

APLICACIÓN DE LA MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DE ULTRASONIDOS (SYLVATEST 4.0) A LA CARACTERIZACIÓN DE MADERA ESTRUCTURAL DE PINO SILVESTRE

CURSO 2022 / 2023

AUTOR: GLORIA LLORENTE SÁNCHEZ

TUTOR: ALFONSO BASTERRA OTERO

COTUTOR: ROBERTO DIEGO MARTINEZ LOPEZ

GRADO EN FUNDAMENTOS DE LA ARQUITECTURA

“Un arquitecto es un dibujante de sueños.”

- Grace McGarvie

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer especialmente a mi tutor, el Dr. Luis Alfonso Bastera Otero, por introducirme en el interesante mundo de la investigación y permitirme ver parte del funcionamiento del GIR de Estructuras y Tecnología de la Madera. Por ofrecerme un tema de trabajo que, si bien en los inicios imponía por ser desconocido y complejo, ha terminado siendo apasionante. También por sus útiles e imprescindibles correcciones y comentarios para poder llevar a cabo este trabajo, aprendizajes que no solo he podido aplicar en él, sino que me llevaré conmigo a lo largo de mi carrera profesional. Ha sido un verdadero placer aprender de alguien con tanto conocimiento y experiencia, además de la oportunidad de visitar y trabajar en un lugar tan especial como la Abadía Retuerta.

En segundo lugar, a mi cotutor, Roberto, quién con su tiempo, sinceridad y comentarios constructivos me ha hecho ver más de cerca la realidad de la investigación y mejorar enormemente mi trabajo. Gracias por la paciencia dedicada a enseñar estadística a alguien que no sabía nada de ello y el conocimiento aportado en el trabajo de laboratorio.

Asimismo, gracias a Patricia y a Lida, que siempre han estado disponibles para ayudarme y aconsejarme en incontables mañanas en el despacho. El buen ambiente que creáis en el departamento hace que sea un lugar donde se disfruta mientras se trabaja y aprende.

También, a mis padres y a mi hermana, que me demuestran día a día que “las vidas esforzadas son más divertidas”, y no dejan de ser un ejemplo de profesionalidad y vocación absoluta por el trabajo bien hecho. Gracias por siempre animarme y no dejarme llevar por la pereza. En especial a mi padre, que me ha mostrado esta preciosa profesión y entiende mejor que nadie lo que implica esta carrera.

A Emma, una brillante amiga, persona y futura profesional que siempre saca lo mejor de mí, por formar tan buen equipo y acompañarme en largas noches de trabajo. Gracias por hacer este camino muchísimo más ameno y divertido.

Por último, a Alberto, que aun estando lejos me ha acompañado en infinidad de momentos. Gracias por ayudarme a confiar más en mí.

RESUMEN

La necesidad de conocer las propiedades mecánicas de las estructuras de madera existentes ha dado lugar a numerosos avances en el uso de ensayos no destructivos. Este trabajo parte de unas propiedades mecánicas conocidas sobre un lote de 13 vigas de *Pinus sylvestris* L., establecidas mediante máquina según norma UNE EN 408, y las compara con los datos obtenidos por un equipo concreto, el Sylvatest 4.0. Con ello se trata de crear un modelo que relacione ambos para poder ejecutar mediciones asegurando unos resultados con buena correlación. Se realizan mediciones de diversas formas con el Sylvatest y el MicroSecond Timer, directas, indirectas, transversales y en ángulo de 45° con el fin de poder comparar un amplio conjunto de datos. También se recurre al uso de un gel de acoplamiento, con el fin de estudiar cuán relevante es. Tras las mediciones se llevan a cabo diferentes métodos estadísticos descriptivos y comparativos de los múltiples datos. Como conclusión, destacan las mediciones indirectas en seco realizadas con el Sylvatest por ser las más precisas y se establece un modelo de correlación entre sus valores y los de establecidos por máquina. Además, se demuestra que el gel de acoplamiento no supone diferencia alguna. Por último, se desestiman las mediciones transversales y a 45° por su imprecisión.

Palabras clave: madera, ensayos no destructivos, END, técnicas acústicas, técnicas acústicas ultrasónicas, Sylvatest, MicroSecond Timer, velocidad de propagación, MOE.

ABSTRACT

The need to know the mechanical properties of existing timber structures has led to numerous advances in the use of non-destructive testing. This work is based on known mechanical properties of a set of 13 beams of *Pinus sylvestris* L., determined by machine according to UNE EN 408 standard, and compares them with the data obtained by a specific device, the Sylvatest 4.0. The aim is to create a model that relates the two in order to carry out measurements that guarantee results with good correlation. Different kinds of measurements are made with the Sylvatest and the MicroSecond Timer, directly, indirectly, transversely and at 45° angles, in order to be able to compare a wide range of data. Coupling gel is also applied in some measurements to study its relevance. After measurements are made, various descriptive and comparative statistical methods are applied to the data. In conclusion, the high accuracy of indirect dry measurements with the Sylvatest is highlighted. Furthermore, it is shown that the coupling gel has no effect. Finally, the cross-sectional and 45° measurements were dismissed due to their inaccuracy.

Keywords: wood, non-destructive techniques, NDT, acoustic techniques, ultrasonic techniques, Sylvatest, MicroSecond Timer, propagation velocity, MOE.

ÍNDICE

RESUMEN.....	5
1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS.....	12
3. ANTECEDENTES.....	15
3.1. LA MADERA	16
3.2. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS APLICADOS EN MADERA.....	16
3.2.1. FACTORES DE INFLUENCIA	22
3.2.2. ESTUDIOS Y ENSAYOS PREVIOS.....	24
4. MATERIAL Y MÉTODO	31
4.1. EQUIPOS DE LABORATORIO.....	33
4.2. MATERIAL FUNGIBLE	36
4.3. MATERIAL DE ENSAYO.....	37
4.4. METODOLOGÍA.....	38
4.4.1. MÉTODOS ESTIMATIVOS.....	38
4.4.2. MÉTODOS ESTADÍSTICOS.....	51
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	56
5.1. RESULTADOS DE LOS PASOS PREVIOS.....	58
5.2. RESULTADOS DE LAS VELOCIDADES DE PROPAGACIÓN Y LOS MOE.....	59
5.3. RESULTADOS ESTADÍSTICOS.....	62
5.3.1. RESULTADOS DEL ESTUDIO DE NORMALIDAD	62
5.3.2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE LAS VARIABLES.....	63
5.3.3. RESULTADOS DE LAS COMPARACIONES.....	64
5.3.4. RESULTADOS DEL MODELO DE REGRESIÓN SIMPLE GENERADO	73
6. CONCLUSIONES	75
7. BIBLIOGRAFÍA.....	76
8. ÍNDICE DE FIGURAS.....	78
9. ÍNDICE DE TABLAS	81
10. ANEXO I: TABLAS.....	83

1. INTRODUCCIÓN

La madera ha sido un material continuamente presente en la vida del ser humano. Desde los inicios de su historia ha acompañado al hombre en su evolución, teniendo gran cantidad de usos como elemento combustible, material de construcción y estético, en herramientas, papel, embarcaciones ... de los cuales la construcción es el que sugiere mayor interés.



Ilustración 1: (de izquierda a derecha) el primer refugio según Viollet-Le-Duc; cabañas primitivas reconstruidas por Perrault según Vitruvio; la construcción de la choza primitiva, según Vitruvio; el descubrimiento del fuego, según Fra Giocondo; cabañas según Caramuel; la choza primitiva, según Oscar Niemeyer. Fuente de todas las ilustraciones: <https://shorturl.at/gruMN>

Debido a su amplia presencia a lo largo de la historia, ha sido un material muy utilizado en la construcción, posiblemente gracias a unas prestaciones de calidad y sus excelentes características, además del componente estético que conlleva su uso. Encontramos madera siendo usada por arquitectos en diferentes épocas y localizaciones. Desde Vitruvio en su cabaña primitiva (Ilustración 1), Ralph Erskine en The Box (Ilustración 2), Le Corbusier en Le Cabanon y otros muchos, optan por hacer que la madera fuese partícipe de sus obras.

Su uso ha llegado hasta nuestros días, apreciándose actualmente una tendencia ascendente. Conociendo su historia y la predominancia que ha tenido como material de construcción, sabemos que está muy presente en una gran cantidad de la arquitectura edificada.



Ilustración 2: Estructura de madera de The Box en estado de construcción. Fuente: <https://shorturl.at/xEPY0>

La madera, con el paso del tiempo, sufre un proceso de degradación, sin embargo, el tiempo en sí mismo no es el factor que más condiciona este proceso. Sí lo son otros factores externos a los que este material es sensible como pueden ser la lluvia, la humedad, el fuego, los insectos xilófagos... Además de estos factores, la madera que forma parte de una estructura en servicio se ve afectada por las cargas de forma distinta según su aplicación. Mientras que soporta muy bien las cargas momentáneas o aplicadas en un periodo breve de tiempo, no responde de la misma forma a aquellas cargas estáticas que se prolongan a lo largo del tiempo, sufriendo a la larga unas deformaciones mayores.

Todo ello modifica la madera utilizada en el pasado y que sigue presente en la actualidad, y debe ser tenido en cuenta en el estudio de la estructura. Es importante un correcto análisis de cómo estos factores han degradado el material para decidir realizar un proyecto de restauración o rehabilitación.

Esta decisión genera nuevas necesidades, como la de comprender el estado en el que se encuentran actualmente los elementos estructurales de madera con largos años de servicio. Para ello surgen y evolucionan las técnicas no destructivas, que permiten conocer las características del material sin alterar sus propiedades, no solo en piezas individuales y en laboratorio, sino también en elementos de estructuras construidas (Ilustración 3). Se han ido aportando soluciones a esta problemática, comenzando por clasificaciones visuales, que han evolucionado hacia equipos cada vez más sofisticados basados en diversos principios físicos.

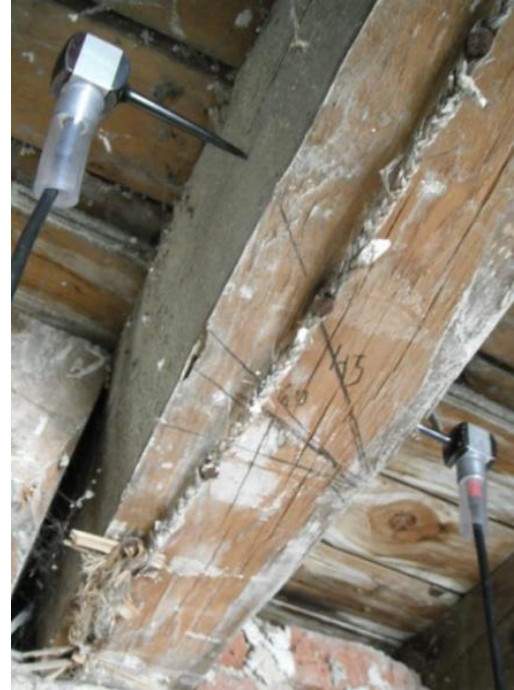


Ilustración 3: Medición transversal con el MST en una viga de una estructura en servicio. (Balmori Roiz, 2014)

Las investigaciones y ensayos con estos equipos se han incrementado y desarrollado paralelamente, revelando ciertos fallos e incorrecciones en los resultados. Por ello, se han seguido publicando y actualizando resultados de investigaciones y posibles modelos matemáticos de aplicación intentando acercarse lo más posible a las características reales del material.

Los ensayos no destructivos han evolucionado no solo en cuanto a la tecnología, sino también en su forma de aplicación. Además del desarrollo de equipos, se experimenta con distintos tipos de aplicación para mejorar sus resultados.

El estudio en laboratorio ofrece unas condiciones muy favorables, sin embargo, en gran cantidad de casos estos estudios y ensayos deben llevarse a cabo en obra, donde es posible que existan más impedimentos que facilidades. En ocasiones, los elementos sobre los que se quiere estudiar se encuentran a la vista en su totalidad, si bien, en muchas otras están recubiertos y solo se puede acceder a puntos muy concretos, limitando las posibilidades de actuación.

2. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

El presente estudio parte de la necesidad general de conocer las propiedades mecánicas de madera estructural en obras existentes, mayoritariamente para ejecutar obras de rehabilitación.

El principal objetivo específico consiste en calibrar el equipo Sylvatest 4.0, desarrollado principalmente para la caracterización de madera nueva, en las condiciones habituales de la madera puesta en obra. Complementariamente, se hace uso del equipo MicroSecond Timer (MST), de la empresa húngara Fakopp, para conocer una cantidad mayor de datos y poder comparar ambos equipos.

Se parte de un lote de 13 vigas de propiedades mecánicas perfectamente conocidas por haber sido clasificadas previamente mediante máquina, según norma UNE EN 408. Conociendo las propiedades mecánicas de referencia de los objetos de ensayo y las obtenidas mediante los END, la finalidad es comprobar la fiabilidad de la caracterización por velocidad de propagación, y, en caso de ser necesario, crear un modelo de correlación para ajustar los resultados en base a los valores conocidos.

Además, se completará el estudio comparando los resultados obtenidos de los siguientes tipos de mediciones:

- Mediciones con el Sylvatest 4.0 y con el equipo MST,
- Mediciones directas e indirectas,
- Mediciones directas en seco y con gel (solo aplicable al Sylvatest 4.0),
- Mediciones indirectas en seco y con gel (solo aplicable al Sylvatest 4.0),

con el fin de establecer si estas diferencias en los ensayos suponen variaciones significativas en los resultados.

En definitiva, se realizará una comparación entre todas ellas para determinar qué tipo de medición se aproxima más a los valores de referencia obtenidos previamente en máquina. Conocido el valor más aproximado, se finalizará el estudio generando un modelo entre ambos para corregir la distorsión de los resultados del Sylvatest 4.0.

3. ANTECEDENTES

3.1. LA MADERA

La madera es uno de los materiales orgánicos más presentes en la construcción, un material que ofrece altas prestaciones dada su resistencia, ligereza, y presencia en multitud de localizaciones. Destaca también su posibilidad de ser un recurso sostenible y renovable con una buena gestión forestal.

Este material heterogéneo está formado por un conjunto de tejidos organizados en capas concéntricas, de interior a exterior: núcleo, duramen, albura, cámbium, líber y corteza. Estas capas están a su vez conformadas por unos sistemas tubulares, las traqueidas, con dirección paralela a la del árbol del que forman parte. Ello determina la anisotropía característica de este material, que implica una rigidez y resistencia distinta, según la dirección en que se mida. Esta particularidad toma gran relevancia en la aplicación de ensayos para caracterización, pues sabiendo que el material no presenta las mismas propiedades en su eje longitudinal como en el transversal se puede esperar que tampoco serán iguales los resultados obtenidos de las mediciones según las direcciones en las que se tomen.

Su naturaleza orgánica conlleva unos posibles deterioros a causa de agentes destructivos que la dañan y empeoran sus propiedades. La agrupación más común que se realiza al respecto es la división en agentes bióticos, que incluye organismos vivos de diversas especies, y agentes abióticos, factores u organismos no vivos. Aquellos comprenden hongos, insectos xilófagos, bacterias o moluscos, mientras que los abióticos se refieren a la humedad, la temperatura, el fuego, los agentes químicos y la exposición a la radiación solar, entre otros.

Con el paso del tiempo, todos pueden afectar negativamente a la madera, por lo tanto, se deben realizar inspecciones en aquellas construcciones de madera que han llegado hasta nuestros días para comprobar su nivel de deterioro y sus propiedades actuales reales.

El término inspección define aquellos procesos en los que se examina y evalúa un material mediante ensayos específicos para conocer sus características. De estas inspecciones se pueden sacar conclusiones sobre la calidad y el estado del material en cuestión. En este caso, las inspecciones y ensayos se ejecutan sobre la madera, y entender su composición y sus propiedades facilita en cierta medida la aplicación de ensayos realizados sobre la misma.

3.2. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS APLICADOS EN MADERA

Originalmente, los ensayos no destructivos (END) no tenían como finalidad única caracterizar productos estructurales, propósito que cambió al comenzar a reparar y rehabilitar las estructuras de obras construidas. Comienza a manifestarse la necesidad de conocer las características de las estructuras existentes dada su abundante utilización a lo largo de la historia y así poder realizar las intervenciones convenientes (Ross & Pellerin, 1994).

Parte de la literatura evidencia estos ensayos de caracterización en estructuras de madera existentes, principalmente para conocer y valorar el estado de la misma y proceder con una intervención adecuada para la rehabilitación (Balmori Roiz, 2014; Basterra et al., 2009).

Gran variedad de especies han sido ensayadas, destacando el pino silvestre, pino pinaster y pino radiata, entre otros. El pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) es la que concierne en especial a este trabajo ya que será la especie ensayada. También conocido de forma común como Pino Albar, pino Soria, Scots Pine, Pino Flandes, y otras, entra en la clasificación de las coníferas, perteneciente a las pináceas como familia y Pinus como género. Multitud de ensayos se han realizado sobre las especies mencionadas anteriormente, algunos analizándolos individualmente, y otros comparándolos (Acuña et al., 2006; Arriaga et al., 2017; Basterra et al., 2009; Esteban Herrero, 2003; Hermoso Prieto, 2001; Íñiguez González, 2007). Aunque varios autores concluyen que existen variaciones poco significativas en las propiedades de las diferentes especies (Acuña et al., 2006; Arriaga et al., 2017).

Los ensayos pueden ser destructivos, pseudo no destructivos, o no destructivos. Los primeros son aquellos que durante el proceso de ensayo destruyen o alteran un material permanentemente. Se distinguen de los ensayos pseudo no destructivos y los no destructivos, en que estos generan una alteración leve o nula. Estos últimos, aunque son ligeramente distintos, se pueden agrupar ya que ambos evitan la destrucción permanente del material de ensayo. La principal diferencia está en un nivel de alteración más elevado por parte de los ensayos pseudo no destructivos, pues su daño es temporal o reversible y su puesta en práctica se ve reflejada en diversos artículos (Basterra et al., 2006).

Por otro lado, todos estos ensayos se clasifican en dos grupos: métodos globales, que estudian el elemento íntegramente, y métodos locales, que inspeccionan únicamente la zona de ensayo sin tener en cuenta la información referente al resto del elemento. Cada uno aporta unos datos y se deben aplicar en diversas situaciones individual o complementariamente según los objetivos deseados.

Numerosos autores han realizado ensayos locales no destructivos o pseudo no destructivos utilizando diferentes técnicas como el penetrómetro, el arranque de tornillo o el resistógrafo. Al ser ensayos que revelan información de puntos concretos de una pieza, es preferible realizar dos o más ensayos en diferentes zonas del elemento, ya que, por ejemplo, al aplicar la extracción de tornillo una única vez, el resultado puede estar sobreestimado o subestimado en un 25% (Basterra et al., 2006).

Este trabajo se centra en ensayos globales no destructivos, por lo que de aquí en adelante serán estos los que se desarrollen más en profundidad. Los ensayos globales incluyen gran cantidad de técnicas, y, al contrario que en los ensayos locales, no se suelen realizar en un único punto o área, ya que las mediciones abarcan la totalidad o práctica totalidad de la pieza.

Tradicionalmente, la toma de datos y caracterización de las estructuras de madera partía de un primer proceso de inspección visual (Ilustración 4). Aunque no se obtengan datos numéricos precisos, este proceso de reconocimiento aporta información relevante sobre la calidad del material. Para ello se identifica la existencia y ubicación de singularidades propias, y en buena medida inevitables, como son los nudos, fendas, grietas, desviaciones de fibras o deformaciones.

La localización de estas singularidades permite establecer unas primeras conclusiones sobre el estado del elemento individual y, a partir de ellas, de una estructura en conjunto en caso de ser el fin. Con el paso del tiempo, la inspección visual se ha visto sometida al

desarrollo de normas que facilitan y establecen unos criterios probados a seguir y tener en cuenta para la caracterización.

Al igual que la inspección visual ha sufrido una evolución y normalización, también lo han hecho los ensayos no destructivos. Estos, y sus respectivas técnicas (TND), se han ido combinando con la inspección visual con el fin de mejorar la estimación de las capacidades resistentes de los objetos de estudio.

