$	0,0078	$MOR = -334,44 - 1,05E-02 * V_{a,MST} + 0,332 * Dens_{v,a} + 16,24 * E_{copa}$	94,45	3,04
	MOE_{Global}	2 + $V_{a,MST}$	0,0106	$MOE_{Global} = -33543,7 + 0,2697 * V_{a,MST} + 36,241 * Dens_{v,a} + 453,32 * E_{copa}$	93,17	327,66
	MOE_{Local}	2 + $V_{a,MST}$	0,0531	-	-	-
Ondas de impacto (Hitman)	MOR	2 + $V_{a,Hitman}$	0,0168	$MOR = -272,32 - 1,11E-02 * V_{a,Hitman} + 0,291 * Dens_{v,a} + 11,63 * E_{copa}$	90,70	3,93
	MOE_{Global}	2 + $V_{a,Hitman}$	0,0060	$MOE_{Global} = -35723,8 + 0,456 * V_{a,Hitman} + 37,228 * Dens_{v,a} + 583,93 * E_{copa}$	95,35	270,35
	MOE_{Local}	2 + $V_{a,Hitman}$	0,1187	-	-	-

Leyenda: VD: Variable dependiente; VI: Variable independiente; 2: $E_{copa} + Dens_{v,a}$; E_{copa} : esbeltez de la copa; $Dens_{v,a}$: densidad verde del árbol (kg m⁻³); $V_{a,USLab}$: velocidad obtenida con el equipo USLab en el árbol (m s⁻¹); $V_{a,MST}$: velocidad obtenida con el equipo MST en el árbol (m s⁻¹); $V_{a,Hitman}$: velocidad obtenida con el equipo Hitman en el árbol (m s⁻¹).

5.1.7 Clasificación de la madera de *Quercus robur*

5.1.7.1 Clasificación de la tabla a partir de ensayos destructivos

A partir de los resultados obtenidos en el proceso de clasificación visual, con la aplicación de los criterios de calidad para *Castanea sativa* ($b \leq 70$ mm) según la norma UNE 56546:2022 (Apartado 5.1.3.3) se establecen 3 grupos de material:

- *Grupo 1*: en este grupo se incluye la totalidad de las piezas sobre las cuales se llevó a cabo la clasificación visual (piezas con y sin rechazos) y de las cuales posteriormente se obtuvieron resultados en el ensayo de flexión estática; con $n = 61$.
- *Grupo 2.1*: en este grupo se incluyen solo las piezas clasificadas como MEF y de las cuales posteriormente se obtuvieron resultados en el ensayo de flexión estática; con $n = 17$.
- *Grupo 2.2*: en este grupo se incluyen solo las piezas clasificadas como Rechazo y de las cuales posteriormente se obtuvieron resultados en el ensayo de flexión estática; con $n = 44$.

Para las tablas incluidas en cada uno de estos tres grupos se aplica el proceso de clasificación según la norma UNE-EN 338:2016. En la Tabla 41 se presentan los valores característicos y valores medios, así como la asignación de la clase resistente para cada grupo. Los mismos cálculos son presentados en la Tabla 42 pero, en este caso, clasificando el material de cada grupo según la tabla de asignación de clases resistentes de la norma UNE-EN 338:2016 para coníferas, ya que como la propia norma indica, estas clases pueden aplicarse también a las maderas de frondosas que presentan un perfil resistente y densidad similares.

Tabla 41. Valores obtenidos de las resistencias ($f_{m,k}$) y densidades (ρ_k) características, del valor medio del módulo de elasticidad ($E_{m,0,mean}$) y asignación de clase resistente según norma UNE-EN 338 para frondosas, de las tablas ensayadas a flexión, para cada grupo establecido en función del resultado de la clasificación visual.

Grupos	$f_{m,k}$ (N mm ⁻²)	Clase	$E_{m,0,mean}$ (N mm ⁻²)	Clase	ρ_k (kg m ⁻³)	Clase	Clase final
G1	19,6	D18	10939	D27	645	D50	D18
G2.1	15,4	NC	10469	D24	683	D55	NC
G2.2	20,5	D18	10972	D27	633	D50	D18

Leyenda: G1: Grupo 1 (todas las piezas: 61); G2.1: Grupo 2.1 (piezas clasificadas MEF:17); G2.2: Grupo 2.2 (piezas clasificadas Rechazo: 44).

Tabla 42. Valores obtenidos de las resistencias ($f_{m,k}$) y densidades (ρ_k) características, del valor medio del módulo de elasticidad ($E_{m,0,mean}$) y asignación de clase resistente según norma UNE-EN 338 para coníferas, de las tablas ensayadas a flexión, para cada grupo establecido en función del resultado de la clasificación visual.

Grupos	$f_{m,k}$ (N mm ⁻²)	Clase	$E_{m,0,mean}$ (N mm ⁻²)	Clase	ρ_k (kg m ⁻³)	Clase	Clase final
G1	19,6	C18	10939	C22	645	C50	C18
G2.1	15,4	C14	10469	C22	683	C50	C14
G2.2	20,5	C20	10972	C22	633	C50	C20

Leyenda: G1: Grupo 1 (todas las piezas: 61); G2.1: Grupo 2.1 (piezas clasificadas MEF:17); G2.2: Grupo 2.2 (piezas clasificadas Rechazo: 44).



Con los resultados obtenidos para las piezas clasificadas como MEF (Grupo 2.1) se observa que no es posible asignar una clase resistente a este lote de material, según la

clasificación establecida en la norma UNE-EN 338:2016 para frondosas (Tabla 41). Dentro de este grupo, las tablas S12A04 y S12A13 presentan propiedades de resistencia (16 y 13 N mm^{-2} , respectivamente) y rigidez (7786 y 7066 N mm^{-2} , respectivamente) excepcionalmente bajas en comparación con el resto de la muestra. La presencia de estas dos piezas reduce drásticamente el valor característico de resistencia (percentil 5) del grupo completo, situándolo por debajo del umbral mínimo requerido para la clase más baja, D18. En un análisis de normalidad estos datos no son considerados anómalos (*outliers*), motivo por el cual no fueron rechazados en el análisis estadístico. Del mismo modo, en el proceso de clasificación visual, estas tablas no fueron consideradas como rechazo. En cuanto al Grupo 2.2, y a pesar de estar formado por tablas rechazadas en el proceso de clasificación visual, ha sido posible la asignación de una clase resistente (D18 / C20) (Tabla 41 y Tabla 42). Las propiedades mecánicas obtenidas si se consideran todas las piezas analizadas permiten la clasificación del material del Grupo 1 y la clase resistente se corresponde con una D18 / C18 (Tabla 41 y Tabla 42).

Para el Grupo 2.1, tal como se presentó en la Tabla 22, el elevado porcentaje de piezas rechazadas (77 %) se debe principalmente a los nudos y a las deformaciones. Si consideramos las piezas clasificadas como MEF, aplicando solamente los criterios de calidad visual para los nudos que se recogen para la madera de *Castanea sativa* de pequeña escuadría, se mejora el porcentaje de rechazo, disminuyendo a un 64 %, y permite la asignación de una clase resistente del material según la norma UNE-EN 338:2016 para frondosas (Tabla 43). La clase resistente para el Grupo 2.1, tras la realización de este ajuste, sería la D18 (frondosa) y C18 (conífera), igualando la clase obtenida si se considera la totalidad del material (Grupo 1).

Tabla 43. Valores obtenidos de las resistencias ($f_{m,k}$) y densidades (ρ_k) características, del valor medio del módulo de elasticidad ($E_{m,0,mean}$) y asignación de clase resistente según norma UNE-EN 338 para frondosas y coníferas, de las tablas ensayadas a flexión, para el grupo 2.1 (MEF) sin considerar las deformaciones.

Grupo	$f_{m,k}$ (N mm^{-2})	$E_{m,0,mean}$ (N mm^{-2})	ρ_k (kg m^{-3})	Clase final frondosas	Clase final coníferas
G2.1 Ajustado	18,7	11216	654	D18	C18

Leyenda: G2.1 Ajustado: Grupo 2.1 constituido por piezas clasificadas MEF, sin considerar la medición de las deformaciones, $n = 26$.

A continuación, la Tabla 44 presenta la asignación de clases resistentes según la norma EN 338, obtenida tras someter a ensayos de flexión tanto el material aceptado (Clase 3) como el rechazado por la norma visual NF B52-001-1:2018. De conformidad con la norma EN 1912:2025, al roble europeo de calidad visual Clase 3 le corresponde la clase resistente D18. Los ensayos de flexión estática corroboran esta asignación, mostrando que el material del Grupo 3.1 (Clase 3) cumple efectivamente con los requisitos de la clase D18. No obstante, tal como sucedía con la norma UNE 56546:2022, se observa que el material catalogado como Rechazo (Grupo 3.2) también alcanza los valores mínimos para ser asignado a la clase resistente D18.

Tabla 44. Valores obtenidos de las resistencias ($f_{m,k}$) y densidades (ρ_k) características, del valor medio del módulo de elasticidad ($E_{m,0,mean}$) y asignación de clase resistente según norma UNE-EN 338 para frondosas, de las tablas ensayadas a flexión, para cada grupo establecido en función del resultado de la clasificación visual según la norma NF B52-001-1:2018.

Grupos	$f_{m,k}$ (N mm ⁻²)	Clase	$E_{m,0,mean}$ (N mm ⁻²)	Clase	ρ_k (kg m ⁻³)	Clase	Clase final
G3.1	21,2	D18	10938	D27	667	D55	D18
G3.2	19,5	D18	10732	D27	626	D50	D18

Leyenda: G3.1: Grupo 3.1 (piezas clasificadas como Clase 3: 24); G3.2: Grupo 3.2 (piezas clasificadas Rechazo: 37).

El análisis planteado para los grupos se organiza ahora según parcelas, con la finalidad de mantener la coherencia con los análisis presentados en el resto de los apartados de este documento. La muestra total fue clasificada como D18 (Tabla 45), la misma clasificación obtenida para los grupos 1, 2.1 (ajustado) y 2.2. La parcela S no fue clasificada, a consecuencia de la presencia de las tablas S12A04 y S12A13, que también formaban parte del Grupo 2.1 y que, a pesar de haber sido clasificadas como MEF en el proceso de clasificación visual, no permiten la asignación de una clase resistente para frondosas cuando son incluidas en el Grupo 2.1 (Tabla 41).

Tabla 45. Valores obtenidos de las resistencias ($f_{m,k}$) y densidades (ρ_k) características, del valor medio del módulo de elasticidad ($E_{m,0,mean}$) y asignación de clase resistente según norma UNE-EN 338 para frondosas, de las tablas ensayadas a flexión, para cada una de las parcelas y considerando la muestra total.

Parcela	$f_{m,k}$ (N mm ⁻²)	Clase	$E_{m,0,mean}$ (N mm ⁻²)	Clase	ρ_k (kg m ⁻³)	Clase	Clase final
M	28,6	D27	11303	D27	697	D60	D27
Q	20,4	D18	10307	D27	626	D45	D27
S	12,6	NC	10621	D18	690	D40	NC
Muestra total	19,6	D18	10939	D27	647	D50	D18

Leyenda: NC: no clasifica.

5.1.7.2 Clasificación de la tabla a partir de ensayos acústicos

Los modelos de correlación entre los parámetros obtenidos mediante la propagación de ondas en las tablas y el módulo de rotura o de elasticidad, a pesar de ser significativos, mostraron una baja capacidad predictiva (R^2 reducidos) (apartado 5.1.5.1). Por ello, no parecen adecuados para emplearse en la clasificación de piezas según sus propiedades de resistencia y rigidez. Dado que no existe una norma europea que contemple la clasificación de piezas de madera a partir de parámetros de propagación de ondas (velocidad o coeficiente de rigidez), en este trabajo se aplican dichos parámetros según los criterios de la norma brasileña ABNT-NBR 15521:2007 para maderas tropicales de frondosas.

La correspondencia entre las clases resistentes definidas en las normas UNE-EN 338 y ABNT-NBR 15521 se realizó a partir del módulo de elasticidad medio (Tabla 46). La norma NBR 15521 proporciona explícitamente el rango de MOE a flexión ($E_{m,12}$); se compararon estos rangos con los valores de módulo de elasticidad ($E_{m,0,mean}$) requeridos por la norma UNE-EN 338 (Tabla 46).

Tabla 46. Valores del módulo de elasticidad medio ($E_{m,0,mean}$) para alguna de las clases resistentes de la norma UNE-EN 338 y sus correspondientes equivalencias con las clases de calidad definidas en la ABNT-NBR 15521.

Módulo de Elasticidad Medio ($E_{m,0,mean}$) ($N\ mm^{-2}$)	Clase resistentes UNE-EN 338	Clase de Calidad ABNT-NBR 15521
9500	D18	UD-25
10000	D24	UD-25
10500	D27	UD-30
11000	D30	UD-30
12000	D35	UD-30
13000	D40	UD-30
13500	D45	UD-35
14000	D50	UD-35

Considerando los grupos definidos según los resultados de la clasificación visual para la norma UNE 56546, y utilizando como referencia el módulo de elasticidad medio ($E_{m,0,mean}$) obtenido en los ensayos de flexión estática (Tabla 41), la clasificación según la ABNT-NBR 15521 sería UD-30, es decir, no sería posible diferenciar los grupos. Esto se debe a que los módulos de elasticidad de los tres grupos fueron muy similares, siendo el G2.2 (Rechazo) apenas un 0,30 % superior al Grupo 1, que incluye la muestra total de tablas, y un 4,6 % superior al G2.1 (MEF).

Esta clasificación como UD-30 también fue indicada al utilizar el $C_{LL,12}$ obtenido mediante los métodos de ultrasonido y de ondas de impacto, para los tres grupos, mientras que con el método de vibración se obtuvo, en la mayoría de casos, una subclasificación como UD-25 (Tabla 47). Asimismo, se observa que la clasificación basada en la velocidad en condición saturada subclasifica las piezas para los tres grupos y técnicas aplicadas, indicando una clase UD-25 o incluso como no clasificada.

Numéricamente, aunque las diferencias son pequeñas, los valores de V_{th} y $C_{LL,12}$ son coherentes con la condición del material en cada grupo, ya que resultan más elevados en el Grupo 2.1 (MEF), más bajos en el Grupo 2.2 y de nivel intermedio en el Grupo 1 (muestra total).

Tabla 47. Clases de calidad obtenidas para los grupos según la norma ABNT-NBR 15521, en base a datos de velocidad de propagación de ondas en tablas saturadas (V_{th}) y en el coeficiente de rigidez de las tablas en la condición de equilibrio higroscópico ($C_{LL,12}$).

		Ultrasonidos	Ondas de impacto	Vibración		
		USLab	MST	MTG	PLG	Hitman
Grupo 1	V_{th} (m s ⁻¹)	3185	3322	3127	-	3012
	Clase	UD-25	UD-25	UD-25	-	NC
	$C_{LL,12}$ (N mm ⁻²)	13682	13646	12790	11933	-
	Clase	UD-30	UD-30	UD-25	UD-25	-
Grupo 2.1	V_{th} (m s ⁻¹)	3274	3404	3256	-	3087
	Clase	UD-25	UD-25	UD-25	-	UD-25
	$C_{LL,12}$ (N mm ⁻²)	13806	13769	14253	12125	-
	Clase	UD-30	UD-30	UD-30	UD-25	-
Grupo 2.2	V_{th} (m s ⁻¹)	3155	3292	3081	-	2985
	Clase	UD-25	UD-25	UD-25	-	NC
	$C_{LL,12}$ (N mm ⁻²)	13634	13587	12289	11846	-
	Clase	UD-30	UD-30	UD-25	UD-25	-

Leyenda: NC: no clasifica.

En el caso de la clasificación definida según parcelas (Tabla 45), y aplicando los valores para el módulo de elasticidad según la ABNT-NBR 15521 (Tabla 46) sí es posible diferenciar la parcela Q con una clase de calidad UD-25, inferior a la obtenida para las parcelas M y S y la correspondiente a la muestra total (UD-30).

Al igual que sucede en la clasificación según grupos de calidad, el uso de la velocidad en la tabla saturada subclasificó el material procedente de las parcelas M, S y de la muestra total, asignándole una clase de calidad UD-25 o NC (Tabla 48). En el caso de la parcela Q, y tomando la velocidad como referencia, cualquier técnica permitió igualar la clasificación obtenida partiendo del módulo de elasticidad en flexión.

Considerando el valor de $C_{LL,12}$ para la parcela M, las técnicas de ultrasonidos, de ondas de impacto y de vibración con el equipo MTG, igualaron la clase obtenida según ensayos de flexión (UD-30). Las técnicas de vibración con el equipo PLG subclasificaron la parcela, obteniendo una clase UD-25 (Tabla 48). Las técnicas de vibración con ambos equipos (MTG y PLG) subclasificaron a la parcela S y a la muestra total (UD-25), mientras que con el resto de técnicas (ultrasonidos y ondas de impacto), se igualó la clasificación (Tabla 48). Sin embargo, en el caso de la parcela Q, la clasificación considerando la técnica de vibración se mostró acorde con la clase de calidad (UD-25) obtenida considerando el módulo de elasticidad en flexión.

Tabla 48. Clases de calidad obtenidas para las tres parcelas y la muestra total de datos, según la norma ABNT-NBR 15521, en base a datos de velocidad de propagación de ondas en tablas saturadas (V_{th}) y en el coeficiente de rigidez de las tablas en la condición de equilibrio higroscópico ($C_{LL,12}$).

		Ultrasonidos	Ondas de impacto	Vibración		
		USLab	MST	MTG	PLG	Hitman
Parcela M	V_{th} (m s ⁻¹)	3190	3315	3153	-	3056
	Clase	UD-25	UD-25	UD-25	-	UD-25
	$C_{LL,12}$ (N mm ⁻²)	13931	13885	13967	12220	-
	Clase	UD-30	UD-30	UD-30	UD-25	-
Parcela Q	V_{th} (m s ⁻¹)	3245	3393	3169	-	3094
	Clase	UD-25	UD-25	UD-25	-	UD-25
	$C_{LL,12}$ (N mm ⁻²)	13400	13267	12096	11741	-
	Clase	UD-30	UD-30	UD-25	UD-25	-
Parcela S	V_{th} (m s ⁻¹)	3108	3246	3047	-	2878
	Clase	UD-25	UD-25	UD-25	-	NC
	$C_{LL,12}$ (N mm ⁻²)	13717	13802	12254	11826	-
	Clase	UD-30	UD-30	UD-25	UD-25	-
Muestra total	V_{th} (m s ⁻¹)	3185	3322	3127	-	3012
	Clase	UD-25	UD-25	UD-25	-	NC
	$C_{LL,12}$ (N mm ⁻²)	13682	13646	12790	11933	-
	Clase	UD-30	UD-30	UD-25	UD-25	-

Leyenda: NC: no clasifica.

5.1.7.3 Clasificación de la troza a partir de ensayos acústicos

De manera análoga a lo observado en los ensayos de propagación de ondas aplicados directamente en las tablas, los modelos de estimación de los módulos de rotura (MOR) y de elasticidad (MOE_{Global} y MOE_{Local}) a partir de las mediciones sobre las trozas no presentaron buena capacidad predictiva, siendo el R^2 máximo del 48 % con la técnica de ondas de impacto (Tabla 34). Por lo tanto, en este caso y para ejemplificar el proceso de clasificación, se utilizó la norma ABNT-NBR 15521:2007, de forma análoga a lo aplicado en el caso de las tablas, pero considerando únicamente las velocidades obtenidas en las mediciones directas en las trozas, ya que en estas no se dispone de valores de velocidad ni de densidad en la condición de referencia al 12 % de humedad para el cálculo de los valores de $C_{LL,12}$.

Los resultados de la clasificación de las tablas, obtenidos mediante la medición de las velocidades directamente en la troza saturada, indican que la técnica de ondas de impacto con el equipo MST permitió obtener la misma clasificación que la alcanzada a partir de los resultados de los ensayos de flexión considerando la muestra total. Por el contrario, la técnica de onda ultrasónica sobreestimó la clase de calidad obtenida en cualquiera de los casos, y la vibración subclasificó o, incluso, no permitió asignar una clase de calidad a las parcelas individuales y a la muestra total (Tabla 49).

Tabla 49. Resultado de clasificación de las tablas incluyendo las tres parcelas de estudio asociado a clases resistentes de la norma brasileña ABNT-NBR 15521 en base a datos de velocidad de propagación de ondas en las trozas (V_t).

Técnica	Parcela M		Parcela Q		Parcela S		Muestra total	
	V_t (m s ⁻¹)	Clase	V_t (m s ⁻¹)	Clase	V_t (m s ⁻¹)	Clase	V_t (m s ⁻¹)	Clase
Ultrasonidos (USLab)	4771	UD-60	4595	UD-55	4433	UD-50	4607	UD-60
Ondas de impacto (MST)	3755	UD-30	3779	UD-30	3645	UD-25	3720	UD-30
Vibración (Hitman)	3077	UD-25	2956	NC	2847	NC	2965	NC
Vibración (MTG)	3182	UD-25	2982	NC	2916	NC	3039	NC

Leyenda: NC: no clasifica.

5.1.7.4 Clasificación del árbol a partir de ensayos acústicos

Para los árboles, fue posible obtener modelos de estimación de la resistencia (MOR) y del módulo de elasticidad global (MOE_{global}) a partir de los ensayos de propagación de ondas realizados directamente en los árboles en pie. Así, en este apartado, y con el objetivo de evaluar la viabilidad de la clasificación de la madera a partir del ensayo en el árbol en pie, se aplicaron los modelos de regresión obtenidos para la muestra “Troza Basal” (Tabla 40). Los valores de resistencia y de módulo de elasticidad estimados por los modelos se aplicaron en la determinación del valor característico de la resistencia ($f_{m,k}$) y del valor medio del módulo de elasticidad ($E_{m,0,mean}$), para la posterior asignación de la clase resistente según la norma UNE-EN 338:2016.

Los resultados indican que ambas técnicas clasificaron la madera proveniente de los árboles de todas las parcelas juntas como D18, y también señalaron la parcela S como no estructural (Tabla 50 y Tabla 51), mismo resultado obtenido a partir del material ensayado a flexión estática (Tabla 45). Para la Parcela M, con la técnica de ultrasonido se obtuvo una clase inferior, mientras que la técnica de ondas de impacto sobreestimó la clasificación, en relación con los resultados obtenidos a partir de los ensayos de flexión (Tabla 50 y Tabla 51). Para la Parcela Q, las dos técnicas clasificaron de la misma manera, pero con una clase inferior a la obtenida en los ensayos de flexión (Tabla 50 y Tabla 51).

Tabla 50. Valores obtenidos de las resistencias ($f_{m,k}$) y densidades (ρ_k) características, y del valor medio del módulo de elasticidad ($E_{m,0,mean}$), estimados a partir de mediciones con ultrasonidos en el árbol en pie y asignación de clase resistente según norma UNE-EN 338 para frondosas, para cada una de las parcelas y considerando la muestra total.

Parcela	$f_{m,k}$ (N mm ⁻²)	Clase	$E_{m,0,mean}$ (N mm ⁻²)	Clase	ρ_k (kg m ⁻³)	Clase	Clase final
M	43,3	D40	10382	D24	647	D50	D24
Q	35,2	D35	9882	D18	519	D27	D18
S	13,5	NC	11695	D30	509	D24	NC
Muestra total	23,2	D18	10673	D27	546	D35	D18

Leyenda: NC: no clasifica.

Tabla 51. Valores obtenidos de las resistencias ($f_{m,k}$) y densidades (ρ_k) características, y del valor medio del módulo de elasticidad ($E_{m,0,mean}$), estimados a partir de mediciones con ondas de impacto en el árbol en pie y asignación de clase resistente según norma UNE-EN 338 para frondosas, para cada una de las parcelas y considerando la muestra total de datos.

Parcela	$f_{m,k}$ (N mm ⁻²)	Clase	$E_{m,0,mean}$ (N mm ⁻²)	Clase	ρ_k (kg m ⁻³)	Clase	Clase final
M	43,3	D40	11584	D30	647	D50	D30
Q	30,4	D30	9754	D18	519	D27	D18
S	9,9	NC	10247	D24	509	D24	NC
Muestra total	19,3	D18	10551	D27	546	D35	D18

Legenda: NC: no clasifica.

Al igual que el caso de las trozas, se aplicaron los criterios de clasificación según la norma ABNT NBR 15521:2007. Considerando los valores de $E_{m,0,mean}$ (Tabla 50 y Tabla 51), la asociación con las clases de la ABNT NBR 15521:2007 (Tabla 46) ambas técnicas indicaron la clase UD-30 para la muestra con todas las parcelas y la clase UD-25 para la parcela Q. La técnica de ultrasonidos subestimó la clasificación de la parcela M, mientras que la técnica de ondas de impacto subestimó la clasificación en el caso de la parcela S.

Con la aplicación de la velocidad obtenida de manera directa en el árbol, y considerando la muestra total, las técnicas de ultrasonidos y ondas de impacto (equipo Hitman) permitieron igualar la clase de calidad a la obtenida al considerar los resultados de los ensayos de flexión (Tabla 52), validando el uso de la velocidad en el árbol para la clasificación de la madera basándose en los valores de referencia establecidos en la norma ABNT NBR 15521:2007.

Tabla 52. Resultado de clasificación de las tablas incluyendo las tres parcelas de estudio asociado a clases resistentes de la norma brasileña ABNT-NBR 15521 en base a datos de velocidad de propagación de ondas en el árbol en pie (V_a).

Técnica	Parcela M		Parcela Q		Parcela S		Muestra total	
	V_a (m s ⁻¹)	Clase	V_a (m s ⁻¹)	Clase	V_a (m s ⁻¹)	Clase	V_a (m s ⁻¹)	Clase
Ultrasonidos (USLab)	3910	UD-30	3949	UD-30	3470	UD-25	3950	UD-30
Ondas de impacto (MST)	3276	UD-25	3357	UD-25	3437	UD-25	3398	UD-25
Ondas de impacto (Hitman)	3710	UD-30	3756	UD-30	3827	UD-30	3769	UD-30

5.2 PARÁMETROS ELÁSTICOS DE LA MADERA DE *QUERCUS ROBUR* OBTENIDOS EN ENSAYOS DE PROBETAS DE PEQUEÑAS DIMENSIONES

5.2.1 Parámetros de propagación de ondas considerando la ortotropía de la madera

La Tabla 53 y la Tabla 54 muestran las velocidades de propagación de la onda en las diferentes direcciones, las cuales, al depender de la anatomía propia de la madera, deben cumplir las siguientes relaciones: $V_{11} > V_{22} > V_{33}$ y $V_{66} > V_{55} > V_{44}$. Desde el punto de vista acústico, en la dirección longitudinal, las fibras (en frondosas) forman un sistema compuesto y continuo de tubos cerrados, cuya relación longitud-diámetro (aprox. 30:1 a 100:1) proporciona excelentes y constantes propiedades acústicas, reflejadas en mayores velocidades. En los ensayos por ultrasonido en madera de especies frondosas, una onda ultrasónica que se propaga longitudinalmente sigue la dirección de los vasos (que funcionan como conductores) y de las fibras (que funcionan como soportes). En la dirección radial, los radios son más cortos que las fibras, pero aun así son capaces de transmitir ondas acústicas con calidad. En la dirección tangencial, no existe una estructura continua que permita esta conducción, por lo que en esta dirección las velocidades son siempre menores (Bucur, 2006).

Tabla 53. Valores medios ($m s^{-1}$), coeficiente de variación (%) y errores obtenidos para la velocidad de propagación de la onda en la dirección longitudinal y transversal con la técnica de ultrasonidos aplicada en probetas prismáticas.

Parámetro		Valor medio ($m s^{-1}$)	CV (%)	Error	
				$m s^{-1}$	%
Velocidad longitudinal en los ejes	V_{11} (V_{LL})	4707	5,87	73,9	1,57
	V_{22} (V_{RR})	2144	8,76	50,2	2,34
	V_{33} (V_{TT})	1495	11,66	46,6	3,12
Velocidad transversal en los ejes	V_{44} ($V_{RT}=V_{TR}$)	751	11,11	22,3	2,97
	V_{55} ($V_{LT}=V_{TL}$)	1049	6,86	19,2	1,83
	V_{66} ($V_{LR}=V_{RL}$)	1380	7,25	26,7	1,94
Velocidad transversal fuera de los ejes	V_{12} (V_{QLR})	1234	19,90	57,9	4,69
	V_{13} (V_{QLT})	1060	10,60	31,2	2,94
	V_{23} (V_{QTR})	765	13,65	29,0	3,79

Tabla 54. Valores medios ($m s^{-1}$), coeficiente de variación (%) y errores obtenidos para la velocidad de propagación de la onda en la dirección longitudinal y transversal con la técnica de ultrasonidos aplicada en poliedros.

Parámetro		Valor medio ($m s^{-1}$)	CV (%)	Error	
				$m s^{-1}$	%
Velocidad longitudinal en los ejes	V_{11} (V_{LL})	4683	9,67	116,0	2,48
	V_{22} (V_{RR})	2157	6,08	32,8	1,52
	V_{33} (V_{TT})	1580	5,97	23,6	1,49
Velocidad transversal en los ejes	V_{44} ($V_{RT}=V_{TR}$)	841	5,00	10,5	1,25
	V_{55} ($V_{LT}=V_{TL}$)	1110	2,98	8,3	0,75
	V_{66} ($V_{LR}=V_{RL}$)	1426	4,99	17,8	1,25
Velocidad transversal fuera de los ejes	V_{12} (V_{QLR})	1558	4,31	16,8	1,08
	V_{13} (V_{QLT})	1244	5,67	17,6	1,42
	V_{23} (V_{QTR})	862	4,02	8,7	1,01

Los mayores errores se obtienen con la técnica de ultrasonidos aplicada sobre probetas prismáticas (Tabla 53). Estos valores más altos de error pueden estar asociados a la disposición de los anillos de crecimiento y a la presencia de desviación de la fibra acusada en las probetas prismáticas, que generan dispersión de la onda y que influyen de manera directa en los errores obtenidos (Bucur, 2006). Para los poliedros (Tabla 54), el error experimental en la determinación de la velocidad longitudinal y de cortante mediante ultrasonido está en torno al 1,5 %, siendo la velocidad longitudinal V_{LL} la que presenta el mayor error registrado (2,48 %). Sin embargo, este error experimental es pequeño en comparación con la variabilidad inherente entre muestras del material, expresada mediante el coeficiente de variación (calculado como la relación entre la desviación estándar y el valor promedio de las muestras ensayadas).

Bucur (2006) presenta resultados de errores de medición por ultrasonido y la variabilidad obtenida en ensayos en madera de haya y abeto de Douglas (Tabla 55). Para la obtención de estos resultados los ensayos se realizaron sobre cubos de 16 mm de lado. Los valores de error obtenidos en esta investigación resultaron ser, en general, ligeramente superiores a los reportados por Bucur (2006). Esta mayor magnitud del error puede estar asociada a las dimensiones superiores de las probetas utilizadas en esta investigación, lo que dificulta la obtención de piezas sin una marcada inclinación de la fibra.

Tabla 55. Valores medios ($m s^{-1}$), coeficientes de variación (%) y errores obtenidos para la velocidad de propagación de la onda en madera de haya y abeto de Douglas. Adaptado de Bucur (2006).

Parámetro	Valor medio ($m s^{-1}$)	CV (%)	Error (%)
<i>Haya</i>			
V_{11} (V_{LL})	5000	3,69	0,9
V_{33} (V_{TT})	1524	5,39	0,7
V_{55} ($V_{LT}=V_{TL}$)	1131	2,81	0,7
<i>Abeto de Douglas</i>			
V_{11} (V_{LL})	5161	6,72	0,9
V_{33} (V_{TT})	1584	7,51	0,8
V_{55} ($V_{LT}=V_{TL}$)	1306	3,00	0,7

Considerando los resultados de la Tabla 53 y la Tabla 54, se puede concluir que ninguna de las dos geometrías de probeta empleada se caracterizó por presentar errores excesivamente grandes. Además, los errores pueden considerarse adecuados (máximo 3 %) cuando se comparan con la variabilidad del material, por lo que ambas geometrías, probeta prismática y poliedro, podrían emplearse para las mediciones con ultrasonidos. Cabe destacar que el poliedro presenta la ventaja de realizar todas las mediciones necesarias en una sola probeta, y que otros autores confirman su facilidad de uso desde una perspectiva metodológica en comparación con otras probetas (Gonçalves et al., 2014).

La Tabla 56 muestra los coeficientes de la matriz de rigidez [C] que se obtuvieron con ambos tipos de probeta. Los valores de C_{12} , C_{13} y C_{23} , correspondientes a los términos fuera de la diagonal, se calcularon con las propagaciones a 45° respecto a cada plano de simetría. Su validación se realiza considerando las bases teóricas del comportamiento acústico y las propiedades mecánicas de la madera. De esta manera, los valores resultantes deben cumplir las siguientes relaciones: $C_{11} > C_{22} > C_{33}$; $C_{66} > C_{55} > C_{44}$ y $C_{12} > C_{13} > C_{23}$.

Tabla 56. Valores medios ($N\ mm^{-2}$) y coeficiente de variación (%) para los coeficientes de la matriz de rigidez obtenidos con la técnica de ultrasonidos aplicada en probetas prismáticas y en poliedros, y valores obtenidos por Bucur y Perrin (1988)⁽¹⁾.

	C_{11} (C_{LL})	C_{22} (C_{RR})	C_{33} (C_{TT})	C_{44} ($C_{RT}=C_{TR}$)	C_{55} ($C_{LT}=C_{TL}$)	C_{66} ($C_{LR}=C_{RL}$)	C_{12} (C_{LR})	C_{13} (C_{LT})	C_{23} (C_{RT})
Prismas	15929	3283	1621	409	804	1361	4450	2498	1393
	12 %	18 %	23 %	22 %	14 %	15 %	31 %	31 %	25 %
Poliedros	15918	3335	1790	507	880	1456	2670	1428	1336
	22 %	13 %	12 %	11 %	6 %	10 %	37 %	16 %	39 %
Bucur y Perrin (1988) ⁽¹⁾	15429	2558	1419	279	941	1434	231	116	603
	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Leyenda: ⁽¹⁾ Citado por Trinca (2011).

