



UNIVERSIDAD DE GRANADA

GRADO EN EDIFICACIÓN

PROYECTO FIN DE GRADO

**Caracterización mecánica a compresión
longitudinal y transversal de chopo del clon
I-214. Comparación con ensayos no
destructivos.**

REALIZADO POR:
Joaquín García Marín

TUTOR:
Dr. Ignacio Valverde Palacios
Dpto. Construcciones Arquitectónicas. Universidad de Granada

TUTOR:
Dr. Francisco José Rescalvo Fernández
Dpto. Construcciones Arquitectónicas. Universidad de Granada

Curso 2020/2021

Caracterización mecánica a compresión longitudinal y transversal de chopo del clon I-214. Comparación con ensayos no destructivos.

JOAQUÍN GARCÍA MARÍN

TUTORES:

Dr. Ignacio Valverde Palacios

Dr. Francisco Rescalvo Fernández



GRADO EN EDIFICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO 2020-2021

D. Francisco José Rescalvo Fernández, Investigador del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la Universidad de Granada y D. Ignacio Valverde Palacios, Profesor titular del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la Universidad de Granada, como tutores del Proyecto Fin de Grado de D. Joaquín García Marín.

Informan:

Que el presente trabajo titulado:

“Caracterización mecánica a compresión longitudinal y transversal de chopo del clon I-214. Comparación con ensayos no destructivos.”

Ha sido realizado y redactado por el mencionado alumno bajo nuestra dirección, y con esta fecha autorizamos a su presentación.

Granada, a 23 de septiembre de 2020

Fdo.

Francisco José Rescalvo Fernández

Ignacio Valverde Palacios

RESUMEN

El chopo es un árbol de crecimiento rápido y ciclo corto, adaptable a sistemas agroforestales y que además cuenta con una madera de alta estabilidad dimensional y baja densidad. Actualmente la madera de chopo está en desuso como material estructural debido a que en España no está contemplada en ninguna normativa para dicho uso. Este proyecto pretende demostrar que la madera del chopo puede cumplir con las características mecánicas necesarias para que vuelva a incluirse en la normativa de clases resistentes. Se ha realizado un análisis de la caracterización mecánica a compresión de la madera de chopo del clon I214, los resultados han sido comparados con los obtenidos a través de procesos no destructivos con el fin de comprobar la fiabilidad de estos, ya que se pretende conocer la rigidez de la madera lo antes posible para poder valorar mejor la plantación sin necesidad de hacer ensayos destructivos.

PALABRAS CLAVE: Chopo, compresión, caracterización mecánica, NDT

ABSTRACT

Poplar is a fast-growing, short-cycle tree which can be easily adapted to agroforestry systems and which also has a high dimensional stability and low density. Poplar wood is currently in decline as a structural building material because it is not included in any regulations for this use in Spain. This project aims to demonstrate that poplar wood can meet the mechanical requirements to be re-included in the strength class standards. An analysis of the mechanical characterisation under compression of poplar wood from the I214 clone has been carried out, and the results have been compared with those obtained through non-destructive methods in order to verify the reliability of the tests, since the objective is to know the stiffness of the wood as soon as possible in order to be able to better evaluate the plantation without the need to carry out destructive tests.

KEYWORDS: Poplar, compression, mechanical characterization, NDT

Este trabajo ha sido financiado por el Proyecto COMPOP_Timber titulado “*Desarrollo de productos de ingeniería elaborados a base de tablonos y chapas de chopo con inserciones de material compuesto para su uso en construcción*”, BIA2017-82650-R, del Plan Nacional I+D+i



UNIÓN EUROPEA
Fondo Europeo de Desarrollo Regional

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría dar las gracias a mi tutor del PFG el Dr. Francisco José Resclavo Fernández por todo su esfuerzo, dedicación, tiempo y paciencia. Este ha sido un Proyecto enmarcado en un sector de la edificación completamente nuevo para mí que me ha hecho desarrollar nuevos conocimientos e inquietudes los cuales estoy seguro que nunca se me olvidaran.

También agradecer al Dr. Antolino Gallego Molina la confianza depositada en mí y todo el esfuerzo y trabajo que conlleva gestionar los equipos de investigación ADIME y COMPOP sin los cuales hubiera sido imposible la realización de este Proyecto. Espero que todo vaya genial y que nunca paren de sumar nuevas aventuras.

Por último, quisiera agradecer a toda mi familia el esfuerzo tanto económico como emocional que me han brindado durante estos 4 años de carrera universitaria, lo cual no es más que una etapa más en mi vida de la cual me siento muy orgulloso.