Las TND basadas en principios físicos incluyen técnicas acústicas, resistivas, de corrientes inducidas... sin embargo, las que suscitan mayor interés en nuestro caso son las acústicas, basadas en el principio físico de la propagación de una onda acústica.

A continuación, se presentan brevemente algunas de las técnicas más utilizadas en los ensayos globales para continuar con un estudio más exhaustivo y detallado de aquel que concierne al presente trabajo.



Ilustración 4: Proceso de clasificación visual: a) medición del espécimen, b) identificación de la especie del espécimen, c) comprobación de los defectos, d) comprobación del contenido de humedad, e) clasificación de la muestra. Fuente: (Mokhtarruddin et al., 2016).

El conocimiento y uso de las TND se comienza a aplicar sobre los años 80 en elementos de tamaño estructural, aunque se originan con gran anterioridad. En octubre de 1846 se presentan los primeros ensayos dinámicos basados en **técnicas vibratorias**, en la academia de ciencias de París (Llana, 2016). Este tipo de técnica necesita de un objeto de ensayo apoyado en ambos extremos sobre el que se induce una vibración, permitiendo que oscile de forma libre y así genere una frecuencia oscilatoria a partir de la cual se puede determinar el MOE (Pellerin & Ross, 2015).

Las **técnicas acústicas** se inician en la aplicación sobre materiales basados en la madera en la década de 1960. En 1995, Voichita Bucur recoge los principios y particularidades de la aplicación de TND acústicas en su libro *Acoustics of Wood*, sentando unas bases claras y muy completas sobre estas técnicas en base a un amplísimo uso de bibliografía. Las técnicas acústicas se basan en una onda acústica que viaja a través de un material hasta el encuentro con un receptor, detector de la variación y/o velocidad de la onda según los defectos con los que interfiere en su recorrido (Pellerin & Ross, 2015).



Ilustración 5: Medición con técnicas no destructivas de un árbol en pie. Fuente: <https://shorturl.at/bxFVZ>

En 2006 la profesora Voichita Bucur publica una segunda edición de su libro *Acoustics of Wood*, en la que amplía el conocimiento recogido y añade las novedades que se han ido presentando en torno a esta temática, incluyendo los avances relativos a los ultrasonidos.

Las **técnicas ultrasónicas** se han desarrollado intensamente desde la década de 1970. Constan generalmente de un aparato emisor, requerido para emitir ondas acústicas ultrasónicas con una frecuencia superior a los 20 kHz, y un aparato receptor encargado de recibirlas, registrando sus variaciones. Tras generar esta información se procesan unos datos que reflejan el estado y las características del elemento ensayado.

Las frecuencias de ultrasonidos más adecuadas para caracterizar elementos estructurales son aquellas próximas a 20 kHz, ya que supone un mejor acoplamiento y una reducción en la atenuación de las ondas, en comparación con las frecuencias elevadas cercanas a 1 MHz (Sandoz, 1996).

Además, existe la posibilidad de analizar el tiempo de vuelo o velocidad de propagación de la onda o la frecuencia de la vibración inducida (Ilustración 7).

La medición de tiempo de vuelo analiza el tiempo (t o ToF) que tarda una onda acústica en recorrer una distancia (d). En el presente trabajo este dato se analiza con los equipos MicroSecond Timer Fakopp y Sylvatest 4.0, aunque se ha investigado sobre numerosos ensayos realizados también con el Sylvatest DUO y TRIO (Ilustración 6).



Ilustración 6: Equipo Sylvatest Duo (izquierda). Fuente: <https://shorturl.at/fwAWX>; Sylvatest Trio. (centro). Fuente: <https://shorturl.at/beZ05>; MicroSecond Timer Fakopp. (izquierda) Fuente: <https://shorturl.at/zCPSW>

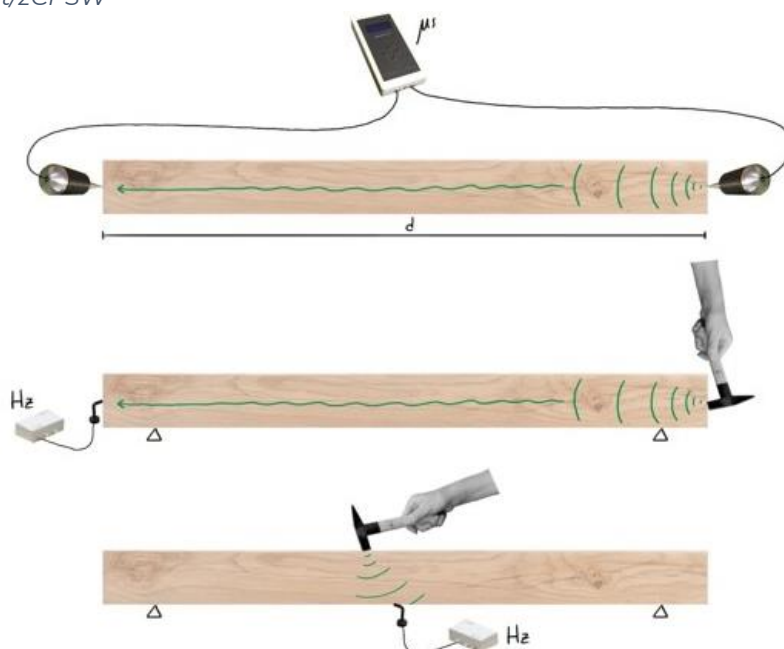


Ilustración 7: Esquemas de tipos de mediciones. Arriba: medición longitudinal del tiempo de vuelo; Centro: medición longitudinal de frecuencia inducida; Abajo: medición transversal de frec. Inducida.

TFG APLICACIÓN DE LA MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DE ULTRASONIDOS (SYLVATEST 4.0) A LA CARACTERIZACIÓN DE MADERA ESTRUCTURAL DE PINO SILVESTRE

La caracterización en condiciones de laboratorio es favorable y, en general, carece de inconvenientes de acceso al material de ensayo, por lo que las mediciones aplicadas comienzan siendo directas. Sin embargo, tras el salto a la obra edificada surge una nueva problemática: el complicado o imposible acceso a las testas de los elementos horizontales. Esta condición desfavorable pero presente en multitud de casos fuerza a una adaptación a esta nueva realidad y el desarrollo de otro tipo de mediciones para obtener la información necesaria: las mediciones indirectas (Ilustración 9) (Ilustración 8) y las mediciones transversales.

Estos equipos, frecuentemente utilizados en la caracterización de madera estructural, han permitido la evaluación y estimación de propiedades y calidad de madera sin alterar sus propiedades, respondiendo a la definición de TND. Y, aunque la tecnología ha permitido realizar avances que facilitan la realización de ensayos y la toma de datos, siempre ha sido y será conveniente combinar varias de estas técnicas y sus respectivas conclusiones.



Ilustración 8: Aplicación de una medición longitudinal indirecta con el Sylvatest-Duo: estudio en un castillo del siglo XIII, Sion, Suiza. Fuente: <https://shorturl.at/tLPRY>



Ilustración 9: Medición indirecta en estructura de madera. Almacenes generales de París. Fuente: <https://shorturl.at/ekquM>

EQUIPOS SYLVATEST

El **Sylvatest 4.0** es la cuarta generación del equipo Sylvatest, equipo de referencia para la estimación de las características de la madera, desarrollado por la empresa francesa CBS-Lifteam. Este equipo de medición, perteneciente a las técnicas no destructivas basado en la emisión de ultrasonidos, ha ido evolucionando, pasando por el Sylvatest, el Sylvatest Duo, el Sylvatest Trio, hasta llegar a la cuarta generación, aquella con la que se desarrollan las mediciones del presente trabajo. El Sylvatest emite ondas de ultrasonidos de 30 kHz y los Sylvatest Duo y Trio de 22 kHz.

En **1990** se presenta el **Sylvatest**, primera generación con tecnología ultrasónica. Consta de una consola, dos palpadores y una conexión entre sí por medio de dos cables. Los cables son tipo BNC y la consola tiene un tamaño de 40x30x20 cm y un peso de 3 kg.

En **1998** el **Sylvatest DUO**, también basado en tecnología ultrasónica, presenta una mejora principal sobre el equipo anterior reduciendo considerablemente su tamaño y peso, con unas dimensiones de consola de 20x10x4 cm y un peso de 0,5 kg. El tipo de cables se mantienen como BNC y los componentes son los mismos.

Cinco años más tarde, en **2003**, se estrena la tercera generación, el **Sylvatest TRIO**. Supone un gran cambio ya que es el primer equipo que incluye, aparte de tecnología ultrasónica, tecnología acústica. Las mejoras incluyen cables de mejor calidad y conexión más rápida y la posibilidad de realizar mediciones acústicas. El equipo consta de los mismos componentes y la conexión continúa siendo mediante cable, aunque se mejora el tipo y pasan a ser tipo LEMO. Las dimensiones de la consola, al igual que el peso, se mantienen.

Por último, en **2022**, se lanza el **Sylvatest 4.0**, destacado por integrar una conexión inalámbrica, sustituyendo los cables por conectividad Bluetooth. Aunque se mantiene la tecnología del Sylvatest TRIO, se sustituya la consola por una aplicación de móvil que muestra los resultados. En el apartado Material y método de este trabajo se realizará una descripción técnica más completa de este último equipo.

EQUIPO MICROSECOND TIMER FAKOPP (MST)

El equipo **MST** de la empresa Fakopp pertenece a las técnicas acústicas, basándose en la generación de ondas sónicas inducidas en un sensor emisor por impacto y recibidas tras un tiempo por un sensor receptor. En este caso lo que se mide es el tiempo transcurrido entre emisión y recepción, en microsegundos.

En **1994** se desarrolla la primera versión de este equipo con el fin de evaluar la madera estimando su rigidez y posibles deterioros ocultos. Se basa en la emisión de una onda y la medición de su tiempo de propagación. El equipo constaba de una consola, dos cables conectores y dos sensores, además de dos martillos.

En **2001** la primera versión pasa a estar descatalogada y se sustituye por un equipo con otro diseño y un sensor de inicio distinto. El funcionamiento continúa siendo el mismo, al igual que los elementos que lo componen. En el apartado Material y método de este trabajo se realizará una descripción técnica más completa de este equipo.

Tras conocer cómo han evolucionado y las características generales que los definen, se extraen datos y conclusiones de la amplia variedad de ensayos y estudios que se han realizado a lo largo del tiempo además de algunos factores que condicionan los resultados.

3.2.1. FACTORES DE INFLUENCIA

El conocimiento y control de las condiciones en las que se realizan los ensayos científicos y las condiciones del propio material ensayado es de gran importancia, ya que cualquier variación puede suponer un cambio en el desarrollo de las mediciones y modificar los resultados. Por ejemplo, hoy en día se sabe que distintos contenidos de humedad (CH) de la madera conllevan distintos resultados tanto en los MOE como en la velocidad de propagación de los ultrasonidos.

Tiemann (1906) fue el primero en describir la relación entre el **CH** y el **MOE**, mencionando el término FSP como el punto de saturación de la fibra a partir del cual el MOE se incrementa de forma directamente proporcional al nivel de secado de la pieza. En otras palabras, el aumento de contenido de humedad de una pieza reducirá el MOE resultante. Tiemann sitúa el FSP entre el 22% y 31% de contenido de humedad según la especie.

Según Kollmann & Côté (1968), esta relación lineal se puede considerar entre el 8% y el 22% de contenido de humedad, definiendo una relación inversamente proporcional entre ellos, en la que el MOE aumenta un 1,5% por cada disminución del 1% del contenido de humedad de los ensayos (Ilustración 10).

Siguiendo con la influencia de contenido de humedad en los ensayos en madera, Sandoz (1989) estudia la relación entre el **CH** y la **velocidad de propagación** de ultrasonidos y establece una relación inversamente proporcional en la que cada incremento del 1% en el CH implica una disminución del 0,8% en la velocidad de propagación. Esta relación se considera lineal entre el 5% y el 30% del contenido de humedad (Ilustración 10).

Otros autores indican que el aumento del **CH** significa una mayor influencia de la **temperatura** en la madera. La temperatura afecta de forma que su aumento provoca una reducción en la velocidad de propagación (Arriaga Martitegui et al., 2002).

Sabiendo que el CH tiene influencia en los resultados, gran parte de la literatura trata sobre ensayos realizados en laboratorio con unas condiciones concretas sobre elementos con un contenido de humedad de referencia del 12%, para facilitar la lectura y comparación de los datos sin necesidad de tratarlos. Al establecer un 12% de CH de referencia se asegura estar dentro de los rangos mencionados anteriormente en los que las relaciones son lineales (Kollmann & Côté, 1968; Sandoz, 1989).

En ocasiones no es posible realizar los ensayos en las condiciones de referencia. En estos casos se pueden transformar los datos teniendo en cuenta las relaciones mencionadas anteriormente entre el contenido de humedad y las velocidades de propagación y MOE, para normalizar los resultados y facilitar su lectura y comparación.

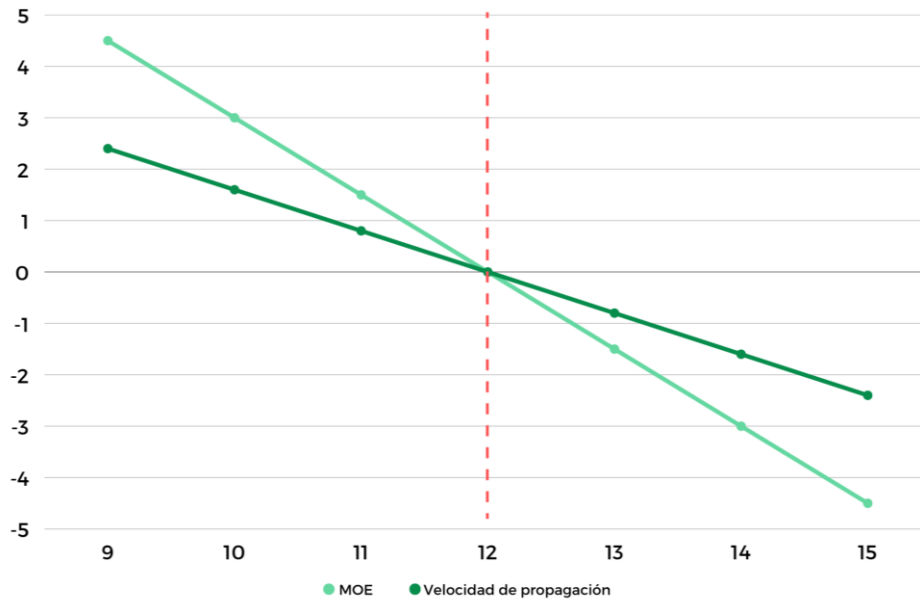


Ilustración 10: Gráfico comparativo del aumento de la influencia del contenido de humedad en el MOE y en la velocidad de propagación. Basado en las teorías de Kollmann & Côté (1968) y Sandoz (1989). En horizontal se indica el contenido de humedad; en vertical se muestra el porcentaje por unidad de MOE y velocidad de propagación.

Además de estos factores, también se han estudiado algunas singularidades físicas de la madera como el alabeo, particularidad que concierne a este estudio dado que ocurre en ciertas vigas pertenecientes al lote con el que se trabajará (Ilustración 11).

Sin embargo, al contrario que en los anteriores casos, se ha determinado que esta deformación no repercute de forma directa en la resistencia, aunque sí lo hace en la calidad, según Arriaga et al. (2023), pues las recomendaciones indican ciertas restricciones en aquellas piezas de madera que tengan una futura puesta en obra.



Ilustración 11: Viga nº4 alabeada.

3.2.2. ESTUDIOS Y ENSAYOS PREVIOS

La literatura científica sobre END aplicados en madera estructural es amplia y variada. Este apartado presenta una recopilación de varios estudios que han utilizado técnicas acústicas y ultrasónicas. Los estudios abarcan diversos enfoques y métodos aplicados en diferentes situaciones y tipos de madera. Esta literatura explora aspectos como la influencia de la dirección de la fibra en las mediciones y las mediciones en diferentes especies, entre otros. Este conjunto de información y sus resultados ayudan a comprender la respuesta de la madera a los ensayos y generar un marco de referencia con el que comparar los resultados del presente estudio.

Acuña et al. (2006) estudia cómo la **dirección de la onda y la distancia entre palpadores modifican la velocidad de propagación**. Trata cinco especies, entre ellas pino silvestre, pino pinaster y pino radiata, determinando las velocidades longitudinales, transversales, y con un ángulo α respecto de la dirección de la fibra. Utilizó 62 piezas de pino de las tres primeras especies mencionadas, con una longitud media de 405 cm y realizó tres tipos de análisis para clasificar los elementos en clases resistentes. En primer lugar, desarrolló un análisis visual, para después proseguir con mediciones mediante ultrasonidos y terminar con un tratamiento estadístico de los datos. Comienza con las mediciones longitudinales correspondientes con el equipo Sylvatest y obtiene la velocidad de propagación, con una media de 5492 m/s. Todas las velocidades superan el umbral de los 5000 m/s, límite a partir del cual otros autores consideran que las piezas poseen una buena capacidad resistente (Basterra et al., 2009; Esteban Herrero, 2003). Tras un ajuste de las velocidades para adecuarlas a un 12% de contenido de humedad y el tratamiento de los datos apropiado, establece un modelo de segundo orden que relaciona la velocidad de ultrasonidos con un ángulo α (Ilustración 12).

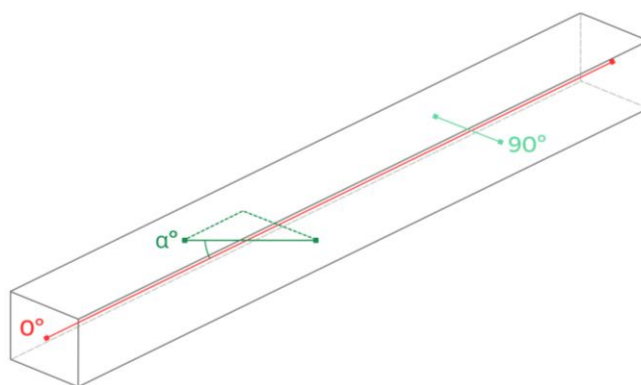


Ilustración 12: Medidas longitudinales, transversales y con un ángulo α .

Este ángulo se refiere a aquel que forma el eje que une los palpadores con la directriz del elemento de ensayo, ya que en ocasiones se toman, además de las medidas longitudinales directas e indirectas (0°), medidas transversales (90°) o con un ángulo α . La siguiente ecuación (1) es aplicable con distintos coeficientes que entran en los siguientes rangos: a) entre 0,477 y 0,730; b) entre -112,66 y -84,92; c) entre 5297,5 y 6160,3, resulta en diferentes R^2 de entre 0,946 y 0,992.

$$V = a \alpha^2 + b \alpha + c$$

1

*Donde: V (m/s) es la velocidad de propagación; a , b y c son coeficientes establecidos experimentalmente; α es el ángulo en el que se realiza la medición respecto al eje longitudinal.

Todas las especies responden de forma similar a la variación del ángulo. Conociendo todos los resultados y realizando una clasificación del material ensayado en clases resistentes, se refleja un 72% de acierto en la clasificación realizada en base a la velocidad de ultrasonido, siendo mayor que el 53% de la clasificación visual, coincidiendo con otros autores, que asocian una mayor fiabilidad a las TND sobre la clasificación visual (Esteban Herrero, 2003).

Otra de las relaciones resultantes del estudio es entre la velocidad ultrasonidos (V) y la distancia entre palpadores (L) definida por la siguiente fórmula (2):

$$V = aL + b \quad 2$$

**Donde: V (m/s) es la velocidad de propagación; a y b son coeficientes establecidos; L (m) es la distancia entre palpadores.*

Los valores de a) oscilan entre -1,087 y -1,82, y los de b) entre 6106,7 y 5902,1. Resultando en valores de R² entre 0,81 y 0,87. Se demuestra así que aumentar la distancia entre transductores supone una disminución de la velocidad de propagación.