En la Tabla 56 se incluyen los valores de los coeficientes de la matriz de rigidez reportados por Bucur y Perrin (1988), obtenidos mediante ultrasonidos aplicados en madera de roble de densidad $600\ kg\ m^{-3}$. Los resultados de este trabajo son muy aproximados a los de la bibliografía de referencia. Se observa que los valores obtenidos en este estudio son ligeramente superiores para la práctica totalidad de los coeficientes y tipos de probeta, con la excepción de los coeficientes C_{12} , C_{13} y C_{23} . En lo que respecta a la variabilidad, los coeficientes de variación (CV) se mostraron, en general, homogéneos. Sin embargo, se detectó una mayor dispersión en los resultados (CV más altos) para los coeficientes obtenidos a partir de las probetas prismáticas.

5.2.2 Coeficientes de Poisson

Se observó que los coeficientes de Poisson resultantes de los ensayos de ultrasonido en los prismas presentaron muchos valores negativos y/o superiores a 1,0, los cuales fueron descartados de la muestra. Para este análisis se contemplan los resultados obtenidos para las técnicas de compresión axial sobre probetas prismáticas y la técnica de ultrasonidos en probetas poliédricas (Tabla 57 y Tabla 58). Para ambas técnicas se obtienen coeficientes de Poisson muy próximos.

Tabla 57. Valores medios de los coeficientes de Poisson obtenidos en los ensayos de compresión axial sobre probetas prismáticas.

Parcela	ν_{LR}	ν_{LT}	ν_{RL}	ν_{RT}	ν_{TL}	ν_{TR}
M	0,32	0,54	0,09	0,66	0,04	0,28
	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(ab)
Q	0,44	0,50	0,09	0,68	0,05	0,39
	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(b)
S	0,51	0,46	0,08	0,54	0,03	0,18
	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)

Leyenda: Letras iguales indican grupos homogéneos (sin diferencias estadísticamente significativas al nivel de confianza del 95 %).

Tabla 58. Valores medios de los coeficientes de Poisson obtenidos en los ensayos de ultrasonidos en poliedros.

Parcela	ν_{LR}	ν_{LT}	ν_{RL}	ν_{RT}	ν_{TL}	ν_{TR}
M	0,50	0,56	0,11	0,65	0,08	0,35
	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)
Q	0,60	0,34	0,13	0,67	0,04	0,41
	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)
S	0,46	0,62	0,09	0,68	0,05	0,37
	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)

Leyenda: Letras iguales indican grupos homogéneos (sin diferencias estadísticamente significativas al nivel de confianza del 95 %).

Los coeficientes de Poisson recogidos en la bibliografía consultada presentan una gran variabilidad (Tabla 59). Bucur (2006) señala que las mediciones precisas del coeficiente de Poisson no se obtienen fácilmente por ningún método y para ningún tipo de sólido.

Se observa, a partir de la Tabla 57 y Tabla 58, que los valores obtenidos por ultrasonido y mediante ensayos de compresión son, en general, del mismo orden de magnitud que los coeficientes recogidos en la bibliografía de referencia. Las mayores discrepancias con respecto a los resultados recogidos en la Tabla 59 son para los coeficientes de Poisson ν_{RL} y ν_{RT} .

Tabla 59. Referencias bibliográficas de los coeficientes de Poisson para madera de roble y otras frondosas, obtenidos a través de técnicas ultrasónicas.

Fuente	Argüelles y Arriaga ⁽¹⁾ (1996)	Bodig y Jayne ⁽²⁾ (1982)	Bucur ⁽²⁾ (2006)	Bucur y Archer ⁽²⁾ (1984)	François ⁽²⁾ (1995)	Guitard ⁽¹⁾ (1987)	Güntekin et al. ⁽³⁾ (2016)	Hearmon ⁽⁴⁾ (1948)	Preziosa (1982)	Schneider ⁽⁵⁾	
Tipo de madera	frondosa	dicotiledóneas	roble	roble americano	roble	frondosa	roble americano	roble	roble	roble	
V _{LR}	0,390	0,370	0,871	0,767	0,823	0,070	0,390	0,082	0,530	0,390	0,450
V _{LT}	0,460	0,500	0,735	1,030	0,750	0,310	0,460	0,061	0,500	0,650	0,640
V _{RL}	0,048	0,044	0,259	0,216	0,242	0,020	0,048	0,360	0,130	0,050	0,090
V _{RT}	0,670	0,670	0,274	0,314	0,298	0,370	0,670	0,700	0,670	0,090	0,130
V _{TL}	0,033	0,027	0,181	0,186	0,177	0,070	0,033	0,420	0,086	0,380	0,300
V _{TR}	0,380	0,330	0,228	0,202	0,239	0,220	0,380	0,410	0,300	0,370	0,330

Leyenda: ⁽¹⁾ Citado por Riesco (2001); ⁽²⁾ Citado por Trinca (2011); ⁽³⁾ para un contenido de humedad de la madera entre 11,6 y 12,1; ⁽⁴⁾ Citado por Bucur (2025); ⁽⁵⁾ Sin referencia, citado por Preziosa (1982).

Para el análisis de la calidad de la madera a partir de los árboles, los coeficientes de Poisson más relevantes son ν_{LR} y ν_{LT} , ya que representan la condición del esfuerzo en la dirección L (peso del árbol). En este caso, los resultados obtenidos en los ensayos de compresión axial y ultrasonidos fueron estadísticamente equivalentes en todas las parcelas (Tabla 57 y Tabla 58). Al observar los datos de la Tabla 60, se verifica que, aunque los resultados promedio de la muestra total se aproximan a algunos de los valores recogidos en la bibliografía de referencia (Tabla 59), los valores obtenidos en cada árbol presentaron una gran variabilidad para las dos técnicas de ensayo aplicadas, debido tanto a la variabilidad natural entre árboles como a los errores generados en la determinación del coeficiente de Poisson.

Tabla 60. Valores de los coeficientes de Poisson ν_{LR} y ν_{LT} obtenidos en cada árbol mediante ensayos de compresión axial sobre probetas prismáticas y ensayos de ultrasonidos en poliedros.

Árbol	Compresión (Prismas)		Ultrasonidos (Poliedros)	
	ν_{LR}	ν_{LT}	ν_{LR}	ν_{LT}
M02A25	0,44	-	-	-
M07A20	0,14	0,62	0,48	0,67
M11A09	0,03	-	0,22	-
M21A05	0,46	0,46	0,53	0,45
M21A06	0,50	0,50	0,57	0,60
M23A11	0,32	0,59	0,69	0,51
Media M	0,32	0,54	0,50	0,56
Q03A05	0,48	0,44	-	-
Q07A11	0,76	0,76	0,57	0,24
Q08A01	0,38	0,38	0,78	0,03
Q08A02	0,33	0,71	0,40	0,37
Q09A20	0,33	0,50	-	-
Q11A08	0,38	0,24	0,67	0,75
Media Q	0,44	0,50	0,60	0,34
S04A17	0,42	0,42	0,33	0,57
S05A07	0,36	0,36	-	-
S05A17	-	-	0,93	0,34
S12A21	0,46	0,40	0,12	0,95
S13A06	0,74	0,74	-	-
S17A01	0,57	0,39	-	-
Media S	0,51	0,46	0,46	0,62
Media Muestra total	0,42	0,50	0,52	0,50

5.2.3 Módulos de cortante y de elasticidad

Los módulos de cortante (G) recogidos en la Tabla 61 y obtenidos mediante compresión axial en los prismas presentaron una fuerte discrepancia con la bibliografía consultada. Aunque los módulos G_{LT} y G_{LR} son similares, como cabía esperar (Bodig y Jayne, 1982), el orden de magnitud de ambos parámetros superó ampliamente los valores máximos documentados para la madera (no superiores a 1500 N mm^{-2}). Los valores de los módulos de cortante se obtienen en probetas retiradas fuera de los ejes principales de simetría (planos inclinados); la hipótesis

para explicar estos valores atípicos es que la extracción de estas probetas inclinadas en los planos no haya sido la adecuada.

Por otro lado, las relaciones calculadas entre los módulos obtenidos mostraron una alta concordancia con los valores de referencia obtenidos por Bucur (2023) en madera de roble (G_{LR}/G_{RT} de 5,0; G_{LT}/G_{RT} de 3,3 y E_L/G_{LR} de 1,2).

Tabla 61. Valores medios ($N\text{ mm}^{-2}$) y coeficiente de variación (%) de los módulos de cortante en los diferentes planos, obtenidos en los ensayos de compresión axial en probetas prismáticas, para las tres parcelas de estudio y la muestra total de datos.

Parcela	G_{RT}	G_{LT}	G_{LR}	G_{LR}/G_{RT}	G_{LT}/G_{RT}	E_L/G_{LR}
M	1014	5961	4843	4,8	5,9	3,0
	(a)	(b)	(a)			
	30 %	41 %	68 %			
Q	1347	2540	7088	5,3	1,9	2,0
	(a)	(a)	(a)			
	16 %	57 %	35 %			
S	1313	5176	6839	5,2	3,9	2,2
	(a)	(ab)	(a)			
	84 %	29 %	84 %			
Muestra total	1240	4192	6340	5,1	3,4	2,3
	36 %	54 %	57 %			

Leyenda: Letras iguales indican grupos homogéneos (sin diferencias estadísticamente significativas al nivel de confianza del 95 %).

Los mismos parámetros se obtuvieron a partir de ensayos con la técnica de ultrasonidos sobre probetas prismáticas y poliédricas (Tabla 62 y Tabla 63). La relación E_L/G_{LR} fue de 6,3 (Tabla 62) y 8,8 (Tabla 63), valores algo inferiores a los propuestos por Bodig y Jayne (1982), de 14, y por Kretschmann (2010), de 11,24 para *Quercus rubra* y de 11,63 para *Quercus alba*. El orden de magnitud de las relaciones fue muy similar, independientemente de la geometría de la probeta utilizada para el ensayo con ultrasonidos.

Tabla 62. Valores medios ($N \text{ mm}^{-2}$) y coeficiente de variación (%) de los módulos de cortante en los diferentes planos, obtenidos en los ensayos con la técnica de ultrasonidos en probetas prismáticas, para las tres parcelas de estudio y la muestra total de datos.

Parcela	G _{RT}	G _{LT}	G _{LR}	G _{LR} /G _{RT}	G _{LT} /G _{RT}	E _L /G _{LR}
M	483	855	1478	3,1	1,8	5,4
	(b)	(a)	(b)			
	14 %	7 %	12 %			
Q	357	739	1303	3,7	2,1	7,0
	(a)	(a)	(ab)			
	16 %	8 %	6 %			
S	342	768	1164	3,4	2,2	7,0
	(a)	(a)	(a)			
	16 %	20 %	6 %			
Muestra total	401	792	1328	3,3	2,0	6,3
	22 %	13 %	13 %			

Leyenda: Letras iguales indican grupos homogéneos (sin diferencias estadísticamente significativas al nivel de confianza del 95 %).

Tabla 63. Valores medios ($N \text{ mm}^{-2}$) y coeficiente de variación (%) de los módulos de cortante en los diferentes planos, obtenidos en los ensayos con la técnica de ultrasonidos en probetas poliédricas, para las tres parcelas de estudio y la muestra total de datos.

Parcela	G _{RT}	G _{LT}	G _{LR}	G _{LR} /G _{RT}	G _{LT} /G _{RT}	E _L /G _{LR}
M	541	880	1533	2,8	1,6	8,2
	(a)	(a)	(a)			
	6 %	6 %	7 %			
Q	516	888	1513	2,9	1,7	7,6
	(a)	(a)	(a)			
	10 %	6 %	8 %			
S	457	872	1308	2,9	1,9	11,2
	(b)	(a)	(c)			
	9 %	7 %	8 %			
Muestra total	507	880	1456	2,9	1,7	8,8
	11 %	6 %	10 %			

Leyenda: Letras iguales indican grupos homogéneos (sin diferencias estadísticamente significativas al nivel de confianza del 95 %).

Los resultados de los módulos de cortante obtenidos en esta investigación para la madera de *Quercus robur*, calculados a partir de ensayos con ultrasonidos sobre probetas prismáticas y poliédricas, son coherentes con los resultados presentados por otros autores para madera de roble y otras frondosas (Tabla 64).

Tabla 64. Referencias bibliográficas de los módulos de cortante ($N\text{ mm}^{-2}$) para madera de roble y otras frondosas, obtenidos a través de técnicas ultrasónicas y ensayos de compresión.

Fuente	Argüelles y Arriaga ⁽¹⁾ (1996)	Bucur y Archer ⁽²⁾ (1984)	François ⁽²⁾ (1995)	Guitard ⁽¹⁾ (1987)	Hearmon ⁽³⁾ (1948)
Tipo de madera	frondosa	roble americano	roble	frondosa	roble
G_{LR} ($N\text{ mm}^{-2}$)	1286	891	845	1310	1290
G_{LT} ($N\text{ mm}^{-2}$)	991	917	758	1030	760
G_{RT} ($N\text{ mm}^{-2}$)	373	303	292	1610	390

Leyenda: ⁽¹⁾ Citado por Riesco (2001); ⁽²⁾ Citado por Trinca (2011); ⁽³⁾ Citado por Bucur (2025).

Se obtuvieron resultados anómalos tanto para los módulos de cortante (G), resultantes de los ensayos de compresión, como para los coeficientes de Poisson de los ensayos de ultrasonidos (Apartado 5.2.2), ambos medidos en probetas prismáticas. En el ensayo de compresión axial, los valores de los módulos de cortante se obtienen en probetas retiradas fuera de los ejes principales de simetría (planos inclinados); estos mismos planos afectan también al coeficiente de Poisson obtenido a partir de ensayos con ultrasonidos. La hipótesis para explicar estos valores atípicos, en ambos casos, es que la extracción de estas probetas inclinadas en los planos no haya sido la adecuada. La implicación de este error es más severa para el ultrasonido: mientras que en la compresión solo invalida los resultados de G , en el ultrasonido compromete el cálculo de todos los parámetros elásticos. En consecuencia, a partir de este punto, se descartó la muestra completa de datos de ultrasonido en prismas. El análisis continuará utilizando los datos de compresión en prismas y los de ultrasonido en poliedros.

Considerando los módulos de elasticidad longitudinales obtenidos por las dos técnicas evaluadas finalmente (Tabla 65 y Tabla 66), no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre las parcelas. Además, las relaciones entre módulos de elasticidad obtenidos para ambas técnicas son muy próximas a los valores indicados por Guitard (1987) para frondosas y Kretschmann (2010), ambos citados por Argüelles et al., (2001), para las especies *Quercus rubra* y *Quercus alba* (Tabla 67). Bucur (2023) señala relaciones entre módulos superiores a las obtenidas en este trabajo, también para madera de roble. El orden de magnitud de las relaciones fue muy similar, tanto para el ensayo a compresión como para los ensayos por ultrasonido, independientemente de que se trate de probetas con geometrías diferentes.

Tabla 65. Valores medios ($N\text{ mm}^{-2}$) y coeficiente de variación (%) de los módulos de elasticidad longitudinales obtenidos en los ensayos de compresión axial.

Parcela	E_L	E_R	E_T	E_L/E_R	E_L/E_T	E_R/E_T
M	14729	2296	1107	6,4	13,3	2,1
	(a)	(a)	(a)			
	9 %	25 %	9 %			
Q	13842	2352	1109	5,9	12,5	2,1
	(a)	(a)	(a)			
	8 %	18 %	15 %			
S	15198	2498	1057	6,1	14,4	2,4
	(a)	(a)	(a)			
	17 %	12 %	10 %			
Muestra total	14427	2375	1092	6,1	13,2	2,2
	11 %	18 %	11 %			

Leyenda: Letras iguales indican grupos homogéneos (sin diferencias estadísticamente significativas al nivel de confianza del 95 %).

Tabla 66. Valores medios ($N\text{ mm}^{-2}$) y coeficiente de variación (%) de los módulos de elasticidad longitudinales obtenidos en los ensayos de ultrasonidos en los poliedros.

Parcela	E_L	E_R	E_T	E_L/E_R	E_L/E_T	E_R/E_T
M	12590	2278	1216	5,5	10,4	1,9
	(a)	(a)	(a)			
	19 %	9 %	11 %			
Q	11497	2026	1224	5,7	9,4	1,7
	(a)	(a)	(a)			
	25 %	20 %	8 %			
S	14597	2069	1116	7,1	13,1	1,9
	(a)	(a)	(a)			
	17 %	15 %	12 %			
Muestra total	12876	2134	1187	6,0	10,8	1,8
	21 %	15 %	11 %			

Leyenda: Letras iguales indican grupos homogéneos (sin diferencias estadísticamente significativas al nivel de confianza del 95 %).

Tabla 67. Referencias bibliográficas de las relaciones entre módulos de elasticidad longitudinales y transversales para madera de roble y otras frondosas.

Fuente	Tipo de madera/Especie	E_L/E_R	E_L/E_T	E_R/E_T
Bucur (2023)	<i>roble</i>	10,46	19,75	1,89
Guitard (1987) ⁽¹⁾	<i>frondosa</i>	8,00	13,50	1,70
Kretschmann (2010) ⁽¹⁾	<i>Quercus rubra</i>	6,49	12,20	1,88
	<i>Quercus alba</i>	6,13	13,89	2,27

Leyenda: ⁽¹⁾ Citado por Argüelles et al., (2001).

Se observó que los valores de los módulos de elasticidad obtenidos en esta investigación se encuentran próximos a los reportados por otros autores para madera de roble y frondosas en general (Tabla 68). Los resultados obtenidos en este trabajo se encuentran dentro del rango de valores según la bibliografía consultada: un rango de entre 5200 y 14400 para el módulo de elasticidad longitudinal (E_L); entre 1400 y 4000 para el módulo de elasticidad radial (E_R); y entre 950 y 2400 para el módulo de elasticidad tangencial (E_T).

Tabla 68. Referencias bibliográficas de los módulos de elasticidad ($N\ mm^{-2}$) de varias especies de madera, obtenidos a través de técnicas ultrasónicas y ensayos de compresión.

Fuente	Bucur y Archer ⁽¹⁾ (1984)	François ⁽¹⁾ (1995)	Gitard ⁽²⁾ (1987)	Güntekin et al. ⁽³⁾ (2016)	Hearmon ⁽⁴⁾ (1948)	Preziosa (1982)	Schneider ⁽⁵⁾ (1982)
Tipo de madera	roble americano	roble	frondosa	roble americano	roble	roble	roble
E_L ($N\ mm^{-2}$)	5267 4745	12900	14400	10305	5300	9400	5400
E_R ($N\ mm^{-2}$)	1481 1399	4060	1810	2032	2140	2220	2180
E_T ($N\ mm^{-2}$)	951 1122	2360	1030	1208	970	1320	985

Leyenda: ⁽¹⁾ Citado por Trinca (2011); ⁽²⁾ Citado por Riesco (2001); ⁽³⁾ para un contenido de humedad de la madera entre 11,6 y 12,1; ⁽⁴⁾ Citado por Bucur, V. (2025); ⁽⁵⁾ Sin referencia, citado por Preziosa (1982).

A pesar de que tanto las técnicas de ultrasonidos como los ensayos de compresión estática son métodos válidos para obtener los parámetros elásticos del material, autores como Preziosa (1982), Bucur (2006) y Gonçalves et al. (2001, 2011b, 2014) señalan que cabe esperar que los valores resultantes de las pruebas por ultrasonido sean ligeramente superiores. Esto se debe a que los ensayos estáticos siguen un proceso isotérmico, en el cual la energía interna del material no varía, mientras que los ensayos dinámicos siguen un proceso adiabático, en el que la energía interna del material aumenta. En esta investigación no es posible plantear esta comparación ya que, para el análisis de resultados, ambos tipos de ensayos fueron realizados en probetas diferentes (poliedros para ultrasonidos y prismas para ensayos de compresión).

5.2.4 Comparación de metodologías

La Tabla 69 presenta los valores elásticos medios con sus respectivos intervalos de confianza, para cada tipo de ensayo, obtenidos mediante la inversión de la matriz de rigidez. Como ya se ha comentado previamente en este trabajo, muchos autores consideran, por simplificación, que la constante de rigidez es aproximadamente igual al módulo de elasticidad ($C_{ii} \approx E_{ii}$). En este caso, se obtienen diferencias máximas entre valores en torno al 50 %. Este resultado se justifica porque, además de las diferencias entre las bases teóricas del ensayo, también existe la diferencia derivada de la falta de corrección del valor por los coeficientes de Poisson. Keunecke et al. (2007) señalan que, incluso si el material fuera perfectamente isotrópico, esta equivalencia solo sería válida en caso de que los coeficientes de Poisson fueran muy pequeños. Estos autores demuestran que, para un material isotrópico, dichas diferencias pueden alcanzar hasta el 50 % cuando el coeficiente de Poisson es igual a 0,40. Trinca (2011) obtuvo diferencias máximas del 50 % entre las constantes de rigidez y los módulos de elasticidad obtenidos a partir de probetas prismáticas y poliedros de madera de *Apuleia leiocarpa*, *Goupia glabra*, y *Eucalyptus saligna*. Considerando lo anterior, las diferencias entre los coeficientes de rigidez y los módulos de elasticidad longitudinales son las esperadas y no invalidan el uso directo de dichos coeficientes para la caracterización parcial (solo determinando los módulos longitudinales en direcciones específicas) o en procesos de

clasificación de la madera. En estos casos, conociendo los fundamentos teóricos, no se deben esperar valores numéricamente iguales, sino correlaciones entre los parámetros estáticos y dinámicos. Dichas correlaciones suelen ser estadísticamente significativas y pueden emplearse para estimar las propiedades del material mediante un ensayo sencillo, como el ultrasonido. El análisis de las correlaciones entre los coeficientes de rigidez y los módulos obtenidos por ultrasonido no es objetivo de esta investigación. La muestra no fue adecuada para este fin (15 probetas). Trinca (2011) ejemplifica el potencial de la técnica de ultrasonidos para determinar las constantes elásticas de la madera a través de correlaciones con ensayos estáticos de probetas prismáticas. En este caso, no es posible plantear esas correlaciones ya que los ensayos de ultrasonidos sobre prismas han sido descartados del análisis, y no tendría sentido establecer correlaciones entre ensayos realizados sobre probetas con diferentes geometrías.

Tabla 69. Comparación estadística de los valores obtenidos para los parámetros elásticos en los ensayos de compresión en probetas prismáticas y ultrasonidos en poliedros.

Parámetros	Ensayo		Intervalo de confianza	p-valor	Resultado
	Compresión (Prismas)	Ultrasonidos (Poliedros)			
E_L (N mm ⁻²)	14427	12876	[-3300; 196]	0,079	Igual
CV (%)	11	21			
E_R (N mm ⁻²)	2375	2134	[-513; 30]	0,080	Igual
CV (%)	18	15			
E_T (N mm ⁻²)	1092	1187	[2,4; 188]	0,044	Diferente
CV (%)	11	11			
G_{LR} (N mm ⁻²)	6340	1456	[-6721; -3046]	0,000	Diferente
CV (%)	57	10,1			
G_{LT} (N mm ⁻²)	4192	880	[-4459; -2164]	0,000	Diferente
CV (%)	54	6			
G_{RT} (N mm ⁻²)	1240	507	[-964; -503]	0,000	Diferente
CV (%)	36	11			
ν_{LR}	0,42	0,52	[-0,050; 0,263]	0,175	Igual
CV (%)	43	44			
ν_{LT}	0,50	0,50	[-0,167; 0,162]	0,980	Igual
CV (%)	31	51			
ν_{RL}	0,09	0,11	[-0,007; 0,056]	0,120	Igual
CV (%)	42	43			
ν_{RT}	0,65	0,67	[-0,038; 0,075]	0,510	Igual
CV (%)	13	9			
ν_{TL}	0,04	0,06	[-0,007; 0,41]	0,160	Igual
CV (%)	50	64			
ν_{TR}	0,28	0,38	[-0,006; 0,175]	0,040	Diferente
CV (%)	53	17			

Al comparar los resultados de todos los parámetros elásticos obtenidos (combinando todas las parcelas), se observaron diferencias significativas en los módulos de cortante entre el método de ultrasonidos (en poliedros) y el ensayo de compresión (en prismas) (Tabla 69). Esta discrepancia, que ya se anticipaba, puede atribuirse a varios factores. El método estático presenta dificultades para determinar los módulos de cortante. Las diferencias en las lecturas de deformaciones en caras paralelas demuestran que este ensayo es muy susceptible a errores. Diversos autores (Sinclair y Farshad, 1987; Keunecke et al., 2007; Trinca, 2011) ya habían señalado esta problemática, considerando que el ensayo por ultrasonido es más confiable para esta determinación. Por otro lado, la inclinación de los anillos de crecimiento y de la fibra en las probetas extraídas en planos inclinados afecta a ambas técnicas. En el ultrasonido, altera la propagación de la onda respecto a la dirección esperada; en el ensayo estático, afecta a las deformaciones registradas por las bandas extensométricas.

Para las demás constantes elásticas, solo el módulo de elasticidad longitudinal en la dirección tangencial (E_T) y el coeficiente de Poisson ν_{TR} presentaron diferencias significativas con un 95 % de confianza (el cero no pertenece al intervalo de confianza de la media y el p -valor es inferior a 0,05) (Tabla 69). No obstante, es importante señalar que, incluso en estos casos, los valores absolutos no fueron excesivamente discrepantes.

En el caso de los coeficientes de Poisson (ν_{LR} , ν_{LT} y ν_{TL}), que mostraron equivalencia estadística, no se descarta que este resultado pueda deberse a los elevados coeficientes de variación (alta dispersión de los datos).

Cuando el mismo análisis se realizó para cada parcela por separado, surgieron pequeñas diferencias. Por ejemplo, los módulos de elasticidad tangenciales (E_T) resultaron estadísticamente equivalentes en todas las parcelas (Tabla 70), y los coeficientes de Poisson en los planos RT y TR solo mostraron diferencias en la parcela S (Tabla 71).

Tabla 70. Comparación estadística de los valores del módulo de elasticidad tangencial obtenidos en los ensayos de compresión en probetas prismáticas y ultrasonidos en poliedros, para cada una de las parcelas.

Parcela	Parámetros	Compresión (Primas)	Ultrasonidos (Poliedros)	Intervalo de confianza	p -valor	Resultado
M	E_T (N mm ⁻²)	1107	1216	[-52,4174; 270,551]	0,160	Igual
	CV (%)	9	11			
Q	E_T (N mm ⁻²)	1109	1224	[-92,7204; 323,22]	0,230	Igual
	CV (%)	15	8			
S	E_T (N mm ⁻²)	1057	1116	[-135,732; 253,332]	0,498	Igual
	CV (%)	10	12			

Tabla 71. Comparación estadística de los valores de los coeficientes de Poisson en los planos RT y TR obtenidos en los ensayos de compresión en probetas prismáticas y ultrasonidos en poliedros, para cada una de las parcelas.

Parcela	Parámetros	Compresión (Primas)	Ultrasonidos (Poliedros)	Intervalo de confianza	p-valor	Resultado
M	v_{RT}	0,66	0,65	[-0,1175; 0,1008]	0,870	Iguales
	CV (%)	15	11			
	v_{TR}	0,28	0,35	[-0,0529; 0,283]	0,160	Iguales
	CV (%)	77	14			
Q	v_{RT}	0,68	0,65	[-0,0859; 0,0699]	0,820	Iguales
	CV (%)	9	7			
	v_{TR}	0,39	0,41	[-0,0813; 0,1193]	0,668	Iguales
	CV (%)	3	20			
S	v_{RT}	0,54	0,68	[0,0006; 0,2793]	0,050	Diferentes
	CV (%)	5	10			
	v_{TR}	0,18	0,37	[0,0067; 0,3682]	0,044	Diferentes
	CV (%)	90	13			

La Tabla 72 contrasta las relaciones de simetría obtenidas con las dos técnicas aplicadas en esta investigación frente a los valores reportados por Bodig y Jayne (1982) para madera de roble. Al comparar los resultados, se observa una coherencia general en el orden de magnitud de las relaciones en cada plano. Sin embargo, las mayores desviaciones se registraron en el plano LT. Estas desviaciones pueden asociarse a la inclinación de los anillos de crecimiento o a la presencia de microfracturas. Aunque se utilizaron probetas de pequeñas dimensiones y aparentemente libres de defectos, no siempre es posible eliminar por completo este tipo de singularidades. Esta variabilidad es consistente con lo advertido por los propios Bodig y Jayne (1982), quienes remarcaron que estas relaciones suelen presentar grandes desviaciones, variando no solo entre especies, sino incluso entre diferentes muestreos de una misma especie.

Tabla 72. Valores medios de las relaciones de los términos de la matriz de flexibilidad (10^{-5}) obtenidos en los ensayos de compresión en probetas prismáticas y ultrasonidos en poliedros, y valores obtenidos por Bodig y Jayne (1982)⁽¹⁾.

Técnica	$\frac{v_{RL}}{E_R}$	$\frac{v_{LR}}{E_L}$	$\frac{v_{TL}}{E_T}$	$\frac{v_{LT}}{E_L}$	$\frac{v_{TR}}{E_T}$	$\frac{v_{RT}}{E_R}$
Compresión axial	3,62	2,90	3,89	3,47	25,95	27,24
Ultrasonidos	5,22	4,08	4,96	3,86	31,61	31,18
Bodig y Jayne (1982) ⁽¹⁾	4,21	4,27	6,14	6,48	20,68	21,37

Leyenda: ⁽¹⁾ Citado por Trinca (2011).

Al comparar los módulos de elasticidad (E_L) obtenidos en probetas pequeñas (mediante ultrasonido y compresión) con los resultantes de ensayos de flexión estática en tablas (MOE), se observa que, si bien presentan el mismo orden de magnitud, existe entre ellos una diferencia

estadística significativa al nivel de confianza del 95 % (Tabla 73). Los valores más altos se registran en los ensayos de compresión sobre prismas, mientras que los más bajos provienen de la flexión estática. Esta discrepancia es esperada y se atribuye principalmente al "efecto de dimensión", dado que las tablas de flexión son considerablemente más grandes que los prismas. Este efecto de escala es un fenómeno reconocido (contemplado, por ejemplo, en la norma UNE-EN 384 para piezas estructurales) y, aunque los ensayos aquí comparados (compresión y flexión) son diferentes, es razonable asumir que el tamaño de la probeta influye de manera similar en los resultados. El uso de distintas metodologías de ensayo justifica las diferencias en la respuesta del material, dado que el ensayo de flexión presenta una mayor sensibilidad ante la presencia de singularidades.

Cuantificando estas diferencias, los valores promedio del módulo de elasticidad fueron un 17 % superiores en los ensayos de ultrasonido y un 26 % superiores en los de compresión, en comparación con los de flexión estática. Estos hallazgos son coherentes con los de Bertoldo (2014), quien obtuvo diferencias promedio similares (alrededor del 20 %) entre los valores de ultrasonido y flexión estática para diferentes especies frondosas.

Otros autores, como Sinclair y Farshad (1987) citado por Trinca (2011), al comparar métodos de flexión estática, vibración y ultrasonido en *Douglas fir*, también registraron un módulo de elasticidad superior con ultrasonido (14970 N mm^{-2}) frente al ensayo de flexión estática (12740 N mm^{-2}). Los autores concluyeron que el ultrasonido era el método más fiable para determinar el módulo longitudinal (E_L). Argumentaron que el ensayo de flexión estática emplea deformaciones muy grandes en la probeta, lo que induce efectos elásticos no lineales que, a su vez, reducen artificialmente el valor del módulo de elasticidad medido.

Tabla 73. Valores medios (N mm^{-2}) y coeficientes de variación (%) de los módulos de elasticidad obtenidos en los ensayos sobre probetas de pequeñas dimensiones (ensayos de ultrasonidos en poliedros y ensayos de compresión en prismas) y en ensayos de flexión estática sobre tablas.

Ultrasonidos	Compresión axial	Flexión estática	
$E_{L,u}$	$E_{L,c}$	$MOE_{\text{global},12}$	$MOE_{\text{local},12}$
(N mm^{-2})	(N mm^{-2})	(N mm^{-2})	(N mm^{-2})
12876	14427	10367	10998
(b)	(c)	(a)	(a)
21 %	11 %	12 %	14 %

Leyenda: Letras iguales indican grupos homogéneos (sin diferencias estadísticamente significativas al nivel de confianza del 95 %).

Se realizaron regresiones simples para estimar los módulos de elasticidad (global y local) obtenidos en los ensayos de flexión estática en las tablas de *Quercus robur*. Como variables predictoras se utilizaron los resultados de los ensayos de compresión axial y los medidos por ultrasonidos ($E_{L,u}$). Los resultados indican que, partiendo únicamente de los ensayos de ultrasonidos sobre probetas poliédricas, es posible obtener una estimación razonable del módulo de elasticidad en flexión, alcanzando un coeficiente de determinación (R^2) en torno al 60 % (Tabla 74).

Tabla 74. Regresión simple considerando el módulo de elasticidad obtenido mediante ensayos de flexión estática (MOE_{Global} y MOE_{Local}) como variable dependiente y el módulo de elasticidad obtenido a partir de ensayos en probetas de pequeñas dimensiones.

Técnica	Modelo	p-valor	R ² (%)
Compresión axial	MOE_{Global}	-	-
	MOE_{Local}	-	-
Ultrasonidos	$MOE_{Global} = \exp(9,483 - 1,309E-09 * E_{L,u}^2)$	0,0065	57,96
	$MOE_{Local} = \exp(9,595 - 1,596E-09 * E_{L,u}^2)$	0,0104	53,63

Leyenda: $E_{L,u}$: módulo de elasticidad en la dirección longitudinal obtenido a partir de ensayos de ultrasonidos sobre probetas poliédricas ($N\ mm^{-2}$).

5.2.5 Parámetros elásticos a partir de muestras cilíndricas

El análisis de los resultados se inició con una verificación de la normalidad de los datos. Para ello, se evaluaron los parámetros estadísticos de asimetría y curtosis, estableciendo como criterio que ambos debían situarse dentro del intervalo (-2, 2). En los casos donde los parámetros excedían este rango, se procedió a identificar y eliminar valores atípicos (*outliers*), repitiendo este proceso de depuración hasta que los datos de la muestra cumplieron con el criterio de normalidad establecido.