ÍNDICE

RESUMEN.....	3
AGRADECIMIENTOS.....	7
ÍNDICE.....	9
ÍNDICE DE FIGURAS.....	10
ÍNDICE DE TABLAS.....	12
1 INTRODUCCIÓN.....	13
1.1 OBJETIVOS.....	13
1.2 MOTIVACIÓN Y CONTEXTO.....	13
1.3 METODOLOGÍA.....	15
2 ESTADO DEL ARTE.....	16
2.1 LA MADERA DE CHOPO EN EL CONTEXTO DE LA BIOMECAÁNICA.....	16
2.2 LA MADERA DE CHOPO EN LA NORMATIVA ESPAÑOLA Y EUROPEA.....	21
3 CARACTERIZACIÓN DE LA MADERA: MATERIALES Y MÉTODOS.....	23
3.1 MATERIALES: PLANTACIÓN Y MADERA EXTRAÍDA.....	23
3.2 ENSAYOS REALIZADOS.....	29
3.2.1 MEDIDAS ACÚSTICAS EN ÁRBOL ($MoE_{din,F1}$).....	29
3.2.2 MEDIDAS ACÚSTICAS EN TROZA ($MoE_{din,F2}$).....	31
3.2.3 MEDIDAS ACÚSTICAS EN VIGA ($MoE_{din,F3}$).....	33
3.2.4 ENSAYOS A COMPRESIÓN. DIRECCIÓN DE LA FIBRA: $f_{c,0}$ y $E_{,0}$	33
3.2.5 ENSAYOS A COMPRESIÓN PERPENDICULAR A LA FIBRA: $f_{c,90}$ y $E_{,90}$	35
4 CARACTERIZACIÓN DE LA MADERA: RESULTADOS.....	37
4.1 RESULTADOS A COMPRESIÓN EN LA DIRECCIÓN DE LA FIBRA.....	37
4.2 RESULTADOS A COMPRESIÓN PERPENDICULAR A LA FIBRA.....	41
4.3 COMPARACIÓN ENTRE MoE_{din} Y $E_{,0}$	43
5 CONCLUSIONES.....	45
6 BIBLIOGRAFÍA.....	47

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1.1: CHOPERA DEL CLON I-214 DE LA VEGA DE GRANADA.....	16
FIGURA 2.1.2: ESQUEMA SEGÚN LA ORIENTACIÓN DE LAS SUPERFICIES O CORTES TRANSVERSAL, TANGENCIAL Y RADIAL. [1]	17
FIGURA 2.1.3: PARTES DEL TRONCO DE UN ÁRBOL (ESTRUCTURA MACROSCÓPICA) [1]	18
FIGURA 2.1.4: ESTRUCTURA MICROSCÓPICA DE UN ÁRBOL ESPECIE CONÍFERA [2].	20
FIGURA 2.1.5: ESTRUCTURA MICROSCÓPICA DE UN ÁRBOL ESPECIE FRONDOSA [2].	20
FIGURA 2.2.1: ESQUEMA DE LAS NORMATIVAS EUROPEAS Y ESPAÑOLAS DE CLASIFICACIÓN DEL CHOPO.....	22
FIGURA 3.1.1: UBICACIÓN DE LA PLANTACIÓN.....	23
FIGURA 3.1.2: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS PARCELAS DE LA PLANTACIÓN.....	24
FIGURA 3.1.3: ESQUEMA DE LAS DIFERENTES FASES A LAS QUE SE HA SOMETIDO A LA MADERA. (END: ENSAYO NO DESTRUCTIVO; ED: ENSAYO DESTRUCTIVO).....	25
FIGURA 3.1.4: ESQUEMA DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE LAS PROBETAS. DISTANCIAS EN MM.	26
FIGURA 3.1.5: APEO DE LOS ÁRBOLES.	27
FIGURA 3.1.6: ASERRADO DE TROZAS. IZQ.: CORTE DE LAS TROZAS EN LA SIERRA DE CINTA. DER.: AGRUPACIÓN POR LOTES Y NUMERACIÓN DE CADA PIEZA ASERRADA.	27
FIGURA 3.1.7: COLOCACIÓN Y ENRASTRELADO DE LAS DIFERENTES PIEZAS PARA EL SECADO AL NATURAL.....	28
FIGURA 3.1.8: IMAGEN DE UNA PROBETA PARA ENSAYO A COMPRESIÓN (IZQUIERDA) Y UNA VIGA PARA ENSAYO A FLEXIÓN (DERECHA).	28
FIGURA 3.1.9: ESQUEMA DE PROCESADO DE LAS DIFERENTES PIEZAS DURANTE EL PROCESO DE ELABORACIÓN. PIEZAS TIPO A.....	29
FIGURA 3.2.1: DER.: EXTRACCIÓN DE UNA MUESTRA EN ÁRBOL EN PIE MEDIANTE BARRENA PRESSLER.	28
FIGURA 3.2.2: MEDIDA DE VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE UNA ONDA ELÁSTICA MEDIANTE LA TÉCNICA TOF. DISTANCIAS EN MM.	31
FIGURA 3.2.3: PESADA DE TROZAS CON BÁSCULA INDUSTRIAL.....	32
FIGURA 3.2.4: MEDIDA DE LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ONDAS ELÁSTICAS EN TROZA MEDIANTE EL MÉTODO DE RESONANCIAS.....	32
FIGURA 3.2.5: ENSAYO DE RESONANCIAS PARA OBTENER LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN Y EL MOEDIN,F3 EN VIGAS.....	33
FIGURA 3.2.6: ENSAYO A COMPRESIÓN EN DIRECCIÓN DE LA FIBRA.	35
FIGURA 3.2.7: ENSAYO A COMPRESIÓN PERPENDICULAR DE LA FIBRA.	36
FIGURA 3.2.8: PROCESO DE SECADO, OBTENCIÓN DE MASAS Y PROBETAS DE DENSIDAD.	34
FIGURA 4.1: RESISTENCIA A COMPRESIÓN EN LA DIRECCIÓN DE LA FIBRA. LÍNEA ROJA: VALOR MEDIO. A) PLANTACIÓN MIXTA. B) PLANTACIÓN PURA.	37