Esta afirmación es también concluida en el estudio realizado por Arriaga et al. (2017) que se realiza sobre vigas de madera de cuatro especies cuyas dimensiones son 9x14x400 cm³. Este estudio se realiza con los equipos Sylvatest Duo, MicroSecond Timer y USLab. La metodología se lleva a cabo en tres pasos: una clasificación visual MEG previa, según la norma UNE 56544: 2011 teniendo en cuenta la existencia de nudos, mediciones de la velocidad de propagación, y la estimación del MOE estático, la densidad y el contenido de humedad. Se realizan cinco tipos de mediciones:

- Medida directa de testa a testa.
- Medida indirecta (palpadores a 45° respecto de la cara) con ambos palpadores en la cara superior.
- Medida indirecta (palpadores a 45° respecto de la cara) con ambos palpadores en el canto.
- Medida indirecta (palpadores a 45° respecto de la cara) con los palpadores en caras opuestas.
- Medida indirecta (palpadores a 45° respecto de la cara) con los palpadores en cantos opuestos.

Todas las medidas indirectas se realizan para **comprobar la efectividad de medidas no directas**, dada la problemática de aplicar mediciones directas en obra.

El MOE del objeto de ensayo, un lote de vigas biapoyadas simétricamente y cargadas, se obtiene según la norma UNE-EN 408:2011+A1:2012. Los resultados muestran, al igual que el estudio anteriormente mencionado, que la velocidad aparente varía con la longitud, aunque no debiera ser así.

Tras conocer esta información se realiza una corrección sobre este desfase tiempo de vuelo de la onda de sonido aplicando la ecuación (3) aplicando distintos valores en los coeficientes que varían según el equipo usado y el tipo de medición, obteniendo unos valores de r² de entre 0,92 y 0,97 para todos los equipos.

$$ToF = [a + (b \times l)] \quad 3$$

* Donde: ToF es el tiempo de vuelo; a es el coeficiente del punto de intersección; b es el coeficiente que indica la pendiente de la ecuación; l es la distancia entre palpadores.

Tras aplicar esta corrección, las velocidades de propagación son aproximadamente constantes si la longitud oscila entre 2 m y 4 m. Por último, también se estima que el MOE dinámico y el MOE estático, siendo mayor el primero, tienen un coeficiente de relación entre 1,1 y 1,5 con buenos coeficientes de R^2 (entre 0,76 y 0,85) y resultando en una variación poco significativa según la especie (Arriaga et al., 2017).

Basterra et al. (2009) estudiaron elementos de **madera estructural de pino silvestre**, con la diferencia de que en este caso se realizó **sobre patrimonio construido**. Comparte con una amplia variedad de estudios una primera fase de inspección visual, según la norma UNE 56544, 2011, y una fase de ensayo, ejecutada con el equipo Sylvatest. El equipo mide la velocidad de propagación entre palpadores, dato que se introduce en la ecuación (4) para poder obtener el MOE dinámico.

$$MOE_{din} = \rho \times V^2 \quad 4$$

* Donde: MOE_{din} es el Módulo de Elasticidad Dinámico; ρ es la densidad; V es la velocidad de propagación.

Se realizan las mediciones indirectas con el equipo instalado a 45° sobre 17 vigas de pino silvestre de una estructura existente, corrigiendo los valores en función del ángulo entre palpadores respecto de la longitudinal y de la distancia entre los mismos. Los resultados muestran unas velocidades de propagación superiores a 5000 m/s, MOE dinámicos entre 10886 N/mm² y 14048 N/mm² y MOE estáticos ligeramente superiores a 11000 N/mm², valores elevados indicadores, según la literatura, de vigas de buena calidad (Basterra et al., 2009).

Esteban Herrero (2003) realiza ensayos sobre 19 piezas de dos especies de pinos localizadas en forjados, de entre 4 m y 5 m de longitud y escuadría de 13 cm x 18 cm. Poseen un contenido de humedad mínimo del 8% y máximo del 12%. Se ejecutan una serie de mediciones directas e indirectas con el Sylvatest Duo que resultan en una velocidad media de propagación superior a 4900 m/s, entrando también dentro del grupo de maderas de buena calidad con altas propiedades mecánicas.

En la tesis doctoral de Íñiguez González (2007) se estudian 120 vigas de pino silvestre de 4,96 m de longitud media y escuadrías de 15cm x 20cm, y 20cm x 25cm. El contenido de humedad de las piezas se encuentra alrededor de un 12%. En primer lugar, al igual que en otra literatura mencionada, se realiza una clasificación visual previa, con clases visuales ME1 y ME2 y MEG. El equipo utilizado para las mediciones con técnicas ultrasonidos es el Sylvatest Duo.

Se realizan mediciones directas obteniendo unos resultados medios de entre 4979 m/s y 5022 m/s, valores elevados como ya se ha mencionado con anterioridad. Los MOE dinámicos obtenidos resultan en 13047 N/mm² de media, datos que se corresponden con buenas propiedades mecánicas. Las mismas mediciones se ejecutan también con el Portable Lumber Grader (PLG), equipo que, al igual que el MicroSecond Timer, proviene de la empresa húngara Fakopp, utilizando técnicas vibratorias.

Los resultados de las mediciones directas plasman velocidades de propagación de entre 4387 m/s y 4559 m/s, datos ligeramente inferiores a los obtenidos con las técnicas ultrasonidos. Los MOE dinámicos obtenidos con esta técnica presentan un valor medio de 10859 N/mm², siendo menores, al igual que las velocidades.

Las conclusiones de este trabajo reflejan que, tanto en los ensayos con técnicas ultrasonidos como en los ensayos de vibraciones longitudinales, las vigas con mayor escuadría presentan velocidades de propagación ligeramente inferiores, además de un MOE dinámico más elevado en probetas de mayor escuadría ensayadas mediante técnicas ultrasonidos y un MOE dinámico menor en aquellas ensayadas con técnicas vibratorias.

Otros ensayos que también utilizan el equipo PLG son los realizados por Casado et al. (2010), quienes ensayan 322 piezas de escuadrías que se encuentran entre 15 x 50 cm y 20 x 10 cm, y longitudes de aproximadamente 3,5 m. Se realiza una clasificación visual de acuerdo con la norma española (UNE 56544, 2011) para después proseguir con ensayos con el PLG. Los resultados necesitan de la aplicación de un factor de corrección (entre 0,76 y 0,92) para obtener los MOE finales. Tras la aplicación del factor de corrección, los MOE dinámicos presentan valores entre 7699,41 N/mm² y 7871,65 N/mm², siendo menores aquellos que corresponden a las vigas con escuadrías mayores, compartiendo esta conclusión con otros autores (Íñiguez González, 2007). Los MOE de estas vigas resultan inferiores a otros plasmados en distintos estudios, lo que puede indicar una calidad menor.

El trabajo de Balmori Roiz (2014) vuelve a estudiar **la influencia del ángulo α (α°) en la velocidad** medida de forma indirecta (Ilustración 13). La finalidad es relacionar las mediciones no longitudinales con las longitudinales para comprobar su relación. Lleva a cabo el ensayo de elementos estructurales de madera en dos condiciones distintas: primero, en laboratorio y, posteriormente, en una estructura histórica existente, poniendo en práctica las conclusiones obtenidas en la primera parte del estudio.

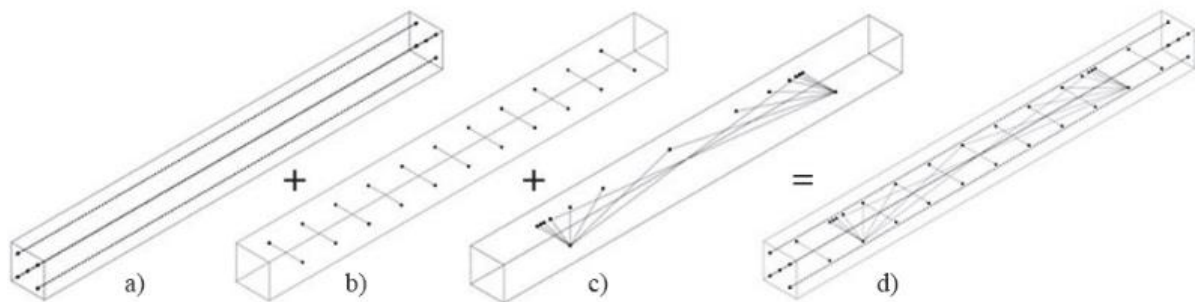


Ilustración 13: Medidas realizadas en las piezas ensayadas en laboratorio por Balmori Roiz (2014).

En el laboratorio se ensayan 12 viguetas de madera pertenecientes a dos especies distintas de gran escuadría, con dimensiones de 600x20x20 cm³ y con un contenido de humedad en torno al 7%, llevando a cabo un total de 384 medidas. El equipo con el que se ejecutan los ensayos es el MicroSecond Timer, de la empresa Fakopp.

El proceso comienza realizando mediciones longitudinales, transversales y con gran variedad de ángulos formando una especie de abanicos, como se muestra en la Ilustración 13.

Las velocidades longitudinales arrojan una media de 4933,13 m/s y las transversales de 1401,60 m/s. A continuación, se comparan entre sí y se establecen una serie de conclusiones:

- Las velocidades muestran datos normales sin diferencias estadísticas significativas, por lo que se pueden dar por válidas y con características similares,
- A medida que aumenta el ángulo entre la directriz de la fibra y la dirección de propagación la velocidad disminuye.
- Las velocidades de ambas especies muestran una similitud muy elevada por lo que se establece un modelo ajustado compatible con ambas especies.

Los resultados de los ensayos muestran que los valores más compactos, y por lo tanto más fiables, son aquellos que se hicieron con ángulos que se encuentran entre 45° y 75°.

Para poder continuar con los procesos comparativos y de estudio se debe realizar una corrección de los valores de velocidad de propagación. En la literatura anteriormente mencionada, este paso no era necesario ya que la velocidad de referencia es aquella tomada en dirección longitudinal, sin embargo, en este caso cuenta con una gran importancia. Para realizarlo se crea un modelo lineal que relaciona la velocidad a 0° con la velocidad a cualquier ángulo. Esta no es la única corrección necesaria, ya que el contenido de humedad de referencia es del 12%, por lo que se aplica otra ecuación que tiene en cuenta la relación entre contenido de humedad y propiedades mecánicas y ajusta los datos (Balmori Roiz, 2014), tal y como se menciona en la literatura (Sandoz, 1989).

Tras las correcciones pertinentes se vuelven a estudiar los resultados y se llega a la misma conclusión de un comportamiento similar en ambas especies, por lo que se pueden tratar como un mismo grupo de estudio. También establece el ángulo de aplicación de 90° no genera unos resultados del todo óptimos.

Como conclusión final se propone el ángulo de 63° como ángulo preferente para el uso en obra, dada su facilidad de reproducción, requisito indispensable en mediciones de estructuras existentes. Esta conclusión se justifica con la relación entre ambos catetos de $b:b/2$, siendo b el canto del elemento de ensayo (Balmori Roiz, 2014).

Todas estas conclusiones se aplicaron en un edificio residencial del s. XIX. Las mediciones se realizan a 45°, 60°, 75° y 90° y los resultados muestran velocidades de propagación muy dispersas a 45° y muy agrupadas a 75°. Se realiza la misma corrección de dirección de velocidad de los ángulos para transformarlas en velocidades equivalentes a 0° y se refleja una mayor dispersión de los datos.

Aunque el autor afirma la conveniencia de realizar una mayor cantidad de ensayos y con una muestra más representativa, concluye en una influencia determinante de la dirección de la fibra, la posibilidad de relacionar la velocidad de referencia V_0 con la velocidad según el ángulo de medición y el propio ángulo, y, por último, una serie de ángulos favorables descartando el resto dada su complejidad de reproducción (Balmori Roiz, 2014).

En resumen, la literatura coincide en varias conclusiones y procesos.

Por ejemplo, se comparte una clara tendencia a la realización de clasificaciones visuales en las primeras fases de los ensayos, a pesar de tener una menor precisión que las TND. Posteriormente los autores complementan la clasificación con END para obtener resultados más precisos. Pero no se prescinde de la clasificación visual, todos ellos combinan ambos métodos.

Lo mismo ocurre en cuanto a la intención de presentar los resultados de los estudios, pues se busca en la medida de lo posible atenerse a unos criterios normalizados para facilitar la comprensión de estos.

Y, en cuanto a factores que modifican los resultados, aunque teóricamente el aumento de distancia entre sensores no debería influenciar la velocidad de propagación, la realidad es que esta última sufre cierta atenuación siendo aconsejable aplicar unas fórmulas de corrección.

4. MATERIAL Y MÉTODO

TFG APLICACIÓN DE LA MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DE ULTRASONIDOS (SYLVATEST 4.0) A LA CARACTERIZACIÓN DE MADERA ESTRUCTURAL DE PINO SILVESTRE

En esta sección se describen los procedimientos utilizados para la obtención de los datos necesarios para el desarrollo de esta investigación. Se hace referencia a los equipos empleados además de información y singularidades tenidas en cuenta para garantizar unos resultados rigurosos y válidos.

También, se desarrollará la información sobre los instrumentos de laboratorio utilizados en el estudio y los parámetros de control aplicados para verificar la precisión de los resultados obtenidos.

Esta sección tiene como fin describir exhaustivamente y clarificar los métodos y materiales empleados en la investigación constituyendo una base sólida sobre la que sustentar la misma.



Ilustración 14: Cabezas de las vigas de ensayo.

4.1. EQUIPOS DE LABORATORIO

Se presentan a continuación los equipos de laboratorio que han formado parte del proceso de investigación.

HYDROMETTE BL A PLUS

Medidor electrónico de humedad para aplicación sobre madera utilizado para obtener el contenido de humedad de las vigas de ensayo (Ilustración 15).

Este medidor, desarrollado por la empresa alemana Gann, permite conocer el contenido de humedad de una pieza de madera seca en porcentaje (%). Tiene un tiempo de respuesta menor a 2 segundos.

Se pueden llevar a cabo mediciones basadas en resistencia y mediciones capacitivas en la madera. El primer método es el utilizado en la investigación y consiste en la medición de la resistencia eléctrica entre dos electrodos clavados en la madera.

El equipo consta de un electrodo hincable M18 con dos agujas y un martillo deslizante con el que se introducen y extraen las agujas mediante golpeo. Se completa con una consola con pantalla, con medidas de 185 x 50 x 30 mm y un peso de 200 g, donde se muestra el contenido de humedad en porcentaje de la madera y una batería de 9 V.



Ilustración 15: Hydromette BL A plus sobre probeta de ensayo.

TALADRO

Se ha utilizado un taladro eléctrico de la marca WORX modelo WX128.9 para realizar los orificios donde se introducen los palpadores del equipo Sylvatest. Está destinado a uso en madera.

El taladro pesa 0.8 kg y cuenta con una batería de 12 V y un par máximo de apriete de 25 Nm.

EQUIPO SYLVATEST 4.0

El Sylvatest 4.0, equipo no destructivo basado en la emisión de ondas acústicas de ultrasonidos, consta de dos sondas inalámbricas de tipo cónico de 185 x 52 mm y un peso de 405 g cada una. Ambas sondas son iguales físicamente y se componen de dos partes: un palpador de forma cónica, que se introduce en el material de ensayo, y una parte recubierta de plástico rígido donde se encuentran los indicadores de luz que informan sobre el estado de la batería, de la medición y de la conectividad Bluetooth (Ilustración 17).

Cada sonda tiene una función diferente: una es transmisora y la otra receptora. Aquella emite una secuencia automática de 10 disparos de ondas acústicas ultrasónicas, cercanas a los 20 kHz, la cual se propaga a través del material y es recibida por la sonda receptora.

Toda esta información es recibida por la aplicación Sylvius (Ilustración 16), complemento del equipo y que se ejecuta sobre un teléfono móvil convencional, encargada de procesarlo junto a la información previa que el operador ha de aportar sobre el material de ensayo:

- Especie.
- Contenido de humedad (%).
- Tipo de medición (directa o indirecta).
- Distancia entre palpadores (cm).

Recibe la información de la medición en sí misma:

- Velocidad de propagación (μs).
- Desviación estándar (%).
- Número de disparos de ondas efectuados correctamente.

Finalmente, muestra los resultados obtenidos a partir de la información de la medición:

- Velocidad Bruta – V_b (m/s).
- Velocidad Corregida – V_c (m/s).
- Módulo de Elasticidad – MOE (MPa).
- Módulo de Rotura – MOR (MPa).
- Clase Resistente – C.

The screenshot shows the 'Measurement' screen of the Sylvius application. It is divided into several sections:

- Parameters:** A table with the following data:

Species:	Pine
Moisture:	10 [%]
Transducers distance:	484 [cm]
Indirect measurement:	<input type="checkbox"/>
- Sylvatest measurement:** A section with a toggle for 'Perform signal digitization' (turned off) and a diagram of the probe.
- Search for devices:** A button with a magnifying glass icon.
- OK:** A green checkmark indicating the measurement is complete.
- Measurement Data:**
 - Propagation time: 893 [μs]
 - Standard deviation: 0.7 [%]
 - Valid shots count: 10
- Results:** A table with the following data:

Rough speed:	5,420 [m/s]
Corrected speed:	5,354 [m/s]
MOE:	11,427.88 [MPa]
MOR:	27.69 [MPa]
- Class:** A box containing the value 'C27'.

Ilustración 16: Aplicación Sylvius. Resultados mostrados tras la medición directa con el equipo Sylvatest de la viga n^o1.

Para garantizar el correcto acoplamiento de las sondas, el equipo incluye una broca especial, que reproduce la misma forma cónica de los palpadores, con posibilidad de instalarse en un taladro eléctrico convencional para hacer los orificios requeridos.



Ilustración 17: Palpador emisor del equipo Sylvatest para medición directa.

EQUIPO MICROSECOND TIMER FAKOPP

El equipo MicroSecond Timer, preparado para mediciones del tiempo de vuelo o tiempo de propagación de una onda, incluye dos sensores (piezosensores SD02) con cables conectores BNC y una consola portátil que básicamente es un cronómetro. El equipo admite un error de medición de tiempo de $\pm 3 \mu\text{s}$ (Ilustración 18).

Cada uno de los sensores cumple una función y se distinguen mediante una banda de color roja o negra en la cabeza de los mismos, que indica respectivamente cuál es el emisor y cuál el receptor. En el extremo de ambos sensores se encuentran unos clavos de 60 mm de longitud.

Los cables conectores BNC integrados en los sensores se acoplan a la consola portátil que muestra la velocidad que tarda en llegar la onda de impacto del palpador emisor al receptor (Ilustración 19). La consola tiene unas dimensiones de 45 x 82 x 150 mm y un peso de 347 g.

Como material complementario cuenta también con un martillo con mango de madera y cabeza de goma cuya finalidad es clavar los sensores del equipo, y otro con mango de madera y cabeza de acero, con un peso total de 100 g, destinado a inducir el golpe que genera las ondas de impacto.



Ilustración 19: Consola del equipo MST.



Ilustración 18: Equipo MST durante la medición directa de una viga.

4.2. MATERIAL FUNGIBLE

GEL DE ACOPLAMIENTO

Aplicado únicamente en las mediciones realizadas con el Sylvatest, se utiliza un gel conductor de ultrasonidos de la marca Konix de 250 ml (Ilustración 20). Se introduce en los agujeros realizados con el taladro antes que las sondas del Sylvatest para proporcionar mayor nivel de acoplamiento y asegurar el ajuste del equipo con la finalidad de comprobar si los datos obtenidos son de mayor calidad.



Ilustración 20: Gel de acoplamiento KONIX tras su aplicación y una medición directa.

El uso de gel de acoplamiento se considera también en otros estudios en caso de necesitar un mejor acoplamiento, aunque cuando este es correcto se suele desestimar (Conde García et al., 2007).