Se calcularon las velocidades a partir de los tiempos de propagación de las ondas en las muestras, considerando los diferentes planos de propagación y polarización (Tabla 75). Las velocidades medias obtenidas oscilaron entre $416\ m \cdot s^{-1}$ (V_{TT}) y $2585\ m \cdot s^{-1}$ (V_{LL}). Los coeficientes de variación (CV) de estas medias mostraron un rango que fue del 3 % (V_{TT}) a 11 % (V_{LT}) (Tabla 75).

Tabla 75. Valores de la velocidad de propagación de las ondas longitudinales y de cortante ($m \cdot s^{-1}$): media, coeficiente de variación (%) y parámetros estadísticos de análisis de normalidad de los datos (asimetría y curtosis) para las muestras cilíndricas retiradas de los árboles.

Muestra	V _{LL}	V _{RR}	V _{TT}	V _{RT}	V _{LT}	V _{RL}
M02A25	2639	1100	530	432	673	814
M07A20	3510	965	419	571	667	706
M11A09	2537	880	401	433	651	794
M21A05	2717	1132	411	445	642	764
M21A06	2717	1132	411	445	642	764
M23A11	2543	1088	421	500	665	901
Q03A05	2754	1212	429	506	661	675
Q07A11	2663	1086	431	485	652	680
Q08A01	2425	1052	408	466	621	726
Q08A02	2425	1052	408	466	621	726
Q09A20	2655	1149	420	465	658	677
Q11A08	2637	1043	405	496	607	652
S04A17	3138	1027	441	451	603	698
S05A07	3577	953	424	397	502	630
S05A17	3577	953	424	397	502	630
S12A21	2550	849	388	365	466	--
S13A06	2505	934	438	432	533	617
S17A01	2419	865	406	436	569	737
Media	2585	1026	416	455	608	717
CV (%)	4	10	3	10	11	10
Asimetría	-0,26	-0,31	-0,13	0,80	-1,82	1,44
Curtosis	-0,97	-0,76	-0,16	1,02	-0,14	0,70

Leyenda: valores destacados en color azul fueron considerados como valores atípicos, de manera que no se contemplan en el análisis estadístico.

Los coeficientes de rigidez obtenidos a partir de la densidad básica y de las velocidades de cortante por ultrasonido presentaron relaciones coherentes con la base teórica del ensayo. Concretamente, se confirmó la relación esperada: $C_{11} > C_{22} > C_{33}$ y $C_{66} > C_{55} > C_{44}$ (Tabla 76). Esta jerarquía está directamente asociada con la estructura anatómica de la madera, como ya se ha comentado anteriormente.

Tabla 76. Valores de los coeficientes de rigidez ($N\ mm^{-2}$): media, coeficiente de variación (%) y parámetros estadísticos de análisis de normalidad de los datos (asimetría y curtosis) para las muestras cilíndricas retiradas de los árboles.

Muestra	C_{11} (C_{LL})	C_{22} (C_{RR})	C_{33} (C_{TT})	C_{44} ($C_{RT}=C_{TR}$)	C_{55} ($C_{LT}=C_{TL}$)	C_{66} ($C_{LR}=C_{RL}$)
M02A25	4409	766	177	118	287	420
M07A20	--	621	117	217	297	332
M11A09	4152	500	104	121	274	407
M21A05	4642	805	106	124	259	368
M21A06	4642	805	106	124	259	368
M23A11	4629	848	127	179	317	581
Q03A05	4725	916	114	160	273	284
Q07A11	5079	845	133	169	305	331
Q08A01	3368	634	95	125	221	302
Q08A02	3368	634	95	125	221	302
Q09A20	4433	831	111	136	272	288
Q11A08	4027	629	95	142	213	246
S04A17	5741	615	113	119	212	284
S05A07	--	616	122	107	171	269
S05A17	--	616	122	107	171	269
S12A21	3779	419	88	77	126	232
S13A06	3802	528	117	113	172	231
S17A01	3868	495	109	126	214	359
Media	4311	673	111	128	237	311
CV (%)	15	21	11	14	23	18
Asimetría	0,73	0,09	-0,28	1,99	-0,68	0,72
Curtosis	0,27	-0,91	-0,40	0,99	-0,59	-0,61

Leyenda: valores destacados en color azul fueron considerados como valores atípicos, de manera que no se contemplan en el análisis estadístico.

Se analizó la correlación entre los coeficientes de rigidez (C_{11} , C_{22} , C_{33} , C_{44} , C_{55} y C_{66}), medidos en las muestras cilíndricas, y los coeficientes de Poisson (ν_{LR} , ν_{LT}) obtenidos mediante los ensayos de compresión estática y de ultrasonido (en poliedros). En todos los casos, el modelo *Double reciprocal* fue el que mejor representó matemáticamente esta relación. Sin embargo, solo se encontraron correlaciones significativas para el Poisson ν_{LR} . Específicamente, este coeficiente mostró una correlación válida con C_{22} (o C_{RR}), C_{44} (plano RT) y C_{55} (plano LT) (Tabla 77). De estos, el modelo que mejor explicó la variabilidad de ν_{LR} fue el basado en el parámetro C_{RR} (C_{22}).

Tabla 77. Modelos de estimación del coeficiente de Poisson v_{LR} a partir de coeficientes de rigidez obtenidos en las muestras retiradas de los árboles.

Modelo	p-valor	R ²
$v_{LR} = \frac{1}{-5,0 + 4863/C_{22} \text{ muestra}}$	0,0006	71 %
$v_{LR} = \frac{1}{-2,9 + 700/C_{44} \text{ muestra}}$	0,0074	53 %
$v_{LR} = \frac{1}{-1,9 + 1009/C_{55} \text{ muestra}}$	0,0183	44 %

Este hallazgo es coherente con trabajos como el de Silva et al. (2020). En un estudio sobre *Leucaena leucocephala*, estos autores también encontraron una fuerte correlación en el mismo plano, donde el coeficiente C_{66} llegó a explicar el 85 % de la variación del coeficiente v_{LR} .

Es fundamental subrayar que estos resultados no pueden considerarse concluyentes debido al tamaño reducido de la muestra. Aunque se disponía de 18 muestras cilíndricas (6 por parcela), solo se pudieron utilizar 12 valores de coeficientes de Poisson en las regresiones (Tabla 60), ya que los restantes fueron eliminados por presentar valores anómalos (negativos o superiores a 1,0). En el futuro, si se confirma la viabilidad de estimar el coeficiente de Poisson mediante el uso de muestras cilíndricas extraídas del árbol, con un muestreo más representativo, sería posible incorporar este parámetro en los modelos predictivos.

5.3 INFLUENCIA DE FACTORES CLIMÁTICOS Y ESTACIONALES EN LA APLICACIÓN DE TÉCNICAS ACÚSTICAS PARA LA ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE *QUERCUS ROBUR* EN EL ÁRBOL EN PIE

5.3.1 Análisis de las condiciones climáticas durante los ensayos

El análisis de las mediciones, distribuidas en nueve días a lo largo del año (en los meses de enero, febrero, abril, junio, julio, septiembre, octubre y diciembre), reveló variaciones estadísticamente significativas en las condiciones ambientales. En el caso de la temperatura, el sexto día de medición (a finales de julio) se diferenció claramente de todos los demás al registrar el valor más elevado, mientras que las temperaturas más bajas se observaron en enero y diciembre (Tabla 78). Para la humedad relativa del aire en este mismo análisis anual, únicamente el registro de finales de julio (día 6 de medición) se diferenció del resto, presentando el menor valor, mientras que septiembre y diciembre mostraron valores similares entre sí, e inferiores a los de los demás meses (Tabla 78).

Tabla 78. Fechas de medición con sus respectivas temperaturas y humedades medias.

Día de medición	Fecha	Temperatura del aire (°C)	Humedad relativa (%)
1	17/01/2020	7,0 (a)	78,3 (cd)
2	14/02/2020	11,7 (b)	82,3 (d)
3	28/04/2020	11,0 (b)	71,3 (b)
4	02/06/2020	20,0 (c)	76,0 (c)
5	08/07/2020	18,3 (c)	74,7 (bc)
6	30/07/2020	24,3 (d)	60,0 (a)
7	24/09/2020	13,0 (b)	91,7 (e)
8	29/10/2020	11,7 (b)	80,0 (cd)
9	03/12/2020	6,7 (a)	90,7 (e)

Leyenda: Para las columnas, letras iguales indican grupos homogéneos (sin diferencias estadísticamente significativas al nivel de confianza del 95 %).

Al considerar los diferentes horarios dentro de cada jornada de medición, también se encontraron diferencias significativas (Figura 60). La temperatura siguió un patrón diario predecible, con el valor más bajo al amanecer (media de 9,2 °C), el más alto al mediodía (media de 17,4 °C) y un valor intermedio al atardecer (media de 14,6 °C). La humedad relativa del aire mostró una tendencia inversa: alcanzó su punto máximo al amanecer (media del 95 %), descendió al valor más bajo al mediodía (media del 66 %) y se situó en un nivel intermedio al atardecer (media del 74 %).

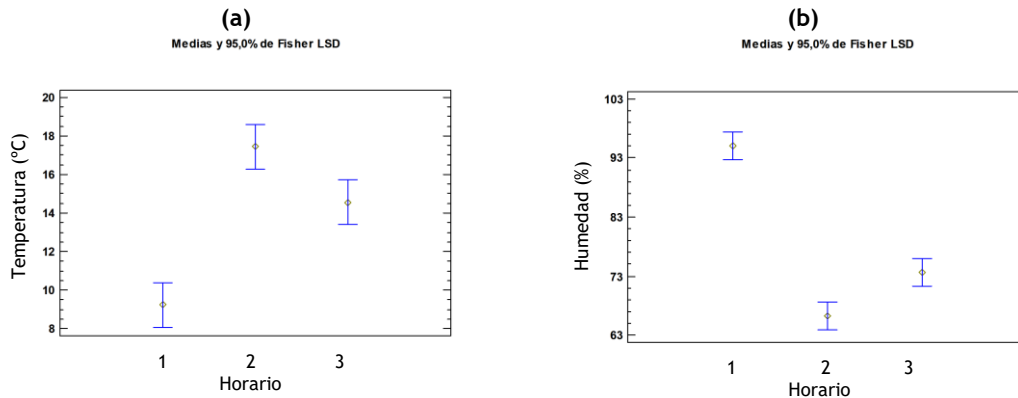


Figura 60. Medias e intervalo de confianza de la temperatura (a) en °C y humedad relativa del aire (b) en %, para los tres horarios de medición a lo largo del día. Leyenda: 1 = amanecer; 2 = mediodía; 3 = atardecer.

La velocidad del viento también presentó diferencias significativas. Dentro de cada jornada, siguió un patrón similar al de la temperatura, registrando la media más baja al amanecer ($6,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), la más alta al mediodía ($10,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) y un valor intermedio al atardecer ($9,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). En cuanto a la variación anual, los valores más bajos se observaron en junio y a finales de julio (cuarto y sexto día de medición), con medias cercanas a $5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Por el contrario, las velocidades más altas se registraron a principios del mes de julio y en diciembre (quinto y noveno día de medición), con medias próximas a $14 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.

En conjunto, estos resultados confirman que se cumplieron las condiciones de análisis buscadas. Desde un punto de vista estadístico, se logró capturar la variabilidad de los parámetros climáticos y estacionales, tal como requerían los objetivos de esta investigación.

5.3.2 Análisis de parámetros acústicos obtenidos en el registro diario

El análisis de las velocidades de propagación de ondas obtenidas en el registro diario demostró que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las mediciones realizadas en los distintos momentos del día (1: amanecer; 2: mediodía y 3: atardecer). Esta falta de significación se mantuvo constante independientemente de la técnica de ensayo empleada (ultrasonidos u ondas de impacto) y de las dos distancias entre transductores utilizadas (0,4 metros y 0,7 metros) (Tabla 79). Este resultado confirma que la velocidad de propagación no se ve afectada por las variaciones en el flujo de savia que el árbol pueda experimentar a lo largo del día.

Tabla 79. Valores medios ($m s^{-1}$) y coeficientes de variación (%) de las velocidades obtenidas en las mediciones realizadas en diferentes momentos del día (V_1 , V_2 , V_3) con una distancia entre transductores de 0,4 m y de 0,7 m, para las dos técnicas utilizadas.

	Ultrasonidos (USLab)		Ondas de impacto (MST)	
	0,4m	0,7m	0,4m	0,7m
V_1	3877	3531	3377	3393
	(a)	(a)	(a)	(a)
	21 %	17 %	17 %	10 %
V_2	3912	3511	3368	3370
	(a)	(a)	(a)	(a)
	21 %	17 %	18 %	11 %
V_3	3920	3508	3394	3354
	(a)	(a)	(a)	(a)
	21 %	17 %	18 %	12 %

Leyenda: V_1 : velocidad al amanecer; V_2 : velocidad al mediodía; V_3 : velocidad al atardecer. Letras iguales indican grupos homogéneos para la columna (sin diferencias estadísticamente significativas al nivel de confianza del 95 %).

5.3.3 Análisis de parámetros acústicos obtenidos en el registro anual

Para el registro anual de mediciones, con las dos distancias entre transductores (0,4 m y 0,7 m), el análisis comparativo de las técnicas mostró resultados distintos. Las mediciones con ultrasonido (USLab) mostraron diferencias significativas entre las dos distancias. En cambio, las velocidades obtenidas con ondas de impacto (MST) fueron estadísticamente equivalentes en ambos tramos de medición (Tabla 80).

Tabla 80. Valores medios ($m s^{-1}$), coeficientes de variación (%) y análisis estadístico de equivalencia de medias de las velocidades anuales, para las dos técnicas utilizadas y distancias de medición.

Técnica	Distancia de medición (m)	Velocidad ($m s^{-1}$)	CV (%)	Intervalo de confianza de la media	p-valor
Ultrasonidos (USLab)	0,4	3904 (a)	21	284 a 424	0,0000
	0,7	3521 (b)	17		
Ondas de impacto (MST)	0,4	3385 (a)	17	-91 a 10	0,0000
	0,7	3372 (a)	11		

Leyenda: Letras iguales indican grupos homogéneos (sin diferencias estadísticamente significativas al nivel de confianza del 95 %).

Al comparar los dos equipos y las dos configuraciones de ensayo, se observó que la única que se diferenció significativamente fue la obtenida con ultrasonido a 0,4 m, cuyos valores fueron superiores a las demás (Figura 61). El hecho de que la velocidad del ultrasonido sea más baja en la distancia mayor (0,7 m) sugiere una posible influencia de parámetros tales como desviaciones de fibra o defectos internos presentes en el árbol. El equipo de ondas de impacto utilizado (MST), al poseer una longitud de onda mayor, es menos sensible a estas pequeñas imperfecciones en el recorrido de propagación de la onda.

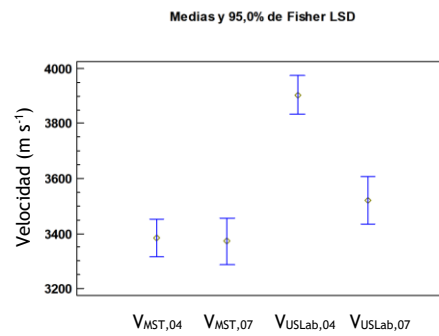


Figura 61. Medias e intervalo de confianza de las velocidades obtenidas con las técnicas de ondas de impacto (MST) y ultrasonido (USLab) para las dos distancias entre transductores (0,4 m y 0,7 m) en el árbol en pie, en m s⁻¹.

A pesar de las variaciones evidentes de temperatura y humedad relativa a lo largo del año, las velocidades medidas con ultrasonido (tanto a 0,4 m como a 0,7 m) no mostraron diferencias significativas entre los distintos meses de medición (Figura 62a y Figura 62b). Para la distancia de 0,4 m los valores anuales oscilaron entre 3695 m s⁻¹ (diciembre) y 4079 m s⁻¹ (febrero) (Figura 62a). En cuanto a los horarios del día, los valores variaron mínimamente de 3860 m s⁻¹ (amanecer) a 3920 m s⁻¹ (atardecer), confirmando la ausencia de diferencias significativas diarias (Figura 62c). Para la distancia de 0,7 m los valores anuales se situaron entre 3278 m s⁻¹ (finales de julio) y 3642 m s⁻¹ (septiembre) (Figura 62b). Del mismo modo, los valores diarios variaron muy poco, de 3508 m s⁻¹ (atardecer) a 3541 m s⁻¹ (amanecer), también sin significación estadística (Figura 62d).

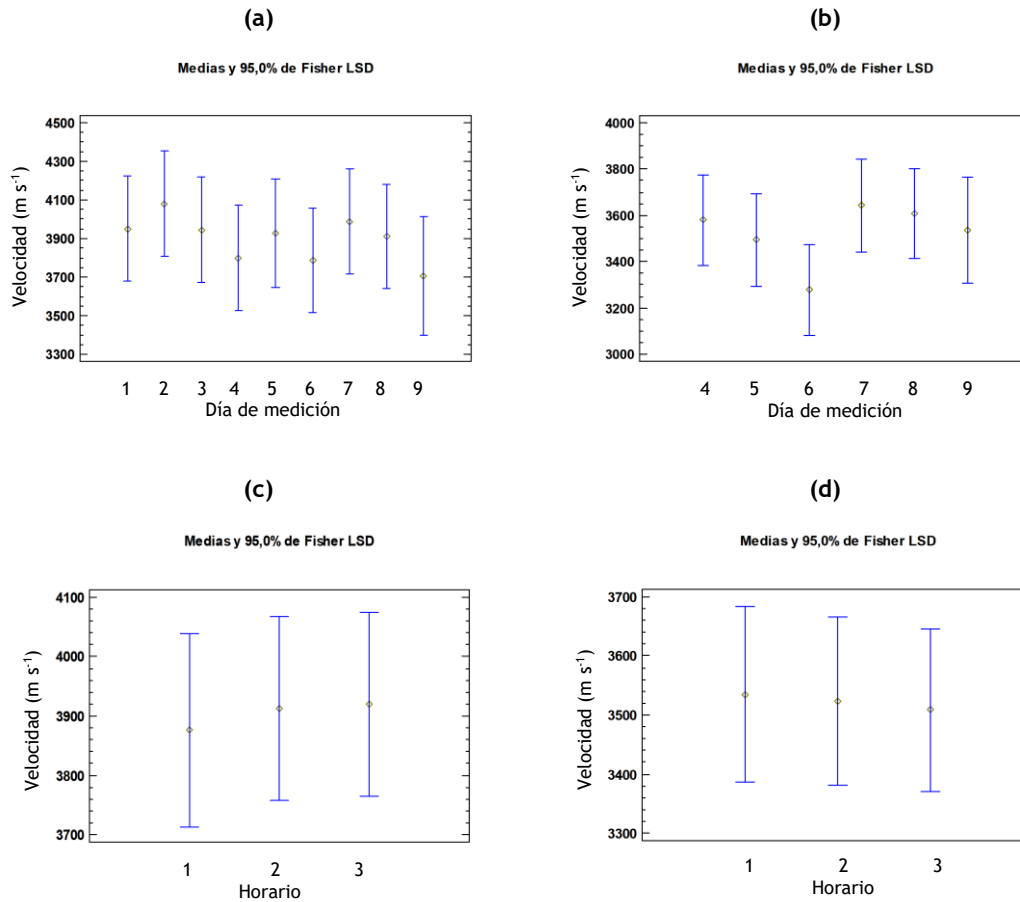


Figura 62. Medias e intervalo de confianza de las velocidades obtenidas con la técnica de ultrasonido en las dos distancias de medición (0,4 m y 0,7 m), en m s⁻¹: (a) velocidad en los nueve días de medición para la distancia de 0,4 m; (b) velocidad en los seis días de medición para la distancia de 0,7 m; (c) velocidad en cada horario de medición para la distancia de 0,4 m; (d) velocidad en cada horario de medición para la distancia de 0,7 m.

En el caso de las ondas de impacto, al igual que con ultrasonidos, no se observaron diferencias significativas en las velocidades ni entre los meses ni en los diferentes horarios del día, para ninguna de las distancias de medición (Figura 63).

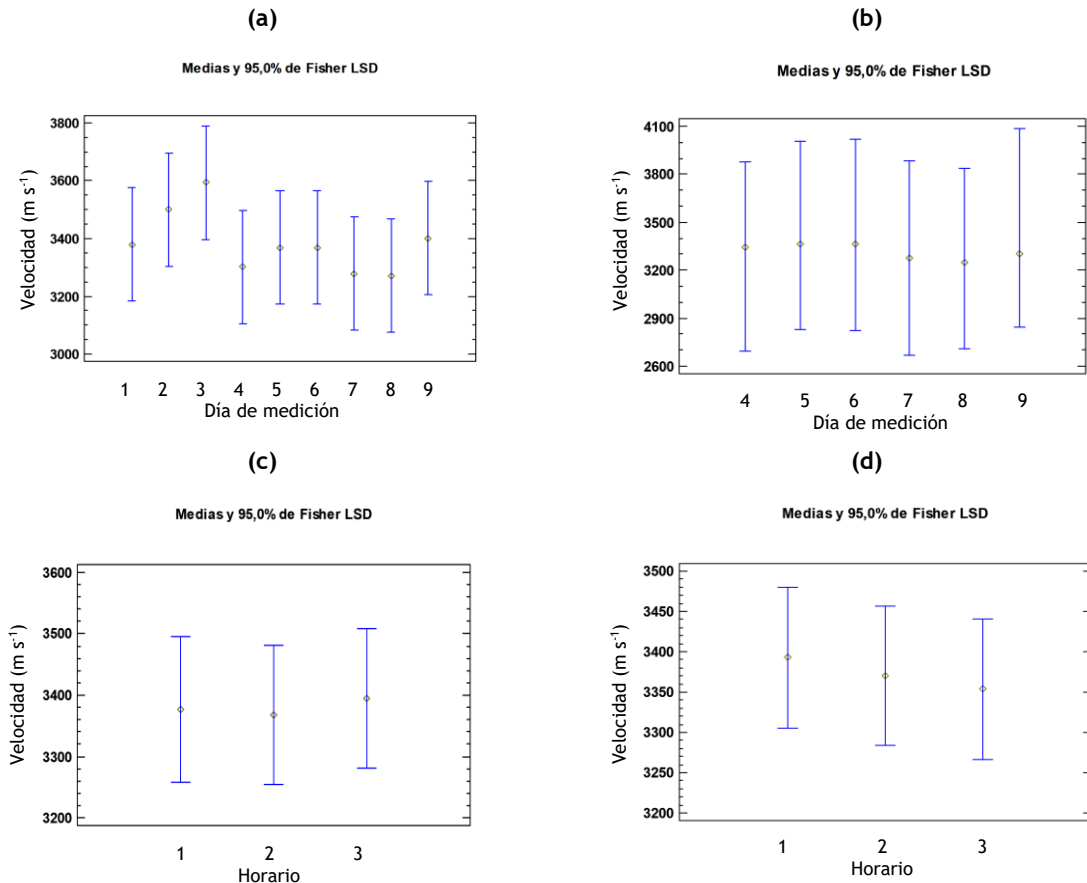


Figura 63. Medias e intervalo de confianza de las velocidades obtenidas con la técnica de ondas de impacto en las dos distancias de medición (0,4 m y 0,7 m), en m s⁻¹: (a) velocidad en los nueve días de medición para la distancia de 0,4 m; (b) velocidad en los seis días de medición para la distancia de 0,7 m; (c) velocidad en cada horario de medición para la distancia de 0,4 m; (d) velocidad en cada horario de medición para la distancia de 0,7 m.

Para poder realizar un análisis comparativo válido entre los dos tramos de medición, fue necesario unificar el conjunto de datos. Esto implicó utilizar únicamente los días en los que se disponía de mediciones con ambas distancias (0,4 m y 0,7 m), acotando así el análisis a las mediciones 4 a 9 (correspondientes al periodo de junio a diciembre).

Al analizar la onda ultrasónica (USLab) en este periodo, se observó que las velocidades registradas a 0,4 m son superiores a las obtenidas a 0,7 m. No obstante, es importante destacar que ambas configuraciones de medición presentan la misma tendencia de variación (Figura 64a), lo que indica que ambas capturan los cambios relativos de manera similar. A pesar de esta similitud en la tendencia, y para el caso de la especie estudiada en esta investigación y sus singularidades de desarrollo, la distancia de 0,4 m se considera técnicamente más adecuada, ya que, al ser un trayecto más corto, estaría menos afectada por imperfecciones en la madera. Asimismo, la distancia de 0,4 m resultó adecuada para la longitud de onda estimada ($\lambda \approx 80$ mm), alcanzando una relación $L/\lambda \approx 5$. Este valor satisface el criterio mínimo ($L/\lambda > 3$) propuesto por otros autores (Bucur, 1984; Oliveira et al., 2006; Trinca, 2008).

En el caso de las ondas de impacto (MST), el análisis mostró un comportamiento diferente: no se apreciaron diferencias significativas entre los valores de velocidad obtenidos con las dos distancias evaluadas. Al igual que sucedió con el ultrasonido, los dos conjuntos de datos mostraron un patrón casi idéntico en sus incrementos y descensos (Figura 64b). Por lo tanto,

para la técnica de ondas de impacto, se concluye que ambas distancias entre transductores resultan válidas para la realización de las mediciones.

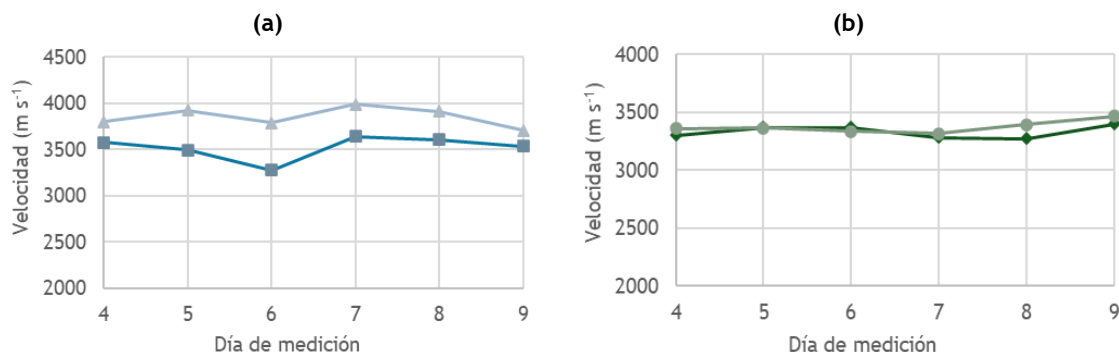


Figura 64. Velocidades obtenidas en los días de medición de 4 a 9, en las distancias entre transductores de 0,4 m y 0,7 m con las dos técnicas utilizadas, en m s⁻¹: (a) ultrasonidos y (b) ondas de impacto. Velocidad promedio USLab distancia de 0,4 m (triángulos); Velocidad promedio USLab distancia de 0,7 m (cuadrados); Velocidad promedio MST distancia de 0,4 m (rombos); Velocidad promedio MST distancia de 0,7 m (círculos).

El análisis de correlación de las variables ambientales mostró los resultados esperados: el viento no mostró correlación con la temperatura ni con la humedad relativa, mientras que la temperatura y la humedad sí presentaron la predecible relación inversa. Sin embargo, para ninguna de las técnicas de ensayo fue posible establecer un modelo de correlación (ni simple ni múltiple) entre la velocidad de propagación de las ondas y la humedad relativa del aire o la temperatura (incluyendo el viento, que no presenta autocorrelaciones con la temperatura ni con la humedad).

Aunque, como se demostró anteriormente, no se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas en las velocidades medidas a lo largo del año, los valores numéricos sí mostraron fluctuaciones (Tabla 81). Una vez identificadas estas variaciones numéricas, la cuestión fundamental fue determinar si estas variaciones, aunque estadísticamente no significativas, podrían ser relevantes en la práctica, es decir, si la magnitud de la variación podría afectar a la categorización de la madera en árboles en pie. Para evaluar este impacto, y como se ha planteado en apartados anteriores de esta tesis, se aplica la norma ABNT NBR 15521:2007. Todas las mediciones fueron clasificadas como UD-30, independientemente del mes o el periodo del día en que se registraron. La obtención de la clase UD-30 es coherente con los resultados ya expuestos en el apartado 5.1.7 para la madera de roble analizada en esta investigación.

Tabla 81. Valores medios (m s^{-1}) y coeficientes de variación (%) de las velocidades obtenidas en las mediciones anuales completas con una distancia entre transductores de 0,4 m y de 0,7 m, para las dos técnicas utilizadas.

Medición	Ultrasonidos (USLab)		Ondas de impacto (MST)	
	0,4 m	0,7 m	0,4 m	0,7 m
1	3950	-	3379	-
	(a)		(a)	
	21 %		18 %	
2	4079	-	3500	-
	(a)		(a)	
	23 %		19 %	
3	3946	-	3593 (a)	-
	(a)		(a)	
	22 %		18 %	
4	3799	3579	3301	3357
	(a)	(a)	(a)	(a)
	19 %	17 %	16 %	11 %
5	3926	3494	3369	3366
	(a)	(a)	(a)	(a)
	21 %	18 %	16 %	10 %
6	3787	3278	3369	3337
	(a)	(a)	(a)	(a)
	19 %	18 %	17 %	12 %
7	3988	3642	3279	3316
	(a)	(a)	(a)	(a)
	21 %	16 %	19 %	12 %
8	3911	3608	3272	3392
	(a)	(a)	(a)	(a)
	22 %	15 %	16 %	11 %
9	3705	3527	3400	3464
	(a)	(a)	(a)	(a)
	22 %	16 %	17 %	10 %

Leyenda: Letras iguales indican grupos homogéneos para la columna (sin diferencias estadísticamente significativas al nivel de confianza del 95 %).

5.4 POSIBILIDADES DE APLICACIÓN DE MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS EN LA EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LÁMINAS DE MADERA DE *QUERCUS ROBUR* CON UNIONES DENTADAS

5.4.1 Efecto de la unión dentada en la rigidez de la lámina (Grupo 1)

Como punto de partida, y antes de iniciar el análisis comparativo entre la tabla y la lámina, se realizó una validación metodológica preliminar. Específicamente, al utilizar el equipo USLab sobre las láminas, se comprobó que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los dos transductores empleados para las mediciones longitudinales (Tabla 82). En consecuencia, y con el objetivo de poder comparar más fielmente los resultados obtenidos entre la tabla y la lámina, el análisis subsiguiente tomará como referencia los resultados de velocidad longitudinal (V_{lon}) obtenidos exclusivamente con el transductor cónico.

Tabla 82. Valores medios ($m s^{-1}$) y coeficientes de variación (%) de la velocidad longitudinal en las láminas del Grupo 1 obtenida con el equipo USLab usando transductores planos ($V_{lon,USLab,p}$) y cónicos ($V_{lon,USLab,c}$).

	Ultrasonidos (USLab)
$V_{lon,USLab,p}$	4351
	(a)
	10 %
$V_{lon,USLab,c}$	4439
	(a)
	10 %

Leyenda: Letras iguales indican grupos homogéneos (sin diferencias estadísticamente significativas al nivel de confianza del 95 %).

Posteriormente, se realizó una segunda comprobación que abarcó las técnicas de ultrasonidos y ondas de impacto. En este caso, se verificó que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los dos tipos de mediciones realizadas sobre las láminas: la medición longitudinal ($V_{lon,l}$) y la superficial ($V_{sup,l}$) para cada técnica, tal como se recoge en la Tabla 83. A partir de esta evidencia, para los análisis discutidos en este apartado se decidió tomar como referencia los resultados provenientes de las mediciones longitudinales (directas).

Tabla 83. Valores medios ($m s^{-1}$) y coeficientes de variación (%) de la velocidad longitudinal ($V_{lon,l}$) y superficial ($V_{sup,l}$) en las láminas del Grupo 1 con las dos técnicas utilizadas, ultrasonidos y ondas de impacto.

Tipo de medición	Ultrasonidos (USLab)	Ondas de impacto (MST)
$V_{lon,l}$	4439	4266
	(a)	(a)
	10 %	10 %
$V_{sup,l}$	4241	4273
	(a)	(a)
	9 %	9 %

Leyenda: Letras iguales indican grupos homogéneos para la columna (sin diferencias estadísticamente significativas al nivel de confianza del 95 %).

En el análisis comparativo de los resultados obtenidos en la tabla y en la lámina, se revela una tendencia interesante para las técnicas de ultrasonido y ondas de impacto. Se observa que la velocidad de propagación de la onda en la lámina ($V_{lon,l}$) es ligeramente superior a la velocidad media de las tablas ($V_{lon,t}$), si bien esta diferencia no resultó ser estadísticamente significativa (Figura 62 y Tabla 83). Una de las principales razones que podrían justificar este incremento de velocidad en la lámina puede estar relacionada con mejoras en la interfaz de la unión, ya sea en el contacto, la continuidad mecánica o la correcta aplicación del adhesivo. Cabe destacar que, para este grupo, las piezas originales no presentaban singularidades como nudos o desviación de la fibra, lo que hizo innecesario realizar un proceso de saneado del material. En consecuencia, no se puede atribuir este resultado a la eliminación de defectos, sino más bien a la influencia de la propia unión.

Existen múltiples razones que pueden explicar el aumento local de la velocidad de propagación de ondas en las láminas. Si la unión dentada fue realizada con una geometría correcta, precisión en las superficies de contacto y un adhesivo bien distribuido, es probable que se hayan minimizado las microfisuras o interfaces imperfectas. Esta optimización reduce las reflexiones y pérdidas de onda en la interfaz, aumentando la velocidad aparente (Sun y Arima, 1998; Biernacki y Beall, 1996). Asimismo, la propia penetración del adhesivo en las paredes celulares de la madera puede llenar vacíos microestructurales o fisuras finas, reparando irregularidades y homogeneizando la estructura en la zona de la unión (Hass et al., 2010; Mendoza et al., 2012), contribuyendo así al aumento local de la velocidad. Finalmente, la impedancia acústica es otra explicación plausible: si el adhesivo presenta una impedancia cercana a la de la madera y baja absorción, puede actuar como una capa de transmisión más eficaz que una interfaz madera-aire o una superficie menos plana (Kowalczyk, 2025).

No obstante, la técnica de vibración mostró un resultado opuesto. Para este método, la velocidad ($V_{lon,l,MST}$) obtenida en las láminas fue ligeramente inferior a la presentada en el caso de las tablas ($V_{lon,t,MST}$) (Figura 65).