FIGURA 4.2: CURVA TENSIÓN-TIEMPO ÁRBOL 19.	38
FIGURA 4.3: MÓDULO DE ELASTICIDAD A COMPRESIÓN EN LA DIRECCIÓN DE LA FIBRA. LÍNEA ROJA: VALOR MEDIO. A) PLANTACIÓN MIXTA. B) PLANTACIÓN PURA.	39
FIGURA 4.4: CURVA TENSIÓN-DEFORMACIÓN LONGITUDINAL	40
FIGURA 4.5: EJEMPLO DE UNA MEDIDA EN LA PROBETA 65-1-1. IZQ.: DEFORMACIÓN FRENTE AL TIEMPO. DER.: VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE POISSON FRENTE AL TIEMPO. LÍNEA ROJA DISCONTINUA: LÍMITES DE CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE POISSON.....	40
FIGURA 4.6: RESISTENCIA A COMPRESIÓN PERPENDICULAR A LA FIBRA. LÍNEA ROJA: VALOR MEDIO. A) PLANTACIÓN MIXTA. B) PLANTACIÓN PURA.	41
FIGURA 4.7: MÓDULO DE ELASTICIDAD A COMPRESIÓN EN DIRECCIÓN PERPENDICULAR A LA FIBRA. LÍNEA ROJA: VALOR MEDIO. A) PLANTACIÓN MIXTA. B) PLANTACIÓN PURA.....	42
FIGURA 4.8: VALOR MEDIO PARA EL MÓDULO DE ELASTICIDAD CALCULADO DE DIFERENTES FORMAS.	43

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 4.1: TABLA DE VALORES PARA LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN EN LA DIRECCIÓN DE LA FIBRA DE LA PLANTACIÓN MIXTA Y PURA.....	37
TABLA 4.2: TABLA DE VALORES PARA EL MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LA PLANTACIÓN MIXTA Y PURA.	40
TABLA 4.3: TABLA DE VALORES PARA LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN EN LA DIRECCIÓN PERPENDICULAR A LA FIBRA DE LA PLANTACIÓN MIXTA Y PURA.	42
TABLA 4.4: TABLA DE VALORES PARA EL MÓDULO DE ELASTICIDAD CALCULADO POR DIFERENTES MÉTODOS. ...	44

1 INTRODUCCIÓN

1.1 OBJETIVOS

Objetivos principales:

- i. Caracterización mecánica de la madera de chopo del clon I-214 proveniente de una chopera de la Vega de Granada.
- ii. Comparar el módulo de rigidez o MoE (*Modulus of Elasticity*) a compresión obtenido mediante los ensayos destructivos (compresión transversal y perpendicular a la fibra) y el módulo de rigidez medido en árbol ($MoE_{din,F1}$), en troza cortada ($MoE_{din,F2}$), y en viga aserrada ($MoE_{din,F3}$), mediante métodos vibroacústicos.