4.3. MATERIAL DE ENSAYO

VIGAS DE MADERA

El material ensayado son 13 vigas de madera perteneciente a la especie de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) aportadas por Maderas Barrio (Soria) y proporcionadas por el GIR de Estructuras y Tecnologías de la Madera, perteneciente a la Universidad de Valladolid (Ilustración 21). Sus dimensiones son variables y el contenido de humedad, semejante para todas, es del 10% (Tabla 1). Las vigas han sido previamente ensayadas según norma UNE-EN 408:2011+A1:2012 y se conocen sus Módulos de Elasticidad global de canto (MOEGTO).



Ilustración 21: Vigas de ensayo.

Tabla 1: Identificación y números de las vigas con sus dimensiones y MOEs.

ID	N.º VIGA	BASE (mm)	CANTO (mm)	LONGITUD (mm)	DENSIDADES (g/mm ³)	MOEGTO (N/mm ²)
1	V1	90	140	4840	460,79	12129
2	V3	90	140	4840	485,09	9993
3	V4	88	134	4560	485,65	9533
4	V6	90	140	4840	575,32	12382
5	V7	90	140	4840	488,26	11427
6	V8	90	140	4840	483,04	10358
7	V9	90	140	4840	510,10	10593
8	V10	87	136	4840	582,32	13925
9	V12	90	140	4840	486,58	11007
10	V13	90	140	4840	485,94	11690
11	V14	90	140	4840	583,68	15270
12	V15	90	140	4840	484,19	8853
13	V16	90	140	5090	497,59	10074

4.4. METODOLOGÍA

Los ensayos han seguido una estructura ordenada explicada a continuación con detalle, posibilitando, en caso de que así lo desee o necesite cualquier usuario, la reproducción del mismo.

4.4.1. MÉTODOS ESTIMATIVOS

PASOS PREVIOS A LOS ENSAYOS: PREPARACIÓN DEL MATERIAL

Se colocan las vigas biapoyadas sobre una estructura metálica, elevándolas del suelo (Ilustración 22).



Ilustración 22: Vigas de ensayo biapoyadas.

Previamente a los ensayos se lleva a cabo una comprobación de las dimensiones de las vigas (base, canto y longitud) con un flexómetro convencional, de precisión ± 1 mm. En esta etapa se realiza una toma de datos de todas aquellas características físicas de las vigas que puedan influir en sus propiedades (fendas, nudos, torsión de cara o canto, gemas, etc.).

Tras estos primeros pasos, se procede al marcaje de los puntos desde los que se realizarán las mediciones. Para el Sylvatest, se practican unas marcas donde se taladrarán los orificios de las medidas directas en las testas, y para las medidas indirectas las marcas se realizan sobre el canto superior.

Las marcas correspondientes a las mediciones del equipo MicroSecond Timer no se realizan, sino que se toman de referencia las del Sylvatest.

Después, se toman las distancias entre los palpadores de los equipos, tanto para medidas directas como indirectas.

A continuación, se toman unos testigos de las vigas ensayadas para conocer sus contenidos de humedad. Estas probetas son resultantes de los anteriores ensayos realizados sobre el lote de vigas que se han mantenido en el mismo laboratorio que las vigas permaneciendo el mismo tiempo bajo las mismas condiciones, por lo tanto, se considera que su contenido de humedad es equivalente a las vigas.

Se determina la humedad por el método de resistencia eléctrica según lo que dicta la norma UNE-EN 13183-2:2002. Con el Hydromette BL A plus ya descrito anteriormente.



Ilustración 23: Uso del Hydromette BL A plus para la estimación del contenido de humedad de una probeta testigo.

Se clavan las agujas mediante el martillo deslizante incluido y se realizan la medición de los contenidos de humedad en todas las probetas una a una (Ilustración 23). Según se realiza cada medición se anota el porcentaje que aparece en la consola.

NOMENCLATURA DE LOS ENSAYOS

Para facilitar la futura comprensión de las siglas asignadas a cada medición se presenta a continuación una ilustración explicativa (Ilustración 24).











	MOE	VELOCIDAD	EJECUCIÓN	
	DIRECTAS	MOESDS	VcSDS	
		MOESDG	VcSDG	
	INDIRECTAS	MOESIS	VcSIS	
		MOESIG	VcSIG	
	DIRECTAS	MOEFD	VbFD	
	INDIRECTAS	MOEFI	VbFI	
	TRANSVERSALES	-	V90°	
		-	V45°	

Ilustración 24: Relación entre las mediciones y la nomenclatura asignada a los MOE y velocidades resultantes, con la indicación esquemática del recorrido de la onda.

ENSAYO SYLVATEST

El equipo Sylvatest, presentado previamente en el apartado de equipos de laboratorio, permite realizar mediciones longitudinales, radiales y comparativas. En este caso el estudio se centra en las longitudinales, pudiendo ser de dos formas distintas.

Por un lado, las mediciones directas se realizan en la dirección de la fibra de la madera, comúnmente usadas en elementos estructurales de madera que no están en servicio. Se realizan dos taladros, uno en cada testa, en el mismo eje. El taladro debe ser perpendicular a la testa permitiendo introducir las sondas casi en su totalidad para asegurar su correcta sujeción sin holgura, y evitando singularidades.

Por otro lado, las mediciones indirectas (Ilustración 25) suelen realizarse en elementos estructurales que forman parte de una estructura, ya que las testas normalmente están ocultas. Para ello se realizan los taladros también en la dirección de la fibra de la madera, pero con una ligera variación. En este caso ambos en la misma cara, pero, en vez de perpendiculares a ella, con una inclinación de 30° respecto a esta (Ilustración 26). De esta forma, la onda emitida y recibida no tiene un recorrido recto sino parabólico, dato importante a tener en cuenta para la toma de datos.

Por último y como característica externa de la medición que no es posible añadir en los datos de la aplicación, en ocasiones se valora la posibilidad de aplicación de gel de acoplamiento en las sondas transmisoras para conseguir un mejor ajuste ya que en ciertos casos no se consigue con la realización del taladro.

(S) PASOS PREVIOS

Una vez se obtiene la aplicación Sylvius, se realizan todos los taladros necesarios para ambas mediciones, directas e indirectas sobre los marcajes señalados en los pasos previos (Ilustración 27).

En cada cabeza de las vigas, en el orden en que están colocadas, se realizan dos pasos: primero el taladro en la testa para la medición directa y después el taladro en la cara superior para la medición indirecta.

En el caso de las mediciones directas la dimensión de la perforación deberá permitir la introducción de la mitad del palpador cónico. En el caso de las mediciones indirectas la perforación, con una inclinación máxima de 30° respecto de la



Ilustración 25: Palpadores en posición para medición indirecta con el equipo Sylvatest.



Ilustración 26: Orificio para medición indirecta con el equipo Sylvatest.

horizontal, deberá facilitar entrada del palpador hasta que la propia geometría del mismo lo permita. Para su ejecución se recomienda comenzar taladrando ligeramente en vertical para inmediatamente después, sin parar el taladro, inclinar el mismo a 45 grados e introducir la broca hasta la parte final del lado que se encuentra en contacto con la madera.

Durante los ensayos se ha tenido en cuenta la existencia de nudos en las testas y caras de las vigas evitando la colocación de los sensores y palpadores próximos a ellos. Previniendo esta proximidad se reduce la influencia de estos en las mediciones, consiguiendo unos resultados menos condicionados.

Finalizada la realización de los taladros se continúa con la conexión entre el equipo y el dispositivo móvil.

El procedimiento continúa a través de la aplicación. En la página principal se abre una pantalla donde se añaden distintos proyectos con un nombre que identifique las mediciones según los criterios elegidos por la persona que los realice. En este caso el proyecto se designa "LAB 02/03/2023" haciendo referencia al día en el que se llevan a cabo las mediciones.



Ilustración 27: Orificios realizados en la viga n°9 para las mediciones directas e indirectas con el equipo Sylvatest.

En cada proyecto se incluyen las inspecciones en referencia a cada medición. Antes de realizar una medición se ha de añadir una nueva inspección y especificar las características que la definan. Este paso incluye un apartado de datos en los que la propia aplicación registra la fecha y hora en la que se realiza la medición, además de otros en los que se puede añadir un ID identificativo de cada medición, el inspector que la lleva a cabo y una pequeña descripción. En este caso solo se completa el apartado del ID utilizando el mismo criterio en todas las inspecciones. Todos los ID constan de tres letras y uno o dos dígitos que responden a la designación "ABCXX" donde: A corresponde al tipo de medida, directa o indirecta (D = Directa; I = Indirecta); B corresponde a la interfaz, seca o con gel (S = Seco; G = gel); V corresponde a la abreviatura de viga, se mantiene igual en todas las inspecciones (V = viga); X corresponden al número de la viga, habrá uno o dos números según el número de dígitos que contenga el número de viga (números del 1 al 16).

- Ejemplo: "DSV1"; medición en seco de la viga 1.

Conociendo esta identificación, se siguen definiendo los parámetros de la medición. Esto incluye la especie, la humedad de la viga (%), la distancia entre transductores (cm) y el tipo de medición según sea directa o indirecta. La especie y la humedad se mantienen constante en todas las inspecciones, siendo Pino y 10% respectivamente.

(S) MEDICIONES EN SECO

Tras definirse todos los parámetros se procede a las mediciones. Se comienza con las mediciones directas en seco. Se introducen los palpadores (Ilustración 28) en los orificios correspondientes hasta asegurarse de que estos se acoplan suficientemente y no existe holgura, se completa el ID de la medición (DSVX), la distancia entre palpadores y por último se asegura que la casilla referida a las mediciones indirectas se encuentra desactivada.



Ilustración 28: Colocación de los palpadores del equipo Sylvatest para mediciones directas (izquierda) y para mediciones indirectas (derecha).

Desde la aplicación (Ilustración 16), se pulsa en el icono del Sylvatest y en ese momento da comienzo la medición en la que el palpador emisor emite ultrasonidos y el receptor los recibe. El dispositivo realiza automáticamente 10 disparos y al terminar se presenta la información resultante en la aplicación, como se indica en el apartado de la información técnica del equipo Sylvatest 4.0.

Los resultados mostrados en pantalla al finalizar la medición corresponden a una viga, y este mismo proceso se ha de repetir con exactitud en cada una de ellas, modificando los datos que sean necesarios, sean estos el ID de las mediciones y las distancias entre palpadores en caso de que varíen entre sí.

Se realiza este proceso en todas las vigas hasta completar todas las mediciones directas en seco. Al finalizar esta serie se realizan los mismos pasos con las mediciones indirectas, con un ID genérico que sigue la composición ISVXX. Un punto relevante a tener en cuenta es la activación de la casilla referida a las mediciones indirectas, la cual ha de estar activada en cada una de las inspecciones realizadas de esta forma ya que influye en el tratamiento que realiza la aplicación de los datos de las mediciones.

Además, se ha de modificar cuidadosamente la distancia entre palpadores, asegurando que la cifra introducida corresponde a la distancia indirecta, no a la directa.

Tras haber realizado estas revisiones y modificaciones, se realizan todas las mediciones indirectas siguiendo el mismo procedimiento explicado para las mediciones directas, sin hacer diferenciación alguna en los pasos. Los resultados se muestran de igual manera.

(S) MEDICIONES CON GEL DE ACOPLAMIENTO

Terminadas las mediciones indirectas en seco se comienzan las mediciones con gel. El gel supone una nueva variable cuya finalidad es comprobar si mejora significativamente el acoplamiento entre palpadores y orificios y ello tiene una consecuencia en la calidad de los datos obtenidos. Al ser un producto húmedo, las siguientes mediciones se desarrollan de forma rápida para reducir el riesgo de variación de humedad de la madera al mínimo.

Se realizan primero las mediciones directas con gel, designadas como DGVXX en los ID. Se comienza de igual manera que en las mediciones en seco. Se ejecutan los pasos correspondientes a la definición de datos necesarios para la medición, teniendo en cuenta las distancias entre palpadores, en este caso iguales a las mediciones en seco, y la desactivación de la casilla de medición indirecta.

A continuación, se introduce una ligera cantidad de gel de acoplamiento en los orificios taladrados para la medición directa. Después se introducen los palpadores y se comienza la medición en un tiempo menor a 10 segundos para evitar el incremento del CH de la pieza (Ilustración 29). Los palpadores se introducen de la misma manera y con la misma profundidad que en las mediciones en seco. Al terminar la medición se limpian los transductores con papel, eliminando los restos de gel.



Ilustración 29: Medición directa con gel con el equipo Sylvatest.

En cada nueva inspección ejecutada en vigas diferentes se repite este método introduciendo gel, realizando la medición en el menor tiempo posible y retirando los transductores para limpiarlos.

Tras efectuar todas las inspecciones correspondientes a todas las vigas de forma directa con aplicación de gel, se continúa con las inspecciones indirectas con gel (IGVXX). Los pasos a seguir son una réplica de los elaborados en las mediciones indirectas en seco, incluyendo la aplicación de gel de la misma manera que en las mediciones anteriores. Se mantiene la limpieza de palpadores entre cada medición para asegurar la igualdad de condiciones de los mismos en todas las mediciones.

Ha sido posible llevar a cabo todas las mediciones en el mismo día al contar con tres personas, una de ellas tomando nota de los resultados y comprobando la correcta ejecución y el funcionamiento de la aplicación, y las otras dos personas encargadas de ir introduciendo los palpadores en los orificios correspondientes a cada tipo de medición. Todas las inspecciones se han realizado con un total 10 de tiros válidos.

Los resultados fueron agrupados en formato Excel y cuyas columnas muestran por orden el nombre del proyecto, la fecha y la hora, el inspector de cada una de las inspecciones, el ID, la especie, la humedad (%), la longitud (cm) entre palpadores definida, el tipo de medición según sea directa o indirecta, el tiempo medido (μ s), la velocidad bruta y corregida (m/s), el MOE (MPa), el MOR (MPa), la clase resistente, la desviación estándar (μ s) y los tiros válidos de cada inspección.

ENSAYO MICROSECOND TIMER

Para realizar la medición se clavan ligeramente los dos sensores con el martillo de goma en el elemento a ensayar, a continuación, se induce un impacto seco, preciso y en paralelo a la dirección del clavo del sensor emisor con el martillo de acero.

Al igual que el equipo Sylvatest, también se realizan mediciones de tipo directo e indirecto. El procedimiento para ejecutar ambas es similar, a excepción de que los sensores en este caso se clavan con el martillo de goma mencionado anteriormente. Para las mediciones directas se clavan en las testas, en la dirección de la fibra, y el golpe inducido por el martillo de acero en el sensor emisor deberá realizarse en ese mismo eje. Para las indirectas, los sensores se clavan en la cara superior del elemento ensayado con un ángulo de unos 45° respecto de la horizontal, y el golpe inducido debe de ir en paralelo al eje del clavo del sensor.

Al contrario que el equipo Sylvatest, este no requiere en ningún caso la aplicación de gel de acoplamiento ya que las mismas sondas van generando el orificio perfectamente ajustado a ellas.

(MST) PASOS PREVIOS

En este caso los ensayos comienzan con la preparación del material (Ilustración 30) que compone el equipo. Esto comienza por conectar la consola con los sensores SD02 mediante dos cables conectores BNC. Es necesaria la utilización de un cable alargador del mismo tipo, dada la longitud de los elementos a ensayar.

La toma de datos se realiza a mano, por lo tanto, se prepara una tabla con tres columnas, la primera con los números de las vigas, la segunda para anotar los resultados de las mediciones directas y la tercera para anotar los resultados de las mediciones indirectas. La tabla tendrá tantas columnas como elementos a ensayar haya.

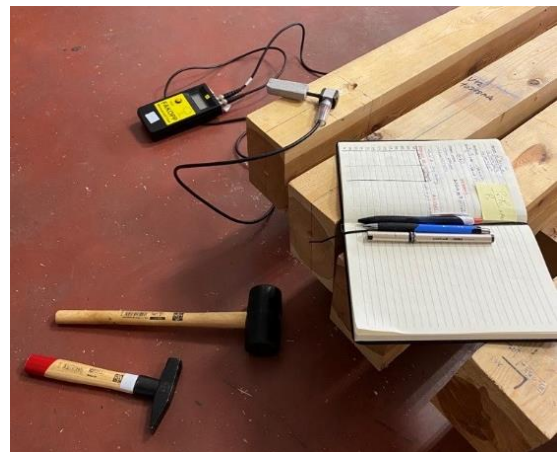


Ilustración 30: Preparación previa a los ensayos. Conexión de consola y sensores con cables BNC y cuaderno con tabla para anotar resultados.

(MST) MEDICIONES DIRECTAS

A continuación, se efectúan las mediciones directas con el equipo MicroSecond Timer. Para ello se clavan los sensores en paralelo a los usados por el equipo Sylvatest, de esta forma nos aseguramos de tomar datos en las mismas áreas con los dos equipos y se garantiza que la onda sigue una trayectoria con una diferencia mínima. Los sensores se clavan ligeramente en las testas en horizontal, en paralelo a la fibra, con el martillo de goma hasta asegurar su correcta sujeción (Ilustración 31).

Cuando ambos sensores se encuentran clavados adecuadamente, se enciende la consola y se aprieta el botón, poniendo así el indicador a cero para comenzar las mediciones correctamente.

Se identifica el sensor emisor, marcado con el color rojo, y con el martillo de acero se induce un golpe seco en la cabeza del sensor siguiendo su propio eje. Tras realizar estos pasos aparecerá un número en la consola, correspondiente a los microsegundos que ha tardado en recorrer la onda acústica producida por impacto el espacio entre los dos sensores.

En cada medición se realizan 4 golpes apuntando el valor medio de las velocidades que aparezcan en la consola. Entre cada golpeo se aprieta el botón de la consola para borrar el valor registrado de la anterior medición permitiendo el registro de uno nuevo. En caso de que el golpe inducido no sea seco y con una fuerza similar, se desechará el resultado plasmado en la consola y se ejecutará otro golpeo.

Se ejecuta este mismo procedimiento en todas las vigas a ensayar, apuntando a mano la media de los cuatro valores en microsegundos mostrados en la consola.



Ilustración 31: Sensor emisor del equipo MicroSecond Timer clavado para medidas directas.

(MST) MEDICIONES INDIRECTAS

Tras realizar todas las mediciones directas se continúa con las mediciones indirectas. El desarrollo del ensayo consta de los mismos pasos. Sin embargo, los sensores deben ser clavados en las líneas de marcaje correspondientes con los mismos criterios que en las mediciones indirectas del equipo Sylvatest, también lo más cerca posible de estas en paralelo tal y como se muestra en la Ilustración 32. Los sensores, clavados en el canto superior de la viga a ensayar con el martillo de goma, no deben formar un ángulo mayor de 45° respecto de la horizontal (Ilustración 32).

El golpe inducido con el martillo de acero debe ser igualmente en el eje del sensor, por lo que el movimiento de golpeo tiene que seguir el mismo eje y ángulo. También se realizan cuatro mediciones y se anota el valor medio de todos los mostrados en la consola. Este proceso se realiza en todas las vigas que forman parte del ensayo. Se mantiene el mismo criterio en caso de que el golpeo no sea seco o adecuado.



*Ilustración 32: Sensor emisor del equipo MST clavado para medida indirecta (izquierda).
Sensor receptor del equipo MST clavado para medida indirecta (derecha).*

(MST) TRATAMIENTO DE LOS DATOS

Todos los datos registrados responden al tiempo que tarda la onda en recorrer la distancia entre los sensores, que sirve de base, conociendo la distancia recorrida, para calcular la velocidad. Conociendo esta y la densidad de la madera ensayada, a partir de su masa y volumen, es posible obtener el MOE dinámico, expresado en N/mm², con la siguiente fórmula (5).¹

$$MOE_{dyn} = \rho \cdot v^2 = \frac{m}{V} \cdot v^2 \quad 5$$

*Donde: ρ (g/mm³) es la densidad; v (m/s) es la velocidad de propagación; m (g) es la masa; V (mm³) es el volumen.

En este caso, al ser unas vigas ensayadas anteriormente, sus densidades eran conocidas. En otros casos, deberían ser determinadas.