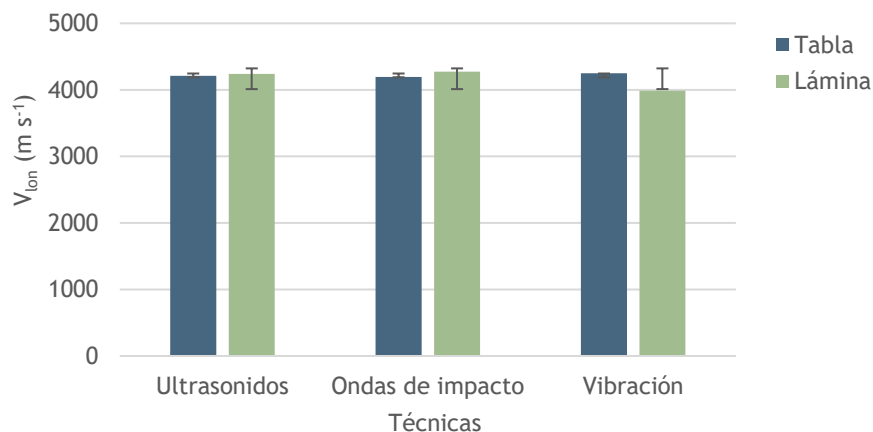


Figura 65. Velocidades longitudinales medias ($m s^{-1}$) y su desviación estándar obtenidas en ensayos realizados en las tablas ($V_{lon,t}$) y en las láminas ($V_{lon,l}$) pertenecientes al Grupo 1, para cada una de las técnicas acústicas aplicadas.

Al analizar los resultados obtenidos para el coeficiente de rigidez mediante técnicas acústicas ($C_{LL,i}$) y el módulo de elasticidad aplicando la técnica DIC (MOE_i), se comprobó que la muestra proviene de una distribución normal, dado que los valores de asimetría y curtosis estandarizada se encuentran en el rango de -2 a +2 (Tabla 84). En la comparación numérica, las

técnicas de ultrasonidos y ondas de impacto mostraron un $C_{LL,I}$ un 11 % y un 3 % superior al de las tablas de origen, respectivamente. En contraposición, la técnica de vibración mostró un comportamiento opuesto, con un $C_{LL,I}$ un 12 % inferior al $C_{LL,t}$ (Tabla 84).

Al igual que en la presente investigación, Karlinasari y Bahtiar (2011) aplicaron la técnica de ultrasonidos, sin detectar diferencias significativas en la velocidad de onda ni en el MOE dinámico entre las fases previa y posterior a la unión dentada. No obstante, constataron que los valores de velocidad de onda ultrasónica, así como de la rigidez, fueron superiores en las probetas con uniones dentadas respecto al material original. En cuanto a la relación entre métodos, obtuvieron un módulo de elasticidad estático entre un 21 % y un 28 % inferior al dinámico. Un resultado análogo se presenta en esta tesis, donde el MOE a tracción es un 24 % menor que el C_{LL} obtenido mediante ultrasonidos en la lámina.

Otros estudios corroboran la disminución en la rigidez de la madera con uniones dentadas aplicando la técnica de vibración (Biechele et al., 2011). Estos autores también observan módulos de elasticidad más bajos en uniones dentadas usando ondas de impacto. Asimismo, Yavari et al. (2015) y Hemmasi et al. (2014), trabajando con *Quercus castaneifolia* y empleando la técnica de vibración, registraron una rigidez inferior en las uniones comparada con la madera sólida. Esta magnitud en la pérdida de rigidez es coherente con los hallazgos reportados por otros autores, quienes han documentado reducciones similares, de entre un 11 % y un 19 %, en uniones dentadas de otras especies (Timbolmas et al., 2022; Rescalvo et al., 2023). Vafadar et al. (2024), utilizando la técnica DIC en ensayos de flexión de vigas de MLE, han obtenido rigideces un 15 % menores en las uniones dentadas con respecto al valor medio de las tablas conectadas. En general, estos autores consideran que la menor rigidez de la madera con uniones dentadas podría atribuirse a un encolado deficiente.

Tabla 84. Estadísticos descriptivos de centralización, dispersión de las variables y análisis de normalidad de los valores de coeficientes de rigidez ($C_{LL,t}$; $C_{LL,I}$) y de MOE (MOE_i), obtenidos en las tablas y en las láminas con uniones dentadas pertenecientes al Grupo 1, con las cuatro técnicas aplicadas.

	Ultrasonidos		Ondas de impacto		Vibración		DIC
	$C_{LL,t}$	$C_{LL,I}$	$C_{LL,t}$	$C_{LL,I}$	$C_{LL,t}$	$C_{LL,I}$	MOE_i
Media	14500	16138	14380	14878	14712	13017	12331
Desviación estándar	3128	3701	3124	3214	2850	2884	2598
CV (%)	22	23	22	22	19	22	21
Mínimo	9960	10861	10323	10369	9999	9689	9063
Máximo	18976	21142	18976	19398	18575	16798	15071
Asimetría	0,0588	-0,0777	0,2059	0,1151	-0,1713	0,1583	-0,42905
Curtois	-0,7084	-0,7939	-0,8267	-0,7639	-0,2378	-1,044	-1,11086

Leyenda: $C_{LL,t}$: coeficiente de rigidez obtenido a partir de mediciones en la tabla con las técnicas acústicas ($N\text{ mm}^{-2}$); $C_{LL,I}$: coeficiente de rigidez obtenido a partir de mediciones en la lámina con las técnicas acústicas ($N\text{ mm}^{-2}$); MOE_i : módulo de elasticidad obtenido en ensayos de tracción de las láminas con la técnica DIC ($N\text{ mm}^{-2}$).

A pesar de las pequeñas diferencias numéricas observadas, para el material incluido en este primer grupo (láminas fabricadas a partir de la misma tabla de origen), no existen diferencias estadísticamente significativas entre las mediciones realizadas en las tablas y en las láminas. Esto se aplica a las tres técnicas, tanto para la medición de la velocidad como del coeficiente de rigidez (Tabla 85), confirmando así que la unión dentada no afecta a la rigidez global de las

piezas. Finalmente, al comparar los resultados entre las distintas técnicas, tampoco se encontraron diferencias significativas entre ellas, ni para la velocidad ni para los valores de C_{LL} y MOE_I (Tabla 85).

Tabla 85. Valores medios y coeficientes de variación (%) de las velocidades, coeficientes de rigidez y módulo de elasticidad, obtenidos en las tablas y en las láminas del Grupo 1 con las cuatro técnicas utilizadas.

Técnica	Velocidad ($m\ s^{-1}$)		C_{LL} / MOE_I ($N\ mm^{-2}$)	
	$V_{lon,t}$	$V_{lon,l}$	$C_{LL,t}$	$C_{LL,l} / MOE_I$
Ultrasonidos (USLab)	4212	4439	14500	16138
	(a)(1)	(a)(1)	(a)(1)	(a)(1)
	10 %	9 %	22 %	23 %
Ondas de impacto (MST)	4194	4266	14380	14878
	(a)(1)	(a)(1)	(a)(1)	(a)(1)
	9 %	9 %	22 %	22 %
Vibración (MTG)	4249	3988	14712	13017
	(a)(1)	(a)(1)	(a)(1)	(a)(1)
	9 %	10 %	19 %	22 %
DIC (Aramis 3D)	-	-	-	12331
	-	-	-	(a)
	-	-	-	21 %

Leyenda: Letras iguales indican grupos homogéneos para la fila (sin diferencias estadísticamente significativas al nivel de confianza del 95 %), es decir, para una misma técnica entre tabla y lámina; números iguales indican grupos homogéneos para la columna, entre las diferentes técnicas. $V_{lon,t}$: velocidad longitudinal obtenida en la tabla; $V_{lon,l}$: velocidad longitudinal obtenida en la lámina; $C_{LL,t}$: coeficiente de rigidez obtenido a partir de mediciones en la tabla con las técnicas acústicas; $C_{LL,l}$: coeficiente de rigidez obtenido a partir de mediciones en la lámina con las técnicas acústicas; MOE_I : módulo de elasticidad obtenido en ensayos de tracción de las láminas con la técnica DIC.

Basándonos en los resultados de velocidad obtenidos tanto en las tablas ($V_{lon,t}$) como en las láminas ($V_{lon,l}$) mediante las tres técnicas acústicas aplicadas, se obtienen modelos estadísticamente significativos para la estimación del MOE_I (módulo de elasticidad en tracción paralela). Estos modelos destacan por presentar altos coeficientes de determinación (Tabla 86). Dado que dichos coeficientes ya son muy elevados, no se consideró necesario recurrir a modelos más complejos, siendo el modelo lineal, por su simplicidad, la opción más adecuada.

Tabla 86. Modelos de predicción del módulo de elasticidad de las láminas ensayadas a tracción paralela a la fibra con DIC (MOE_l), obtenidos a partir de las velocidades en las tablas de manera previa a su mecanizado ($V_{lon,t}$) y de las láminas con uniones dentadas ($V_{lon,l}$), pertenecientes al Grupo 1.

Técnica	VI	R	R ²	p-valor	Error (N mm ⁻²)	Modelo
Ultrasonidos (USLab)	$V_{lon,l}$	0,99	98,13	0,0011	410,11	$MOE_l = -6909,1 + 4,321 * V_{lon,l,USLab}$
	$V_{lon,t}$	0,98	97,00	0,0022	519,32	$MOE_l = -8297,45 + 4,868 * V_{lon,t,USLab}$
Ondas de impacto (MST)	$V_{lon,l}$	0,99	97,74	0,0014	450,83	$MOE_l = -8447,84 + 4,836 * V_{lon,l,MST}$
	$V_{lon,t}$	0,99	98,64	0,0007	350,10	$MOE_l = -9086,34 + 5,070 * V_{lon,t,MST}$
Vibración (MTG)	$V_{lon,l}$	1,00	99,41	0,0002	231,16	$MOE_l = -8984,67 + 5,296 * V_{lon,l,MTG}$
	$V_{lon,t}$	0,92	84,98	0,0259	1162,92	$MOE_l = -7790,91 + 4,722 * V_{lon,t,MTG}$

Leyenda: VI: variable independiente; $V_{lon,l}$: velocidad longitudinal obtenida en la lámina ($m s^{-1}$); $V_{lon,t}$: velocidad longitudinal obtenida en la tabla ($m s^{-1}$); MOE_l : módulo de elasticidad obtenido en ensayos de tracción de las láminas con la técnica DIC ($N mm^{-2}$).

Durante el análisis de las mediciones superficiales, realizadas con técnicas de ultrasonidos y ondas de impacto recorriendo la tabla desde un punto fijo y pasando por todas las uniones dentadas, se observaron comportamientos opuestos entre ambas técnicas (Figura 66). Específicamente, se registró una velocidad ultrasónica elevada al inicio, que descendió y se estabilizó a partir de la segunda unión. Las ondas de impacto, por el contrario, mostraron la tendencia opuesta, con la menor velocidad al inicio de la secuencia de medición.

Este comportamiento podría deberse a dos razones principales. Por una parte, como se ha discutido anteriormente, la propia unión dentada, su mecanizado y la presencia del adhesivo pueden estar afectando a la propagación de la onda, influenciando de manera más acusada en tramos de medición reducidos. Por otro lado, este efecto anómalo en el primer tramo puede atribuirse al fenómeno de dispersión de la onda superficial. Este fenómeno es especialmente acusado cuando la relación entre la longitud de recorrido (L) y la longitud de onda (λ) es baja ($L/\lambda < 3$), como ocurre en el primer tramo de medición, en el que la distancia es siempre de 300 mm. Si consideramos, para la técnica de ultrasonidos, una velocidad de referencia de $5000 m s^{-1}$, y una frecuencia de los transductores de 45 kHz, la longitud de onda ($\lambda \approx 111 mm$) sitúa esta primera medición dentro de la zona afectada por el fenómeno de dispersión inducido por la geometría. Lo mismo sucede en el caso de la técnica de ondas de impacto, con una velocidad de referencia de $3700 m s^{-1}$, y una frecuencia de los transductores de 23 kHz. Esto explica por qué, únicamente en la primera medición, la velocidad de propagación presenta un comportamiento anómalo para ambas técnicas. A partir de la segunda medición la distancia es siempre superior a 600 mm, lo que permite que la propagación se dé con una relación $L/\lambda > 5$, superando el umbral de conversión y estabilizando la medición. Llana (2016) también obtuvo resultados de velocidad anómalos para mediciones directas e indirectas realizadas en tramos con una longitud de 0,52 m.

En el caso específico de los ultrasonidos propagándose como ondas superficiales, puede ocurrir un fenómeno diferenciado de polarización, el cual se manifiesta en función de la dimensión de la sección transversal (plano LR o LT). En la presente investigación, las láminas

tienen una sección nominal de 20×80 mm lo que resulta en una relación R/T (20/80) de aproximadamente 0,25. Este valor se encuentra por debajo de los umbrales de estabilidad, $R/T > 0,3$ o $L/T > 0,75$, indicados por otros autores (Bartholomeu et al., 2003).

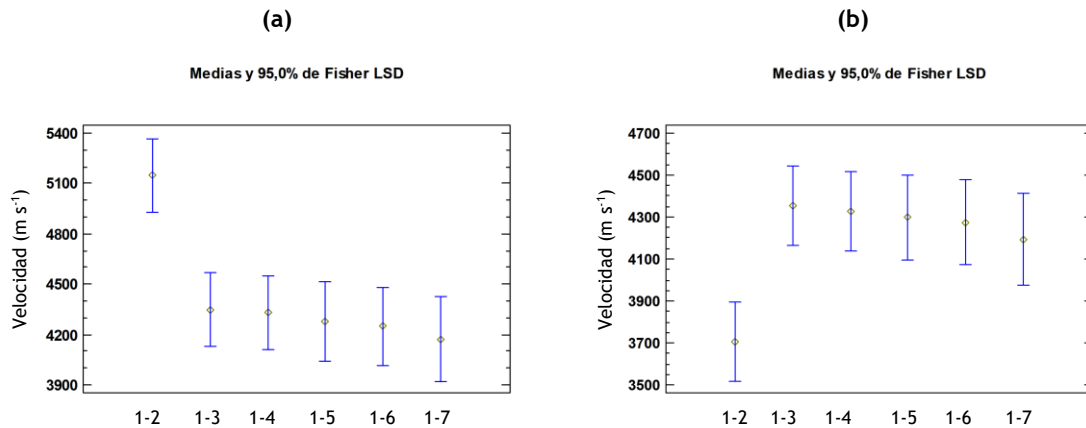


Figura 66. Velocidades medias (m s^{-1}) y desviación estándar para las mediciones superficiales progresivas realizadas con la técnica de ultrasonidos (a) y la técnica de ondas de impacto (b), en los tramos 1-2; 1-3; 1-4; 1-5; 1-6; 1-7.

En las mediciones progresivas realizadas con ambos equipos, se constató que, a partir de la segunda unión (tramo 1-3), es decir, con una distancia entre transductores igual o superior a 600 mm, los valores de velocidad forman un grupo homogéneo. Este grupo de valores es, además, coincidente con la velocidad obtenida en la lámina completa, tanto en la medición superficial ($V_{\text{sup},l}$) como en la longitudinal ($V_{\text{lon},l}$) (Tabla 87).

Tabla 87. Valores medios (m s^{-1}) y coeficientes de variación (%) de la velocidad obtenida en las mediciones superficial progresiva, superficial considerando la lámina completa y longitudinal, para las técnicas de ultrasonidos y ondas de impacto.

	Ultrasonidos (USLab)	Ondas de impacto (MST)
	5148	3704
$V_{\text{sup},l}$ 1-2	(a) 10 %	(a) 8 %
	4348	4355
$V_{\text{sup},l}$ 1-3	(b) 12 %	(b) 10 %
	4332	4329
$V_{\text{sup},l}$ 1-4	(b) 9 %	(b) 7 %
	4278	4299
$V_{\text{sup},l}$ 1-5	(b) 9 %	(b) 8 %
	4249	4273
$V_{\text{sup},l}$ 1-6	(b) 9 %	(b) 9 %
	4172	4193
$V_{\text{sup},l}$ 1-7	(b) 10 %	(b) 10 %
	4439	4266
$V_{\text{sup},l}$	(b) 10 %	(b) 10 %
	4241	4273
$V_{\text{lon},l}$	(b) 9 %	(b) 9 %

Leyenda: Letras iguales indican grupos homogéneos para la columna (sin diferencias estadísticamente significativas al nivel de confianza del 95 %). $V_{\text{sup},l}$ 1-2: velocidad superficial incluyendo un *finger-joint*; $V_{\text{sup},l}$ 1-3: velocidad superficial incluyendo dos *finger-joint*; $V_{\text{sup},l}$ 1-4: velocidad superficial incluyendo tres *finger-joint*; $V_{\text{sup},l}$ 1-5: velocidad superficial incluyendo cuatro *finger-joint*; $V_{\text{sup},l}$ 1-6: velocidad superficial incluyendo cinco *finger-joint*; $V_{\text{sup},l}$ 1-7: velocidad superficial incluyendo seis *finger-joint*; $V_{\text{sup},l}$: velocidad superficial de la lámina; $V_{\text{lon},l}$: velocidad longitudinal de la lámina.

Se realizaron mediciones superficiales con las técnicas de ultrasonidos y ondas de impacto en cada una de las uniones de manera individual. Los valores promedio obtenidos en estas mediciones localizadas fueron de 5183 m s^{-1} para ultrasonidos y de 3783 m s^{-1} para ondas de impacto. Estos resultados son del mismo orden de magnitud que los obtenidos para el primer tramo de medición (1-2) en las mediciones superficiales progresivas (Tabla 87). Esta correspondencia verifica la hipótesis anterior: la medición de la velocidad se ve afectada significativamente por la reducida distancia recorrida por la onda (300 mm), así como por los efectos locales provocados por la presencia de la unión y del adhesivo, como ya se detalló.

Aunque se realizaron mediciones superficiales individuales de cada *finger-joint* (tramos de 300 mm) para todos los grupos, el análisis de estos datos se ha desestimado. Como se ha demostrado, los resultados en tramos de 300 mm no son fiables (debido al fenómeno de

polarización y a una relación L/λ insuficiente). La metodología original planteaba usar marcadores circulares entre cada unión *finger-joint* para comparar las mediciones individuales entre técnicas (acústicas vs. DIC). Al descartar los datos de las mediciones acústicas para los *finger-joint*, la comparación entre técnicas en este punto ya no es viable.

A continuación, se evalúa la influencia del tramo de medición (distancia entre marcadores) en el resultado del Módulo de Elasticidad de la lámina (MOE_l) calculado a partir del ensayo de tracción. El objetivo es detectar si las uniones dentadas o las características de la madera en cada tramo afectan al valor final. Para ello, se calcula el MOE_l a partir de las deformaciones unitarias en los siguientes tramos acumulativos: Marcador 1-Marcador 2; Marcador 1-Marcador 3; Marcador 1-Marcador 4; Marcador 1-Marcador 5. A partir de este análisis se observó que los valores de MOE_l en las mediciones progresivas son estadísticamente equivalentes entre sí y, a su vez, equivalentes al módulo de elasticidad de la lámina completa (Figura 67). Este resultado indica que, para este grupo de material, el tramo de medición no afecta al resultado del MOE_l , independientemente del número de uniones *finger-joint* incluidas en él. Al comparar las técnicas aplicadas, se observa un comportamiento análogo al obtenido con los métodos de propagación de ondas. A excepción del primer tramo, donde las mediciones no fueron válidas, las velocidades en las secciones restantes resultaron estadísticamente equivalentes (Tabla 87).

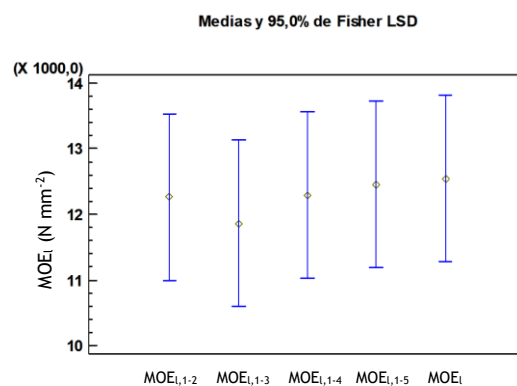


Figura 67. Valores medios ($N\ mm^{-2}$) y desviación estándar para los módulos de elasticidad calculados con DIC en los distintos tramos: $MOE_{l,1-2}$: módulo de elasticidad obtenido entre el marcador 1 y 2; $MOE_{l,1-3}$: módulo de elasticidad obtenido entre el marcador 1 y 3; $MOE_{l,1-4}$: módulo de elasticidad obtenido entre el marcador 1 y 4; $MOE_{l,1-5}$: módulo de elasticidad obtenido entre el marcador 1 y 5; MOE_l : módulo de elasticidad obtenido entre el marcador 1 y 6, que se corresponde con el módulo de elasticidad adoptado para la lámina.

En contraste con lo observado en esta investigación, Biechele et al. (2011) hallaron una disminución de la rigidez al aumentar el número de uniones dentadas en la probeta. Sin embargo, debe considerarse que en el estudio citado se reutilizaron piezas cortas sin un proceso previo de eliminación de defectos; por tanto, la presencia de nudos y otras singularidades pudo haber afectado negativamente a los resultados. Por el contrario, en la presente tesis se controló estrictamente esta variable: las tablas del Grupo 1 fueron seleccionadas por estar libres de defectos, mientras que las de los Grupos 2 y 3 fueron sometidas a un proceso de saneado previo a la fabricación de la lámina. Adicionalmente, cabe mencionar que dichos autores también atribuyeron la pérdida de rigidez a una calidad deficiente en el encolado.

5.4.2 Estimación de la rigidez en láminas fabricadas con material de densidades variables (Grupo 2)

En el análisis del segundo grupo, formado por láminas constituidas por tablas de densidades variables, se estableció un valor de referencia para el parámetro de velocidad en la lámina para compararlo con la velocidad obtenida de manera directa ($V_{dir,l}$). Para ello, se calculó una velocidad estimada de la lámina ($V_{est,l}$). Esta velocidad se determinó mediante la media armónica ponderada de las velocidades de las tablas de origen, ajustada según su longitud en la lámina final (Ecuación 33).

$$V_{est,l} = \frac{\sum_i^n L_i}{\sum_i^n \frac{L_i}{v_i}} \quad \text{Ecuación 33}$$

Siendo

L_i longitud de la tabla formando parte de la lámina final;

v_i velocidad de la tabla.

Al comparar esta velocidad estimada ($V_{est,l}$) con la velocidad medida de manera directa en la lámina ($V_{dir,l}$), no se encontraron diferencias estadísticamente significativas, salvo con la técnica de ultrasonidos (USLab). Este hallazgo sugiere que las mediciones con el USLab se ven más afectadas por la presencia del *finger-joint* en el material heterogéneo de este segundo grupo (Tabla 88).

Tabla 88. Valores medios ($m s^{-1}$) y coeficientes de variación (%) para la velocidad obtenida de manera estimada ($V_{est,l}$) y a partir de la medición directa sobre las láminas ($V_{dir,l}$) del Grupo 2, para las tres técnicas acústicas aplicadas.

	Ultrasonidos (USLab)	Ondas de impacto (MST)	Vibración (MTG)
$V_{est,l}$	4238	4231	4095
	(a)	(a)	(a)
	7 %	7 %	9 %
$V_{dir,l}$	4532	4371	4153
	(b)	(a)	(a)
	6 %	5 %	8 %

Leyenda: Letras iguales indican grupos homogéneos para la columna (sin diferencias estadísticamente significativas al nivel de confianza del 95 %).

A pesar de que la técnica de ultrasonidos presentó diferencias significativas entre la velocidad estimada ($V_{est,l}$) y la directa ($V_{dir,l}$), se obtuvo una alta correlación entre ambos parámetros. De hecho, la velocidad estimada calculada con la técnica de ultrasonidos ($V_{est,l,USLab}$) logró explicar casi el 90 % de la variabilidad observada en la velocidad medida directamente sobre la lámina ($V_{dir,l,USLab}$) (Tabla 89).

Tabla 89. Correlación y regresión entre las variables velocidad estimada ($V_{est,i}$) y velocidad directa ($V_{dir,i}$), obtenidas con las tres técnicas acústicas aplicadas para el material perteneciente al Grupo 2.

Técnica	R	R ²	p-valor	Error (m s ⁻¹)	Modelo
Ultrasonidos (USLab)	0,95	89,46	0,0000	87,30	$V_{dir,i,USLab} = -24547 + 3482,61 \cdot \ln(V_{est,i,USLab})$
Ondas de impacto (MST)	0,96	92,65	0,0000	65,30	$V_{dir,i,MST} = -20233,3 + 2947,44 \cdot \ln(V_{est,i,MST})$
Vibración (MTG)	0,87	76,46	0,0009	162,72	$V_{dir,i,MTG} = -22288,9 + 3180,39 \cdot \ln(V_{est,i,MTG})$

Leyenda: $V_{dir,i}$: velocidad obtenida a partir de la medición directa sobre la lámina (m s⁻¹); $V_{est,i}$: velocidad estimada de la lámina (m s⁻¹).

Dado que este grupo incluye tablas con densidades variables, el análisis se extendió a los coeficientes de rigidez, ya que estos incorporan la densidad en su determinación. Siguiendo la misma metodología que con la velocidad, se llevó a cabo una comparación entre los coeficientes de rigidez estimados ($C_{LL,est,i}$), calculados también mediante una media armónica ponderada de los C_{LL} de las tablas de origen, y el coeficiente de rigidez obtenido a partir de la velocidad directa en la lámina ($C_{LL,dir,i}$). Los resultados fueron coincidentes con los de la velocidad: de nuevo, la única técnica que mostró diferencias estadísticamente significativas entre los parámetros estimados y los directos fue la de ultrasonidos (Tabla 90). Para este segundo grupo, el coeficiente de rigidez obtenido a partir de la media armónica ponderada de los C_{LL} de las tablas ($C_{LL,est,i}$) explica hasta un 98,13 % de la variabilidad del C_{LL} obtenido de manera directa en la lámina ($C_{LL,dir,i}$) (Tabla 91).

Tabla 90. Valores medios (N mm⁻²) y coeficientes de variación (%) para los coeficientes de rigidez obtenidos de manera estimada ($C_{LL,est,i}$) y a partir de la medición directa sobre las láminas ($C_{LL,dir,i}$) del Grupo 2, para las tres técnicas acústicas aplicadas.

	Ultrasonidos (USLab)	Ondas de impacto (MST)	Vibración (MTG)
$C_{LL,est,i}$	14306 (a) 14 %	14413 (a) 15 %	13513 (a) 17 %
$C_{LL,dir,i}$	16280 (b) 10 %	15237 (a) 8 %	13822 (a) 11 %

Leyenda: Letras iguales indican grupos homogéneos para la columna (sin diferencias estadísticamente significativas al nivel de confianza del 95 %).

Tabla 91. Correlación y regresión entre las variables coeficiente de rigidez obtenido de manera estimada ($C_{LL,est,l}$) y coeficiente de rigidez a partir de la medición directa sobre las láminas ($C_{LL,dir,l}$) del Grupo 2, para las tres técnicas acústicas aplicadas.

Técnica	R	R ²	p-valor	Error (N mm ⁻²)	Modelo
Ultrasonidos (USLab)	0,99	98,13	0,0000	0,01	$C_{LL,dir,l,USLab} = \exp(9,36 + 1,58E-09 * C_{LL,est,l,USLab}^2)$
Ondas de impacto (MST)	0,97	94,13	0,0003	339,02	$C_{LL,dir,l,MST} = 11109 + 1,92E-05 * C_{LL,est,l,MST}^2$
Vibración (MTG)	0,86	73,26	0,0140	0,06	$C_{LL,dir,l,MTG} = \exp(9,27 + 1,39E-09 * C_{LL,est,l,MTG}^2)$

Leyenda: $C_{LL,dir,l}$: coeficiente de rigidez obtenido a partir de la velocidad directa en la lámina (N mm⁻²); $C_{LL,est,l}$: coeficiente de rigidez estimado de la lámina (N mm⁻²).

Al comparar la rigidez calculada a partir del ensayo de tracción con el método DIC (MOE_l) y la rigidez calculada de manera directa con las demás técnicas ($C_{LL,dir,l}$), se verificó que solo la técnica de vibración (MTG) presentó un valor promedio estadísticamente equivalente (Tabla 92). Por el contrario, las técnicas de ultrasonidos y ondas de impacto, ambas basadas en el tiempo de vuelo (ToF), mostraron valores de $C_{LL,dir,l}$ significativamente mayores. Este comportamiento es acorde con lo reportado por otros autores (Haines et al., 1996; Osuna et al., 2020) y se atribuye a que las mediciones ToF son más sensibles a las heterogeneidades locales. Dicha sensibilidad podría verse acentuada en este segundo grupo de material, precisamente por tratarse de láminas fabricadas a partir de tablas diferentes.

Tabla 92. Valores medios (N mm⁻²) y coeficientes de variación (%) de los coeficientes de rigidez ($C_{LL,dir,l}$) y módulo de elasticidad (MOE_l), obtenidos en las láminas del Grupo 2, con las cuatro técnicas utilizadas.

Técnica	$C_{LL,dir,l} / MOE_l$ (N mm ⁻²)
Ultrasonidos (USLab)	16280
	(a)
	10 %
Ondas de impacto (MST)	15237
	(ab)
	8 %
Vibración (MTG)	13822
	(bc)
	11 %
DIC (Aramis 3D)	13046
	(c)
	18 %

Leyenda: Letras iguales indican grupos homogéneos (sin diferencias estadísticamente significativas al nivel de confianza del 95 %).

Aunque los valores de $C_{LL,dir,l}$ de las técnicas ToF no fueran estadísticamente equivalentes al MOE_l, todas las técnicas presentaron correlaciones estadísticamente significativas con él. En este sentido, la técnica de ondas de impacto (MST) demostró ser la que mejor explicaba la variabilidad del MOE_l, alcanzando un 75,4 % solo con la velocidad ($V_{dir,l,MST}$) y un 84,2 % al

usar el coeficiente de rigidez ($C_{LL,dir,l,MST}$) (Tabla 93). Cabe destacar que la técnica de vibración (MTG), pese a ser la única en obtener valores promedio equivalentes a la técnica DIC, fue la que presentó el coeficiente de correlación más bajo de todos los analizados (Tabla 93).

Tabla 93. Modelos de predicción del módulo de elasticidad de las láminas ensayadas a tracción paralela a la fibra con DIC (MOE_l), a partir de la velocidad y del coeficiente de rigidez obtenidos de mediciones directas en las láminas ($V_{dir,l}$ y $C_{LL,dir,l}$) con técnicas acústicas, para el Grupo 2.

Técnica	VI	R	R ²	p-valor	Error (N mm ⁻²)	Modelo
Ultrasonidos (USLab)	$V_{dir,l}$	0,84	70,50	0,0181	7,89E-06	$MOE_l = 1/(-1,39E-04 + 0,99/V_{dir,l,USLab})$
	$C_{LL,dir,l}$	0,86	74,63	0,0122	7,32E-06	$MOE_l = 1/(-4,38E-05 + 1,98/C_{LL,dir,l,USLab})$
Ondas de impacto (MST)	$V_{dir,l}$	0,87	75,37	0,0113	7,21E-06	$MOE_l = 1/(-1,72E-04 + 1,10/V_{dir,l,MST})$
	$C_{LL,dir,l}$	-0,92	84,24	0,0036	5,77E-06	$MOE_l = 1/(2,24E-04 - 9,53E-09 * C_{LL,dir,l,MST})$
Vibración (MTG)	$V_{dir,l}$	0,75	56,53	0,0513	9,58E-06	$MOE_l = 1/(-1,02 E-04 + 0,75/V_{dir,l,MTG})$
	$C_{LL,dir,l}$	0,77	59,78	0,0415	9,22E-06	$MOE_l = 1/(-2,28E-05 + 1,39/C_{LL,dir,l,MTG})$

Legenda: VI: variable independiente. MOE_l : módulo de elasticidad obtenido en ensayos de tracción de las láminas con la técnica DIC (N mm⁻²); $V_{dir,l}$: velocidad obtenida a partir de la medición directa sobre la lámina (m s⁻¹); $C_{LL,dir,l}$: coeficiente de rigidez obtenido a partir de la velocidad directa en la lámina (N mm⁻²).

La Tabla 94 recoge los modelos de regresión obtenidos para la estimación del módulo de elasticidad de la lámina a partir de las variables velocidad estimada ($V_{est,l}$) y coeficiente de rigidez estimado ($C_{LL,est,l}$) de las tablas. Los resultados muestran que, para los tres equipos, se obtienen coeficientes de determinación en torno al 70 % al utilizar el coeficiente de rigidez estimado ($C_{LL,est,l}$). Como cabía esperar, estos valores son algo inferiores a los obtenidos en los modelos que incorporan la medición directa sobre la lámina ($C_{LL,dir,l}$), detallados en la Tabla 93.

Tabla 94. Modelos de predicción del módulo de elasticidad de las láminas ensayadas a tracción paralela a la fibra con DIC (MOE_i), a partir de la velocidad y del coeficiente de rigidez obtenidos de manera estimada en las láminas ($V_{est,i}$ y $C_{LL,est,i}$) con técnicas acústicas, para el Grupo 2.

Técnica	VI	R	R ²	p-valor	Error (N mm ⁻²)	Modelo
Ultrasonidos (USLab)	$V_{est,i}$	-	-	0,0533	-	-
	$C_{LL,est,i}$	-0,83	69,01	0,0206	8,09E-06	$MOE_i = 1 / (1,56E-04 - 5,39E-09 * C_{LL,est,i,USLab})$
Ondas de impacto (MST)	$V_{est,i}$	0,76	57,34	0,0487	9,49E-06	$MOE_i = 1 / (-5,31E-05 + 0,558 / V_{est,i,MST})$
	$C_{LL,est,i}$	-0,83	68,77	0,0210	8,12E-06	$MOE_i = 1 / (1,52E-04 - 5,03E-09 * C_{LL,est,i,MST})$
Vibración (MTG)	$V_{est,i}$	-0,77	59,38	0,0426	9,26E-06	$MOE_i = 1 / (1,37E-04 - 3,42E-12 * V_{est,i,MTG}^2)$
	$C_{LL,est,i}$	0,84	70,91	0,0175	6,02E+00	$MOE_i = (88,47 + 1,34E-07 * C_{LL,est,i,MTG}^2)^{-2}$

Leyenda: VI: variable independiente. MOE_i : módulo de elasticidad obtenido en ensayos de tracción de las láminas con la técnica DIC (N mm⁻²); $V_{est,i}$: velocidad estimada de la lámina (m s⁻¹); $C_{LL,est,i}$: coeficiente de rigidez estimado de la lámina (N mm⁻²).