Objetivos específicos:

Estos se basan en la realización de diferentes ensayos siguiendo las normas sobre clasificación visual y asignación de clases resistentes. De los cuales se van a obtener los siguientes datos:

- Medidas acústicas en el árbol para la obtención del MoE_{dinF1} .
- Medidas acústicas en la troza para la obtención del MoE_{dinF2} .
- Medidas acústicas en viga para la obtención del MoE_{dinF3} .
- Medida de la densidad de la madera.
- Realización de ensayos a compresión para la obtención del MoE, (la resistencia a lo largo de la fibra y perpendicular)

1.2 MOTIVACIÓN Y CONTEXTO

¿Por qué usar madera?

La madera ha sido uno de los materiales más usados a nivel estructural desde la antigüedad, pero con la revolución industrial aparecieron nuevos materiales como el acero y el hormigón (hormigón armado) que han ido ocupando el lugar de esta, dejándola en un segundo plano.

En su día fueron un gran avance para el sector de la construcción, pero hoy en día este sector es uno de los que más contamina a nivel mundial. Por lo tanto, como seres vivos del planeta en el que vivimos, estamos en la obligación de hacer todo lo posible para minimizar estos daños. La vuelta de la madera al escenario de la construcción puede contribuir muy positivamente a ello, y al cumplimiento de muchos de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU.

¿Qué ocurre con el chopo?

Actualmente existe un cierto auge del uso de la madera en construcción, por ser uno de los materiales que más aportan a la sostenibilidad y la economía circular. Es bien conocido que sus propiedades físico-mecánicas son altamente dependientes de la especie arbórea y del lugar de extracción. En particular, la madera de chopo proveniente de árboles plantados es una madera ligera, con una gran estabilidad dimensional y un rápido crecimiento. Sin embargo, hace años la madera de chopo cayó en desuso como material estructural debido a que en España no está contemplada en la norma de clasificación visual UNE-EN 56544, aunque lo estuvo hasta el año 1997. Sin embargo, países como Francia y Alemania si lo incluyen en sus respectivas normas de clasificación visual y por ende en la norma UNE-EN 1912. Ante esta situación se plantea la necesidad de disponer de datos sobre su caracterización mecánica con objeto de construir una base de datos en España suficientemente amplia, según localizaciones, clones, tratamientos silvícolas de la plantación, tipos de suelo, etc.

¿Por qué comparar el módulo MoE o $E_{,0}$ con el módulo MoE_{din} en fases 1 (árbol), 2 (troza) y 3 (viga o tablón)?

En el contexto de la silvicultura moderna resulta cada vez más importante desarrollar procedimientos no destructivos para obtener la rigidez de la madera lo antes que sea posible, es decir, en árbol, en troza y finalmente en viga o tablón, sin necesidad de realizar ensayos destructivos. De esa forma, se podrá valorar mejor la plantación (económicamente) y las trozas obtenidas, haciendo por tanto una valoración económica más acertada de la plantación y perfeccionar el uso de la madera según cada aplicación y producto derivado. Además, valorar la calidad de la madera en viga o tablón mediante

el MoE_{dinF3} permite clasificar la madera adecuadamente en clases resistentes sin necesidad de laboriosos procesos subjetivos de observación visual, y por tanto usarla de forma optimizada en la elaboración de productos industriales tecnológicos como contrachapado, vigas laminadas, vigas LVL, etc.

1.3 METODOLOGÍA

A continuación se describe la estructura de este Proyecto Fin de Grado:

En primer lugar, se obvia el Capítulo de la introducción que es el que contiene la metodología.

El siguiente es el Capítulo 2, es en el que se recoge la importancia de la madera, en concreto de la madera de chopo en el contexto actual y la situación en la normativa española y europea de clasificación de madera para uso estructural.

La caracterización mecánica de la madera de chopo del clon I-214, proveniente de una chopera de la Vega de Granada, realización de ensayos destructivos y no destructivos se recogen en el Capítulo 3.

En cuanto al análisis de los resultados obtenidos y la comparación del MoE con MoE_{din} 1, 2 y 3 se recoge en el Capítulo 4.

Finalmente, el Capítulo 5 recoge las conclusiones del trabajo.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 LA MADERA DE CHOPO EN EL CONTEXTO DE LA BIOMECAÁNICA

La biomecánica es un área de conocimiento interdisciplinar que estudia los fenómenos naturales que ocurren, en este caso en la madera de chopo, por lo que es necesario conocer todos los detalles posibles a cerca de él para desarrollar un estudio lo más exhaustivo posible.