A partir del MOE dinámico, y conocido también en este caso el MOE estático, se persigue establecer una regresión lineal (6) que relacione ambos de la siguiente manera:

$$MOE_{stat} = a + b \cdot MOE_{dyn} \quad 6$$

* Donde: a , b son los coeficientes que definen respectivamente la ordenada en el origen y la pendiente de una recta.

(MST) MEDICIONES TRANSVERSALES Y CON UN ÁNGULO α

Para terminar, se ejecutan las mediciones transversales, cuyo proceso comienza decidiendo cuántas mediciones se realizarán, en qué puntos de la viga y a qué ángulos. Debido a la poca distancia entre sensores o palpadores, cualquier defecto de la madera en el recorrido de la onda de propagación puede derivar en grandes variaciones en los resultados y disminuir su fiabilidad. Por ello, se escogen tres puntos en cada viga (Ilustración 33) y en cada uno de los puntos se decide tomar mediciones transversales (90°) y a 45°, dada su facilidad de reproducción y su referencia a los ángulos con mejores resultados (Balmori Roiz, 2014).

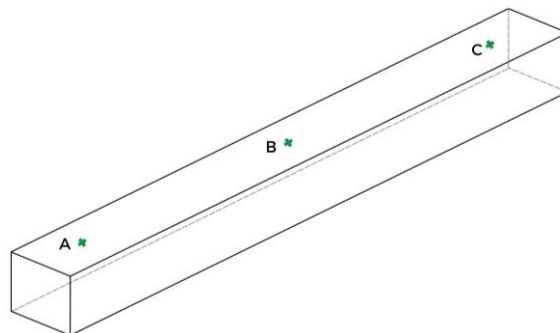


Ilustración 33: Posición de los puntos a , b y c en las vigas de ensayo.

¹ Esta fórmula, presente en numerosos artículos y libros que tratan de este tema, fue propuesta por primera vez por Augustin-Louis Cauchy en 1827 en su obra "Sur l'équation générale de l'équilibre et du mouvement des corps solides élastiques".

Sabiendo los puntos sobre los que se quiere ensayar se establece un sistema de nomenclatura: cada punto se nombra como a, b y c, y para cada medición se añade un subíndice con el ángulo correspondiente. Así, resultan seis puntos de ensayo por cada viga:

- a_{90°
- a_{45°
- b_{90°
- b_{45°
- C_{90°
- C_{45°

Se continúa con el marcaje de estos puntos en las vigas, lo que se realizó con una escuadra dibujando una línea perpendicular a la dirección de la fibra y otra a 45° de esta, todo ello en el canto superior de las vigas. Sin embargo, los sensores del equipo se localizan en la mitad de la cara, en la proyección vertical de las líneas de los marcajes (Ilustración 34).

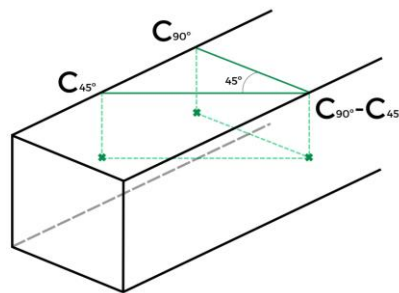


Ilustración 34: Marcajes de las medidas transversales y a 45° en un punto C de una viga.

Para realizar una correcta toma de datos se crea una tabla (Tabla 2) en la que se irán anotando los anchos de las vigas, que en este caso será la distancia entre sensores, los resultados de las mediciones y las observaciones de cada punto de aplicación.

Tabla 2: Tabla para mediciones transversales en los puntos de aplicación y sus características.

VIGA	ESPESOR	MEDICIONES (velocidad μs)						OBSERVACIONES					
		a		b		c		a		b		c	
		90°	45°	90°	45°	90°	45°	90°	45°	90°	45°	90°	45°
V1													
V2													
V3													
V4													
...	
V16													

Las observaciones se refieren a la parte de la madera en la que se encuentran los puntos de aplicación de las mediciones, pudiendo encontrarse en zona de albura o de duramen.

Para estas mediciones se escoge el equipo Fakopp ya que en los estudios encontrados en la literatura referentes a estas mediciones se realizaron con este equipo. Además, no sería

adecuado el uso del Sylvatest ensayando vigas de tan poco espesor, y realizar los taladros necesarios para ese equipo sería excesivamente destructivo para el objeto de ensayo.

Las mediciones siguieron un orden específico. En primer lugar, se clavaron los sensores, a la mitad del canto, en el punto a de la viga 1 a 90° , es decir, en posición perpendicular a la dirección de la fibra. Después se continuó con los golpesos en el sensor emisor, tal y como se ha reflejado en los apartados anteriores referidos a las mediciones con el MST, y con la toma de datos de los resultados mostrados en la consola.

Finalizado este primer ensayo se continúa con el mismo punto a de la viga 1, pero ubicando los sensores, a la mitad de la cara, en la proyección paralela de la línea de marcaje a 45° . En este caso los sensores se clavan en paralelo a esta línea, no se clavan perpendiculares al canto, por lo que se realiza el mismo proceso explicado anteriormente (Ilustración 35).

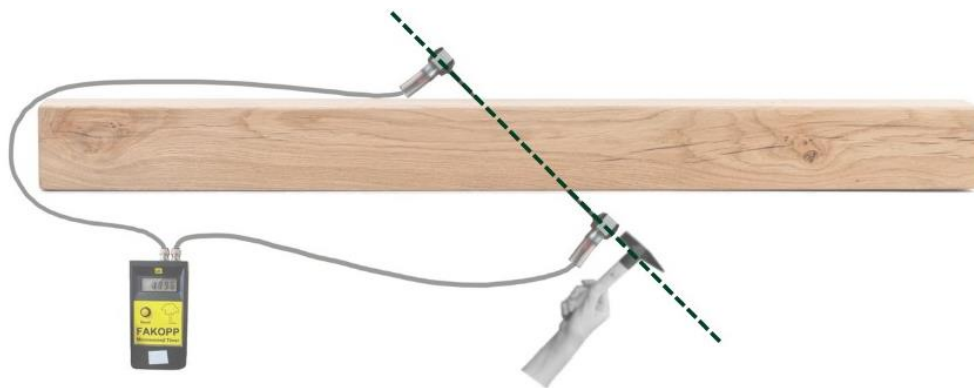


Ilustración 35: Colocación sensores en el mismo eje, en paralelo a la línea de marcaje.

Una vez se han realizado las mediciones a 90° y a 45° en el punto a) de la viga 1 se ejecuta el mismo proceso en el punto a) de la siguiente viga, y así continuamente hasta completar todas las mediciones en los puntos a) de las vigas, primero a 90° y después a 45° .

Tras la medición de todos los puntos a, se replican estos pasos en los puntos b) y, finalmente, en los puntos c).

4.4.2. MÉTODOS ESTADÍSTICOS

Después de obtener todos los datos de los ensayos se realiza un tratamiento de los mismos utilizando los programas Excel y Statgraphics 19 – X64, programa con el que se realizarán todas las posteriores comprobaciones y comparaciones.

Para conseguir los objetivos enunciados en apartados anteriores se realiza un tratamiento de todos los MOE obtenidos, procesando cada uno de ellos siguiendo el mismo procedimiento explicado a continuación:

- Estadística descriptiva (ED).
- Comprobación de las medidas de muestras.
 - o Análisis de varianza con el Test ANOVA.
 - o Prueba de múltiples rangos.
 - o Comparación de varianzas.
- Relación de los factores mediante la aplicación de un modelo de regresión simple.

ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA

La metodología comienza con el tratamiento de todos los datos con el programa Excel una vez recibidos los datos solicitados de las mediciones del Sylvatest y obtenidos los MOE de las mediciones del MicroSecond Timer tras aplicar las fórmulas (5) (6) mencionadas en el apartado anterior. Tras ordenar todos los datos de forma que el formato permita un tratamiento sencillo y apropiado de los mismos, se comienza con el procedimiento explicado a continuación.

Para poder desarrollar con mayor claridad los siguientes pasos se procede a definir brevemente los siguientes conceptos estadísticos básicos, que nos describen y resumen características o propiedades de las muestras, ayudando a comprender la distribución y comportamiento de los datos.

- Media: Tendencia central que representa el valor promedio de un conjunto de datos. Responde al sumatorio de todos los valores de datos entre el número de datos.
- Desviación estándar: Medida estadística que indica la dispersión o variabilidad de un conjunto respecto a su media. Determina cuánto se alejan los valores individuales del valor promedio.
- Coefficiente de variación: Compara la variabilidad relativa entre varios conjuntos de datos con diferentes unidades de medidas o escalas. Se expresa como porcentaje. Responde a la división de la desviación estándar entre la media multiplicado por cien.
- Rango: Representa la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo. Responde a la resta entre ellos en ese orden.
- Normalidad: Se refiere a la distribución de datos en una forma que se asemeja a la distribución normal o de Gauss. Su comprobación puede hacerse con distintas técnicas, en este caso la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk es la utilizada.

(ED) COMPROBACIÓN DE NORMALIDAD

Una comprobación de normalidad responde a un procedimiento estadístico que verifica que la distribución que presenta una muestra de datos es normal. Los datos deben cumplir esta condición para asegurar que los resultados de los análisis estadísticos sean fiables.

Se comprueban todos los MOE mediante la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk. Esta prueba se basa en la hipótesis nula de que los datos provienen de una distribución normal. Para saber si el conjunto de datos sigue una distribución normal se ha de comprobar que el valor-P es igual o mayor que 0,05.

Las comprobaciones se realizan en el siguiente orden: (ver Ilustración 24).

MOE Sylvatest Directo Seco	MOESDS
MOE Sylvatest Directo Gel	MOESDG
MOE Sylvatest Indirecto Seco	MOESIS
MOE Sylvatest Indirecto Gel	MOESIG
MOE MicroSecond Timer Directo	MOEFD
MOE MicroSecond Timer Indirecto	MOEFI
MOE establecido por máquina	MOEGTO
Velocidad de propagación MST medida transversal a 90°	V90°
Velocidad de propagación MST medida transversal a 45°	V45°

(ED) DIFERENCIAS ESTADÍSTICAS ENTRE VARIABLES

A continuación, tras poder afirmar la normalidad de todos los datos, se procede con la comprobación de medidas de muestras. En este apartado se busca determinar si existe una diferencia estadísticamente significativa entre las muestras. Para ello se recurre al uso del test ANOVA y del test de múltiples rangos.

Se comparan las muestras siguiendo los pasos mencionados a continuación:

- Test ANOVA.
- Prueba múltiples rangos.
- Verificación de varianza.

Las muestras comparadas sometidas a los pasos anteriores son las siguientes:

- Cada uno de los MOE individualmente.
- MOE Sylvatest medida Directa con gel y en seco (MOESDS – MOESDG).
- MOE Sylvatest medida Indirecta con gel y en seco (MOESIS – MOESIG).
- MOE Sylvatest medida Directa e Indirecta en seco (MOESDS – MOESIS).
- MOE MicroSecond Timer medida Directa e Indirecta (MOEFD – MOEFI).
- Velocidad con MST en medida Transversal a 90° con la Velocidad bruta de las mediciones Indirectas con MST (V90° – VbFI).
- Velocidad con MST en medida Transversal a 45° con la Velocidad bruta de las mediciones Indirectas con MST (V45° – VbFI).
- Comparación de todos los MOE entre sí.

Se realiza una comparativa entre las velocidades transversales y las velocidades brutas de las mediciones indirectas realizadas con el MST, ya que son datos tomados por un mismo equipo y los resultados de las medidas indirectas del MST resultan más similares a las del MOEGTO que los resultados de las medidas directas. Esto se puede comprobar en el apartado de resultados.

TEST ANOVA

El Test ANOVA es una prueba estadística que compara las medias de tres o más grupos independientes. Su finalidad es determinar si las medias de los grupos sufren diferencias significativas entre ellas o no.

Se basa en la hipótesis nula de que todas las medias de los grupos son iguales pudiendo ocurrir que al menos una de las medias sea distinta a las demás. Busca comparar la variabilidad para poder rechazar la hipótesis nula inicial.

PRUEBA DE MÚLTIPLES RANGOS

Una vez se ha realizado el Test ANOVA, en caso de indicar que existen diferencias significativas entre las medias, se realiza la prueba de múltiples rangos. En este caso el método utilizado es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Las medidas de las muestras tratadas en este caso son, al igual que en el Test ANOVA, las medias.

Su finalidad es comparar los datos y mostrar entre qué medias existen o no diferencias estadísticamente significativas. Para poder leer los resultados la prueba muestra a su fin una tabla con cuatro columnas que muestran respectivamente todos los grupos comparados, los casos de cada uno, sus medias, y por último una columna en la que con una X se marcan en el mismo vertical los grupos homogéneos. Por lo tanto, si en la columna de los grupos homogéneos varias X comparten la misma vertical quiere decir que estos grupos no tienen diferencias estadísticamente significativas entre sí.

En resumen, con el Test ANOVA se establece si existen diferencias entre las medias, y en caso de haberlas, el test de múltiples rangos indica cuáles son diferentes y las agrupa en conjuntos sin diferencias estadísticamente significativas.

VERIFICACIÓN DE VARIANZAS

Por último, se somete a los datos a una verificación de varianzas desarrollada con la Prueba de Levene para evaluar la igualdad entre dos o más grupos de datos. Cuanta más diferencia exista entre las varianzas de los grupos, menos precisión y validez tendrán las conclusiones.

Para ello, se basa en la hipótesis nula de que las varianzas son iguales en todos los grupos, teniendo como alternativa que al menos una de ellas sea distinta.

(ED) MODELO DE REGRESIÓN SIMPLE

Una vez completado el análisis estadístico de las variables se procede a obtener un modelo de regresión simple. En este paso se busca establecer un modelo estadístico que relacione el MOEGTO con el MOE que más se asemeje a este, mediante una ecuación que corresponda a la ecuación genérica de una regresión simple (7) que contenga una única variable independiente. Se introducen los datos en Statgraphics indicando el MOEGTO como la variable dependiente y el MOE más semejante como la variable independiente.

$$Y = a + bX \quad 7$$

**Donde: Y es la variable dependiente por predecir (MOEGTO); X es la variable independiente; a es la ordenada de origen; b es la pendiente de la línea.*

Este proceso establece unos coeficientes *a* y *b* que relacionan ambas variables, en este caso la relación que se busca es lineal, lo que quiere decir que la línea de regresión que los vincula será recta. Al obtener la relación se deben estudiar sus características y condiciones.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan y discuten los resultados obtenidos a lo largo del trabajo. Además, se estudiará cuando sea posible la relación con los resultados de los trabajos previos estudiados en los antecedentes. Se incluyen los resultados finales, así como aquellos que han intervenido en el proceso y pueden ser relevantes en las futuras conclusiones.

Se ha organizado el contenido de la siguiente manera:

- 5.1. Resultados de los pasos previos.
- 5.2. Resultados de las mediciones.
- 5.3. Resultados estadísticos.
 - 5.3.1. Resultados del estudio de normalidad.
 - 5.3.2. Resultados del análisis de las variables.
 - 5.3.3. Resultados de las comparaciones.
 - 5.3.4. Resultados sobre el modelo de regresión simple generado.

Cada uno de los apartados reúne los datos recogidos en las tablas y los gráficos correspondientes para una mejor comprensión de la discusión sobre ellos.

Tras los resultados individuales de cada muestra según la fase del análisis, se muestran los resultados de ciertas comparaciones entre las mismas, determinadas por su interés para el presente trabajo. Los resultados se muestran en el mismo orden que en el siguiente listado:

- MOE Sylvatest medida Directa con gel y en seco (MOESDG – MOESDS).
- MOE Sylvatest medida Indirecta con gel y en seco (MOESIG – MOESIS).
- MOE Sylvatest medida Directa e Indirecta en seco (MOESDS – MOESIS).
- MOE MicroSecond Timer medida Directa e Indirecta (MOEFD – MOEFI).
- Velocidad con MST en medida Transversal a 90° con la Velocidad bruta de las mediciones Indirectas con MST (V_{90° – V_{bFI}).
- Velocidad con MST en medida Transversal a 45° con la Velocidad bruta de las mediciones Indirectas con MST (V_{45° – V_{bFI}).
- Comparación de todos los MOE entre sí.

5.1. RESULTADOS DE LOS PASOS PREVIOS

La realización de los pasos previos nos permite elaborar una base de datos necesaria para conocer el estado de los elementos a ensayar además de las distancias necesarias para ejecutar las mediciones (Tabla 3) (Tabla 4).

Tabla 3: Anotaciones de las singularidades de las vigas de ensayo y distancias entre palpadores expresadas en metros para Sylvatest y MicroSecond Timer.

ID	N.º VIGA	ANOTACIONES	DISTANCIA DIRECTA	DISTANCIA INDIRECTA	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)
1	V1	-	4,84	4,58	10,04
2	V3	-	4,84	4,78	10,07
3	V4	Alabeo Nudo en dos testas	4,56	4,34	10,65
4	V6	Nudo en una testa	4,84	4,84	10,30
5	V7	Nudo en una testa	4,84	4,58	10,52
6	V8	Nudo en una testa	4,84	4,58	10,00
7	V9	Curvatura de cara	4,84	4,73	10,47
8	V10	Curvatura de cara y canto	4,84	4,58	10,35
9	V12	Nudo sobre medida indirecta	4,84	4,58	10,05
10	V13	Alabeo	4,84	4,58	10,27
11	V14	-	4,84	4,58	10,02
12	V15	Curvatura de canto Nudo en una testa	4,84	4,58	10,23
13	V16	Alabeo Torsión Nudo en las dos testas	5,09	4,80	10,00

El cálculo del contenido de humedad tras aplicar la fórmula presentada en la metodología de los pasos previos establece una media del 10%.

Tabla 4: Resultados de las observaciones de los puntos de aplicación para mediciones transversales.

VIGA	OBSERVACIONES		
	a	b	c
V1	duramen	duramen	duramen
V3	albura y duramen	albura y duramen	duramen
V4	duramen	duramen	duramen
V6	albura	albura	albura
V7	albura	albura	albura
V8	duramen	duramen	albura
V9	albura	albura	albura
V10	duramen	duramen	duramen
V12	duramen	duramen	albura
V13	duramen	duramen	duramen
V14	albura y duramen	albura	albura y duramen
V15	albura y duramen	albura y duramen	albura y duramen
V16	duramen	duramen	duramen

5.2. RESULTADOS DE LAS VELOCIDADES DE PROPAGACIÓN Y LOS MOE

El estudio de normalidad refleja unos valores-P mayores a 0,05, por lo tanto, no se puede rechazar que los datos estudiados siguen una distribución normal y son aptos para continuar con el análisis estadístico (Tabla 5).

Tabla 5: Resultados de la prueba de normalidad Shapiro-Wilk de las velocidades.

PRUEBA DE NORMALIDAD SHAPIRO-WILK		
VELOCIDADES	VALOR-P	NORMAL
VcSDS	0,446527	Si
VcSDG	0,239954	Si
VcSIS	0,446136	Si
VcSIG	0,517991	Si
VbFD	0,159035	Si
VbFI	0,884169	Si
V90°	0,16658	Si
V45°	0,0908057	Si

Se muestra en la siguiente tabla un resumen estadístico de cada variable donde encontramos la media (M), la desviación estándar (DE), el coeficiente de variación (CV), el mínimo (MIN) y el máximo (MAX), el rango (Rg) y por último la afirmación o negación de la normalidad de los datos (Tabla 6).

Tabla 6: Resultados de la estadística descriptiva de las variables (velocidades en μ s).