En este segundo bloque de material, se repitió el análisis de mediciones progresivas con DIC. Los resultados indicaron que, aunque el MOE aumentó ligeramente del primer tramo (1-2) al segundo (1-3), no se encontraron diferencias estadísticamente significativas ni entre los distintos tramos ni con el módulo de la lámina completa (Figura 68).

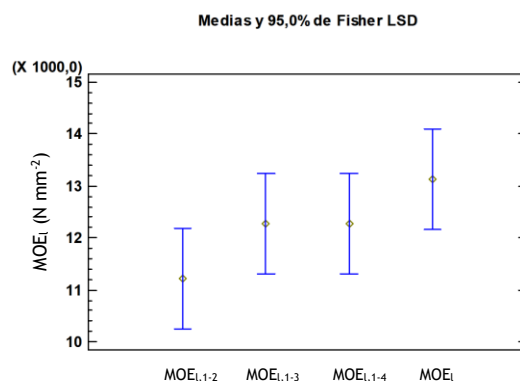


Figura 68. Valores medios (N mm⁻²) y desviación estándar para los módulos de elasticidad calculados con DIC en los distintos tramos: $MOE_{i,1-2}$: módulo de elasticidad obtenido entre el marcador 1 y 2; $MOE_{i,1-3}$: módulo de elasticidad obtenido entre el marcador 1 y 3; $MOE_{i,1-4}$: módulo de elasticidad obtenido entre el marcador 1 y 4; MOE_i : módulo de elasticidad obtenido entre el marcador 1 y 5, que se corresponde con el módulo de elasticidad adoptado para la lámina.

5.4.3 Estimación de la rigidez en láminas fabricadas con material de velocidades variables (Grupo 3)

Para el análisis del tercer grupo, compuesto por láminas fabricadas con material de velocidades variables, se aplicó la misma metodología que en el grupo anterior. Se utilizó la media armónica ponderada para calcular los valores estimados de velocidad ($V_{est,i}$) y de coeficiente de rigidez ($C_{LL,est,i}$) de las láminas a partir de los datos disponibles para cada tabla individual.

El primer análisis, centrado en la velocidad, mostró un resultado homogéneo: para todas las técnicas aplicadas, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas (con un nivel de confianza del 95 %) entre los valores medios de la velocidad estimada ($V_{est,l}$) y la velocidad obtenida mediante medición directa sobre la lámina ($V_{dir,l}$) (Tabla 95). Sin embargo, a pesar de que la comparación de medias evidenció que los grupos eran estadísticamente iguales, la regresión simple no mostró ninguna asociación significativa entre las variables (p -valor $> 0,05$), indicando una ausencia de correlación (Tabla 96). Estadísticamente, este comportamiento puede ocurrir porque la variabilidad entre los grupos es demasiado baja para definir un modelo de correlación (lo que resulta en una nube de puntos o una recta casi paralela) o porque los pares de datos no se corresponden entre sí, aunque sus promedios coincidan.

Tabla 95. Valores medios ($m s^{-1}$) y coeficientes de variación (%) para la velocidad obtenida de manera estimada ($V_{est,l}$) y a partir de la medición directa sobre las láminas ($V_{dir,l}$) del Grupo 3, para las tres técnicas acústicas aplicadas.

	Ultrasonidos (USLab)	Ondas de impacto (MST)	Vibración (MTG)
$V_{est,l}$	4339	4353	4234
	(a)	(a)	(a)
	6 %	6 %	2 %
$V_{dir,l}$	4369	4238	4004
	(a)	(a)	(a)
	3 %	2 %	5 %

Leyenda: Letras iguales indican grupos homogéneos para la columna (sin diferencias estadísticamente significativas al nivel de confianza del 95 %).

Tabla 96. Correlación y regresión entre las variables velocidad estimada ($V_{est,l}$) y velocidad directa ($V_{dir,l}$), obtenidas con las tres técnicas acústicas aplicadas para el material perteneciente al Grupo 3.

Técnica	R	R ²	p -valor	Error ($m s^{-1}$)	Modelo
Ultrasonidos (USLab)	-	-	0,7677	-	-
Ondas de impacto (MST)	-	-	0,5110	-	-
Vibración (MTG)	-	-	0,1351	-	-

Al comparar los valores promedio de los coeficientes de rigidez directos ($C_{LL,dir,l}$) de las técnicas acústicas con el módulo de elasticidad obtenido por DIC (MOE_i), los resultados fueron similares a los del Grupo 2. Solamente se obtuvo una equivalencia estadística en el caso de la técnica de vibración (equipo MTG) (Tabla 97), y el orden de magnitud de los coeficientes de rigidez conservó el mismo comportamiento que en el grupo anterior.

Tabla 97. Valores medios ($N\ mm^{-2}$) y coeficientes de variación (%) de los coeficientes de rigidez ($C_{LL,dir,l}$) y módulo de elasticidad (MOE_l), obtenidos en las láminas del Grupo 3, con las cuatro técnicas utilizadas.

Técnica	$C_{LL,dir,l} / MOE_l$ ($N\ mm^{-2}$)
Ultrasonidos (USLab)	15283
	(a)
	1 %
Ondas de impacto (MST)	14509
	(ab)
	10 %
Vibración (MTG)	13245
	(bc)
	13 %
DIC (Aramis 3D)	12024
	(c)
	12 %

Leyenda: Letras iguales indican grupos homogéneos (sin diferencias estadísticamente significativas al nivel de confianza del 95 %).

Aunque los valores de $C_{LL,dir,l}$ obtenidos por ultrasonidos y ondas de impacto no fueron estadísticamente equivalentes a los del DIC, ambos presentaron correlaciones estadísticamente significativas con el MOE_l . De hecho, el equipo USLab (ultrasonidos) resultó ser el que mejor explicaba la variabilidad del MOE_l , alcanzando un 65 % solo con la velocidad ($V_{dir,l,USLab}$) y un 96 % con el coeficiente de rigidez ($C_{LL,dir,l,USLab}$) (Tabla 98). En contraste, la técnica de vibración (MTG), pese a ser la única con equivalencia estadística en el valor promedio, presentó el coeficiente de correlación más bajo de todas las técnicas (78,56 %) al analizar la variable $C_{LL,dir,l}$.

Tabla 98. Modelos de predicción del módulo de elasticidad de las láminas ensayadas a tracción paralela a la fibra con DIC (MOE_l), a partir de la velocidad y del coeficiente de rigidez obtenidos de mediciones directas en las láminas ($V_{dir,l}$ y $C_{LL,dir,l}$) con técnicas acústicas, para el Grupo 3.

Técnica	VI	R	R ²	p-valor	Error ($N\ mm^{-2}$)	Modelo
Ultrasonidos (USLab)	$V_{dir,l}$	-0,81	65,14	0,0154	5,96E-06	$MOE_l = 1 / (2,27E-04 - 7,54E-12 * V_{dir,l,USLab}^2)$
	$C_{LL,dir,l}$	0,98	95,88	0,0000	0,025	$MOE_l = \exp(8,86 + 2,25E-09 * C_{LL,dir,l,USLab}^2)$
Ondas de impacto (MST)	$V_{dir,l}$	-	-	0,0861	-	-
	$C_{LL,dir,l}$	0,95	90,62	0,0003	0,038	$MOE_l = \exp(8,80 + 2,79E-09 * C_{LL,dir,l,MST}^2)$
Vibración (MTG)	$V_{dir,l}$	-	-	0,0599	-	-
	$C_{LL,dir,l}$	0,88	78,56	0,0034	729,82	$MOE_l = -75275,6 + 9206,76 * \ln(C_{LL,dir,l,MTG})$

Leyenda: VI: variable independiente. MOE_l : módulo de elasticidad obtenido en ensayos de tracción de las láminas con la técnica DIC ($N\ mm^{-2}$); $V_{dir,l}$: velocidad obtenida a partir de la medición directa sobre la lámina ($m\ s^{-1}$); $C_{LL,dir,l}$: coeficiente de rigidez obtenido a partir de la velocidad directa en la lámina ($N\ mm^{-2}$).

En el caso de este tercer grupo, que se caracteriza por láminas formadas por tablas con velocidades diferentes, no fue posible obtener ningún modelo de regresión que explicara la variabilidad del módulo de elasticidad obtenido en ensayo de tracción en la lámina (MOE_l), a partir de la velocidad o del coeficiente de rigidez estimados de las tablas ($V_{est,l}$ y $C_{LL,est,l}$) (Tabla 99). Esto se explica por la ausencia de correlación entre los parámetros de velocidad estimada y velocidad directa (Tabla 96), presentada anteriormente.

Tabla 99. Modelos de predicción del módulo de elasticidad de las láminas ensayadas a tracción paralela a la fibra con DIC (MOE_l), a partir de la velocidad y del coeficiente de rigidez obtenidos de manera estimada en las láminas ($V_{est,l}$ y $C_{LL,est,l}$) con técnicas acústicas, para el Grupo 3.

Técnica	VI	R	R ²	p-valor	Error (N mm ⁻²)	Modelo
Ultrasonidos (USLab)	$V_{est,l}$	-	-	0,6687	-	-
	$C_{LL,est,l}$	-	-	0,3989	-	-
Ondas de impacto (MST)	$V_{est,l}$	-	-	0,6310	-	-
	$C_{LL,est,l}$	-	-	0,4446	-	-
Vibración (MTG)	$V_{est,l}$	-	-	0,4839	-	-
	$C_{LL,est,l}$	-	-	0,6394	-	-

Leyenda: VI: variable independiente.

Corroborando la tendencia de los grupos anteriores, el análisis de mediciones progresivas en este último bloque tampoco mostró diferencias estadísticamente significativas entre los módulos de elasticidad calculados, independientemente del tramo considerado (Figura 69). En contraste, autores como Vafadar et al. (2024) han reportado que la unión mediante empalmes dentados de tablas con diferencias notables de rigidez puede inducir fluctuaciones significativas en las deformaciones captadas por DIC. No obstante, cabe señalar que la variación en los valores de rigidez en dicho estudio era considerablemente mayor a la registrada en la presente tesis doctoral.

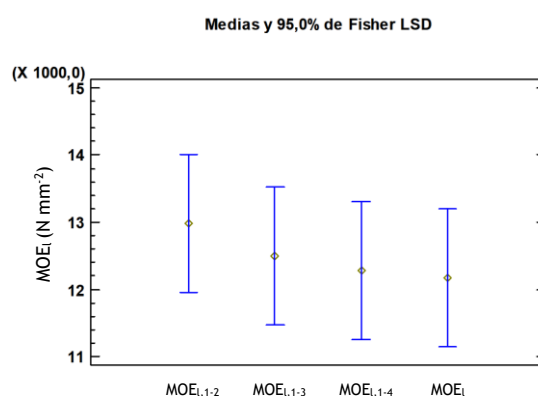


Figura 69. Valores medios (N mm⁻²) y desviación estándar para los módulos de elasticidad calculados con DIC en los distintos tramos: $MOE_{i,1-2}$: módulo de elasticidad obtenido entre el marcador 1 y 2; $MOE_{i,1-3}$: módulo de elasticidad obtenido entre el marcador 1 y 3; $MOE_{i,1-4}$: módulo de elasticidad obtenido entre el marcador 1 y 4; MOE_i : módulo de elasticidad obtenido entre el marcador 1 y 5, que se corresponde con el módulo de elasticidad adoptado para la lámina.

5.4.4 Análisis considerando los tres grupos de material

Al analizar el conjunto de resultados de los tres grupos que componen la muestra, se compararon las medias de los valores de rigidez de las láminas. El análisis verificó que, de las cuatro técnicas no destructivas aplicadas, solo la técnica de vibración ($C_{LL,dir,l,MTG}$) resultó estadísticamente equivalente a la técnica DIC (MOE_I). Este hallazgo es coherente y confirma lo observado de manera individual en los grupos 2 y 3 (Tabla 100).

Tabla 100. Valores medios ($N\ mm^{-2}$) y coeficientes de variación (%) de los coeficientes de rigidez ($C_{LL,dir,l}$) y módulo de elasticidad (MOE_I), obtenidos en las láminas considerando el conjunto de datos, con las cuatro técnicas utilizadas.

Técnica	$C_{LL,dir,l} / MOE_I$ ($N\ mm^{-2}$)
Ultrasonidos (USLab)	15919
	(a)
	16 %
Ondas de impacto (MST)	14952
	(a)
	15 %
Vibración (MTG)	13392
	(b)
	17 %
DIC (Aramis 3D)	12458
	(b)
	16 %

Leyenda: Letras iguales indican grupos homogéneos (sin diferencias estadísticamente significativas al nivel de confianza del 95 %).

Aunque los valores de $C_{LL,dir,l}$ obtenidos con las técnicas de ultrasonidos y ondas de impacto no fueron estadísticamente equivalentes a los del DIC (MOE_I), en ambos casos se observaron correlaciones estadísticamente significativas (Tabla 101). Los modelos de regresión indican que el $C_{LL,dir,l}$ derivado de estas técnicas explica aproximadamente el 80 % de la variabilidad del MOE_I (Tabla 101). Al igual que en el análisis por grupos, se confirma que los modelos que utilizan el C_{LL} (que incorpora la densidad) para predecir el MOE_I presentaron coeficientes de determinación (R^2) superiores a los que usan únicamente la velocidad.

Tabla 101. Modelos de predicción del módulo de elasticidad de las láminas ensayadas a tracción paralela a la fibra (MOE_l), obtenidos a partir de mediciones con las técnicas de ultrasonidos y ondas de impacto en las láminas con uniones dentadas ($C_{LL,dir,l}$), considerando el conjunto de resultados.

Técnica	VI	R	R ²	p-valor	Error (N mm ⁻²)	Modelo
Ultrasonidos (USLab)	$V_{dir,l}$	0,88	77,32	0,0000	6,43E-06	$MOE_l = 1/(-6,91E-05 + 0,669/V_{dir,l,USLab})$
	$C_{LL,dir,l}$	0,90	80,98	0,0000	5,89E-06	$MOE_l = 1/(1,23E-05 + 1,089/C_{LL,dir,l,USLab})$
Ondas de impacto (MST)	$V_{dir,l}$	0,87	75,25	0,0000	6,72E-06	$MOE_l = 1/(-8,056 E-05 + 0,699/V_{dir,l,MST})$
	$C_{LL,dir,l}$	0,89	80,75	0,0000	5,92E-06	$MOE_l = 1/(0,00000628383 + 1,117/C_{LL,dir,l,MST})$
Vibración (MTG)	$V_{dir,l}$	0,84	70,66	0,0000	7,31E-06	$MOE_l = 1/(-6,39E-05 + 0,594/V_{dir,l,MTG})$
	$C_{LL,dir,l}$	0,87	75,24	0,0000	6,72E-06	$MOE_l = 1/(1,35E-05 + 0,908/C_{LL,dir,l,MTG})$

Leyenda: VI: variable independiente. MOE_l : módulo de elasticidad obtenido en ensayos de tracción de las láminas con la técnica DIC (N mm⁻²); $V_{dir,l}$: velocidad obtenida a partir de la medición directa sobre la lámina (m s⁻¹); $C_{LL,dir,l}$: coeficiente de rigidez obtenido a partir de la velocidad directa en la lámina (N mm⁻²).

6 CONCLUSIONES

6.1 SOBRE LA EXACTITUD DE LAS TÉCNICAS EN LA CLASIFICACIÓN ESTRUCTURAL (DESDE EL ÁRBOL A LA TABLA)

En cuanto a la inspección visual, la aplicación de las normativas evaluadas (UNE y NF) resultó excesivamente conservadora para el *Quercus robur* gallego, generando tasas de rechazo muy elevadas (entre el 60 % y el 77 %) debido fundamentalmente a nudos y deformaciones. Se ha demostrado que gran parte del material rechazado visualmente posee, en realidad, propiedades mecánicas aptas para la clase resistente D18. Esto evidencia la urgencia de desarrollar criterios de calidad a nivel nacional, adaptados a las singularidades de esta especie para evitar la infravaloración del recurso.

Por otro lado, la predicción mediante técnicas acústicas reveló que la medición aislada de la velocidad de propagación de la onda es insuficiente en las etapas tempranas (árbol y troza) o en la tabla saturada. Sin embargo, la capacidad predictiva aumenta al integrar variables adicionales. En el árbol en pie, la combinación de la velocidad de la onda con el parámetro de esbeltez de la copa y la densidad verde permitió estimar el MOR y el MOE de las tablas basales con una elevada precisión (R^2 superior al 94 % para la técnica de ondas de impacto). El uso de estos modelos, generados a partir de la troza basal, permite equiparar la clasificación resultante a la obtenida mediante los ensayos de flexión estática para el conjunto de la muestra. Este hallazgo valida la viabilidad de clasificar la madera con alta fiabilidad desde el árbol en pie, empleando métodos basados en el tiempo de vuelo (ultrasonidos y ondas de impacto).

6.2 SOBRE LA CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES ELÁSTICAS Y COEFICIENTES DE POISSON

Se validó la viabilidad técnica de caracterizar el comportamiento elástico completo de la madera de *Quercus robur* de origen gallego mediante ultrasonidos. Los coeficientes de la matriz de rigidez, determinados en probetas poliédricas, presentaron una elevada concordancia con los valores de referencia bibliográficos.

Asimismo, a pesar de la complejidad teórica inherente, se encontró una correlación significativa (R^2 del 71 %) entre el coeficiente de Poisson (ν_{LR}) y la rigidez medida en testigos cilíndricos extraídos mediante barrena de incremento. Este hallazgo abre una nueva vía para la evaluación no destructiva de propiedades elásticas desde la etapa forestal, lo que permite obtener parámetros clave sin necesidad de abatir el árbol y potencia la precisión de los modelos de estimación mecánica.

6.3 SOBRE LA INFLUENCIA DE FACTORES CLIMÁTICOS EN LA MEDICIÓN DEL ÁRBOL EN PIE

Los resultados obtenidos demostraron que las fluctuaciones diarias o estacionales de temperatura, humedad relativa y viento no generaron diferencias estadísticamente significativas en la velocidad de propagación de ondas, ya sea mediante ultrasonidos u ondas de impacto. En términos prácticos, esto implica que la clasificación estructural realizada sobre el árbol en pie

es robusta y fiable en cualquier época del año o momento del día, lo que elimina la necesidad de aplicar factores de corrección climáticos.

6.4 SOBRE LA EVALUACIÓN DE PRODUCTOS DE MADERA TÉCNICA (LÁMINAS CON *FINGER-JOINT*)

En el análisis de láminas con uniones dentadas, todas las técnicas acústicas evaluadas (ultrasonidos, ondas de impacto y vibración) ofrecieron una precisión elevada para clasificar la rigidez.

Específicamente, para láminas fabricadas a partir de material homogéneo, la medición simple de la velocidad es un predictor suficientemente robusto ($R^2 \approx 99\%$), lo que simplifica el proceso industrial al no requerir el cálculo de la densidad. Sin embargo, en el caso de láminas con material heterogéneo (densidades o velocidades variables), se confirma que el parámetro de C_{LL} es un mejor predictor, al explicar entre el 60 % y el 96 % de la variabilidad del MOE determinado con la técnica DIC.

Por otro lado, al evaluar la capacidad predictiva de los modelos basados en las tablas de origen, los resultados mostraron comportamientos diferenciados. En las láminas con densidad variable, el uso del C_{LL} estimado, calculado a partir de las tablas de origen, logró explicar alrededor del 70 % de la variabilidad del MOE de la lámina, para las tres técnicas acústicas (ultrasonidos, ondas de impacto y vibración). Esto demuestra la posibilidad de estimar la rigidez de la lámina a partir de la preclasificación de las tablas individuales. No obstante, cabe advertir que la medición directa sobre el producto final siempre permitirá la identificación de encolados defectuosos. Por el contrario, en láminas que presentan heterogeneidad de rigidez, no fue posible obtener modelos de regresión significativos a partir de las tablas de origen, para ninguna de las técnicas aplicadas. Esto indica que la mezcla de piezas de alta y baja rigidez en una misma lámina genera un comportamiento final impredecible mediante modelos basados en medias ponderadas de las tablas originales.

6.5 CONCLUSIÓN GENERAL

Como síntesis global de la tesis, se concluye que las técnicas no destructivas (TND) constituyen una metodología precisa y aplicable para la valorización estructural del *Quercus robur* de Galicia, siempre que se seleccionen las variables adecuadas para cada fase de la cadena productiva.

La investigación confirma la hipótesis planteada: es posible estimar las propiedades mecánicas desde el árbol en pie hasta productos de madera técnica con la aplicación de TND. Mientras que los criterios de clasificación visual aplicados penalizan injustificadamente la madera analizada, la implementación de técnicas acústicas, especialmente cuando se combinan con datos dendrométricos y con la densidad, permite identificar correctamente las propiedades mecánicas del material. Esto proporciona una base tecnológica sólida para impulsar el uso de esta frondosa en aplicaciones estructurales de alto valor añadido, garantizando la fiabilidad exigida por la normativa de construcción.

7 LIMITACIONES Y OPORTUNIDADES

En este apartado se sintetizan las principales limitaciones metodológicas y técnicas identificadas, así como las oportunidades que estas generan para el avance del conocimiento en la caracterización de la madera mediante técnicas no destructivas.

7.1 MARCO NORMATIVO Y ESTANDARIZACIÓN DE LAS TND

Una limitación relevante vinculada al Objetivo Específico 1 es la inexistencia de una norma europea que regule el uso de las técnicas de propagación de ondas de manera genérica, sin estar vinculada a un equipamiento específico. Ante este vacío normativo, la investigación recurrió a normativa extranjera desarrollada para la técnica de ultrasonidos en frondosas. Si bien esto representa un condicionante inicial, constituye una oportunidad estratégica: los resultados obtenidos demuestran la viabilidad de estas técnicas en diversas fases del procesamiento y aportan evidencia científica de base que puede servir de referencia para futuros procesos de normalización en la Unión Europea. Asimismo, este trabajo sienta un precedente para dotar al sector de herramientas de clasificación basadas en la propagación de ondas de aplicación más ágil y accesible, aplicables desde el árbol en pie independientemente de la técnica aplicada.

7.2 CARACTERIZACIÓN DE COEFICIENTES DE POISSON Y DESAFÍOS EN *QUERCUS ROBUR*

En relación al Objetivo Específico 2, orientado a obtener los coeficientes de Poisson (LR y LT) desde el árbol en pie para perfeccionar los modelos de predicción mecánica, la principal limitación fue el tamaño de la muestra. La obtención de valores anómalos en los coeficientes de Poisson en algunas de las probetas de pequeño tamaño, limitó el volumen de datos disponibles, condicionando la obtención de modelos estadísticos concluyentes.

No obstante, esta dificultad técnica subraya la complejidad intrínseca del roble (*Quercus robur*) como material altamente anisótropo y heterogéneo. En este contexto, cualquier avance en su caracterización elástica representa un progreso significativo. La metodología propuesta abre una línea de investigación prometedora para desarrollar protocolos de ensayo robustos que integren variables elásticas complejas en la predicción de las propiedades mecánicas de esta especie.

7.3 FACTORES CLIMÁTICOS Y ROBUSTEZ EN LA CLASIFICACIÓN TEMPRANA

Respecto al Objetivo Específico 3, el análisis de la influencia climática en las mediciones acústicas en árboles en pie podría haberse fortalecido mediante la integración de medidores de flujo de savia. Esto habría permitido profundizar en la discusión teórica con resultados numéricos obtenidos de manera directa en la especie *Quercus robur* y no solo utilizando los conocimientos teóricos de fisiología vegetal.

A pesar de ello, la investigación posee una relevancia práctica fundamental: se ha demostrado que las variaciones climáticas diarias y estacionales no alteran significativamente la

clasificación final de la madera. Este hallazgo valida la robustez de las técnicas de propagación de ondas en condiciones de campo, un factor crítico para su implementación a escala industrial.

7.4 INNOVACIÓN EN UNIONES DENTADAS Y TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA

El uso de TND en láminas con *finger-joint* (Objetivo Específico 4) ha demostrado ser una herramienta de gran potencial. No se identificaron limitaciones que comprometan el análisis, salvo una precisión metodológica sobre la técnica de Correlación Digital de Imágenes (DIC): la configuración empleada registró la deformación en una sola cara de la probeta.

Aunque la literatura científica respalda el método DIC para determinar el módulo de elasticidad en madera, este estudio no contó con un ensayo estático de contraste en ambas caras. Esto se debe a que, en láminas con uniones dentadas, el ensayo de tracción convencional no es idóneo, ya que la medición de la deformación queda restringida a una zona local y no representa el comportamiento global del material.

Más allá del ámbito académico, la validación de estas técnicas permite a las industrias de primera y segunda transformación superar las limitaciones de los ensayos convencionales, mejorando su competitividad y facilitando la integración de la madera local en mercados de productos técnicos de alto valor añadido.

7.5 CONSIDERACIONES FINALES

Aunque los condicionantes metodológicos señalados han acotado ciertos análisis puntuales, el conjunto de la investigación aporta una visión integral de la aplicación de las TND en la madera de *Quercus robur* a lo largo de toda su cadena de transformación. Los hallazgos obtenidos no solo marcan el camino para futuras líneas académicas, sino que ofrecen soluciones técnicas listas para su transferencia, reforzando la competitividad y la sostenibilidad del sector forestal. En definitiva, esta investigación ratifica que la caracterización mediante técnicas no destructivas no es solo una alternativa viable, sino una necesidad para la modernización del sector. Superar los vacíos normativos y los desafíos técnicos de una especie como el *Quercus robur* permitirá transformar el recurso forestal del arco atlántico de una materia prima genérica en un activo tecnológico de alto valor añadido.

8 BIBLIOGRAFÍA

ABNT-NBR 15521:2007. Ensaïos não destrutivos - Classificação mecânica da madeira serrada de dicotiledôneas. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Aira, J. R., Arriaga, F., & Íñiguez, G. (2014). Determination of the elastic constants of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood by means of compression tests. *Biosystems Engineering*, 126, 12-22. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.07.008>

Allison, R. B., & Wang, X. (2015). Chapter 7: Nondestructive Testing in the Urban Forest. En R. J. Ross (Ed.), *Nondestructive evaluation of wood* (General Technical Report, FPL-GTR-238, pp. 77-86). USDA Forest Service, Forest Products Laboratory.

Amishev, D., & Murphy, G. E. (2008). In-forest assessment of veneer grade *Douglas-fir* logs based on acoustic measurement of wood stiffness. *Forest Products Journal*, 58(11), 42-47.

Angelidi, M., Vassilopoulos, A. P., & Keller, T. (2017). Displacement rate and structural effects on poisson ratio of a ductile structural adhesive in tension and compression. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 78, 13-22. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2017.06.008>

Arciniegas, A., Prieto, F., Brancheriau, L., & Lasaygues, P. (2014). Literature review of acoustic and ultrasonic tomography in standing trees. *Trees*, 28, 1559-1567. <https://doi.org/10.1007/s00468-014-1062-6>

Argüelles Álvarez, R., Arriaga Martitegui, F., Esteban Herrero, M., Íñiguez González, G., & Argüelles Bustillo, R. (2013). *Estructuras de madera: Bases de cálculo*. AITIM.

Arriaga, F., Esteban, M., & Relea, E. (2005). Evaluación de la capacidad portante de piezas de gruesa escuadría de madera de conifera en estructuras existentes (Evaluation of the bearing capacity of large cross-section coniferous timber in built-in structures). *Materiales de Construcción*, 55(280), 43-52. <https://doi.org/10.3989/mc.2005.v55.i280.205>

Arriaga, F., Esteban, M., Argüelles, R., Bobadilla, I., & Íñiguez, G. (2007). Efecto de las gemas en la resistencia a flexión de piezas enterizas de madera (The effect of waness on the bending strength of solid timber beams). *Materiales de Construcción*, 57(288), 61-76.

Arriaga, F., Montón, J., Segué, E., & Íñiguez, G. (2014). Determination of the mechanical properties of radiata pine timber by means of longitudinal and transverse vibration methods. *Holzforschung*, 68, 299-305. <https://doi.org/10.1515/hf-2013-0087>

Arriaga, F., Wang, X., Íñiguez-González, G., Llana, D. F., Esteban, M., & Niemz, P. (2023). Mechanical Properties of Wood: A Review. *Forests*, 14(6), 1202. <https://doi.org/10.3390/f14061202>

Assis, E. B., & Evangelista Junior, F. (2017). Development of Digital Image Correlation tool to determine displacements and strains in mechanical testing. En R. H. Lopez, L. F. F. Miguel, & P. O.

- Farias (Eds.), *CILAMCE 2017 Proceedings of the XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering* (1207). ABMEC. <https://doi.org/10.20906/cps/cilamce2017-1207>
- Auty, D., & Achim, A. (2008). The relationship between standing tree acoustic assessment and timber quality in Scots pine and the practical implications for assessing timber quality from naturally regenerated stands. *Forestry*, *81*, 475-487. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpn015>
- Avril, S., Bonnet, M., Bretelle, A., Hild, F., Ienny, P., Latourte, F., Lemosse, D., Pagano, S., Pagnacco, S., & Pierron, F. (2008). Overview of identification methods of mechanical parameters based on full-field measurements. *Experimental Mechanics*, *48*(4), 381-402. <https://doi.org/10.1007/s11340-008-9148-y>
- Ayarkwa, J., Hirashima, Y., Sasaki, Y., & Yamasaki, M. (2000). Influence of finger-joint geometry and end pressure on tensile properties of three finger-jointed Tropical African Hardwoods. *South African Forestry Journal*, *188*, 37-49. <https://doi.org/10.1080/10295925.2000.9631268>
- Azzi, Z., Al Sayegh, H., Metwally, O., & Eissa, M. (2025). Review of Nondestructive Testing (NDT) Techniques for Timber Structures. *Infrastructures*, *10*, 28. <https://doi.org/10.3390/infrastructures10020028>
- Bakalarz, M. M., & Tworzewski, P. P. (2023). Application of digital image correlation to evaluate strain, stiffness and ductility of full-scale LVL beams strengthened by CFRP. *Materials*, *16*(3), 1309. <https://doi.org/10.3390/ma16031309>
- Bartholomeu, A., Gonçalves, R., & Bucur, V. (2003). Dispersion of ultrasonic waves in Eucalyptus lumber as a function of the geometry of boards. *Scientia Forestalis*, *63*, 235-240.
- Basterra, L. A., Acuña, L., Casado, M., Ramón, G., & López, G. (2009). Diagnóstico y análisis de estructuras de madera mediante técnicas no destructivas: aplicación a la plaza mayor de Chinchón (Madrid). *Informes de la Construcción*, *61*(516), 21-36. <https://doi.org/10.3989/ic.09.016>
- Beall, F. C. (2001). Wood Products: Nondestructive Evaluation. En *Encyclopedia of Materials: Science and Technology* (2ª ed., pp. 9702-9707). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/01761-7>
- Bertoldo, C. (2014). Propriedades de resistência e de rigidez da madeira obtidas a partir da avaliação acústica na árvore (Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas).
- Bertoldo, C., & Gonçalves, R. (2015). Influence of measurement position, tree diameter, and bulk wood density on models that predict wave propagation velocity in logs according to the velocity in trees. *Forest Products Journal*, *65*(3-4), 166-172. <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-14-00012>
- Biechele, T., Chui, Y. H., & Gong, M. (2011). Comparison of NDE techniques for assessing mechanical properties of unjointed and finger-jointed lumber. *Holzforschung*, *65*(3), 397-401.
- Biernacki, J. M., & Beall, F. C. (1996). Acoustic monitoring of cold-setting adhesive curing in wood laminates. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, *16*(3), 165-172. [https://doi.org/10.1016/0143-7496\(95\)00041-0](https://doi.org/10.1016/0143-7496(95)00041-0)
- Blanchet, P., Cabral, M. R., Silva, J. V. F., García-Jaca, J., Ridley-Ellis, D., McGetrick, P. J., Nocetti, M., & Pommier, R. (2025). A decade review on hardwood composites and their research developments. *European Journal of Wood and Wood Products*, *83*(2), 65. <https://doi.org/10.1007/s00107-025-02216-0>

- Bockel, S., Mayer, I., Konnerth, J., Harling, S., Niemz, P., Swaboda, C., Beyer, M., Bieri, N., Weiland, G., & Pichelin, F. (2019). The role of Wood extractives in structural hardwood bonding and their influence on different adhesive systems. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, *91*, 43-53. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2019.03.001>
- Brancheriau, L., Ghodrati, A., Gallet, P., Thauhay, P., & Lasaygues, P. (2012). Application of ultrasonic tomography to characterize the mechanical state of standing trees (*Picea abies*). *Journal of Physics: Conference Series*, *353*(1), 1-13. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/353/1/012007>
- Brashaw, B. K., Bucur, V., Divos, F., Gonçalves, R., Lu, J., Meder, R., Pellerin, R. F., Potter, S., Ross, R. J., Wang, X., & Yin, Y. (2009). Nondestructive testing and evaluation of wood: A worldwide research update. *Forest Products Journal*, *59*(3), 7-14.
- Bruck, H. A., McNeill, S. R., Sutton, M. A., & Peters, W. H. I. (1989). Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction. *Experimental Mechanics*, *29*(3), 261-267. <https://doi.org/10.1007/BF02321405>
- Brunetti, M., Nocetti, M., Pizzo, B., Negro, F., Aminti, G., Burato, P., Cremonini, C., & Zanuttini, R. (2020). Comparison of different bonding parameters in the production of beech and combined beech-spruce CLT by standard and optimized tests methods. *Construction and Building Materials*, *265*, 120168. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120168>
- Bucur, V. (1984). Relationships between grain angle of wood specimens and ultrasonic velocity. *Catgut Acoustical Society Newsletter*, *41*, 30-35.
- Bucur, V. (2005). Ultrasonic techniques for non destructive testing of standing trees. *Ultrasonics*, *43*(4), 237-239. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2004.06.008>
- Bucur, V. (2006). *Acoustics of wood* (2^a ed.). Springer.
- Bucur, V. (2023). A Review on Acoustics of Wood as a Tool for Quality Assessment. *Forests*, *14*(8), 1545. <https://doi.org/10.3390/f14081545>
- Bucur, V. (2025). High-Power Ultrasound. En: *Acoustics of Wood*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-70209-3_22
- Bucur, V., & Archer, R. R. (1984). Elastic constants for wood by an ultrasonic method. *Wood Science and Technology*, *18*, 255-265. <https://doi.org/10.1007/BF00353361>
- Bucur, V., & Böhnke, I. (1994). Factors affecting ultrasonic measurements in solid Wood. *Ultrasonics*, *32*(5), 385-390. [https://doi.org/10.1016/0041-624X\(94\)90109-0](https://doi.org/10.1016/0041-624X(94)90109-0)
- Bucur, V., & Chivers, R. C. (1991). Acoustic properties and anisotropy of some Australian wood species. *Acoustica*, *75*(1), 69-74.
- Buras, A., Sass-Klaassen, U., Verbeek, I., & Copini, P. (2020). Provenance selection and site conditions determine growth performance of pedunculat oak. *Dendrochronologia*, *61*, 125705. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125705>
- Burmester, A. (1965). Relationship between sound velocity and the morphological, physical and mechanical properties of wood (Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und morphologischen, physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Holz). *Holz als Roh- und Werkstoff*, *23*(6), 227-236. <https://doi.org/10.1007/BF02611075>

- Buschalsky, A., Löning, S., Militz, H., & Koddenberg, T. (2022). Structural characterisation of the variable impregnation of poplar wood. *10th Hardwood Conference Proceedings 2022*, 28. <https://www.researchgate.net/publication/364348562>.
- Carter, P., Briggs, D., Ross, R. J., & Wang, X. (2005). Acoustic testing to enhance western forest values and meet customer wood quality needs. En *Productivity of Western Forests: A Forest Products Focus* (PNW-GTR-642, pp. 121-129). USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station.
- Catterou, T., Lecorgne, M., Brassy, J., Lanvin, J., & Legrand, G. (2022). Numerical modeling of hardwood Glued Laminated Timber. *10th Hardwood Conference Proceedings 2022*, 284.
- Chan, J. M., Walker, J. C., & Raymond, C. A. (2011). Effects of moisture content and temperature on acoustic velocity and dynamic MOE of radiata pine sapwood boards. *Wood Science and Technology*, 45(4), 609-626. <https://doi.org/10.1007/s00226-010-0350-6>
- Chauhan, S. S., & Walker, J. C. F. (2006). Variations in acoustic velocity and density with age, and their interrelationships in radiata pine. *Forest Ecology and Management*, 229, 388-394. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.04.019>
- Chen, Z. Q., Karlsson, B., Lundqvist, S. O., García Gil, M. R., Olsson, L., & Wu, H. X. (2015). Estimating solid wood properties using Pilodyn and acoustic velocity on standing trees of Norway spruce. *Annals of Forest Science*, 72(4), 499-508. <https://doi.org/10.1007/s13595-015-0458-9>
- Conde, M., Fernández-Golfín, J. I., & Hermoso, E. (2007). Mejora de la predicción de la resistencia y rigidez de la madera estructural con el método de ultrasonidos combinado con parámetros de clasificación visual. *Materiales de Construcción*, 57(288), 49-59.
- Corcuera, L., Camarero, J. J., & Gil-Pelegrín, E. (2004). Effects of a severe drought on *Quercus ilex* radial growth and xylem anatomy. *Trees*, 18(1), 83-92. <https://doi.org/10.1007/s00468-003-0284-9>
- Crespo, J., Aira, J., Vázquez, C., & Guaita, M. (2017). Comparative Analysis of the Elastic Constants Measured via Conventional, Ultrasound, and 3-D Digital Image Correlation Methods in *Eucalyptus globulus* Labill. *BioResources*, 12(2), 3728-3743. <https://doi.org/10.15376/biores.12.2.3728-3743>
- Cruz, H., Yeomans, D., Tsakanika, E., Macchioni, N., Jorissen, A., Touza, M., Mannucci M., & Lourenço, P. B. (2014). Guidelines for On-Site Assessment of Historic Timber Structures. *International Journal of Architectural Heritage*, 9(3), 277-289. <https://doi.org/10.1080/15583058.2013.774070>
- Cyriac S. Mvolo, Stewart, J. D., & Koubaa, A. (2022). Comparison between static modulus of elasticity, non-destructive testing moduli of elasticity and stress-wave speed in white spruce and lodgepole pine wood. *Wood Material Science & Engineering*, 17(5), 345-355. <https://doi.org/10.1080/17480272.2021.1871949>
- Dahl, K. B., & Malo, K. A. (2009). Planar strain measurements on wood specimens. *Experimental Mechanics*, 49(4), 575-586. <https://doi.org/10.1007/s11340-008-9162-0>
- De Schepper, V., Van Dusschoten, D., Copini, P., Jahnke, S., & Steppe, K. (2012). MRI links stem water content to stem diameter variations in transpiring trees. *Journal of Experimental Botany*, 63(7), 2645-2653. <https://doi.org/10.1093/jxb/err445>
- Dijk, V. R., Gonçalves, R., Soriano, J., & Bertoldo, C. (2013). Conversion mode of the ultrasound wave. En *18th Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium*.

- Dikrallah, A., Hakam, A., Kabouchi, B., Brancheriau, L., Baillères, H., Famiri, A., & Ziani, M. (2006). Experimental analysis of acoustic anisotropy of green wood by using guided waves. En *ESWM-COST Action E35* (pp. 149-154).
- Dill-Langer, G., Bernauer, W., & Aicher, S. (2005). Inspection of glue-lines of glued-laminated timber by means of ultrasonic testing. En *Proceedings of 14th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*.
- Divos, F., & Tanaka, T. (2005). Relation between static and dynamic modulus of elasticity of wood. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, 1, 105-110. <https://doi.org/10.37045/aslh-2005-0009>
- Doan, D. V., & Schimleck, L. (2022). Prediction of static bending properties of *Eucalyptus* clones using stress wave measurements on standing trees, logs and small clear specimens. *Forests*, 13, 1728. <https://doi.org/10.3390/f13101728>
- EN 14081-1:2016. *Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por resistencia. Parte 1: Requisitos generales*. Comité Europeo de Normalización.
- EN 1912:2025. *Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de calidades visuales y especies*. Comité Europeo de Normalización.
- EN 338:2016. *Madera estructural. Clases resistentes*. Comité Europeo de Normalización.
- Espinoza, O., & Buehlmann, U. (2018). Cross-laminated timber in the USA: Opportunity for Hardwoods? *Current Forestry Reports*, 4(1), 1. <https://doi.org/10.1007/s40725-018-0071-x>
- Esteban, M., Arriaga, F., Íñiguez, G., Bobadilla, I., & Mateo, R. (2010). The effect of fissures on the strength of structural timber. *Materiales de Construcción*, 60, 115-132. <https://doi.org/10.3989/mc.2010.48208>
- Evans, R., & Ilic, J. (2001). Rapid prediction of wood stiffness from microfibril angle and density. *Forest Products Journal*, 51, 53-57.
- Fink, G., Frangi, A., & Kohler, J. (2015). Bending tests on GLT beams having well-known local material properties. *Materials and Structures*, 48(11), 3571-3584. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0424-2>
- Fundova, I., Funda, T., & Wu, H. X. (2019). Non-destructive assessment of wood stiffness in Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) and its use in forest tree improvement. *Forests*, 10, 491. <https://doi.org/10.3390/f10060491>
- Gallego, M. A. A., Ripoll, M. A., Timbolmas, C., Rescalvo, F., Suarez, E., Valverde, I., Rodríguez, M., Navarro, F. B., & Merlo, E. (2021). Modulus of elasticity of I-214 young poplar wood from standing trees to sawn timber: influence of the age and stand density. *European Journal of Wood and Wood Products*, 79, 1225-1239. <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01675-5>
- Gao, S., Wang, X., Wan, L., & Allison, R. B. (2011). Modeling temperature and moisture state effects on acoustic velocity in wood. En *Proceedings, 17th Symposium Nondestructive Testing of Wood* (Vol. 2, pp. 411-418).
- Gerhards, C. (1982). *Effect of knots on stress waves in lumber* (Technical Report FPL-384). Forest Service, Forest Products Laboratory, US Department of Agriculture. <https://doi.org/10.2737/FPL-RP-384>

Gibson, L. J., & Ashby, M. F. (2001). *Cellular solids: Structure and properties*. Cambridge University Press.

Gil-Martin, I., Suarez, E., & Roldán, A. M. (2025). *Development and Validation of a Novel Low-Cost Portable Device for Non-Destructive Evaluation of Structural Timber*. SSRN.

<https://ssrn.com/abstract=5354324>

Gonçalves, J. C., Valle, A. T., & Costa, A. F. (2001). Estimativas das constantes elásticas da madeira por meio de ondas ultrassônicas (The use of ultrasonic method for estimating wood elastic constants). *Revista Cerne*, 7(2), 81-92. <https://doi.org/10.1007/s00226-013-0598-8>

Gonçalves, R., & Leme, O. A. (2008). Influence of moisture content on longitudinal, radial and tangential ultrasonic velocity for two Brazilian wood species. *Wood and Fiber Science*, 40(4), 580-586.

Gonçalves, R., Bertoldo, C., Massak, M. V., Batista, F., & Secco, C. B. (2011a). Technical note: Velocity of ultrasonic waves in live trees and in freshly-felled logs. *Wood and Fiber Science*, 43(2), 232-235.

Gonçalves, R., Lorensani, R. G. M., Merlo, E., Santaclara, O., Touza, M., Guaita, M., & Lario, F. J. (2018). Modeling of wood properties from parameters obtained in nursery seedlings. *Canadian Journal of Forest Research*, 48(6), 621-628. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2017-0393>

Gonçalves, R., Lorensani, R. G. M., Ruy, M., Veiga, N. S., Müller, G., da Silva Alves, C., & Martins, G. A. (2019). Evolution of acoustical, geometrical, physical, and mechanical parameters from seedling to cutting age in *Eucalyptus* clones used in the pulp and paper industries in Brazil. *Forest Products Journal*, 69(1), 5-16.

Gonçalves, R., Pedroso, C. B., & Massak, M. V. (2013). Acoustic and bending properties in *Pinus elliottii* beams obtained from trees of different ages. *Journal of Wood Science*, 59(2), 127-132. <https://doi.org/10.1007/s10086-012-1311-5>

Gonçalves, R., Trinca, A. J., & Cerri, D. G. P. (2011b). Comparison of elastic constants of wood determined by ultrasonic wave propagation and static compression test. *Wood and Fiber Science*, 43(1), 64-75.

Gonçalves, R., Trinca, A. J., & Pellis, B. P. (2014). Elastic constants of wood determined by ultrasound using three geometries of specimens. *Wood Science and Technology*, 48, 269-287. <https://doi.org/10.1007/s00226-013-0598-8>

Grabianowski, M., Manley, B. & Walker, J.C.F. (2006). Acoustic measurements on standing trees, logs and green lumber. *Wood Science and Technology* 40, 205–216. <https://doi.org/10.1007/s00226-005-0038-5>

Guillaume, C., Katline, C. V., Benoit, L., Thierry, A., & Stefan, M. (2014). Changes in ultrasound velocity and attenuation indicate freezing of xylem sap. *Agricultural and Forest Meteorology*, 185, 20-25. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.10.009>

Güntekin, E., Yılmaz Aydın, T., & Niemz, P. (2016). Some orthotropic mechanical properties of Sessile oak (*Quercus petraea*) as influenced by moisture content. *Eurasian Journal of Forest Science*, 4(1), 40-47. <https://doi.org/10.31195/ejejfs.258624>

Haines, D. W., & Leban, J. M. (1997). Evaluation of modulus of elasticity of logs. En *10th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*.

- Haines, D. W., Leban, J. M., & Herbé, C. (1996). Determination of Young's modulus for spruce, fir and isotropic materials by the resonance flexure method with comparisons to static flexure and other dynamic methods. *Wood Science and Technology*, 30, 253-263.
- Hallé, F., Oldeman, R. A. A., & Tomlinson, P. B. (1978). *Tropical Trees and Forests: An Architectural Analysis*. Springer. <https://doi.org/10.2307/2259284>
- Han, G. P., Wu, Q. L., & Wang, X. P. (2006). Stress-wave velocity of woodbased panels: Effect of moisture, product type, and material direction. *Forest Products Journal*, 56, 28-33.
- Hanhijärvi, A., Ranta-Maunus, A., & Turk, G. (2005). Potential of strength grading of timber with combined measurement techniques. *Report of the Combigrade-project-phase I* (No. 568).
- Hansmann, C., & Rosenfeld, C. (2022). Hardwood research in cooperation with industry. *10th Hardwood Conference Proceedings 2022*, 10.
- Hasegawa, M., Sasaki, Y., & Iwata, T. (2000). Acoustoelastic effect of wood III: effect of applied stresses on the velocity of ultrasonic waves propagating normal to the direction of the applied stress. *Journal of Wood Science*, 46, 102-108. <https://doi.org/10.1007/BF00777355>
- Hasegawa, M., Takata, M., Matsumura, J., & Oda, K. (2011). Effect of wood properties on within-tree variation in ultrasonic wave velocity in softwood. *Ultrasonics*, 51(3), 296-302. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2010.10.001>
- Hasenstab, A., & Hillemeier, B. (2005). Defect localisation in wood with low frequency ultrasonic echo technique. En *Proceedings of 14th international symposium on nondestructive testing of wood*.
- Hass, P., Wittel, F. K., McDonald, S. A., Marone, F., Stampanoni, M., Herrmann, H. J., & Niemz, P. (2015). Pore space analysis of beech wood: The vessel network. *Holzforschung*, 64 (5), 639– 644, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1509.03651>
- Hausle, J. M., Forrester, J. A., & Walker, T. D. (2023). Determining the effectiveness of using acoustic velocity as an indirect measurement of branchiness in standing longleaf pine. *Canadian Journal of Forest Research*, 53(10), 814-819. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2023-0052>
- Haygreen, J. G., & Bowyer, J. L. (1995). *Forest Products and Wood Science: An Introduction*. Iowa State University Press.
- Hellier, C. J. (2013). *Handbook of nondestructive evaluation* (2.^a ed.). McGraw-Hill Education.
- Hematabadi, H., Madhoushi, M., Khazaeian, A., & Ebrahimi, G. (2021). Structural performance of hybrid Poplar-Beech cross-laminated-timber (CLT). *Journal of Building Engineering*, 44, 102959. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102959>
- Hemmasi, A. H., Khademi-Eslam, H., Roohnia, M., Talaeipour, M., & Aliabadi, M. (2014). Elastic properties of oak wood finger joints with polyvinyl acetate and isocyanate adhesives. *BioResources*, 9(1), 849-860.
- Hering, S., Keunecke, D., & Niemz, P. (2012). Moisture-dependent orthotropic elasticity of beech wood. *Wood Science and Technology*, 46(5), 927-938. <https://doi.org/10.1007/s00226-011-0442-y>
- Hermoso, E. (2001). *Caracterización mecánica de la madera estructural de Pinus sylvestris L.* (Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid). <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.644>

- Hermoso, E., Fernández-Golfín, J. I., Díez, R., & Mier, R. (2007). Aplicación de los ultrasonidos a la evaluación de las propiedades mecánicas de la madera en rollo de pequeño diámetro. *Informes de la Construcción*, 59(506), 87-95. <https://doi.org/10.3989/ic.2007.v59.i506.511>
- Hofmann, N., Brüchert, F., Sauter, U. H., Schober, K. U., & Hörnel-Metzger, B. (2022). Green-oak building: characterisation of small-diameter logs from oak by non-destructive and destructive testing. *10th Hardwood Conference Proceedings 2022*, 37.
- Horváth, D., & Fehér, S. (2022). Preliminary results of the investigations of lower quality oak lamellae with regard to their potential uses. *10th Hardwood Conference Proceedings 2022*, 105.
- Hsu, C. Y. (2003). *Radiata pine wood anatomy structure and biophysical properties* (Ph.D. thesis, University of Canterbury).
- Hua, T., Xie, H., Wang, S., Hu, Z., Chen, P., & Zhang, Q. (2011). Evaluation of the quality of a speckle pattern in the digital image correlation method by mean subset fluctuation. *Optics and Laser Technology*, 43(1), 9-13. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2010.04.010>
- Huang, C. L., Lindström, H., Nakada, R., & Ralston, J. (2003). Cell wall structure and wood properties determined by acoustics-a selective review. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 61(5), 321-335. <https://doi.org/10.1007/s00107-003-0398-1>
- Íñiguez, G. (2007). *Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural* (Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid). <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.415>
- Íñiguez, G., Arriaga, F., Esteban, M., & Llana, D. F. (2015). Reference conditions and modification factors for the standardization of nondestructive variables used in the evaluation of existing timber structures. *Construction and Building Materials*, 101, 1166-1171. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.128>
- Íñiguez, G., Arriaga, F., Osuna, C., Esteban, M., & Ridley-Ellis, D. (2019). Nondestructive measurements in reclaimed timber from existing structures. En *Proceedings of the 21st International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium* (pp. 462-472).
- ISO 13061-17:2017. *Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens - Part 17: Determination of ultimate stress in compression parallel to grain*. International Organization for Standardization.
- ISO 13061-5:2020. *Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens - Part 5: Determination of strength in static bending*. International Organization for Standardization.
- Johansson, C. J. (2003). Grading of timber with respect to mechanical properties. *Timber engineering*, 23-43.
- Jokerst, R. W. (1981). *Finger-jointed wood products* (Research Paper FPL 382). USDA Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Jones, T. G., & Emms, G. W. (2010). Influence of acoustic velocity, density, and knots on the stiffness grade outturn of radiata pine logs. *Wood and Fiber Science*, 42(1), 1-9.
- Kang, H., & Booker, R. E. (2002). Variation of stress wave velocity with MC and temperature. *Wood Science and Technology*, 36(1), 41-54. <https://doi.org/10.1007/s00226-001-0129-x>

- Karlinasari, L., & Bahtiar, E. T. (2011). Nondestructive evaluation of end-jointed in meranti wood using ultrasonic wave techniques. *17th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium*, Sopron, Hungria.
- Katz, J. L., Spencer, P., Wang, Y., Misra, A., Marangos, O., & Friis, L. (2008). On the anisotropic elastic properties of woods. *Journal of Materials Science*, *43*, 139-145. <https://doi.org/10.1007/s10853-007-2121-9>
- Keunecke, D., Hering, S., & Niemz, P. (2007). Determination of Young's and shear moduli of common yew and Norway spruce by means of ultrasonic waves. *Wood Science and Technology*, *41*, 309-327. <https://doi.org/10.1007/s00226-006-0105-9>
- Kollmann, F. F. P., & Côté, W. A. (1984). *Principles of wood science and technology. Volume I: Solid wood*. Springer-Verlag.
- Kowalczyk, J. (2025). The effect of ultrasonic probes on the ability to inspect adhesive joints. *Materials*, *18*(9), 1946. <https://doi.org/10.3390/ma18091946>
- Krauss, A., & Kúdela, J. (2011). Ultrasonic wave propagation and young's modulus of elasticity along the grain of scots pine wood (*Pinus sylvestris* L.) varying with distance from the pith. *Wood Research*, *56*(4), 479-488.
- Krauss, A., Szymański, W., & Pinkowski, G. (2010). The radial variability of the modulus of elasticity along the grain of Scots pine wood. *Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW. Forestry and Wood Technology*, *71*.
- Krzosek, S., & Grześkiewicz, M. (2008). Strength grading Polish-grown *Pinus Sylvestris* L. structural timber using Timber Grader MTG and Visual method. *Annals of Warsaw University of Life Science - SGGW. Forestry and Wood Technology*, *66*, 26-31.
- Lachenbruch, B., Johnson, G., Downes, G., & Evans, R. (2010). Relationships of density, microfibril angle, and sound velocity with stiffness and strength in mature wood of Douglas fir. *Canadian Journal of Forest Research*, *40*, 55-64. <https://doi.org/10.1139/X09-174>
- Landry, G., Thiffault, E., Cyr, D., Moreau, L., Boulanger, Y., & Dymond, C. (2021). Mitigation potential of ecosystem-based forest management under climate change: A case study in the boreal-temperate forest ecotone. *Forests*, *12*(12), 1667. <https://doi.org/10.3390/f12121667>
- Lasaygues, P. (2007). *Wavelet based deconvolution method in ultrasonic tomography*. International congress on ultrasonics, Vienne, Austria. <https://hal.science/hal-00440745>
- Lasserre, J. P., Mason, E., & Watt, M. (2004). The influence of initial stocking on corewood stiffness in a clonal experiment of 11 year-old *Pinus radiata* D. Don. *New Zealand Journal of Forestry*, *49*, 18-23.
- Lecompte, D., Smits, A., Bossuyt, S., Sol, H., Vantomme, J., Van Hemelrijck, D., & Habraken, A. M. (2006). Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation. *Optics and Lasers in Engineering*, *44*(11), 1132-1145. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2005.10.004>
- Legg, M., & Bradley, S. (2016). Measurement of stiffness of standing trees and felled logs using acoustics: A review. *Journal of the Acoustical Society of America*, *139*, 588-604. <https://doi.org/10.1121/1.4940210>

- Li, G., Wang, X., Feng, H., Wiedenbeck, J., & Ross, R. (2014). Analysis of wave velocity patterns in black cherry trees and its effect on internal decay detection. *Computers and Electronics in Agriculture*, *104*, 32-39. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.03.008>
- Li, H., Zhang, X., Li, Z., Wen, J., & Tan, X. (2022). A review of research on tree risk assessment methods. *Forests*, *13*(10), 1556. <https://doi.org/10.3390/f13101556>
- Lindstrom, H., Harris, P., Sorensson, C., & Evans, R. (2004). Stiffness and wood variation of 3-year old *Pinus radiata* clones. *Wood Science and Technology*, *38*(8), 579-597. <https://doi.org/10.1007/s00226-004-0249-1>
- Linhares, C. S. F., Gonçalves, R., Martins, L. M., & Knapic, S. (2021). Structural stability of urban trees using visual and instrumental techniques: A Review. *Forests*, *12*(12), 1752. <https://doi.org/10.3390/f12121752>
- Linsenmann, P. (2016). *European hardwoods for the building sector (EU Hardwoods)*. Holzforschung Austria.
- Liu, F., Zhang, H., Wang, X., Jiang, F., Yu, W., & Ross, R. J. (2021). Acoustic wave propagation in standing trees -Part II. Effects of tree diameter and juvenile wood. *Wood and Fiber Science*, *53*(2), 95-108. <https://doi.org/10.22382/wfs-2021-12>
- Livani, M. A., Bosco, E., & Suiker, A. S. J. (2021). Influence of morphology on the effective hygro-elastic properties of softwood (spruce) and hardwood (balsa). *Archive of Applied Mechanics*, *91*, 4141-4162. <https://doi.org/10.1007/S00419-021-01994-2>
- Llana, D. F. (2016). *Influencia de factores físicos y geométricos en la clasificación estructural de la madera mediante técnicas no destructivas* (Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid). <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.43696>
- Llana, D. F., González-Alegre, V., Portela, M., & Íñiguez, G. (2022). Cross Laminated Timber (CLT) manufactured with European oak recovered from demolition: Structural properties and non-destructive evaluation. *Construction and Building Materials*, *339*, 127635. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127635>
- Llana, D. F., Íñiguez, G., Arriaga, F., & Esteban, M. (2016). Non-destructive assessment of modulus of elasticity and strength in Spanish structural sawn timber of *Pinus sylvestris* L. *Construction and Building Materials*, *112*, 539-548.
- Llana, D. F., Íñiguez, G., Díez, M. R., & Arriaga, F. (2020a). Nondestructive testing used on timber in Spain: A literature review. *Maderas. Ciencia y tecnología*, *22*(2), 133-156. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2020005000201>
- Llana, D. F., Sanabria, S. J., Íñiguez-González, G., Arriaga, F., & Niemz, P. (2013). Experimental and numerical investigation of effect of sawn timber dimensions in ultrasonic velocity measurements of Spanish softwoods. En *18th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium* (Report No. FPL-GTR-226). Forest Products Laboratory. <https://oa.upm.es/22941/>
- Llana, D. F., Short, I. & Harte, A. M. (2020b). Use of non-destructive test methods on Irish hardwood standing trees and small-diameter round timber for prediction of mechanical properties. *Annals of Forest Science*, *77*, 62. <https://doi.org/10.1007/s13595-020-00957-x>

- Lourenço, P. B., Feio, A. O., & Machado, J. S. (2007). Chestnut wood in compression perpendicular to the grain: Non-destructive correlations for test results in new and old wood. *Construction and Building Materials*, 21(8), 1617-1627. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.07.011>
- Ma, Y., Si, R., Musah, M., Dai, Q., Xie, X., Wang, X., & Ross, R. J. (2021). Mechanical property evaluation of hybrid mixed-species CLT panels with sugar maple and white spruce. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(7). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003760](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003760)
- Majano-Majano, A., Fernández-Cabo, J. L., Hoheisel, S., & Klein, M. (2012). A test method for characterizing clear wood using a single specimen. *Experimental Mechanics*, 52(8), 1079-1096. <https://doi.org/10.1007/s11340-011-9560-6>
- Malhotra, V. M., & Carino, N. J. (2003). *Handbook on nondestructive testing of concrete* (2^a ed.). CRC press.
- Mariño, R. A., Fernández, M. E., & Fernández-Rodríguez, C., Méndez, M. (2009). Detection of pith location in chestnut lumber (*Castanea sativa* Mill.) by means of acoustic tomography and longitudinal stress-wave velocity. *European Journal of Wood and Wood Products*, 68, 197-206. <https://doi.org/10.1007/s00107-009-0366-5>
- Marzo, A., Carpani, B., Marghella, G., & Tripepi, C. (2024). A methodology to manage and correlate results of non-destructive and destructive tests on ancient timber beams: The case of Montorio Tower. *NDT*, 2(3), 311-329. <https://doi.org/10.3390/ndt2030019>
- Matheson, A. C., Gapare, W. J., Ilic, J., & Wu, H. X. (2008). Inheritance and genetic gain in wood stiffness in radiata pine assessed acoustically in young standing trees. *Silvae Genetica*, 57, 56-64.
- Melinda, A. P., Higuchi, S., Yoresta, F. S., Yamazaki, Y., Nhut, P. V., Nuryanti, P., & Matsumoto, Y. (2024). Bending performance of laminated veneer lumber timber beams strengthened in the compression side with near-surface mounted CFRP plates. *Case Studies in Construction Materials*, 21, e03418. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03418>
- Melinda, A. P., Higuchi, S., Yoresta, F. S., Yamazaki, Y., Nhut, P. V., Nuryanti, P., Takiuchi, Y., & Matsumoto, Y. (2025). Digital image correlation (DIC) application to evaluate bending performance of timber beams strengthened with NSM-CFRP plate. *European Journal of Wood and Wood Products*, 83, 104. <https://doi.org/10.1007/s00107-025-02258-4>
- Melinda, A. P., Yoresta, F. S., Higuchi, S., Yamazaki, Y., & Matsumoto, Y. (2023). Investigation of the accuracy of digital image correlation (DIC) in measuring full-field strain for timber materials. *E3S Web of Conferences*, 464, 09002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346409002>
- Mendoza, M., Hass, P., Wittel, F.K. et al. Adhesive penetration of hardwood: a generic penetration model. *Wood Sci Technol* 46, 529–549 (2012). <https://doi.org/10.1007/s00226-011-0422-2>
- Merlo, E., Alvarez, J. G., Santaclara, O., & Riesco, G. (2014). Modelling modulus of elasticity of *Pinus pinaster* Ait. in northwestern Spain with standing tree acoustic measurements, tree, stand and site variables. *Forest Systems*, 23(1), 153-166. <https://doi.org/10.5424/fs/2014231-04706>
- Meyers, M. A. (1994). *Dynamic behavior of materials*. John Wiley & Sons.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (2011-2017). *Cuarto Inventario Forestal Nacional*. <https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/inventarios-nacionales/inventario-forestal-nacional.html>

- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2023). *Avance de Anuario de Estadística Forestal 2023*.
<https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/biodiversidad/estadisticas/forestal-anuario-2023.pdf>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2024). *Inventario de daños forestales de España 2024: Resultados Red de Nivel I. Informe de resultados Galicia*.
<https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/biodiversidad/temas/inventarios-nacionales/INFORME%20DE%20RESULTADOS%20GALICIA%202024.pdf>
- Mitchell, S. J. (2013). Wind as a natural disturbance agent in forests: a synthesis. *Forestry*, 86(2), 147-157. <https://doi.org/10.1093/forestry/cps058>
- Moliński, W., & Marcinkowska, A. (2007). Interrelationships between macrostructural parameters of pine (*Pinus sylvestris* L.) wood and the propagation velocity of ultrasound waves in the direction along fibers. *Drewno*, 50(177), 79-89. <http://www.itd.poznan.pl>
- Moliński, W., Fabisiak, E., & Roszyk, E. (2007). The propagation velocity of ultrasound waves along the grain in juvenile, mature, normal and reaction wood of pine (*Pinus sylvestris* L.). *Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW, Forestry and Wood Technology*, 62, 200-206.
- Montero, M. J., Mata, J. D., Esteban, M., & Hermoso, E. (2015). Influence of moisture content on the wave velocity to estimate the mechanical properties of large cross-section pieces for structural use of Scots pine from Spain. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 17, 407-420. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000038>
- Mora, C. R., Schimleck, L. R., Isik, F., Mahon, J. M., Clark, A., & Daniels, R. F. (2009). Relationship between acoustic variables and different measures of stiffness in standing *Pinus taeda* trees. *Canadian Journal of Forest Research*, 39, 1421-1429. <https://doi.org/10.1139/X09-062>
- Morales-Conde, M. J., & Machado, J. S. (2017). Evaluation of cross-sectional variation of timber bending modulus of elasticity by stress waves. *Construction and Building Materials*, 156, 85-91. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.188>
- Morin-Bernard, A., Blanchet, P., Dagenais, C., & Achim, A. (2020a). Use of northern hardwoods in glued-laminated timber: a study of bondline shear strength and resistance to moisture. *European Journal of Wood and Wood Products*, 78, 891-903. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01572-3>
- Morin-Bernard, A., Blanchet, P., Dagenais, C., & Achim, A. (2020b). Strength grading of northern hardwood species for structural engineered wood products: identification of the relevant indicating. *BioResources*, 15(4), 8813-8832. <https://doi.org/10.15376/biores.15.4.8813-8832>
- Musah, M., Wang, X., Dickinson, Y., Ross, R. J., Rudnicki, M., & Xie, X. (2021). Durability of the adhesive bond in cross-laminated northern hardwoods and softwoods. *Construction and Building Materials*, 307, 124267. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124267>
- Najafi, S. K., Bucur, V., & Ebrahimi, G. (2005). Elastic constants of particleboard with ultrasonic technique. *Materials Letters*, 59(16), 2039-2042. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2005.02.013>
- Navaratnam, S., Ngo, T., Christopher, P., & Linforth, S. (2020). The use of digital image correlation for identifying failure characteristics of cross-laminated timber under transverse loading. *Measurement*, 154, 107502. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107502>
- Németh, R. (2022). Preface to the 10th Hardwood Conference. *10th Hardwood Conference Proceedings 2022*, 8. <https://doi.org/10.35511/978-963-334-446-0>

Newton, P. F. (2018). Acoustic velocity-wood fiber attribute relationships for jack pine logs and their potential utility. *Forests*, 9, 749. <https://doi.org/10.3390/f9120749>

NF B 52-001-1:2011. (2011). *Règles d'utilisation du bois dans les constructions - Classement visuel pour l'emploi en structures des bois sciés français résineux et feuillus*. Association Française de Normalisation.

NF B52-001-1:2018. *Règles d'utilisation du bois dans la construction - Classement visuel pour l'emploi en structure des bois sciés français résineux et feuillus*. Association Française de Normalisation.

Nop, P., Cristini, V., Zlámal, J., Hassan Vand, M., Šeda, V., & Tippner, J. (2024). Determination of the static bending properties of green beech and oak wood by the frequency resonance technique. *Forests*, 15(1), 150. <https://doi.org/10.3390/f15010150>

Novosel, A., Sedlar, T., Čizmar, D., Turkulin, H., & Živković, V. (2021). Structural reinforcement of bi-directional oak-wood lamination by carbon fibre implants. *Construction and building materials*, 287, 123073. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123073>

Oberhofnerová, E., Arnetová, K., Holeček, T., Borůvka, V., & Bomba, J. (2016). Determination of correlation between destructive and nondestructive methods applied on modified wood exposed to natural weathering test. *BioResources*, 11(2), 5155-5168.

Oliveira, F. G. R., Candian, M., & Lucchette, F. F. (2005). Moisture content effect on ultrasonic velocity in *Goupia glabra*. *Materials Research*, 8(1), 11-14. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392005000100004>

Oliveira, F. G. R., Sales, A., Lucchette, F. F., & Candian, M. (2006). Efeito do comprimento do corpo de prova na velocidade ultrassônica em madeiras (Effect of specimen length on ultrasonic velocity of wood). *Revista Árvore*, 30(1), 141–145. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622006000100017>

Oliver, C. D., & Larson, B. C. (1996). *Forest stand dynamics*. John Wiley & Sons.

Ormonde, P. C., & Gonçalves, R. (2006). Avaliação do fenômeno acustoelástico na madeira por meio de ultra-som. En *1º Seminário sobre a Aplicação de Ensaios não Destrutivos na Madeira e Materiais a Base de Madeira* (Vol. 1, pp. 1-6).

Osuna, C., Llana, D. F., Esteban, M., & Arriaga, F. (2019). Improving density estimation in large cross-section timber from existing structures optimizing the number of nondestructive measurements. *Construction and Building Materials*, 211, 199-206. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.144>

Osuna, C., Llana, D. F., Íñiguez, G., & Arriaga, F. (2020). The influence of cross-section variation on bending stiffness assessment in existing timber structures. *Engineering Structures*, 204, 110082. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110082>

Palma, S. S. A. (2022). *Interferência de fatores relacionados às medições em campo e ao processamento de dados na qualidade de imagens geradas por tomografia ultrassônica produzida com equipamento convencional* (Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas).