	M (μ s)	DE	CV (%)	MIN (μ s)	MAX (μ s)	Rg (μ s)	Normalidad
VcSDS	5038,3	279,792	5,55335	4624,8	5491,5	866,7	Si
VcSDG	5062,2	267,197	5,2783	4720,5	5507,5	787	Si
VcSIS	5362,3	323,403	6,03106	4928,5	5854,8	926,3	Si
VcSIG	5532,9	292,915	5,29404	5112,2	5999,4	887,2	Si
VbFD	4934,1	259,88	5,267	4623,1	5371,8	748,7	Si
VbFI	4821,7	265,491	5,50613	4370,2	5252,3	882,1	Si
V90°	1362,46	84,175	6,17816	1250	1561	311	Si
V45°	1840,77	85,6224	4,65145	1712	1989	277	Si

*Donde: VcSDS es la Velocidad corregida de la medida con Sylvatest Directa en Seco; VcSDG es la Velocidad corregida de la medida con Sylvatest Directa con Gel; VcSIS es la Velocidad corregida de la medida con Sylvatest Indirecta en Seco; VcSIG es la Velocidad corregida de la medida con Sylvatest Indirecta con Gel; VbFD es la Velocidad bruta con Fakopp (MST) Directa; VbFI es la Velocidad bruta con Fakopp (MST) Indirecta; V90° es la Velocidad de la medición transversal a 90°; V45° es la Velocidad de la medición transversal a 45°.

Las velocidades obtenidas de las mediciones con el Sylvatest se asemejan según el tipo de medición. Las mediciones directas, sean en seco o con gel, presentan las medias más cercanas entre sí.

En cuanto a las velocidades obtenidas con el MST son similares, independientemente del tipo de medición realizada. En este caso el tipo de medición es la única variable como se mencionó anteriormente, ya que no se considera el uso de gel de acoplamiento en estos dispositivos.

Cabe mencionar que las velocidades medias más altas corresponden a las mediciones indirectas del Sylvatest, y las inferiores corresponden a aquellas obtenidas con el equipo MST.

Se puede apreciar que las velocidades medias deducidas mediante técnicas ultrasonidos superan la barrera de los 4900 m/s mencionada en varios estudios. Esto se asocia con una buena calidad de la madera ya que mayor será la velocidad cuantos menos defectos posea la pieza.

Sin embargo, las velocidades medias recopiladas de los ensayos realizados con el MST tienden a superar esta barrera sólo en el caso de las mediciones directas. En el caso de las mediciones indirectas, la velocidad media no supera los 4900 m/s, aunque el valor es bastante próximo (Tabla 6).

También se puede observar que los valores de las mediciones longitudinales presentan una mayor desviación típica y mayor rango que las tomadas de forma transversal. Esto es coherente ya que las distancias que tienen que recorrer las ondas son bastante inferiores en el segundo caso. Sin embargo, cabe mencionar que los datos tienen una variación similar, pues los valores de los coeficientes de variación son similares en ambos tipos de medición.

En la Ilustración 24 se muestra gráficamente a qué tipo de medición corresponde cada sigla para facilitar su comprensión.

A continuación, se muestran las medias de todos los MOE obtenidos, incluyendo el establecido como referencia, marcado en rojo.

Tabla 7: Medias del MOE (N/mm²) obtenido por máquina y de los MOE (N/mm²) resultantes según el tipo de medición. Se muestra el valor de referencia estimado por máquina en rojo.

	MOE_{SDS}	MOE_{SDG}	MOE_{SIS}	MOE_{SIG}	MOE_{FD}	MOE_{FI}	MOEGTO
MEDIAS	9445,8	9595,9	11480,3	12552,0	12776,3	11896,0	11326,2

Las medias de todos los MOE se aproximan en cierta medida al MOEGTO, sin embargo, la media del MOE obtenido con el equipo Sylvatest realizando medidas indirectas en seco (MOE_{SIS}) es la más próxima.

Los valores más alejados del MOEGTO corresponden a los obtenidos con el equipo Sylvatest realizando medidas directas, tanto en seco como con gel (MOE_{SDS} y MOE_{SDG}). Lo que significa que este procedimiento, con este equipo, infravalora las características de la madera ensayada. Del lado de la seguridad.

Los MOE restantes superan el MOEGTO. El MOE de las mediciones indirectas con el equipo MST (MOE_{FI}) lo superan ligeramente y el MOE superior más alejado del MOEGTO corresponde al obtenido de las mediciones directas con el equipo MST (MOE_{FD}) (Tabla 7).

Las clases resistentes asociadas a las mediciones indirectas del Sylvatest con aplicación de gel de acoplamiento son las más elevadas, seguidas de las mismas en seco. Por el contrario, las clases que se asocian a las mediciones directas son menores.

Este primer análisis ya indica que las mediciones realizadas con el equipo Sylvatest, sin aplicación de gel de acoplamiento, resultan en valores que tienden a asemejarse más a los obtenidos por máquina.

Se procede mostrando los resultados del análisis estadístico realizado sobre todos los datos obtenidos. Por lo tanto, se podrá corroborar o rechazar esta primera hipótesis que muestra que las mediciones directas en seco del equipo Sylvatest parecen más certeras.

5.3. RESULTADOS ESTADÍSTICOS

Se presentan los resultados según el orden mencionado al inicio del apartado.

5.3.1. RESULTADOS DEL ESTUDIO DE NORMALIDAD

El estudio de normalidad refleja unos valores-P mayores o iguales que 0,05 mostrados en la siguiente tabla (Tabla 8), por lo tanto, **no se puede rechazar** la hipótesis que afirma que todos los datos estudiados **no siguen una distribución normal** y son aptos para continuar con el análisis estadístico.

Tabla 8: Resultados de la prueba de normalidad Shapiro-Wilk de los MOE. Se muestra el valor de referencia estimado por máquina en rojo.

PRUEBA DE NORMALIDAD SHAPIRO-WILK		
MOE	VALOR-P	NORMAL
MOESDS	0,446407	Si
MOESDG	0,239942	Si
MOESIS	0,445701	Si
MOESIG	0,517449	Si
MOEFD	0,546964	Si
MOEFI	0,126801	Si
MOEGTO	0,475702	Si

También se someten a la prueba de normalidad las velocidades de propagación obtenidas de las mediciones transversales a 45° y a 90°, los resultados son los siguientes (Tabla 9):

Tabla 9: Resultados de la prueba de normalidad Shapiro-Wilk de las velocidades transversales con el MST.

PRUEBA DE NORMALIDAD SHAPIRO-WILK		
VELOCIDAD	VALOR-P	NORMAL
V90°	0,16658	Si
V45°	0,0908057	Si

Los resultados son asimismo normales, por lo que se continúa con el proceso estadístico.

5.3.2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE LAS VARIABLES

Se muestra en la siguiente tabla un resumen estadístico de cada variable donde encontramos la media (M), la desviación estándar (DE), el coeficiente de variación (CV), el mínimo (MIN) y el máximo (MAX), el rango (Rg) y por último la afirmación o negación de la normalidad de los datos (Tabla 10).

Tabla 10: Resultados de la estadística descriptiva sobre las variables (MOE) Se muestran en rojo los datos de referencia del MOE estimado por máquina.

ENSAYO	M (N/mm ²)	DE	CV (%)	MIN (N/mm ²)	MAX (N/mm ²)	Rg (N/mm ²)	Normalidad
MOESDS	9445,7	1756,8	18,59	6849,7	12291,5	5441,8	Si
MOESDG	9595,9	1677,72	17,48	7450,7	12391,9	4941,2	Si
MOESIS	11480,3	2030,69	17,68	8756,8	14572,6	5815,8	Si
MOESIG	12552,0	1839,48	14,65	9910,1	15481,0	5570,9	Si
MOEGTO	11326,2	1790,25	15,80	8853,8	15270,1	6416,3	Si

Los valores que se observan de los MOE, comparando los resultados con la literatura mencionada en los antecedentes, muestran unas propiedades mecánicas elevadas. Esto puede deberse a la elección premeditada de buscar un lote compuesto por vigas de gran calidad. Unas propiedades elevadas también explican, posiblemente, una alta cantidad de duramen y resina en las vigas.

Tabla 11: Resultados de la estadística descriptiva sobre las variables (velocidades de propagación).

ENSAYO	M (μs)	DE	CV (%)	MIN (μs)	MAX (μs)	Rg (μs)	Normalidad
V90°	1362,46	84,175	6,17	1250,0	1561,0	311,0	Si
V45°	1840,77	85,6224	4,65	1712,0	1989,0	277,0	Si

5.3.3. RESULTADOS DE LAS COMPARACIONES

Las comparaciones entre datos se presentan en el mismo orden descrito al inicio de este apartado.

MOE Sylvatest medida Directa con gel y en seco

Dado que el Valor-P (0,8255) del Test ANOVA es mayor que 0,05, no existen diferencias significativas entre las medias de las mediciones directas del Sylvatest tomadas en seco y tras la aplicación de gel de acoplamiento.

Además, el Valor-P (0,7649) de la prueba de Levene's, muestra que no hay una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar de ambos datos, lo que significa que ambos conjuntos de datos forman parte del mismo grupo homogéneo.

Esto quiere decir que, tal y como se aprecia en el siguiente gráfico (Ilustración 36), la aplicación previa de gel de acoplamiento a los orificios de los palpadores no supone ninguna diferencia en las mediciones directas. El gráfico muestra dos grupos de datos muy semejantes.

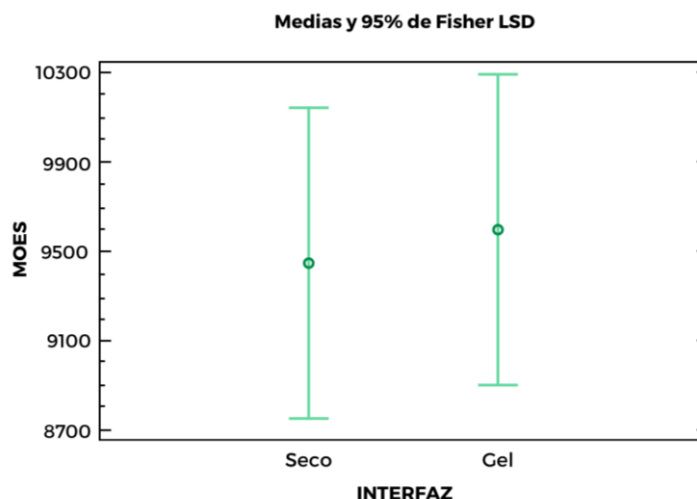


Ilustración 36: Gráfico de medias (directas) del MOESDS y MOESDG.

Al obtener resultados sin diferencias significativas en las mediciones en seco y con aplicación de gel, se trabaja sin la aplicación de gel en medidas directas.

Prescindir de la aplicación de gel facilita el procedimiento, además de rebajar las posibles alteraciones que pueda producir el gel y la variación que suponga en el contenido de humedad del elemento ensayado.

MOE Sylvatest medida Indirecta con gel y en seco

Dado que el Valor-P (0,1713) del Test ANOVA es mayor que 0,05, no existen diferencias significativas entre las medias de las mediciones indirectas del Sylvatest tomadas en seco y tras la aplicación de gel de acoplamiento.

El Valor-P (0,7600) de la prueba de Levene's, muestra que no hay una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar de ambos grupos. Por ello, los valores obtenidos de estas mediciones forman parte del mismo grupo homogéneo.

Los resultados de esta comparación reflejan unas características similares a las que plasma el gráfico anterior (Ilustración 36), en las que el gel de acoplamiento tampoco supone una diferencia significativa en las medias de las mediciones indirectas realizadas con el equipo Sylvatest (Ilustración 37).

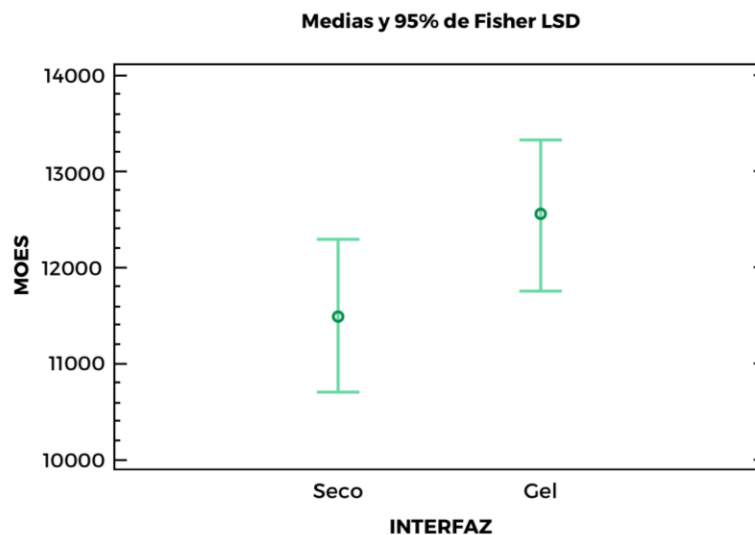


Ilustración 37: Gráfico de medias (indirectas) del MOESIS y MOESIG.

Al obtener resultados sin diferencias significativas en las mediciones en seco y con aplicación de gel, se trabaja sin la aplicación de gel en medidas indirectas.

Prescindir de la aplicación de gel facilita el procedimiento, además de rebajar las posibles alteraciones que pueda producir el gel y la variación que suponga en el contenido de humedad del elemento ensayado.

MOE Sylvatest medida Directa e Indirecta en seco

Al conocer que la aplicación de gel no supone ninguna diferencia significativa en los datos, se continúa el proceso comparando únicamente entre sí las medidas realizadas en seco.

Dado que el Valor-P (0,0116) del Test ANOVA es menor que 0,05, no se puede rechazar que existan diferencias significativas entre las medias de las mediciones directas e indirectas del Sylvatest.

Además, el Valor-P (0,6939) de la prueba de Levene's, muestra que no hay una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar de ambos datos.

Esta es la primera comparación en la que los grupos de datos no son semejantes entre sí. Dado que la comparación es solo entre dos grupos y el Valor-P del Test ANOVA es inferior a 0,05, se sabe que pertenecerán a dos grupos distintos.

Esto se traduce en que el tipo de medición realizado influye en los resultados, tal y como se aprecia en el siguiente gráfico (Ilustración 38).

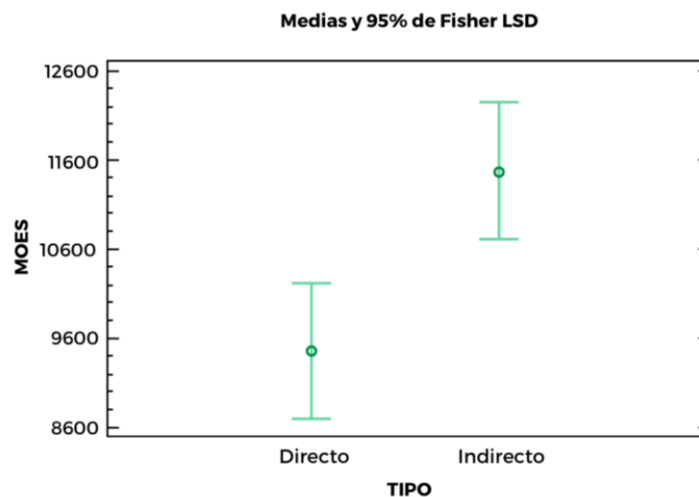


Ilustración 38: Gráfico de medias del MOESDS y MOESIS.

MOE MicroSecond Timer medida Directa e Indirecta

Dado que el Valor-P (0,3156) del Test ANOVA es mayor que 0,05, no existen diferencias significativas entre las medias de las mediciones directas e indirectas del MST.

El Valor-P (0,3293) de la prueba de Levene's, muestra que no hay una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar de ambos datos, lo que significa que ambos conjuntos de datos forman parte del mismo grupo homogéneo.

Esto quiere decir que, tal y como se aprecia en el siguiente gráfico (Ilustración 39), el tipo de medición no supone ninguna diferencia estadísticamente significativa en las medias de las mediciones realizadas con el equipo MST.

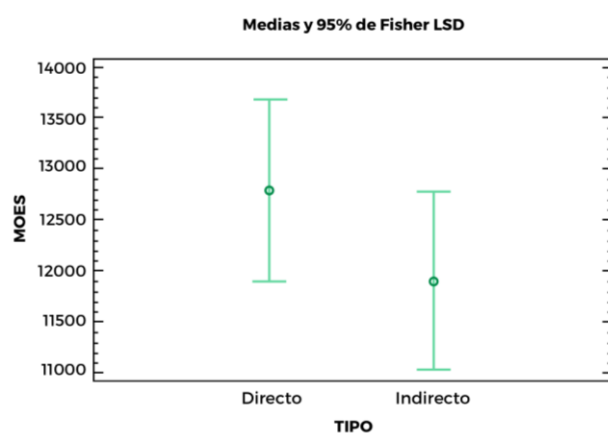


Ilustración 39: Gráfico de medias del MOEFD y MOFI.

Velocidad MicroSecond Timer medida Transversal a 90° con VbFI

Dado que el Valor-P (0,0000) del Test ANOVA es menor que 0,05, no se puede rechazar que existan diferencias significativas entre las medias de las velocidades de las mediciones realizadas con el MST a 90° y de la velocidad indirecta del MST a 0°. Por ello se sabe que pertenecerán a dos grupos distintos.

Para facilitar las medidas en obra se pretende estimar la velocidad transversal hallada a 90° a través de la velocidad bruta indirecta del MST, para ello se realiza un modelo de regresión simple (8).

$$VbFI = 5233,95 - 0,302548 * V90 \quad 8$$

*Donde: VbFI (μ s) es la velocidad bruta de la medición indirecta con el MST; V90 (μ s) es la velocidad de la medición transversal a 90° con el MST.

El estadístico R² indica que el modelo ajustado explica el 0,920144% de la variabilidad en VbFI. El coeficiente de correlación es igual a -0,0959241, indicando una relación relativamente débil entre las variables.

Puesto que el valor-P (0,7552) es mayor que 0,05, no hay una relación estadísticamente significativa entre VbFI y V90° con un nivel de confianza del 95,0% o más. Por lo tanto, se descarta seguir con el modelo de correlación.

En el supuesto de que el resultado hubiese sido favorable, se habría continuado con una línea de investigación que pueda relacionar las mediciones transversales a 90° con aquellas tomadas longitudinalmente.

En el siguiente gráfico se pueden apreciar los grupos de valores (Ilustración 40).

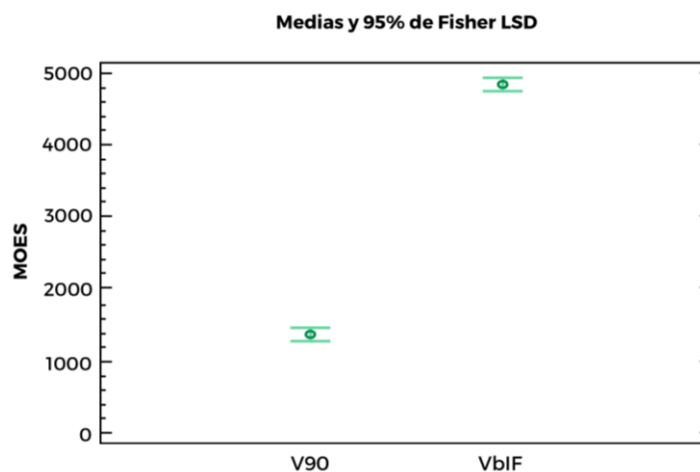


Ilustración 40: Gráfico de medias de la V_{90°} y VbFI.

Velocidad MicroSecond Timer medida Transversal a 45° con VbFI

Dado que el Valor-P (0,0000) del Test ANOVA es menor que 0,05, no se puede rechazar que existan diferencias significativas entre las medias de las velocidades de las mediciones realizadas con el MST a 45° y de la velocidad indirecta del MST a 0°. Por ello se sabe que pertenecerán a dos grupos distintos.

Para facilitar las medidas en obra se pretende estimar la velocidad transversal hallada a 45° a través de la velocidad bruta indirecta del MST, para ello se realiza un modelo de regresión simple (9).

$$VbFI = 6670,65 - 1,00442*V45 \quad 9$$

**Donde: VbFI (μ s) es la velocidad bruta de la medición indirecta con el MST; V45 (μ s) es la velocidad de la medición transversal a 45° con el MST.*

El estadístico R² indica que el modelo ajustado explica el 10,4932% de la variabilidad en VbFI. El coeficiente de correlación es igual a -0,323932, indicando una relación relativamente débil entre las variables.