Palma, S. S. A., Gonçalves, R., Trinca, A. J., Costa, C. P., Reis, M. N., & Martins, G. A. (2018). Interference from knots, wave propagation direction, and effect of juvenile and reaction wood on velocities in ultrasound tomography. *BioResources*, 13(2), 2834-2845. <https://doi.org/10.15376/biores.13.2.2834-2845>

- Pan, B., Qian, K., Xie, H., & Asundi, A. (2009). Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review. *Measurement Science and Technology*, 20(6), 062001. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/20/6/062001>
- Papandrea, S. F., Cataldo, M. F., Bernardi, B., Zimbalatti, G., & Proto, A. R. (2022a). The predictive accuracy of modulus of elasticity (MOE) in the wood of standing trees and logs. *Forests*, 13, 1273. <https://doi.org/10.3390/f13081273>
- Papandrea, S. F., Cataldo, M. F., Zimbalatti, G., & Proto, A. R. (2022b). Comparative evaluation of inspection techniques for decay detection in urban trees. *Sensors and Actuators A: Physical*, 340, 113544. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113544>
- Pastor, J. G., & Salgado, A. R. (1999). El fomento de la transformación de productos forestales en Galicia. En *Proceedings of the Congreso de Ordenación y Gestión Sostenible de Montes* (Vol II, pp. 329-336).
- Pellerin, R. F., & Ross, R. J. (Eds.). (2002). *Nondestructive Evaluation of Wood* (Publication no. 7250). Forest Products Society.
- Périé, J., & Passieux, J. C. (2020). Special issue on advances in Digital Image Correlation (DIC). *Applied Sciences*, 10(4), 1530. <https://doi.org/10.3390/app10041530>
- Posta, J., Ptáček, P., Jára, R., Terebesyová, M., Kuklík, P., & Dolejš, J. (2016). Correlations and differences between methods for non-destructive evaluation of timber elements. *Wood Research*, 61(1), 129–140.
- Pretzsch, H. (2009). *Forest dynamics, growth and yield*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-88307-4>
- Preziosa, C. (1982) *Méthode de détermination des constantes élastiques du matériau bois par utilisation des ultrasons*. (PhD Thesis, University of Orleans).
- Purves, D. W., Lichstein, J. W., & Pacala, S. W. (2007). Crown plasticity and competition for canopy space: a new spatially implicit model parameterized for 250 North American tree species. *PLoS One*, 2, e870. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0000870>
- Pushkin, S. A., Kozlova, L. V., Makarov, A. A., Grachev, A. N., & Gorshkova, T. A. (2015). Cell wall components in torrefied softwood and hardwood samples. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 116, 102-113. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2015.09.020>
- Raczkowski, J., Helińska-Raczkowska, L., & Moliński, W. (2004). Relationship between lengthwise ultrasound transmission and tracheid length in wood of selected softwood species. *Folia Forestalia Polonica Series B*, 35, 3-12.
- Rais, A., Kovryga, A., Pretzsch, H., et al. (2022). Timber tensile strength in mixed stands of european beech (*Fagus sylvatica* L.). *Wood Science and Technology*, 56, 1239-1259. <https://doi.org/10.1007/s00226-022-01398-7>
- Ramage, M. H., Burridge, H., Busse-Wicher, M., Fereday, G., Reynolds, T., Shah, D. U., Wu, G., Yu, L., Fleming, P., Densley-Tingley, D., Allwood, J., Dupree, P., Linden, P. F., & Scherman, O. (2017). The wood from the trees: the use of timber in construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 333-359. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.107>

- Ramos, X. A. R., Velasco, R. M., Ambriz, A. C., & Hernández, L. C. (2024). Modulus of elasticity in standing trees of *Pinus montezumae* Lamb., using non-destructive testing. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4088012/v1>
- Rescalvo, F. J., Portela, M., Bravo, R., Lorenzana, J., Cruz-Rodríguez, C., Guaita, M., Gallego, A., & Iglesias, S. (2023). Evaluation of the mechanical behaviour of poplar specimens with and without fingers subjected to tensile stress by means of acoustic emission and DIC. *e-Journal of Nondestructive Testing*, 28(1). <https://doi.org/10.58286/27596>
- Reu, P. (2014). All about speckles: speckle size measurement. *Experimental Techniques*, 38(6), 1-2. <https://doi.org/10.1111/ext.12110>
- Ridley-Ellis, D., Stapel, P., & Baño, V. (2016). Strength grading of sawn timber in Europe: An explanation for engineers and researchers. *European Journal of Wood and Wood Products*, 74, 291–306. <https://doi.org/10.1007/s00107-016-1034-1>
- Riesco, G. (2001). *Estudio de las propiedades físico-mecánicas de la madera de roble (Quercus robur L.) de Galicia en relación con las variables del medio* (Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid). <https://tesis.biblioteca.upm.es/tesis/3355>
- Riesco, G. (2025). La regularidad en la anchura de anillos de crecimiento y su empleo en la clasificación visual de la madera para su asignación al sistema europeo de clases resistentes. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 27(6), 1-9. <https://doi.org/10.22320/s0718221x/2025.06>
- Riggio, M., Sandak, J., & Franke, S. (2015). Application of imaging techniques for detection of defects, damage and decay in timber structures on-site. *Construction and Building Materials*, 101, 1241-1252. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.065>
- Rodríguez-Liñán, C., & Rubio, P. (2000). *Evaluación del estado de la madera, en obras de rehabilitación, mediante técnicas de ultrasonidos*. Universidad de Sevilla.
- Roohnia, M., Hemmasi, A. H., & Khademi-Eslam, H. (2014). Modulus of elasticity in scarf-jointed wooden beams using free-free beam vibration. *BioResources*, 9(1), 59-70. <https://doi.org/10.1007/s10086-014-1413-3>
- Ross, R. J. (Ed.). (2015). *Nondestructive evaluation of wood* (2^a ed., General Technical Report FPL-GTR-238). U.S. Department of Agriculture.
- Ross, R. J., & Pellerin, R. F. (1994a). *Nondestructive testing for assessing wood members in structures: A review*. General technical report FPL-GTR-70 (Rev.). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. <https://doi.org/10.2737/FPL-GTR-70>
- Ross, R. J., & Pellerin, R. F. (1994b). Review of nondestructive evaluation of timber. En *Technical aspects of maintaining, repairing preserving historically significant ships: Proceedings of conference*.
- Ross, R. J., Brashaw, B. K., & Pellerin, R. F. (1998). Nondestructive evaluation of wood. *Forest Products Journal*, 48(1), 14-19. <https://www.proquest.com/scholarly-journals/nondestructive-evaluation-wood/docview/214629527/se-2>
- Ross, R. J., Wang, X., Mattson, J. A., Erickson, J. R., Forsman, J. W., Geske, E. A., & Wehr, M. A. (2001). *Comparison of several nondestructive evaluation techniques for assessing stiffness and MOE of small-diameter logs* (Research Paper). Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

- Sakai, H., Minamisawa, A., & Takagi, K. (1990). Effect of moisture content on ultrasonic velocity and attenuation in woods. *Ultrasonics*, 28(6), 382-385. [https://doi.org/10.1016/0041-624X\(90\)90060-2](https://doi.org/10.1016/0041-624X(90)90060-2)
- Sandoz, J. L. (1993). Moisture content and temperature effect on ultrasound timber grading. *Wood Science and Technology*, 27, 373-380. <https://doi.org/10.1007/BF00192223>
- Sandoz, J. L., & Lorin, P. (1994). Standing tree quality assessments using ultrasound. En *Proceedings of 1st European symposium on non-destructive evaluation of wood* (Vol. 2, pp. 493-502). University of Sopron. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1999.496.34>
- Sasaki, Y., Iwata, T., & Ando, K. (1998). Acoustoelastic effect of wood II: effect of compressive stress on the velocity of ultrasonic waves parallel to the transverse direction of wood. *Journal of Wood Science*, 44, 21-27. <https://doi.org/10.1007/BF00521870>
- Schimleck, L., Dahlen, J., Apiolaza, L. A., Downes, G., Emms, G., Evans, R., Moore, J., Pâques, L., Van den Bulcke, J., & Wang, X. (2019). Non-destructive evaluation techniques and what they tell us about wood property variation. *Forests*, 10, 728. <https://doi.org/10.3390/f10090728>
- Schmidt, J., & Kaliske, M. (2009). Models for numerical failure analysis of wooden structures. *Engineering Structures*, 31(2), 571-579. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.11.001>
- Searles, G. (2012). *Acoustic segregation and structural timber production* (Ph.D. thesis, Edinburgh Napier University).
- Serrano, E., & Gustafsson, P. J. (1999). Influence of bondline brittleness and defects on the strength of timber finger-joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 19, 9-17. [https://doi.org/10.1016/S0143-7496\(98\)00048-7](https://doi.org/10.1016/S0143-7496(98)00048-7)
- Silva, M. S. P. L. da, Pedroso, C. B., & Lorensani, R. G. M. (2020). *Inferência dos coeficientes de Poisson da madeira por meio da velocidade de cisalhamento obtida por ultrassom* (Relatório Final de Iniciação Científica). Universidade Estadual de Campinas.
- Sinclair, A. N., & Farshad, M. (1987). Comparison of three methods for determining elastic constants of wood. *Journal of Testing of Evaluation*, 15(2), 77-86. <https://doi.org/10.1520/JTE10986J>
- Sirswal, N. S., Nolan, G., Kotlarewski, N., & Taoum, A. (2025). Non-destructive evaluation of plantation *Eucalyptus nitens* logs and recovered samples to analyse the stiffness property. *Applied Sciences*, 15, 10973. <https://doi.org/10.3390/app152010973>
- Škorpík, P., Konrad, H., Geburek, T., Schuh, M., Vasold, D., Eberhardt, M., & Schueler, S. (2018). Solid wood properties assessed by non-destructive measurements of standing European larch (*Larix decidua* Mill.): Environmental effects on variation within and among trees and forest stands. *Forests*, 9, 276. <https://doi.org/10.3390/f9050276>
- Skovsgaard, J. P., & Vanclay, J. K. (2008). Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. *Forestry*, 81(1), 13-31. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpm041>
- Sliker, A., Yu, Y., Weigel, T., & Zhang, W. (1994). Orthotropic elastic constants for eastern hardwood species. *Wood and Fiber Science*, 26(1), 107-121.
- Sobue, N. (1990). Correction factors of the resonance frequency for tapering and shear deformation of a log in flexural vibration. *Mokuzai Gakkaishi*, 36(9), 760-764.

- Solav, D., & Silverstein, A. (2022). DuoDIC: 3D digital image correlation in MATLAB. *Journal of Open Source Software*, 7(74), 4279. <https://doi.org/10.21105/joss.04279>
- Solav, D., Moerman, K. M., Jaeger, A. M., Genovese, K., & Herr, H. M. (2018). MultiDIC: an open-source toolbox for multi-view 3D digital image correlation. *IEEE Access*, 6, 30520-30535. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2843725>
- Sotomayor, J. R. (2015). La madera como material de construcción y los ensayos no destructivos. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 9(2), 1-16.
- Sousa, H. S., & Neves, L. C. (2018). Reliability-based design of interventions in deteriorated Timber structures. *International Journal of Architectural Heritage*, 12(4), 507-515. <https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1436205>
- Steiger, R. (1996). *Mechanische Eigenschaften von Schweizer Fichten-Bauholz bei Biege-, Zug-, Druck- und kombinierter M/N-Beanspruchung* (Tesis doctoral, ETH Zürich).
- Straže, A., & Novak, K. (2022). Quality and price gain of european oak logs determined by visual and stress wave analysis. *10th Hardwood Conference Proceedings*, 62.
- Sun, YG., Arima, T. Structural mechanics of wood composite materials I: Ultrasonic evaluation of internal bond strength during an accelerated aging test. *Journal of Wood Science*, 44, 348–353 (1998). <https://doi.org/10.1007/BF01130446>
- Sutton, M. A., Orteu, J. J., & Schreier, H. (2009). *Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications*. Springer.
- Tayierjiang, A., W. J., Cheng, Q., Halik, Ü., Betz, F., & Yusup, A. (2024). Quantitative diagnosis of internal wood damage in living trees and its relationship with soil physicochemical properties: The case of an endangered desert riparian forest in Xinjiang, NW China. *Forest Ecology and Management*, 561, 121880. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121880>
- Thibaut, B., Caré, S., & Maurin, E. (2024). Oak beams in medieval frameworks: Constraints and advantages for restoration. *Journal of Cultural Heritage*, 65, 32-41. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2022.09.005>
- Timbolmas, C., Rescalvo, F. J., Portela, M., & Bravo, R. (2022). Analysis of poplar timber finger joints by means of Digital Image Correlation (DIC) and finite element simulation subjected to tension loading. *European Journal of Wood and Wood Products*, 80(3), 555-567. <https://doi.org/10.1007/s00107-022-01806-6>
- Trinca, A. J. (2011). *Metodologia para determinação das constantes elásticas da madeira por ultrassom* (Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo).
- Trinca, A. L., & Gonçalves, R. (2009). Efeito das dimensões da seção transversal e da frequência do transdutor na velocidade de propagação de ondas de ultra-som na madeira. *Revista Árvore*, 33(1), 177–184. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622009000100019>
- Tsehaye, A., Buchanan, A. H., & Walker, J. C. F. (2000a). Selecting trees for structural timber. *Holz Als Roh- Und Werkstoff*, 162-167. <https://doi.org/10.1007/s001070050407>
- Tsehaye, A., Buchanan, A. H., & Walker, J. C. F. (2000b). Sorting of logs using acoustics. *Wood Science And Technology*, 337-344. <https://doi.org/10.1007/s002260000048>

Turkot, C. G., Seale, R. D., Entsminger, E. D., França, F. J. N., & Shmulsky, R. (2020). Nondestructive evaluation of red oak and white oak species. *Forest Products Journal*, 70(3), 370-377.

UNE 56544:2022. *Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas*. Asociación Española de Normalización.

UNE 56546:2022. *Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de frondosas*. Asociación Española de Normalización.

UNE 56546:2024. *Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de frondosas*. Asociación Española de Normalización.

UNE-EN 13183-1:2002. *Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 1: Determinación por el método de secado en estufa*. Asociación Española de Normalización.

UNE-EN 13183-2:2002. *Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 2: Estimación por el método de la resistencia eléctrica*. Asociación Española de Normalización.

UNE-EN 14358:2016. *Estructuras de madera. Cálculo y verificación de los valores característicos*. Asociación Española de Normalización.

UNE-EN 15497:2014. *Madera maciza empalmada estructuralmente. Requisitos de comportamiento y requisitos mínimos de fabricación*. Asociación Española de Normalización.

UNE-EN 384:2016+A2:2023. *Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad*. Asociación Española de Normalización.

UNE-EN 408:2011+A1:2012. *Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas*. Asociación Española de Normalización.

Unterswieser, H., & Schickhofer, G. (2011). Influence of moisture content of wood on sound velocity and dynamic MOE of natural frequency- and ultrasonic runtime measurement. *European Journal of Wood and Wood Products*, 69(2), 171-181. <https://doi.org/10.1007/s00107-010-0417-y>

Vafadar, F., Jaaranen, J., & Fink, G. (2024). Experimental stiffness investigation of finger joints in glued laminated timber beams using digital image correlation. *Construction and Building Materials*, 438, 137095. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137095>

Van Acker, J., Militz, H., & Stevens, M. (1999). The significance of accelerated laboratory testing methods determining the natural durability of wood. *Holzforschung*, 53(5), 449-458. <https://doi.org/10.1515/HF.1999.075>

Van Duong, D., & Schimleck, L. (2022). Prediction of static bending properties of *Eucalyptus* clones using stress wave measurements on standing trees, logs and small clear specimens. *Forests*, 13(10), 1728. <https://doi.org/10.3390/f13101728>

Vázquez, C., Gonçalves, R., Bertoldo, C., Baño, V., Vega, A., Crespo, J., & Guaita, M. (2015). Determination of the mechanical properties of *Castanea sativa* (Mill.) using ultrasonic wave propagation and comparison with static compression and bending methods. *Wood Science and Technology*, 49(3), 607-622. <https://doi.org/10.1007/s00226-015-0719-7>

Vega, A., González, L., Fernández, I., & González, P. (2017). Grading and mechanical characterization of small-diameter round chestnut (*Castanea sativa* Mill.) timber from thinning

operations. *Wood Material Science & Engineering*, 14(2), 81-87.

<https://doi.org/10.1080/17480272.2017.1387174>

Virgen-Cobos, G. H., Olvera, G., Hermoso, E., & Esteban, M. (2022). Nondestructive techniques for determination of wood mechanical properties of urban trees in Madrid. *Forests*, 13, 1381.

<https://doi.org/10.3390/f13091381>

Virgen-Cobos, G. H. (2023). *Caracterización de las propiedades físicas y mecánicas de arbolado urbano mediante técnicas no destructivas* (Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid).

<https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.77522>

Vössing, K. J., & Niederleithinger, E. (2018). Nondestructive assessment and imaging methods for internal inspection of timber. A review. *Holzforschung*, 72, 467-476. <https://doi.org/10.1515/hf-2017-0122>

Waghorn, M. J., Mason, E. G., & Watt, M. S. (2007). Influence of initial stand density and genotype on longitudinal variation in modulus of elasticity for 17-year-old *Pinus radiata*. *Forest Ecology and Management*, 252(1), 67-72. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.019>

Walker, J., & Nakada, R. (1999). Understanding corewood in some softwoods: A selective review on stiffness and acoustics. *International Forestry Review*, 1(4), 251-259.

<https://www.jstor.org/stable/42609213>

Wang, S. Y., Chiu, C. M., & Lin, C. J. (2002). Variations in ultrasonic wave velocity and dynamic Young's modulus with moisture content for Taiwania plantation lumber. *Wood and Fiber Science*, 34(3), 370-381.

Wang, X. (2008). Effects of size and moisture content on stress waves E-rating of structural lumber. En *10th World Conference on Timber Engineering*.

Wang, X. (2013). Acoustic measurements on trees and logs: a review and analysis. *Wood Science and Technology*, 47, 965-975. <https://doi.org/10.1007/s00226-013-0552-9>

Wang, X., & Allison, R. B. (2008). Decay detection in red oak trees using a combination of visual inspection, acoustic testing, and resistance microdrilling. *Arboriculture & Urban Forestry*, 34(1), 1-4.

Wang, X., Carter, P., Ross, R. J., & Brashaw, B. K. (2007a). Acoustic assessment of wood quality of raw forest materials-A path to increased profitability. *Forest Products Journal*, 57, 6-14.

Wang, X., Ross, R. J., Brashaw, B. K., Panches, J., Erickson, J. R., Forsman, J. W., & Pellerin, R. F. (2004). Diameter effect on stress-wave evaluation of modulus of elasticity of logs. *Wood and Fiber Science*, 36(3), 368-377.

Wang, X., Ross, R. J., Carter, P. (2007b). Acoustic evaluation of wood quality in standing trees. Part 1. Acoustic wave behavior. *Wood Science And Technology*, 28-38.

Wang, X., Ross, R. J., McClellan, M., Barbour, R. J., Erickson, J. R., Forsman, J. W., & McGinnis, G. D. (2000). *Strength and stiffness assessment of standing trees using a nondestructive stress wave technique*. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

Wang, X., Ross, R. J., McClellan, M., Barbour, R. J., Erickson, J. R., Forsman, J. W., & McGinnis, G. D. (2001). Nondestructive evaluation of standing trees with a stress wave method. *Wood And Fiber Science*, 33, 522-533.

Wang, X., Verrill, S., Lowell, E., Ross, R. J., & Heriant, V. L. (2013). Acoustic sorting models for improved log segregation. *Wood and Fiber Science*, 45(4), 343-352.

Watson, L. (2013). *Evaluating the effects of initial stocking, physiological age and species on wood stiffness* (Bachelor thesis, University of Canterbury).

Wei, X., Du, C., Xu, S., Tian, C., Yang, X., Hu, L., & Pang, P. (2022). Research on stress wave wood nondestructive testing technology. En *Journal of Physics: Conference Series* 2366(1), 012035. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2366/1/012035>

Xavier, J., De Jesus, A. M. P., Morais, J. J. L., & Pinto, J. M. T. (2012). Stereovision measurements on evaluating the modulus of elasticity of wood by compression tests parallel to the grain. *Construction and Building Materials*, 26(1), 207-215. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.012>

Xu, H., Xu, G., Wang, L., & Yu, L. (2014). Propagation behavior of acoustic wave in wood. *Journal of Forestry Research*, 25, 671-676. <https://doi.org/10.1007/s11676-014-0506-6>

Xu, P., Guan, C., Zhang, H., Li, G., Zhao, D., Ross, R. J., & Shen, Y. (2021). Application of nondestructive testing technologies in preserving historic trees and ancient timber structures in China. *Forests*, 12(3), 318. <https://doi.org/10.3390/f12030318>

Yaitskova, N., & van de Kuilen, J. W. (2014). Time-of-flight modeling of transversal ultrasonic scan of wood. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 135, 3409-3415. <https://doi.org/10.1121/1.4873519>

Yamamoto, K., Sulaiman, O., & Hashim, R. (1998). Nondestructive detection of heart rot of *Acacia mangium* trees in Malaysia. *Forest Products Journal*, 38(3), 83-86. <https://www.proquest.com/scholarly-journals/nondestructive-detection-heart-rot-acacia-mangium/docview/214626929/se-2>

Yaofeng, S., & Pang, J. H. L. (2007). Study of optimal subset size in digital image correlation of speckle pattern images. *Optics and Lasers in Engineering*, 45(9), 967-974. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2007.01.012>

Yavari, A., Hemmasi, A., Roohnia, M., & Marušák, R. (2015). Dynamic young's modulus of scarf- and finger-jointed beams using longitudinal vibration method. *BioResources*, 10(4), 6886-6895. <https://doi.org/10.15376/biores.10.4.6886-6895>

Yin, Y., Nagao, H., Liu, X., & Nakai, T. (2010). Mechanical properties assessment of *Cunninghamia lanceolata* plantation. *Journal of Wood Science*, 33-40. <https://doi.org/10.1007/s10086-009-1067-8>

Zobel, B. J., & Sprague, J. R. (1998). *Juvenile wood in forest trees*. Springer.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Propagación de ondas longitudinales y de cortante (Adaptado de Bucur, 2023).	11
Figura 2. Matriz de flexibilidad [S].	31
Figura 3. Equipo USLab.	38
Figura 4. Equipo Epoch 600.	39
Figura 5. Equipo Microsecond Timer.	39
Figura 6. Equipo Hitman ST300.	40
Figura 7. Equipo Timber Grader MTG y detalle del extremo de la consola en la zona de salida del percutor interno.	41
Figura 8. Equipo Hitman HM220.	41
Figura 9. Equipo Portable Lumber Grader.	42
Figura 10. Equipo Aramis 3D.	43
Figura 11. Máquinas de ensayo en el laboratorio de PEMADE.	44
Figura 12. Línea para fabricación de uniones dentadas (<i>finger-joint</i>) disponible en el laboratorio de PEMADE.	45
Figura 13. Línea para fabricación de uniones dentadas (<i>finger-joint</i>): (a) detalle de la cinta transportadora y máquina fresadora; (b) detalle del sistema encolador; (c) unidad de ensamble; (d) prensa y salida de prensa.	47
Figura 14. Equipos para la determinación del contenido de humedad: (a) estufa de circulación forzada y (b) balanza de precisión.	48
Figura 15. Xilohigrómetro de resistencia eléctrica.	48
Figura 16. Ortofotos de las tres parcelas de estudio y su localización. Parcelas M y Q, situadas en el ayuntamiento de Rois (A Coruña); Parcela S, situada en el ayuntamiento de Santiago de Compostela (A Coruña).	53
Figura 17. Proceso de mediciones dendrométricas realizadas en una parcela de <i>Quercus robur</i> : (a) medición del diámetro de copa; (b) medición de altura del árbol y (c) medición del diámetro normal.	54
Figura 18. Mediciones sobre pies de <i>Quercus robur</i> : (a) ondas de ultrasonidos, con el equipo USLab; y (b) ondas de impacto, con el equipo MST.	54
Figura 19. Extracción de testigo cilíndrico en un pie de <i>Quercus robur</i> .	55
Figura 20. Corta de pies de <i>Quercus robur</i> en la parcela M e identificación de las tres trozas extraídas para el árbol 7.	56
Figura 21. Mediciones longitudinales realizadas sobre las trozas: (a) ondas de ultrasonidos (USLab); (b) ondas de impacto (MST); y (c) vibración (MTG).	56
Figura 22. Mediciones superficiales realizadas sobre las trozas: (a) ondas de ultrasonidos (USLab), y (b) ondas de impacto (MST).	57
Figura 23. Procesado de trozas en las instalaciones de Maderas Exfopino S.L.: (a) aserrado de trozas y (b) obtención de tabla.	57
Figura 24. Mediciones longitudinales realizadas sobre las tablas saturadas: (a) ondas de ultrasonidos (USLab); (b) ondas de impacto (MST); (c) vibración con el equipo Hitman y (d) vibración con el equipo MTG.	58
Figura 25. Secado de madera de roble en el secadero de la Escola de Enxeñaría Forestal de Pontevedra.	59
Figura 26. Mediciones longitudinales realizadas sobre las tablas en la condición de equilibrio higroscópico: (a) ondas de ultrasonidos (USLab); (b) ondas de impacto (MST); y (c) vibración (MTG).	60
Figura 27. Mediciones realizadas sobre las tablas en la condición de equilibrio higroscópico con la técnica de vibración (PLG).	60
Figura 28. Algunas de las singularidades medidas en el proceso de clasificación visual: (a) medición de nudo de canto; (b) medición de curvatura de canto; (c) medición de desviación de la fibra con trazador; y (d) medición de anchura del anillo de crecimiento.	61
Figura 29. Ensayo a flexión según la norma UNE-EN 408 para obtener el módulo de elasticidad local y global, y la resistencia a la flexión para las piezas de <i>Q. robur</i> .	62
Figura 30. Esquema de ensayo para la determinación del módulo de elasticidad local a flexión según la norma UNE-EN 408.	63
Figura 31. Esquema de ensayo para la determinación del módulo de elasticidad global a flexión según la norma UNE-EN 408.	64

Figura 32. Extracción de tablón para la obtención de probetas de pequeñas dimensiones. 69

Figura 33. Orientación de las probetas sobre el material inicial (adaptado de Crespo et al., 2017), y ejemplo de probetas extraídas en las distintas direcciones: 1- probetas extraídas en la dirección longitudinal; 2- probetas extraídas en la dirección radial; 3- probetas extraídas en la dirección tangencial; 4,5,6- probetas extraídas a 45°. 70

Figura 34. Material durante el proceso de mecanizado de las probetas poliédricas: (a) pieza de sección rectangular original, pieza de sección octogonal al salir de la tupí y poliedro final; (b) corte a 45° en la tronadora abatible; (c) poliedros de *Quercus robur* con la geometría final. 71

Figura 35. Muestras cilíndricas de *Quercus robur*. 71

Figura 36. Realización de ensayo con Olympus Epoch 600: (a) ensayo en probeta prismática y (b) ensayo en probeta poliédrica. 72

Figura 37. Direcciones radial, tangencial y longitudinal sobre muestra cilíndrica extraída del árbol en pie. 73

Figura 38. Probetas para el ensayo de compresión: (a) probeta 1 para ensayo de compresión paralela a la fibra y (b) probeta 4, para ensayo de compresión oblicua. 75

Figura 39. Ortofoto y datos de localización de la parcela de estudio 77

Figura 40. Muestreos realizados y fechas de ensayo. 78

Figura 41. Proceso de fabricación de láminas para el material perteneciente al Grupo 1. 80

Figura 42. Proceso de fabricación de láminas para el material perteneciente al Grupo 2. 82

Figura 43. Proceso de fabricación de láminas para el material perteneciente al Grupo 3. 84

Figura 44. Distancia entre el nudo y la base de la unión dentada (*finger-joint*). Adaptado de la Norma UNE-EN 15497:2014. 84

Figura 45. Material saneado: (a) tablas cortadas y agrupadas por bloques de manera previa a la fabricación de las láminas; (b) restos de material rechazado. 85

Figura 46. Esquema de unión dentada y parámetros que la definen. 86

Figura 47. Geometría final de unión dentada en madera de *Quercus robur* (dimensiones en mm). 86

Figura 48. Imágenes del proceso de fabricación de la unión dentada, por orden de ejecución: (a) retesteado de tablas y mecanización de la unión; (b) *finger-joint* mecanizado y tras la aplicación del adhesivo; (c) posicionamiento de tablas con *finger-joint* para su ensamble; (d) salida de la lámina fabricada al final de la línea. 87

Figura 49. Mediciones longitudinales realizadas sobre las láminas: (a) aplicando la técnica de ultrasonidos; (b) ondas de impacto; y (c) vibración. 88

Figura 50. Mediciones superficiales sobre las láminas: (a) medición de la unión aplicando la técnica de ultrasonidos; (b) medición de la unión aplicando la técnica de ondas de impacto; (c) mediciones progresivas con la técnica de ultrasonidos; y (d) representación de la lámina y los puntos de medición. 89

Figura 51. Proceso de calibración de Aramis 3D con el objeto de calibración CC20/MV2000 x 2000. 90

Figura 52. Configuración de ensayo de tracción paralela a la fibra con la técnica de Correlación Digital de Imágenes (DIC) y marcadores circulares posicionados en la lámina de *Quercus robur*. 91

Figura 53. Medición de deformaciones unitarias con DIC en la lámina para F2 (≈ 20 kN): (a) considerando los marcadores 1 y 6; y (b) teniendo en cuenta todos los marcadores, posicionados entre cada *finger-joint*. . 91

Figura 54. Estado general de las tres parcelas de estudio. 96

Figura 55. Medias e intervalos de confianza de las velocidades obtenidas en las trozas ($m s^{-1}$), considerando los tres puntos de medición: médula- M, duramen- I y albura-C: (a) con la técnica de ultrasonidos -USLab y (b) con la técnica de ondas de impacto- MST. 100

Figura 56. Porcentajes de rechazo por parcela en madera de *Quercus robur*, desglosados según la singularidad determinante detectada y la normativa de aplicación. 103

Figura 57. Ejemplos de la tipología de nudos presentes en la madera de *Quercus robur* clasificada visualmente. 104

Figura 58. Medias e intervalos de confianza de las velocidades obtenidas en los árboles (V_a), en las trozas (V_t) y en las tablas saturadas (V_{th}) con los tres equipos utilizados: (a) USLab; (b) MST; y (c) Hitman, en $m s^{-1}$ 106

Figura 59. Medias e intervalos de confianza de las densidades en árbol ($Dens_{v,a}$), troza ($Dens_{v,t}$) y tabla ($Dens_{v,th}$) en condiciones de saturación, en $kg m^{-3}$ 107

Figura 60. Medias e intervalo de confianza de la temperatura (a) en $^{\circ}C$ y humedad relativa del aire (b) en %, para los tres horarios de medición a lo largo del día. Leyenda: 1 = amanecer; 2 = mediodía; 3 = atardecer. 147

Figura 61. Medias e intervalo de confianza de las velocidades obtenidas con las técnicas de ondas de impacto (MST) y ultrasonido (USLab) para las dos distancias entre transductores (0,4 m y 0,7 m) en el árbol en pie, en $m s^{-1}$ 149

Figura 62. Medias e intervalo de confianza de las velocidades obtenidas con la técnica de ultrasonido en las dos distancias de medición (0,4 m y 0,7 m), en $m s^{-1}$: (a) velocidad en los nueve días de medición para la distancia de 0,4 m; (b) velocidad en los seis días de medición para la distancia de 0,7 m; (c) velocidad en cada horario de medición para la distancia de 0,4 m; (d) velocidad en cada horario de medición para la distancia de 0,7 m. 150

Figura 63. Medias e intervalo de confianza de las velocidades obtenidas con la técnica de ondas de impacto en las dos distancias de medición (0,4 m y 0,7 m), en $m s^{-1}$: (a) velocidad en los nueve días de medición para la distancia de 0,4 m; (b) velocidad en los seis días de medición para la distancia de 0,7 m; (c) velocidad en cada horario de medición para la distancia de 0,4 m; (d) velocidad en cada horario de medición para la distancia de 0,7 m.	151
Figura 64. Velocidades obtenidas en los días de medición de 4 a 9, en las distancias entre transductores de 0,4 m y 0,7 m con las dos técnicas utilizadas, en $m s^{-1}$: (a) ultrasonidos y (b) ondas de impacto. Velocidad promedio USLab distancia de 0,4 m (triángulos); Velocidad promedio USLab distancia de 0,7 m (cuadrados); Velocidad promedio MST distancia de 0,4 m (rombos); Velocidad promedio MST distancia de 0,7 m (círculos).	152
Figura 65. Velocidades longitudinales medias ($m s^{-1}$) y su desviación estándar obtenidas en ensayos realizados en las tablas ($V_{lon,t}$) y en las láminas ($V_{lon,l}$) pertenecientes al Grupo 1, para cada una de las técnicas acústicas aplicadas.	155
Figura 66. Velocidades medias ($m s^{-1}$) y desviación estándar para las mediciones superficiales progresivas realizadas con la técnica de ultrasonidos (a) y la técnica de ondas de impacto (b), en los tramos 1-2; 1-3; 1-4; 1-5; 1-6; 1-7.	159
Figura 67. Valores medios ($N mm^{-2}$) y desviación estándar para los módulos de elasticidad calculados con DIC en los distintos tramos: $MOE_{l,1-2}$: módulo de elasticidad obtenido entre el marcador 1 y 2; $MOE_{l,1-3}$: módulo de elasticidad obtenido entre el marcador 1 y 3; $MOE_{l,1-4}$: módulo de elasticidad obtenido entre el marcador 1 y 4; $MOE_{l,1-5}$: módulo de elasticidad obtenido entre el marcador 1 y 5; MOE_l : módulo de elasticidad obtenido entre el marcador 1 y 6, que se corresponde con el módulo de elasticidad adoptado para la lámina.	161
Figura 68. Valores medios ($N mm^{-2}$) y desviación estándar para los módulos de elasticidad calculados con DIC en los distintos tramos: $MOE_{l,1-2}$: módulo de elasticidad obtenido entre el marcador 1 y 2; $MOE_{l,1-3}$: módulo de elasticidad obtenido entre el marcador 1 y 3; $MOE_{l,1-4}$: módulo de elasticidad obtenido entre el marcador 1 y 4; MOE_l : módulo de elasticidad obtenido entre el marcador 1 y 5, que se corresponde con el módulo de elasticidad adoptado para la lámina.	166
Figura 69. Valores medios ($N mm^{-2}$) y desviación estándar para los módulos de elasticidad calculados con DIC en los distintos tramos: $MOE_{l,1-2}$: módulo de elasticidad obtenido entre el marcador 1 y 2; $MOE_{l,1-3}$: módulo de elasticidad obtenido entre el marcador 1 y 3; $MOE_{l,1-4}$: módulo de elasticidad obtenido entre el marcador 1 y 4; MOE_l : módulo de elasticidad obtenido entre el marcador 1 y 5, que se corresponde con el módulo de elasticidad adoptado para la lámina.	169

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Obtención de los términos de la diagonal de la matriz de rigidez de la madera con ensayos de ultrasonidos.	30
Tabla 2. Obtención de los términos externos a la diagonal de la matriz de rigidez con ensayos de ultrasonidos.	30
Tabla 3. Ecuaciones para el cálculo de los coeficientes de rigidez obtenidos por ultrasonido.	31
Tabla 4. Codificación aplicada en las tablas y ejemplo de etiquetado del material.	58
Tabla 5. Número de tablas ensayadas en la condición de equilibrio higroscópico y técnicas aplicadas en cada caso.	59
Tabla 6. Sistema de Clases Resistentes para Madera de Frondosas según UNE-EN 338:2016 (Extracto). ...	66
Tabla 7. Sistema de clasificación para frondosas según ABNT NBR 15521 (Adaptado).	68
Tabla 8. Dimensiones de las probetas prismáticas extraídas y coeficientes elásticos obtenidos en cada caso.	72
Tabla 9. Dimensiones de las probetas prismáticas extraídas y coeficientes elásticos obtenidos en cada caso.	75
Tabla 10. Tablas pertenecientes al primer grupo de material (Grupo 1), densidades y valores de velocidades obtenidas con los diferentes equipos empleados.	79
Tabla 11. Tablas pertenecientes al segundo grupo de material (Grupo 2), densidades, valores de velocidades obtenidas con los diferentes equipos empleados y su clasificación según bloques.	81
Tabla 12. Tablas pertenecientes al tercer grupo de material (Grupo 3), densidades y valores de velocidad obtenida con los diferentes equipos empleados.	83
Tabla 13. Valores medios de las características dendrométricas de los árboles, con sus respectivos coeficientes de variación (%) para cada parcela.	95
Tabla 14. Valores medios (kg m^{-3}) de la densidad verde ($\text{Dens}_{v,a}$) y densidad básica en el árbol ($\text{Dens}_{b,a}$), con sus respectivos coeficientes de variación (%) para cada parcela y para la muestra total, que incluye todas las parcelas.	97
Tabla 15. Valores medios y coeficientes de variación (%) de la velocidad (V_a) y del coeficiente de rigidez ($C_{LL,a}$) en el árbol, para las diferentes técnicas y parcelas.	98
Tabla 16. Valores medios de la conicidad (C_t) y de las densidades verde ($\text{Dens}_{v,t}$) y básica ($\text{Dens}_{b,t}$) de las trozas, con sus respectivos coeficientes de variación (%), obtenidas de los árboles de cada parcela.	98
Tabla 17. Valores medios (m s^{-1}) de las velocidades obtenidas en las mediciones longitudinal ($V_{t,USLab,lon}$), superficial en un tramo de 2 m ($V_{t,USLab,sup,2}$), y superficial en un tramo de 0,4 m ($V_{t,USLab,sup,04}$), con sus respectivos coeficientes de variación (%), realizadas en las trozas con la técnica de ultrasonidos.	99
Tabla 18. Valores medios (m s^{-1}) de las velocidades obtenidas en las mediciones longitudinal directa ($V_{t,MST,lon}$), superficial indirecta en un tramo de 2 m ($V_{t,MST,sup,2}$), y superficial indirecta en un tramo de 0,4 m ($V_{t,MST,sup,04}$), con sus respectivos coeficientes de variación (%), realizadas en las trozas con la técnica de ondas de impacto.	99
Tabla 19. Valores medios (m s^{-1}) y coeficientes de variación (%) de la velocidad longitudinal ($V_{t,lon}$) y del coeficiente de rigidez ($C_{LL,t}$) en la troza, para las diferentes técnicas y parcelas.	100
Tabla 20. Valores medios (m s^{-1}) y coeficientes de variación de las velocidades de propagación de ondas en las tablas saturadas (V_{th}) obtenidas mediante las diferentes técnicas.	101
Tabla 21. Valores medios (m s^{-1}) y coeficientes de variación (%) de las velocidades de propagación de ondas en las tablas en condición de equilibrio higroscópico ($V_{ts,12}$) obtenidas mediante las diferentes técnicas.	102
Tabla 22. Número total y porcentaje de piezas rechazadas según los criterios de clasificación visual para la madera de coníferas ($b \leq 70$ mm), de calidad ME-2 de la norma UNE 56544; la madera de castaño ($b \leq 70$ mm) de calidad MEF recogidos en la norma UNE 56546; y la madera de roble según la norma NB B52-001-1 para la Clase de calidad 3.	103
Tabla 23. Estadísticos descriptivos de centralización y dispersión de las variables $\text{MOE}_{Local,12}$, $\text{MOE}_{Global,12}$, MOR, ρ_{12} y humedad.	104
Tabla 24. Valores medios y coeficientes de variación (%) para los resultados de densidad (ρ_{12}), módulo de rotura (MOR) y módulos de elasticidad global ($\text{MOE}_{Global,12}$) y local ($\text{MOE}_{Local,12}$) obtenidos en las tablas a la humedad de equilibrio (12 %), para las tres parcelas.	105

Tabla 25. Modelos de regresión para la estimación del módulo de rotura (MOR) a partir de la velocidad de propagación de la onda obtenida en la medición en la tabla saturada (V_{th}), aplicando diferentes técnicas y equipos.	108
Tabla 26. Modelos de regresión para la estimación del módulo de elasticidad global (MOE_{Global}) a partir de la velocidad de propagación de la onda obtenida en la medición en la tabla saturada (V_{th}), aplicando diferentes técnicas y equipos.	108
Tabla 27. Modelos de regresión para la estimación del módulo de elasticidad local (MOE_{Local}) a partir de la velocidad de propagación de la onda obtenida en la medición en la tabla saturada (V_{th}), aplicando diferentes técnicas y equipos.	108
Tabla 28. Valores de p -valor obtenidos en las regresiones para la estimación del módulo de rotura (MOR), módulo de elasticidad global (MOE_{Global}) y módulo de elasticidad local (MOE_{Local}), a partir de la velocidad de propagación de ondas en la tabla en condición de equilibrio higroscópico ($V_{ts,12}$), aplicando diferentes técnicas y equipos.	109
Tabla 29. Modelos de regresión para la estimación del módulo de rotura (MOR) a partir del coeficiente de rigidez en la tabla en condición de equilibrio higroscópico ($C_{LL,12}$), aplicando diferentes técnicas y equipos.	110
Tabla 30. Modelos de regresión para la estimación del módulo de elasticidad global (MOE_{Global}) a partir del coeficiente de rigidez en la tabla en condición de equilibrio higroscópico ($C_{LL,12}$), aplicando diferentes técnicas y equipos.	110
Tabla 31. Modelos de regresión para la estimación del módulo de elasticidad local (MOE_{Local}) a partir del coeficiente de rigidez en la tabla en condición de equilibrio higroscópico ($C_{LL,12}$), aplicando diferentes técnicas y equipos.	110
Tabla 32. Resultados de p -valor obtenidos en las regresiones para la estimación del módulo de rotura (MOR), módulo de elasticidad global (MOE_{Global}) y módulo de elasticidad local (MOE_{Local}), a partir de la velocidad de propagación de ondas en la troza ($V_{t,lon}$), y del coeficiente de rigidez ($C_{LL,t}$) aplicando diferentes técnicas y equipos.	111
Tabla 33. Modelos de regresión para la estimación de la velocidad de propagación de la onda en el árbol a partir de mediciones de velocidad realizadas en las trozas con las técnicas de ultrasonidos (USLab) y ondas de impacto (MST).	112
Tabla 34. Modelos de regresión para la estimación del módulo de rotura (MOR) a partir de la velocidad de propagación de la onda ($V_{t,sup,2}$) y del coeficiente de rigidez en la troza ($C_{LL,t}$), obtenido en mediciones superficiales en un tramo de 2 m, con la técnica de ondas de impacto.	112
Tabla 35. Resultados de p -valor obtenidos en las regresiones para la estimación del módulo de rotura (MOR), módulo de elasticidad global (MOE_{Global}) y módulo de elasticidad local (MOE_{Local}), a partir de la velocidad de propagación de ondas en el árbol (V_a), aplicando diferentes técnicas y equipos.	113
Tabla 36. Matriz de correlaciones entre las variables dendrométricas y físicas obtenidas del árbol.	114
Tabla 37. Matriz de correlaciones entre variables dendrométricas compuestas y variables físicas obtenidas del árbol.	114
Tabla 38. Modelos de regresión para la estimación del módulo de rotura (MOR), módulo de elasticidad global (MOE_{Global}) y módulo de elasticidad local (MOE_{Local}), a partir de las combinaciones de velocidad de propagación de ondas y parámetros del árbol, aplicando diferentes técnicas y equipos.	116
Tabla 39. Resultados de p -valor obtenidos en las regresiones para la estimación del módulo de rotura (MOR), módulo de elasticidad global (MOE_{Global}) y módulo de elasticidad local (MOE_{Local}) a partir de la velocidad de propagación de la onda (V_{tb}) y del coeficiente de rigidez en la troza basal ($C_{LL,tb}$), aplicando diferentes técnicas y equipos.	117
Tabla 40. Modelos de regresión para la estimación del módulo de rotura (MOR), módulo de elasticidad global (MOE_{Global}) y módulo de elasticidad local (MOE_{Local}), a partir de las combinaciones de velocidad de propagación de ondas y parámetros del árbol, aplicando diferentes técnicas y equipos y considerando como variable dependiente los resultados de las tablas de la troza basal.	118
Tabla 41. Valores obtenidos de las resistencias ($f_{m,k}$) y densidades (ρ_k) características, del valor medio del módulo de elasticidad ($E_{m,0,mean}$) y asignación de clase resistente según norma UNE-EN 338 para frondosas, de las tablas ensayadas a flexión, para cada grupo establecido en función del resultado de la clasificación visual.	119
Tabla 42. Valores obtenidos de las resistencias ($f_{m,k}$) y densidades (ρ_k) características, del valor medio del módulo de elasticidad ($E_{m,0,mean}$) y asignación de clase resistente según norma UNE-EN 338 para coníferas, de las tablas ensayadas a flexión, para cada grupo establecido en función del resultado de la clasificación visual.	119
Tabla 43. Valores obtenidos de las resistencias ($f_{m,k}$) y densidades (ρ_k) características, del valor medio del módulo de elasticidad ($E_{m,0,mean}$) y asignación de clase resistente según norma UNE-EN 338 para frondosas y coníferas, de las tablas ensayadas a flexión, para el grupo 2.1 (MEF) sin considerar las deformaciones. .	120
Tabla 44. Valores obtenidos de las resistencias ($f_{m,k}$) y densidades (ρ_k) características, del valor medio del módulo de elasticidad ($E_{m,0,mean}$) y asignación de clase resistente según norma UNE-EN 338 para frondosas, de las tablas ensayadas a flexión, para cada grupo establecido en función del resultado de la clasificación visual según la norma NF B52-001-1:2018.	121

Tabla 45. Valores obtenidos de las resistencias ($f_{m,k}$) y densidades (ρ_k) características, del valor medio del módulo de elasticidad ($E_{m,0,mean}$) y asignación de clase resistente según norma UNE-EN 338 para frondosas, de las tablas ensayadas a flexión, para cada una de las parcelas y considerando la muestra total.	121
Tabla 46. Valores del módulo de elasticidad medio ($E_{m,0,mean}$) para alguna de las clases resistentes de la norma UNE-EN 338 y sus correspondientes equivalencias con las clases de calidad definidas en la ABNT-NBR 15521.	122
Tabla 47. Clases de calidad obtenidas para los grupos según la norma ABNT-NBR 15521, en base a datos de velocidad de propagación de ondas en tablas saturadas (V_{th}) y en el coeficiente de rigidez de las tablas en la condición de equilibrio higroscópico ($C_{LL,12}$).	123
Tabla 48. Clases de calidad obtenidas para las tres parcelas y la muestra total de datos, según la norma ABNT-NBR 15521, en base a datos de velocidad de propagación de ondas en tablas saturadas (V_{th}) y en el coeficiente de rigidez de las tablas en la condición de equilibrio higroscópico ($C_{LL,12}$).	124
Tabla 49. Resultado de clasificación de las tablas incluyendo las tres parcelas de estudio asociado a clases resistentes de la norma brasileña ABNT-NBR 15521 en base a datos de velocidad de propagación de ondas en las trozas (V_t).	125
Tabla 50. Valores obtenidos de las resistencias ($f_{m,k}$) y densidades (ρ_k) características, y del valor medio del módulo de elasticidad ($E_{m,0,mean}$), estimados a partir de mediciones con ultrasonidos en el árbol en pie y asignación de clase resistente según norma UNE-EN 338 para frondosas, para cada una de las parcelas y considerando la muestra total.	125
Tabla 51. Valores obtenidos de las resistencias ($f_{m,k}$) y densidades (ρ_k) características, y del valor medio del módulo de elasticidad ($E_{m,0,mean}$), estimados a partir de mediciones con ondas de impacto en el árbol en pie y asignación de clase resistente según norma UNE-EN 338 para frondosas, para cada una de las parcelas y considerando la muestra total de datos.	126
Tabla 52. Resultado de clasificación de las tablas incluyendo las tres parcelas de estudio asociado a clases resistentes de la norma brasileña ABNT-NBR 15521 en base a datos de velocidad de propagación de ondas en el árbol en pie (V_a).	126
Tabla 53. Valores medios ($m s^{-1}$), coeficiente de variación (%) y errores obtenidos para la velocidad de propagación de la onda en la dirección longitudinal y transversal con la técnica de ultrasonidos aplicada en probetas prismáticas.	127
Tabla 54. Valores medios ($m s^{-1}$), coeficiente de variación (%) y errores obtenidos para la velocidad de propagación de la onda en la dirección longitudinal y transversal con la técnica de ultrasonidos aplicada en poliedros.	127
Tabla 55. Valores medios ($m s^{-1}$), coeficientes de variación (%) y errores obtenidos para la velocidad de propagación de la onda en madera de haya y abeto de Douglas. Adaptado de Bucur (2006).	128
Tabla 56. Valores medios ($N mm^{-2}$) y coeficiente de variación (%) para los coeficientes de la matriz de rigidez obtenidos con la técnica de ultrasonidos aplicada en probetas prismáticas y en poliedros, y valores obtenidos por Bucur y Perrin (1988) ⁽¹⁾	129
Tabla 57. Valores medios de los coeficientes de Poisson obtenidos en los ensayos de compresión axial sobre probetas prismáticas.	129
Tabla 58. Valores medios de los coeficientes de Poisson obtenidos en los ensayos de ultrasonidos en poliedros.	130
Tabla 59. Referencias bibliográficas de los coeficientes de Poisson para madera de roble y otras frondosas, obtenidos a través de técnicas ultrasónicas.	131
Tabla 60. Valores de los coeficientes de Poisson ν_{LR} y ν_{LT} obtenidos en cada árbol mediante.	132
Tabla 61. Valores medios ($N mm^{-2}$) y coeficiente de variación (%) de los módulos de cortante en los diferentes planos, obtenidos en los ensayos de compresión axial en probetas prismáticas, para las tres parcelas de estudio y la muestra total de datos.	133
Tabla 62. Valores medios ($N mm^{-2}$) y coeficiente de variación (%) de los módulos de cortante en los diferentes planos, obtenidos en los ensayos con la técnica de ultrasonidos en probetas prismáticas, para las tres parcelas de estudio y la muestra total de datos.	134
Tabla 63. Valores medios ($N mm^{-2}$) y coeficiente de variación (%) de los módulos de cortante en los diferentes planos, obtenidos en los ensayos con la técnica de ultrasonidos en probetas poliédricas, para las tres parcelas de estudio y la muestra total de datos.	134
Tabla 64. Referencias bibliográficas de los módulos de cortante ($N mm^{-2}$) para madera de roble y otras frondosas, obtenidos a través de técnicas ultrasónicas y ensayos de compresión.	135
Tabla 65. Valores medios ($N mm^{-2}$) y coeficiente de variación (%) de los módulos de elasticidad longitudinales obtenidos en los ensayos de compresión axial.	136
Tabla 66. Valores medios ($N mm^{-2}$) y coeficiente de variación (%) de los módulos de elasticidad longitudinales obtenidos en los ensayos de ultrasonidos en los poliedros.	136
Tabla 67. Referencias bibliográficas de las relaciones entre módulos de elasticidad longitudinales y transversales para madera de roble y otras frondosas.	136
Tabla 68. Referencias bibliográficas de los módulos de elasticidad ($N mm^{-2}$) de varias especies de madera, obtenidos a través de técnicas ultrasónicas y ensayos de compresión.	137

Tabla 69. Comparación estadística de los valores obtenidos para los parámetros elásticos en los ensayos de compresión en probetas prismáticas y ultrasonidos en poliedros.	138
Tabla 70. Comparación estadística de los valores del módulo de elasticidad tangencial obtenidos en los ensayos de compresión en probetas prismáticas y ultrasonidos en poliedros, para cada una de las parcelas.	139
Tabla 71. Comparación estadística de los valores de los coeficientes de Poisson en los planos RT y TR obtenidos en los ensayos de compresión en probetas prismáticas y ultrasonidos en poliedros, para cada una de las parcelas.	140
Tabla 72. Valores medios de las relaciones de los términos de la matriz de flexibilidad (10^{-5}) obtenidos en los ensayos de compresión en probetas prismáticas y ultrasonidos en poliedros, y valores obtenidos por Bodig y Jayne (1982) ⁽¹⁾	140
Tabla 73. Valores medios ($N\text{ mm}^{-2}$) y coeficientes de variación (%) de los módulos de elasticidad obtenidos en los ensayos sobre probetas de pequeñas dimensiones (ensayos de ultrasonidos en poliedros y ensayos de compresión en prismas) y en ensayos de flexión estática sobre tablas.	141
Tabla 74. Regresión simple considerando el módulo de elasticidad obtenido mediante ensayos de flexión estática (MOE_{Global} y MOE_{Local}) como variable dependiente y el módulo de elasticidad obtenido a partir de ensayos en probetas de pequeñas dimensiones.	142
Tabla 75. Valores de la velocidad de propagación de las ondas longitudinales y de cortante ($m\cdot s^{-1}$): media, coeficiente de variación (%) y parámetros estadísticos de análisis de normalidad de los datos (asimetría y curtosis) para las muestras cilíndricas retiradas de los árboles.	143
Tabla 76. Valores de los coeficientes de rigidez ($N\text{ mm}^{-2}$): media, coeficiente de variación (%) y parámetros estadísticos de análisis de normalidad de los datos (asimetría y curtosis) para las muestras cilíndricas retiradas de los árboles.	144
Tabla 77. Modelos de estimación del coeficiente de Poisson ν_{LR} a partir de coeficientes de rigidez obtenidos en las muestras retiradas de los árboles.	145
Tabla 78. Fechas de medición con sus respectivas temperaturas y humedades medias.	146
Tabla 79. Valores medios ($m\text{ s}^{-1}$) y coeficientes de variación (%) de las velocidades obtenidas en las mediciones realizadas en diferentes momentos del día (V_1 , V_2 , V_3) con una distancia entre transductores de 0,4 m y de 0,7 m, para las dos técnicas utilizadas.	148
Tabla 80. Valores medios ($m\text{ s}^{-1}$), coeficientes de variación (%) y análisis estadístico de equivalencia de medias de las velocidades anuales, para las dos técnicas utilizadas y distancias de medición.	148
Tabla 81. Valores medios ($m\text{ s}^{-1}$) y coeficientes de variación (%) de las velocidades obtenidas en las mediciones anuales completas con una distancia entre transductores de 0,4 m y de 0,7 m, para las dos técnicas utilizadas.	153
Tabla 82. Valores medios ($m\text{ s}^{-1}$) y coeficientes de variación (%) de la velocidad longitudinal en las láminas del Grupo 1 obtenida con el equipo USLab usando transductores planos ($V_{lon,USLab,p}$) y cónicos ($V_{lon,USLab,c}$).	154
Tabla 83. Valores medios ($m\text{ s}^{-1}$) y coeficientes de variación (%) de la velocidad longitudinal ($V_{lon,i}$) y superficial ($V_{sup,i}$) en las láminas del Grupo 1 con las dos técnicas utilizadas, ultrasonidos y ondas de impacto.	154
Tabla 84. Estadísticos descriptivos de centralización, dispersión de las variables y análisis de normalidad de los valores de coeficientes de rigidez ($C_{LL,t}; C_{LL,i}$) y de MOE (MOE_i), obtenidos en las tablas y en las láminas con uniones dentadas pertenecientes al Grupo 1, con las cuatro técnicas aplicadas.	156
Tabla 85. Valores medios y coeficientes de variación (%) de las velocidades, coeficientes de rigidez y módulo de elasticidad, obtenidos en las tablas y en las láminas del Grupo 1 con las cuatro técnicas utilizadas. ..	157
Tabla 86. Modelos de predicción del módulo de elasticidad de las láminas ensayadas a tracción paralela a la fibra con DIC (MOE_i), obtenidos a partir de las velocidades en las tablas de manera previa a su mecanizado ($V_{lon,t}$) y de las láminas con uniones dentadas ($V_{lon,i}$), pertenecientes al Grupo 1.	158
Tabla 87. Valores medios ($m\text{ s}^{-1}$) y coeficientes de variación (%) de la velocidad obtenida en las mediciones superficial progresiva, superficial considerando la lámina completa y longitudinal, para las técnicas de ultrasonidos y ondas de impacto.	160
Tabla 88. Valores medios ($m\text{ s}^{-1}$) y coeficientes de variación (%) para la velocidad obtenida de manera estimada ($V_{est,i}$) y a partir de la medición directa sobre las láminas ($V_{dir,i}$) del Grupo 2, para las tres técnicas acústicas aplicadas.	162
Tabla 89. Correlación y regresión entre las variables velocidad estimada ($V_{est,i}$) y velocidad directa ($V_{dir,i}$), obtenidas con las tres técnicas acústicas aplicadas para el material perteneciente al Grupo 2.	163
Tabla 90. Valores medios ($N\text{ mm}^{-2}$) y coeficientes de variación (%) para los coeficientes de rigidez obtenidos de manera estimada ($C_{LL,est,i}$) y a partir de la medición directa sobre las láminas ($C_{LL,dir,i}$) del Grupo 2, para las tres técnicas acústicas aplicadas.	163
Tabla 91. Correlación y regresión entre las variables coeficiente de rigidez obtenido de manera estimada ($C_{LL,est,i}$) y coeficiente de rigidez a partir de la medición directa sobre las láminas ($C_{LL,dir,i}$) del Grupo 2, para las tres técnicas acústicas aplicadas.	164
Tabla 92. Valores medios ($N\text{ mm}^{-2}$) y coeficientes de variación (%) de los coeficientes de rigidez ($C_{LL,dir,i}$) y módulo de elasticidad (MOE_i), obtenidos en las láminas del Grupo 2, con las cuatro técnicas utilizadas. ..	164

Tabla 93. Modelos de predicción del módulo de elasticidad de las láminas ensayadas a tracción paralela a la fibra con DIC (MOE_i), a partir de la velocidad y del coeficiente de rigidez obtenidos de mediciones directas en las láminas ($V_{dir,i}$ y $C_{LL,dir,i}$) con técnicas acústicas, para el Grupo 2.	165
Tabla 94. Modelos de predicción del módulo de elasticidad de las láminas ensayadas a tracción paralela a la fibra con DIC (MOE_i), a partir de la velocidad y del coeficiente de rigidez obtenidos de manera estimada en las láminas ($V_{est,i}$ y $C_{LL,est,i}$) con técnicas acústicas, para el Grupo 2.	166
Tabla 95. Valores medios ($m s^{-1}$) y coeficientes de variación (%) para la velocidad obtenida de manera estimada ($V_{est,i}$) y a partir de la medición directa sobre las láminas ($V_{dir,i}$) del Grupo 3, para las tres técnicas acústicas aplicadas.....	167
Tabla 96. Correlación y regresión entre las variables velocidad estimada ($V_{est,i}$) y velocidad directa ($V_{dir,i}$), obtenidas con las tres técnicas acústicas aplicadas para el material perteneciente al Grupo 3.	167
Tabla 97. Valores medios ($N mm^{-2}$) y coeficientes de variación (%) de los coeficientes de rigidez ($C_{LL,dir,i}$) y módulo de elasticidad (MOE_i), obtenidos en las láminas del Grupo 3, con las cuatro técnicas utilizadas. .	168
Tabla 98. Modelos de predicción del módulo de elasticidad de las láminas ensayadas a tracción paralela a la fibra con DIC (MOE_i), a partir de la velocidad y del coeficiente de rigidez obtenidos de mediciones directas en las láminas ($V_{dir,i}$ y $C_{LL,dir,i}$) con técnicas acústicas, para el Grupo 3.	168
Tabla 99. Modelos de predicción del módulo de elasticidad de las láminas ensayadas a tracción paralela a la fibra con DIC (MOE_i), a partir de la velocidad y del coeficiente de rigidez obtenidos de manera estimada en las láminas ($V_{est,i}$ y $C_{LL,est,i}$) con técnicas acústicas, para el Grupo 3.	169
Tabla 100. Valores medios ($N mm^{-2}$) y coeficientes de variación (%) de los coeficientes de rigidez ($C_{LL,dir,i}$) y módulo de elasticidad (MOE_i), obtenidos en las láminas considerando el conjunto de datos, con las cuatro técnicas utilizadas.	170
Tabla 101. Modelos de predicción del módulo de elasticidad de las láminas ensayadas a tracción paralela a la fibra (MOE_i), obtenidos a partir de mediciones con las técnicas de ultrasonidos y ondas de impacto en las láminas con uniones dentadas ($C_{LL,dir,i}$), considerando el conjunto de resultados.....	171

ANEXO I

Especificaciones para la clasificación como ME-2 de madera de coníferas de sección rectangular de pequeña escuadría ($b \leq 70$ mm). Adaptado de la Norma UNE 56544:2022.

Criterios de calidad			ME-2
Diámetro de nudos en cara			$d \leq 1/2$ de "h"
Diámetro de nudos en canto			$d \leq 2/3$ de "b"
Densidad ⁽¹⁾			$\rho \geq 350$ kg/m ³
Anchura máxima del anillo de crecimiento ⁽²⁾ – Pino silvestre – Pino laricio – Pino pinaster – Pino radiata			Sin limitación Sin limitación Sin limitación Sin limitación
Fendas	De secado ⁽¹⁾⁽³⁾	Pasantes en testa	$L_f \leq 2$ h
		Pasantes no en testa	$L_f \leq 1/4$ de "L" y 1 m
		No pasantes	$f \leq 3/5$ de "b" o "h" y (4) $L_f \leq 1/2$ de "L" y 1,5 m
	– Rayo – Heladura – Abatimiento		No admitidas
Acebolladuras			No admitidas
Bolsas de resina y entrecasco			Longitud $\leq 1,5$ de "h"
Madera de compresión			Admisible en 2/5 de la sección o de la superficie externa de la pieza
Desviación de la fibra			1:6 (16,7%)
Gemas – Longitud – Dimensión relativa			$L_g \leq 1/3$ de "L" $g \leq 1/3$
Médula ⁽²⁾			Admitida
Alteraciones biológicas – Muérdago (<i>V. album</i>) – Azulado – Pudrición – Galerías de insectos xilófagos			– No se admite – Se admite – No se admite – No se admiten
Deformaciones máximas ⁽¹⁾⁽³⁾⁽⁵⁾ – Curvatura de cara – Curvatura de canto – Alabeo – Abarquillado			20 mm (para una longitud de 2 m) 12 mm (para una longitud de 2 m) 2 mm (por cada 25 mm de "h") (para una longitud de 2 m) sin limitación
<p>⁽¹⁾ Referidas a un 20% de contenido de humedad. ⁽²⁾ Estos criterios sólo se considerarán cuando se comercializa en húmedo. ⁽³⁾ Estos criterios no se considerarán cuando la clasificación se efectúa en húmedo. ⁽⁴⁾ Esta limitación de longitud sólo será aplicable cuando la profundidad de la fenda (f) sea mayor o igual a 1/2 de "b" o "h". ⁽⁵⁾ Pueden aceptarse deformaciones mayores siempre que no afecten a la estabilidad de la construcción (porque puedan corregirse durante la fase del montaje) y exista acuerdo expreso al respecto entre el suministrador y el cliente.</p>			

ANEXO II

Especificaciones para la clasificación como MEF de madera de castaño de sección rectangular de pequeña escuadría ($b \leq 70$ mm). Adaptado de la Norma UNE 56546:2022.

Criterios de calidad			MEF
Diámetro de nudos en cara			$d \leq 1/2$ de "h"
Diámetro de nudos en canto			$d \leq 2/3$ de "b"
Densidad ⁽¹⁾			$\rho \geq 395$ kg/m ³
Fendas	De secado ⁽¹⁾⁽²⁾	Pasantes en testa	$L_f \leq h$
		Pasantes no en testa	No admitidas
		No pasantes	$f < 1/2$ de "b" o "h"
	– Rayo – Heladura – Abatimiento		No admitidas
Acebolladuras ⁽³⁾			$r_{\text{máx}} \leq b/3$ $\varepsilon < b/6$
Madera de tracción			Admisible en 1/5 de la sección o en 1/5 de la superficie externa de la pieza
Desviación de la fibra			1:10 (10 %)
Gemas – Longitud – Dimensión relativa			$L_g \leq 1/4$ de "L" $g \leq 1/4$
Médula			Admitida
Alteraciones biológicas – Pudriciones – Insectos xilófagos – Coloraciones			No admitidas No admitidos ataques activos. Ataques inactivos, se admiten orificios de hasta 2 mm de diámetro Se admite coloración rojiza/atabacado
Deformaciones máximas ⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁴⁾ – Curvatura de cara – Curvatura de canto – Alabeo – Abarquillado			10 mm (para una longitud de 2 m) 8 mm (para una longitud de 2 m) 2 mm (por cada 25 mm de "h") (para una long. de 2 m) Sin limitación
<p>⁽¹⁾ Referidas a un 20% de contenido de humedad.</p> <p>⁽²⁾ Estos criterios no se consideran cuando la clasificación se efectúa en húmedo.</p> <p>⁽³⁾ $r_{\text{máx}}$ es el radio máximo de la acebolladura considerando la médula como centro de la circunferencia y ε es la excentricidad (distancia entre la médula y el centro geométrico de la sección).</p> <p>⁽⁴⁾ Pueden aceptarse deformaciones mayores siempre que no afecte a la estabilidad de la construcción (porque pueda corregirse durante la fase de montaje) y exista acuerdo expreso al respecto entre el suministrador y el cliente.</p>			

ANEXO III

**Especificaciones para la clasificación como Clase 3 de madera de roble de espesor ≤ 100 mm.
Adaptado de la Norma NF B52-001-1:2018.**

Criterios	Clase visual	3
Diámetro de los nudos	Sanos y adheridos sobre la cara ⁽¹⁾	$d \leq 1/2$ de "h"
	Sanos y adheridos sobre el canto ⁽²⁾	$d \leq 4/5$ de "b" $d \leq 45$ mm
	Otros nudos	$d \leq 1/3$ de "h" y "b" $d \leq 45$ mm
Anchura máxima de los anillos de crecimiento		≤ 10 mm
Albura (Sin perjuicio de las clases de uso definido en la norma EN 350)		Albura sana admitida sobre los bordes (aristas) si es inferior a la mitad de la anchura de las caras y cantos de la pieza
Fendas ⁽³⁾⁽⁴⁾	Rajas por heladas	No se admiten
	Grietas	Se admiten
	Acebolladura en la sección	1/2 de la circunferencia del anillo
	Fendas de cara o de canto no pasantes	$< 1/2$ de la longitud de la pieza
	Fendas pasantes	Admitida en testa con una longitud menor del ancho de la pieza
Gemas		Menos de 10% de la cara Menos de 35% de "L"
Desviación de la fibra	Locales	1:3 (33%)
	Generales	1:5 (20%)
Coloraciones y alteraciones	Corazón marrón	Se admite
	Pudrición	No se admite
	Cola de vaca ⁽⁵⁾	Se admite
Ataques de insectos	Picaduras negras en rollizos	No se admiten
	Picaduras blancas en albura y otros ataques de insectos	No admitidas
Deformaciones máximas	Curvatura de cara	< 20 mm (para 2 m de longitud)
	Curvatura de canto	< 12 mm (para 2 m de longitud)
	Alabeo	2 mm (para 25 mm de "h")
	Atejado	Ninguna restricción
Daños de manipulación		No se aceptan si alteran más de un 5% la sección de la pieza
⁽¹⁾ h: Anchura de la pieza ⁽²⁾ b: Grosor de la pieza ⁽³⁾ La longitud de las fendas dependen de la humedad, por consiguiente, los límites marcados en la tabla son solamente aplicables en el momento de la clasificación ⁽⁴⁾ Para las piezas clasificadas como "húmedas", y secciones grandes el criterio fendas es difícilmente predecible ⁽⁵⁾ Cola de vaca: Tipo de coloración que ocurre en madera de roble en forma de llamas de color marrón.		



El objetivo general de esta tesis doctoral fue evaluar a lo largo de las diferentes etapas de la cadena productiva y de su empleo en productos de madera técnica, la precisión y la aplicabilidad de Técnicas No Destructivas (TND) para la estimación de propiedades mecánicas de la madera de *Quercus robur* de procedencia gallega. Los objetivos específicos abordaron la determinación de la exactitud de las TND para la clasificación estructural, la caracterización de las propiedades elásticas, la investigación de la influencia de factores climáticos y estacionales en las mediciones realizadas en el árbol en pie, y la verificación de la idoneidad de las TND para la estimación de la rigidez en láminas con uniones dentadas.