Puesto que el valor-P (0,2803) es mayor que 0,05, no hay una relación estadísticamente significativa entre VbFI y V45° con un nivel de confianza del 95,0% o más. Por lo tanto, se descarta seguir con el modelo de correlación.

En el supuesto de que el resultado hubiese sido favorable, se habría continuado con una línea de investigación que pueda relacionar las mediciones transversales a 45° con aquellas tomadas longitudinalmente.

En el siguiente gráfico se pueden apreciar los grupos de valores (Ilustración 41).

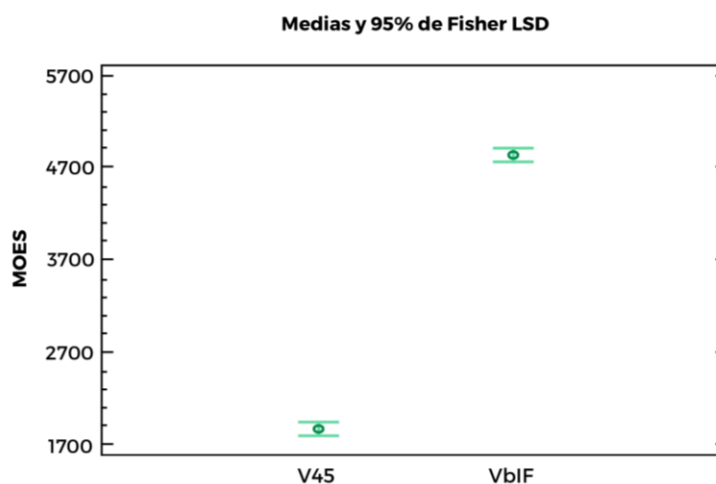


Ilustración 41: Gráfico de medias de la V₄₅° y VbFI.

Para finalizar, se realiza la comparación de todos los MOE obtenidos.

Comparación de todos los MOE entre sí

Al comparar las medias de las siete variables intervenidas y obtener un Valor-P de 0,00, no se puede rechazar que existan diferencias estadísticamente significativas entre las medias de todos los MOE comparados.

Para comprobar la existencia de algún grupo homogéneo se realiza una prueba de múltiples rangos ya que hay más de dos grupos de datos y no se sabe a qué grupo pertenece cada grupo de datos.

Existen dos grupos homogéneos, uno de ellos compuesto por las mediciones directas tomadas en seco con el Sylvatest, y otro compuesto por todos los demás grupos (Tabla 12).

En la tabla no se muestran las medidas realizadas con gel, ya que, como se ha mencionado con anterioridad, no suponen una diferencia estadística significativa, y se muestra el valor de referencia estimado por máquina en rojo.

Pertenecer a un mismo grupo homogéneo implica el rechazo de la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los grupos de datos que pertenecen al mismo.

Tabla 12: Tabla de grupos homogéneos resultantes de la prueba de múltiples rangos. Se muestra en rojo el grupo del valor de referencia estimado por máquina.

	Grupos Homogéneos
MOESDS	X
MOESIS	X
MOEFD	X
MOEFI	X
MOEGTO	X

En las gráficas se puede comprender con más facilidad el resultado de todos los grupos comparados visualizando los grupos homogéneos existentes (Ilustración 42) (Ilustración 43).

Se generan dos bandas horizontales en la gráfica, una superior y una inferior. La inferior incluye las mediciones directas del Sylvatest sin gel de acoplamiento. La banda superior agrupa las mediciones restantes, sin embargo, la anchura de esta banda es significativamente superior que la inferior, ya que los grupos de datos se encuentran más dispersos, son más diferentes entre sí.

Se puede reconocer una gran similitud entre los valores de MOE obtenidos de las mediciones indirectas en seco realizadas con el Sylvatest y el MOE obtenido por máquina.

Mientras los valores obtenidos de las mediciones directas del Sylvatest subestiman claramente los valores del MOE de máquina, el resto de los resultados lo sobreestiman, siendo la medición directa con el MST la que resulta en valores más elevados.

En el ámbito de la construcción, y en especial en las estructuras, se trabaja con coeficientes de seguridad elevados, un equipo que subestime los valores reales de las propiedades sigue la coherencia marcada en el trabajo de este tipo, siempre en favor de la seguridad.

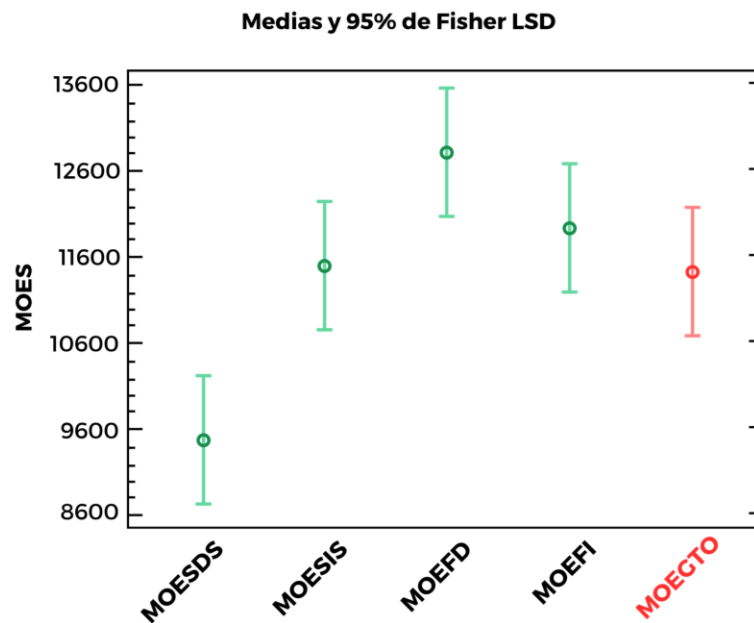


Ilustración 42: Gráfico de medias de todos los MOE. Se muestra en rojo el valor de referencia estimado por máquina.

En cuanto a la dispersión de los datos, aquellos más agrupados son los referentes a las mediciones directas del Sylvatest, y los que muestran un mayor rango son los relativos a las medidas directas del MST. El resto de los MOE mantienen más o menos una estructura similar.

Por último, hay que mencionar que tanto las mediciones indirectas del MST como las de máquina comparten la existencia de outliers, puntos externos que representan datos muy alejados del resto de los datos del grupo (Ilustración 43).

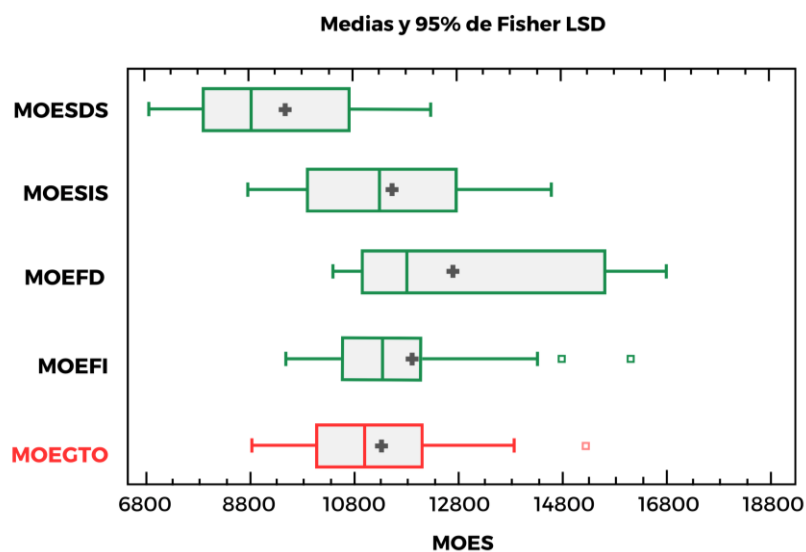


Ilustración 43: Gráfico de cajas y bigotes de todos los MOE. Se muestra en rojo el valor de referencia estimado por máquina.

Como conclusión final y más destacable de este apartado, se puede decir que las **mediciones indirectas sin gel del Sylvatest** ofrecen el **MOE** (MOESIS) más **semejante** al **MOEGTO**.

Además, se confirma la hipótesis supuesta al inicio de la discusión de resultados a partir de las velocidades medias.

5.3.4. RESULTADOS DEL MODELO DE REGRESIÓN SIMPLE GENERADO

Para terminar, se establece un modelo de regresión simple (Ilustración 44) entre el MOE obtenido con la metodología más fácilmente aplicable en obra, la indirecta, y el MOE establecido por máquina.

El MOE con el que se calcula el modelo de regresión es el MOE obtenido con las mediciones indirectas sin gel realizadas con el Sylvatest (MOESIS), aquel con mayor correlación con el MOE establecido por máquina.

Esta **relación** se define con la siguiente fórmula (10):

$$MOEGTO = 3795,75 + 0,655943 \times MOESIS \quad 10$$

**Donde: MOEGTO (N/mm²) es el Módulo de Elasticidad Dinámico establecido por máquina: MOESIS es el Módulo de Elasticidad Dinámico según la medición indirecta en seco con el equipo Sylvatest*

Este modelo, con un P-valor menor que 0,05, posee una relación estadísticamente significativa con un 95% de confianza y con la mayoría de los valores cercanos a la recta de regresión.

El estadístico R² muestra que el modelo explica el 55,36% de la variabilidad observada en el MOEGTO y su coeficiente de correlación (0,744039) indica una relación relativamente elevada entre ambas variables. Esto quiere decir que, si una de las variables aumenta, la otra aumentará también, aunque con una ligera imprecisión.

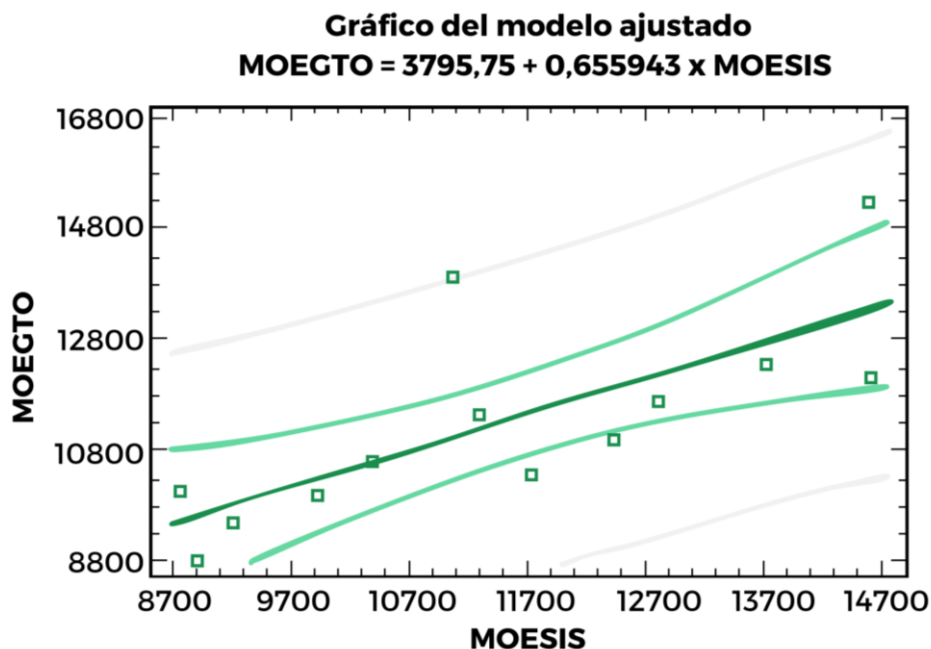


Ilustración 44: Gráfico del Modelo Ajustado entre MOEGTO y MOESIS.

Por último, como análisis del gráfico de residuos, se puede observar que el modelo cumple con los supuestos de normalidad (P-valor= 0,449766>0,05), homocedasticidad, linealidad e independencia de los residuos (Ilustración 45) (Ilustración 46).

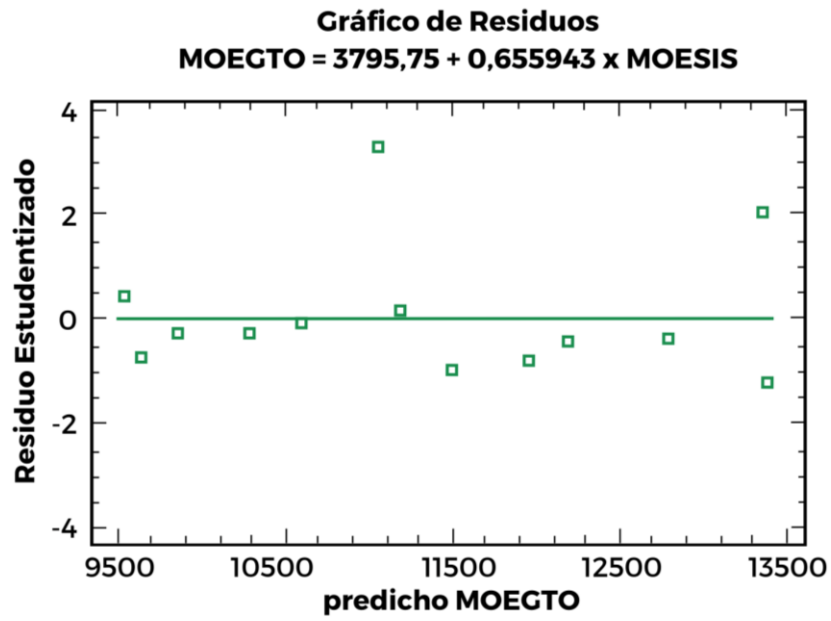


Ilustración 45: Gráfico de residuos.

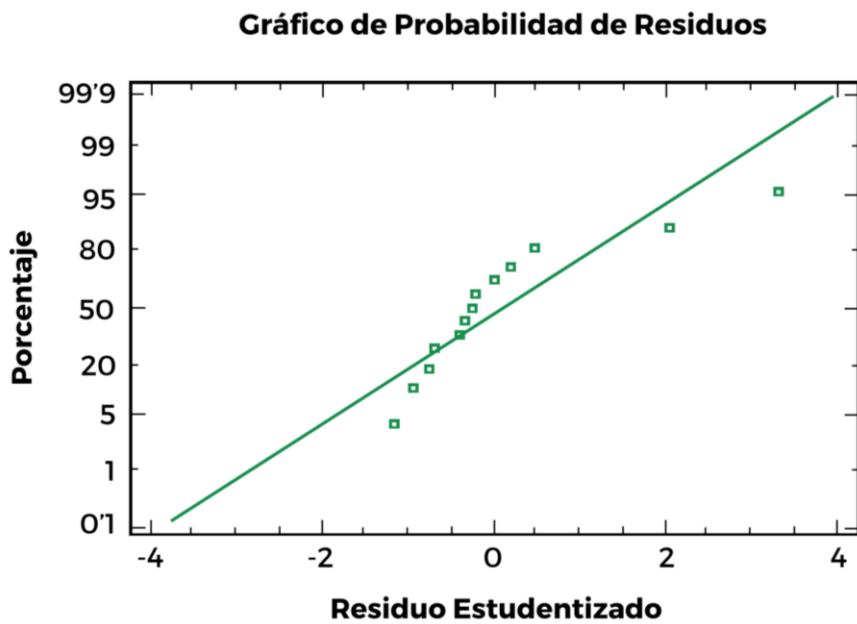


Ilustración 46: Gráfico de probabilidad de residuos.

6. CONCLUSIONES

- Los valores resultantes de las mediciones **transversales, tanto a 45° como a 90°**, se **desestiman** y no se continúa con su estudio. No se pueden considerar válidos al no presentar una buena correlación con la velocidad indirecta del MST, velocidad tomada como referencia.

- **No** se perciben **diferencias estadísticamente significativas** ente los valores de las propiedades elásticas obtenidas de las **mediciones directas** del **Sylvatest 4.0** realizadas **en seco y con gel**.

Tampoco se perciben **diferencias estadísticamente significativas** ente los valores de las propiedades elásticas obtenidas de las **mediciones indirectas** del **Sylvatest 4.0** realizadas **en seco y con gel**.

Se puede decir que aplicar gel de acoplamiento no supone una diferencia o mejora, por lo que se **desestima la aplicación de gel**, facilitando la realización de los ensayos.

- Los resultados de las mediciones **directas e indirectas** realizadas con el equipo **Sylvatest 4.0** muestran **diferencias estadísticamente significativas**.
- Los valores de las propiedades mecánicas establecidas por el equipo **Sylvatest 4.0** en las mediciones **directas**, tanto en seco como con gel, **subestiman** los determinados por **máquina**. Esto proporciona datos con un margen de seguridad comúnmente conveniente en el ámbito de la construcción.
- El tipo de medición que ofrece los resultados con **mejor correlación** con los **estimados por máquina** es la medición **indirecta en seco** llevada a cabo con el **Sylvatest 4.0**. Se puede recomendar este tipo de medición por ser la más comúnmente aplicada en obra además de presentar buena correlación con los valores de referencia.
- **No** existen **diferencias estadísticamente significativas** entre los valores de **MOE** estimados de forma directa e indirecta mediante el **MST** y los **valores de referencia** obtenidos con máquina. Por lo tanto, se podría utilizar este método como estimación directa de los valores de máquina.
- Con el **modelo de regresión** generado se obtiene una correlación con un **R²** del **55,36%**.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Acuña, L., Díez, M. R., & Casado, M. (2006). Los ultrasonidos y la calidad de la madera estructural. aplicación a *Pinus pinaster* AIT. *Boletín Del CIDEU*, 2, 7–26.
- Arriaga, F., Llana, D. F., Esteban, M., & Íñiguez-González, G. (2017). Influence of length and sensor positioning on acoustic time-of-flight (ToF) measurement in structural timber. *Holzforschung*, 71(9), 713–723. <https://doi.org/10.1515/hf-2016-0214>
- 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>
- Arriaga Martitegui, F., Peraza Sánchez, F., Esteban Herrero, M., Bobadilla Maldonado, I., & García Fernández, F. (2002). *Intervención en estructuras de madera* (S.l.: Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y el Corcho, Ed.). Taravilla, S.L.
- Balmori Roiz, J. A. (2014). *Estudio de la influencia de la dirección de la fibra en la velocidad de propagación de ondas sónicas (Fakopp) en madera estructural de "Pinus radiata" y "Pinus sylvestris". Perfeccionamiento del ensayo y postproceso de resultados para su aplicación directa*. [TFM]. Universidad de País Vasco.
- Basterra, A., Acuña, L., Casado, M., Ramón-Cueto, 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>
- Basterra, A., Casado, M., Acuña, L., & Pinazo, O. (2006). Técnicas de ensayo pseudo no destructivas en madera estructural mediante extracción de tornillos. *ReCoPaR*, 2, 37–59.
- Bucur, V. (2006). *Acoustics of Wood* (2nd ed.). Springer Berlin. <https://doi.org/https://doi-org.ponton.uva.es/10.1007/3-540-30594-7>
- Casado, M., Acuña, L., Vecilla, D., Relea, E., Basterra, A., Ramón, G., & López, G. (2010). The influence of size in predicting the elastic modulus of *Populus x euramericana* timber using vibration techniques. *Structures and Architecture - Proceedings of the 1st International Conference on Structures and Architecture, ICSA 2010*, 2086–2093.
- Conde García, M., Fernández-Golfín Seco, J. I., & Hermoso Prieto, 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.

- Esteban Herrero, M. (2003). *Determinación de la capacidad resistente de la madera estructural de gran escuadría y su aplicación en estructuras existentes de madera de conífera* [Tesis]. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes.
- Hermoso Prieto, E. (2001). *Caracterización mecánica de la madera estructural de Pinus sylvestris L.* [Tesis]. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes.
- Íñiguez González, 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. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes.
- Kollmann, F. F. P., & Côté, W. A. (1968). *Principles of Wood Science and Technology: I Solid Wood* (Vol. 1). Springer-Verlag.
- 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. Escuela Superior de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural.
- Pellerin, R. F., & Ross, R. J. (2015). *Nondestructive Evaluation of Wood* (R. Ross, Ed.; 2nd ed.). United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Sandoz, J. L. (1989). Grading of construction timber by ultrasound. *Wood Science and Technology*, 23, 95–108.
- Sandoz, J. L. (1996). *Ultrasonic solid wood evaluation in industrial applications. Proceedings of 10th International symposium on nondestructive testing of wood. Aug. 26-28. 1(12), 147–153.*
- Tiemann, H. D. (1906). *Effect of Moisture upon the Strength and Stiffness of Wood* (Vol. 70). United States Department of Agriculture.
- UNE 56544. (2011). *Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas*. www.aenor.es
- 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*. CTN 56 Madera y corcho.
- UNE-EN 13183-2. (2002). *Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 2: Estimación por el método de la resistencia eléctrica*. CTN 56 Madera y Corcho.

8. ÍNDICE DE FIGURAS

Portada: Fuente: Microsoft Bing. Image Creator powered by DALL·E. Texto de búsqueda: an artistic but minimalist collage of wood textures of trees and beams <https://www.bing.com/images/create/an-artistic-but-minimalist-collage-of-wood-texture/649968913b374b26a8c6a7250a26980f?FORM=GUH2CR> _____ 0

Ilustración 1: (de izquierda a derecha) el primer refugio según Viollet-Le-Duc; cabañas primitivas reconstruidas por Perrault según Vitruvio; la construcción de la choza primitiva, según Vitruvio; el descubrimiento del fuego, según Fra Giocondo; cabañas según Caramuel; la choza primitiva, según Oscar Niemeyer. Fuente de todas las ilustraciones: <https://shorturl.at/gruMN> _____ 10

Ilustración 2: Estructura de madera de The Box en estado de construcción. Fuente: <https://shorturl.at/xEPYO> _____ 10

Ilustración 3: Medición transversal con el MST en una viga de una estructura en servicio. (Balmori Roiz, 2014) _____ 11

Ilustración 4: Proceso de clasificación visual: a) medición del espécimen, b) identificación de la especie del espécimen, c) comprobación de los defectos, d) comprobación del contenido de humedad, e) clasificación de la muestra. Fuente: (Mokhtarruddin et al., 2016). _____ 18

Ilustración 5: Medición con técnicas no destructivas de un árbol en pie. Fuente: <https://shorturl.at/bxFVZ> _____ 18

Ilustración 6: Equipo Sylvatest Duo (izquierda). Fuente: <https://shorturl.at/fwAWX>; Sylvatest Trio. (centro). Fuente: <https://shorturl.at/beZ05>; MicroSecond Timer Fakopp. (izquierda) Fuente: <https://shorturl.at/zCPSW> _____ 19

Ilustración 7: Esquemas de tipos de mediciones. Arriba: medición longitudinal del tiempo de vuelo; Centro: medición longitudinal de frecuencia inducida; Abajo: medición transversal de frec. Inducida. _____ 19

Ilustración 9: Aplicación de una medición longitudinal indirecta con el Sylvatest-Duo: estudio en un castillo del siglo XIII, Sion, Suiza. Fuente: <https://shorturl.at/tLPRY> _____ 20

Ilustración 8: Medición indirecta en estructura de madera. Almacenes generales de París. Fuente: <https://shorturl.at/ekquM> _____ 20

Ilustración 10: Gráfico comparativo del aumento de la influencia del contenido de humedad en el MOE y en la velocidad de propagación. Basado en las teorías de Kollmann & Côté (1968) y Sandoz (1989). En horizontal se indica el contenido de humedad; en vertical se muestra el porcentaje por unidad de MOE y velocidad de propagación. _____ 23

Ilustración 11: Viga nº4 alabeada. _____ 23

Ilustración 12: Medidas longitudinales, transversales y con un ángulo α . _____ 24

<i>Ilustración 13: Medidas realizadas en las piezas ensayadas en laboratorio por Balmori Roiz (2014).</i>	27
<i>Ilustración 14: Cabezas de las vigas de ensayo.</i>	32
<i>Ilustración 15: Hydromette BL A plus sobre probeta de ensayo.</i>	33
<i>Ilustración 16: Aplicación Sylvius. Resultados mostrados tras la medición directa con el equipo Sylvatest de la viga nº1.</i>	34
<i>Ilustración 17: Palpador emisor del equipo Sylvatest para medición directa.</i>	35
<i>Ilustración 19: Consola del equipo MST.</i>	35
<i>Ilustración 18: Equipo MST durante la medición directa de una viga.</i>	35
<i>Ilustración 20: Gel de acoplamiento KONIX tras su aplicación y una medición directa.</i>	36
<i>Ilustración 21: Vigas de ensayo.</i>	37
<i>Ilustración 22: Vigas de ensayo biapoyadas.</i>	38
<i>Ilustración 23: Uso del Hydromette BL A plus para la estimación del contenido de humedad de una probeta testigo.</i>	39
<i>Ilustración 24: Relación entre las mediciones y la nomenclatura asignada a los MOE y velocidades resultantes, con la indicación esquemática del recorrido de la onda.</i>	40
<i>Ilustración 25: Palpadores en posición para medición indirecta con el equipo Sylvatest.</i>	41
<i>Ilustración 26: Orificio para medición indirecta con el equipo Sylvatest.</i>	41
<i>Ilustración 27: Orificios realizados en la viga nº9 para las mediciones directas e indirectas con el equipo Sylvatest.</i>	42
<i>Ilustración 28: Colocación de los palpadores del equipo Sylvatest para mediciones directas (izquierda) y para mediciones indirectas (derecha).</i>	43
<i>Ilustración 29: Medición directa con gel con el equipo Sylvatest.</i>	44
<i>Ilustración 30: Preparación previa a los ensayos. Conexión de consola y sensores con cables BNC y cuaderno con tabla para anotar resultados.</i>	45
<i>Ilustración 31: Sensor emisor del equipo MicroSecond Timer clavado para medidas directas.</i>	46
<i>Ilustración 32: Sensor emisor del equipo MST clavado para medida indirecta (izquierda). Sensor receptor del equipo MST clavado para medida indirecta (derecha).</i>	47
<i>Ilustración 33: Posición de los puntos a, b y c en las vigas de ensayo.</i>	48

<i>Ilustración 34: Marcajes de las medidas transversales y a 45o en un punto C de una viga.</i>	49
<i>Ilustración 35: Colocación sensores en el mismo eje, en paralelo a la línea de marcaje.</i>	50
<i>Ilustración 36: Gráfico de medias (directas) del MOESDS y MOESDG.</i>	64
<i>Ilustración 37: Gráfico de medias (indirectas) del MOESIS y MOESIG.</i>	65
<i>Ilustración 38: Gráfico de medias del MOESDS y MOESIS.</i>	66
<i>Ilustración 39: Gráfico de medias del MOEFD y MOFI.</i>	67
<i>Ilustración 40: Gráfico de medias de la V90o y VbFI.</i>	68
<i>Ilustración 41: Gráfico de medias de la V45o y VbFI.</i>	69
<i>Ilustración 42: Gráfico de medias de todos los MOE. Se muestra en rojo el valor de referencia estimado por máquina.</i>	71
<i>Ilustración 43: Gráfico de cajas y bigotes de todos los MOE. Se muestra en rojo el valor de referencia estimado por máquina.</i>	71
<i>Ilustración 44: Gráfico del Modelo Ajustado entre MOEGTO y MOESIS.</i>	73
<i>Ilustración 45: Gráfico de residuos.</i>	74
<i>Ilustración 46: Gráfico de probabilidad de residuos.</i>	74

9. ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Identificación y números de las vigas con sus dimensiones y MOEs.</i>	37
<i>Tabla 2: Tabla para mediciones transversales en los puntos de aplicación y sus características.</i>	49
<i>Tabla 3: Anotaciones de las singularidades de las vigas de ensayo y distancias entre palpadores expresadas en metros para Sylvatest y MicroSecond Timer.</i>	58
<i>Tabla 4: Resultados de las observaciones de los puntos de aplicación para mediciones transversales.</i>	58
<i>Tabla 5: Resultados de la prueba de normalidad Shapiro-Wilk de las velocidades.</i>	59
<i>Tabla 6: Resultados de la estadística descriptiva de las variables (velocidades en μs).</i>	59
<i>Tabla 7: Medias del MOE (N/mm²) obtenido por máquina y de los MOE (N/mm²) resultantes según el tipo de medición. Se muestra el valor de referencia estimado por máquina en rojo.</i>	60
<i>Tabla 8: Resultados de la prueba de normalidad Shapiro-Wilk de los MOE. Se muestra el valor de referencia estimado por máquina en rojo.</i>	62
<i>Tabla 9: Resultados de la prueba de normalidad Shapiro-Wilk de las velocidades transversales con el MST.</i>	62
<i>Tabla 10: Resultados de la estadística descriptiva sobre las variables (MOE) Se muestran en rojo los datos de referencia del MOE estimado por máquina.</i>	63
<i>Tabla 11: Resultados de la estadística descriptiva sobre las variables (velocidades de propagación).</i>	63
<i>Tabla 12: Tabla de grupos homogéneos resultantes de la prueba de múltiples rangos. Se muestra en rojo el grupo del valor de referencia estimado por máquina.</i>	70
<i>Tabla 13: Relación entre abreviaturas y su significado correspondiente.</i>	83
<i>Tabla 14: Tiempos de propagación de las mediciones directas e indirectas realizadas con el MST.</i>	84
<i>Tabla 15: Velocidades brutas del equipo Sylvatest y densidades de las vigas</i>	84
<i>Tabla 16: Velocidades corregidas del Sylvatest y velocidades brutas del MST</i>	85
<i>Tabla 17: Módulos de Elasticidad Estática de las vigas según todas las mediciones</i>	85
<i>Tabla 18: Clase resistente de las vigas según el equipo Sylvatest y el tipo de medición</i>	86

Tabla 19: Observaciones sobre los puntos de aplicación de los sensores del MST para las mediciones transversales en tres puntos distintos de las vigas (en ambas cabezas y en el centro) _____ 86

Tabla 20: Velocidades de propagación de la onda vibratorio del equipo MST en las mediciones transversales _____ 87

Tabla 21: Tiempos y velocidades medias de propagación de los puntos A, B y C en mediciones transversales con el equipo MST _____ 87

10. ANEXO I: TABLAS

Tabla 13: Relación entre abreviaturas y su significado correspondiente.

ID	Número identificador de la viga ensayada
ρ	Densidad
Tdf	Tiempo de propagación en medición directa con el MST
Tif	Tiempo de propagación en medición indirecta con el MST
VbDS	Velocidad bruta de propagación en medición directa en seco con el Sylvatest
VbDG	Velocidad bruta de propagación en medición directa con gel con el Sylvatest
VbIS	Velocidad bruta de propagación en medición indirecta en seco con el Sylvatest
VbIG	Velocidad bruta de propagación en medición indirecta con gel con el Sylvatest
VbFD	Velocidad bruta de propagación en medición directa con el MST
VbFI	Velocidad bruta de propagación en medición indirecta con el MST
VcSDS	Velocidad corregida de propagación en medición directa en seco con el Sylvatest
VcSDG	Velocidad corregida de propagación en medición directa con gel con el Sylvatest
VcSIS	Velocidad corregida de propagación en medición indirecta en seco con el Sylvatest
VcSIG	Velocidad corregida de propagación en medición indirecta con gel con el Sylvatest
MOE_{SDS}	Módulo de elasticidad obtenido en medición directa en seco con el Sylvatest
MOE_{SDG}	Módulo de elasticidad obtenido en medición directa con gel con el Sylvatest
MOE_{SIS}	Módulo de elasticidad obtenido en medición indirecta en seco con el Sylvatest
MOE_{SIG}	Módulo de elasticidad obtenido en medición indirecta con gel con el Sylvatest
MOE_{FD}	Módulo de elasticidad obtenido en medición directa con el MST
MOE_{FI}	Módulo de elasticidad obtenido en medición indirecta con el MST
MOEGTO	Moe establecido por máquina según norma UNE EN 408
CLASE_{SDS}	Clase resistente establecida por la aplicación Sylvius en medición directa en seco con el Sylvatest
CLASE_{SGS}	Clase resistente establecida por la aplicación Sylvius en medición directa con gel con el Sylvatest
CLASE_{SIS}	Clase resistente establecida por la aplicación Sylvius en medición indirecta en seco con el Sylvatest
CLASE_{SIG}	Clase resistente establecida por la aplicación Sylvius en medición indirecta con gel con el Sylvatest
90°	Velocidad de propagación en medición transversal a 90° con el MST
45°	Velocidad de propagación en medición transversal a 45° con el MST
T90°	Tiempo medio de propagación de los tres puntos de aplicación en medición transversal a 90° con el MST
T45°	Tiempo medio de propagación de los tres puntos de aplicación en medición transversal a 45° con el MST

Tabla 14: Tiempos de propagación de las mediciones directas e indirectas realizadas con el MST

ID	Viga	T _{df}	T _{if}
1	1	0,000926	0,000896
2	3	0,000979	0,000962
3	4	0,000967	0,000948
4	6	0,000926	0,000903
5	7	0,001014	0,000973
6	8	0,001014	0,000957
7	9	0,001041	0,001039
8	10	0,000931	0,000924
9	12	0,000986	0,000949
10	13	0,000953	0,000918
11	14	0,000901	0,000872
12	15	0,001040	0,001015
13	16	0,001101	0,001048
MEDIAS		0,000983	0,000954

Tabla 15: Velocidades brutas del equipo Sylvatest y densidades de las vigas

ID	Viga	VbDS	VbDG	VbIS	VbIG	ρ
1	1	5419,9	5441,3	5379,4	5384,0	460,79
2	3	5002,1	5034,8	4548,0	5122,2	485,09
3	4	4852,1	4886,4	4512,8	4737,0	485,65
4	6	5302,9	5376,0	5224,7	5413,1	575,32
5	7	4986,1	4995,9	4812,9	4959,4	488,26
6	8	4984,0	5017,6	4889,5	4879,6	483,04
7	9	4814,5	4841,5	4632,7	4684,1	510,10
8	10	5440,0	5444,3	4776,3	5143,8	582,32
9	12	5188,7	5137,5	5005,5	5099,1	486,58
10	13	5296,6	5283,8	5067,5	5206,3	485,94
11	14	5557,5	5573,5	5375,6	5539,4	583,68
12	15	4820,2	4847,3	4419,1	4583,2	484,19
13	16	4690,8	4786,5	4358,1	4606,1	497,59
MEDIAS		5104,3	5128,2	4846,3	5027,5	508,3

Tabla 16: Velocidades corregidas del Sylvatest y velocidades brutas del MST

ID	Viga	VcSDS	VcSDG	VcSIS	VcSIG	VbFD	VbFI
1	1	5353,9	5375,3	5854,8	5859,0	5226,8	5111,6
2	3	4936,1	4968,8	5111,4	5659,2	4943,8	4968,8
3	4	4786,1	4820,4	5002,5	5212,8	4715,6	4578,1
4	6	5236,9	5310,0	5713,5	5885,3	5226,8	5072,0
5	7	4920,1	4929,9	5330,5	5467,9	4773,2	4707,1
6	8	4918,0	4951,6	5402,5	5393,2	4773,2	4785,8
7	9	4748,5	4775,5	5185,2	5234,6	4649,4	4552,5
8	10	5374,0	5378,3	5295,9	5639,0	5198,7	4956,7
9	12	5122,7	5071,5	5510,9	5597,8	4908,7	4826,1
10	13	5230,6	5217,8	5568,5	5696,6	5078,7	4989,1
11	14	5491,5	5507,5	5851,3	5999,4	5371,8	5252,3
12	15	4754,2	4781,3	4954,3	5112,2	4653,8	4512,3
13	16	4624,8	4720,5	4928,5	5170,9	4623,1	4370,2
MEDIAS		5038,3	5062,2	5362,3	5532,9	4934,1	4821,7

Tabla 17: Módulos de Elasticidad Estática de las vigas según todas las mediciones

ID	Viga	MOE _{SDS}	MOE _{SDG}	MOE _{SIS}	MOE _{SIG}	MOE _{FD}	MOE _{FI}	MOEGTO
1	1	11427,9	11561,8	14572,6	14601,5	12588,4	12039,8	12129,7
2	3	8804,1	9009,9	9904,8	13344,9	11856,2	11976,4	9993,1
3	4	7862,4	8077,9	9221,0	10542,0	10799,4	10178,5	9533,9
4	6	10693,3	11151,9	13685,9	14764,6	15717,3	14800,1	12382,2
5	7	8703,8	8765,2	11280,7	12143,5	11124,1	10818,2	11427,9
6	8	8690,9	8901,7	11732,8	11674,5	11005,1	11063,3	10358,2
7	9	7626,2	7795,5	10368,3	10678,6	11026,6	10571,6	10593,7
8	10	11554,1	11581,0	11063,5	13218,0	15738,1	14307,0	13925,6
9	12	9975,8	9654,2	12413,3	12958,9	15738,1	11333,2	11007,7
10	13	10653,2	10573,4	12775,1	13579,8	12533,9	12095,6	11690,5
11	14	12291,5	12391,9	14551,0	15481,0	16842,8	16101,6	15270,1
12	15	7662,3	7832,1	8918,4	9910,1	10486,7	9858,5	8853,8
13	16	6849,7	7450,7	8756,8	10278,5	10634,9	9503,5	10074,1
MEDIAS		9445,8	9595,9	11480,3	12552,0	12776,3	11896,0	11326,2

Tabla 18: Clase resistente de las vigas según el equipo Sylvatest y el tipo de medición

ID	Viga	CLASE _{SDS}	CLASE _{SGS}	CLASE _{SIS}	CLASE _{SIG}
1	1	27	27	40	40
2	3	18	18	18	35
3	4	24	14	18	24
4	6	27	24	35	40
5	7	16	16	27	30
6	8	0	16	27	27
7	9	16	0	22	24
8	10	30	27	24	30
9	12	24	18	30	30
10	13	0	24	30	35
11	14	0	30	40	40
12	15	16	0	16	18
13	16	0	0	16	22

Tabla 19: Observaciones sobre los puntos de aplicación de los sensores del MST para las mediciones transversales en tres puntos distintos de las vigas (en ambas cabezas y en el centro)

ID	Viga	OBSERVACIONES PUNTOS DE MEDICIÓN		
		A	B	C
1	V1	duramen	duramen	duramen
2	V3	albura y duramen	albura y duramen	duramen
3	V4	duramen	duramen	duramen
4	V6	albura	albura	albura
5	V7	albura	albura	albura
6	V8	duramen	duramen	albura
7	V9	albura	albura	albura
8	V10	duramen	duramen	duramen
9	V12	duramen	duramen	albura
10	V13	duramen	duramen	duramen
11	V14	albura y duramen	albura	albura y duramen
12	V15	albura y duramen	albura y duramen	albura y duramen
13	V16	duramen	duramen	duramen

Tabla 20: Velocidades de propagación de la onda vibratorio del equipo MST en las mediciones transversales

ID	Viga	L (cm)	A		B		C	
			90°	45°	90°	45°	90°	45°
1	V1	9	62	67	68	72	64	73
2	V3	9	70	69	68	75	70	68
3	V4	9	69	73	66	67	68	65
4	V6	9	69	72	72	77	66	74
5	V7	9	70	73	72	71	74	70
6	V8	9	63	67	62	64	57	61
7	V9	9	72	75	70	72	68	64
8	V10	9	66	62	62	74	67	69
9	V12	9	69	64	64	67	66	64
10	V13	9	63	73	67	73	64	70
11	V14	9	72	74	65	70	64	67
12	V15	9	54	64	69	67	50	62
13	V16	9	68	74	66	74	69	65

Tabla 21: Tiempos y velocidades medias de propagación de los puntos A, B y C en mediciones transversales con el equipo MST

ID	Viga	T90	T45	V90	V45
1	V1	65	71	1392	1801
2	V3	69	71	1298	1801
3	V4	68	68	1330	1863
4	V6	69	74	1304	1712
5	V7	72	71	1250	1784
6	V8	61	64	1484	1989
7	V9	70	70	1286	1810
8	V10	65	68	1385	1863
9	V12	66	65	1357	1958
10	V13	65	72	1392	1768
11	V14	67	70	1343	1810
12	V15	58	64	1561	1978
13	V16	68	71	1330	1793