El clon I-214 (Figura 2.1.1) es el más utilizado en la populicultura italiana y española, debido a su adaptabilidad y crecimiento en la zona del mediterráneo. Su madera es ligera, blanda, de fibra uniforme y apta para el desenrollo, aserrío y fabricación de pasta.

Este es un clon que proviene de *Populus x Euramericana*, un híbrido de *Populus Nigra* y *Populus deltoides*. Las principales características de este árbol son: I) Posee un tronco levemente flexuoso; II) Rectitud variable; III) Corteza de color gris marrón lisa y fina; IV) Copa bastante grande. Para la poda del fuste se debe prestar especial atención y será de forma prolongada hasta el final, ya que se ramifica rápidamente en ramas gruesas, y para la poda de guía es indispensable para evitar bifurcaciones del tronco.



Figura 2.1.1: Chopera del clon I-214 de la Vega de Granada.

Para conocer a fondo el comportamiento de la madera es necesario realizar un estudio desde que se planta la semilla o esqueje, hasta que se procede a la corta del árbol. Factores como el viento, la luz solar, el agua, el tipo de substrato, el clima y la zona geográfica son determinantes en las características físico-mecánicas de los árboles. Todos estos factores se reflejan en su estructura molecular, por lo tanto, han de ser estudiados y optimizados para lograr una plantación lo más eficiente posible.

En las Figuras 2.1.2 y 2.1.3 se representan las diferentes capas que componen un árbol. Dependiendo de las circunstancias que haya atravesado a lo largo de su vida, estas quedarán reflejadas en su estructura pudiendo ser analizadas a posteriori, con el fin de comprender mejor el comportamiento de la madera ante los diferentes esfuerzos.

Para estudiar la madera se debe analizar su estructura microscópica y macroscópica, debido a su heterogeneidad. Macroscópicamente, se establecen tres planos según, la Figura 2.1.2:

- Transversal: perpendicular al eje del tronco.
- Tangencial: paralela a un plano tangente al tronco.
- Radial: pasa por el eje y un radio del tronco.

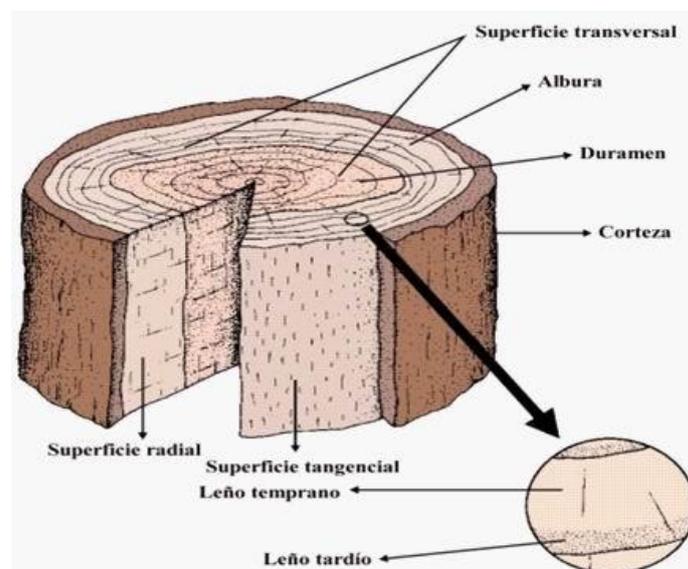


Figura 2.1.2: Esquema según la orientación de las superficies o cortes transversal, tangencial y radial. [1]

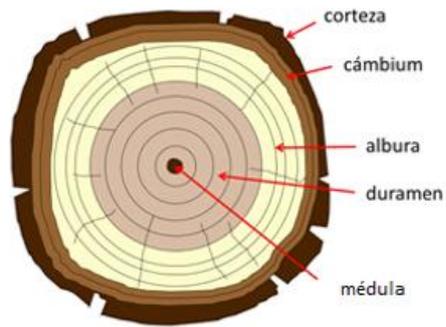


Figura 2.1.3: Partes del tronco de un árbol (Estructura macroscópica) [1]

ESTRUCTURA MACROSCÓPICA:

- Corteza externa: está formada por células muertas del árbol y además sirve de barrera contra los agentes atmosféricos.
- Cambium o capa delgada de células vivas: es la generadora del crecimiento en espesor del árbol (xilema y floema).
- Albura: es la parte exterior de xilema, tiene como función principal conducir el agua y las sales minerales de las raíces a las hojas.
- Duramen: es la parte inactiva de xilema y tiene como función proporcionar resistencia para el soporte del árbol.
- Leño o tejido leñoso: forma la mayor parte del tronco y presenta diferencias fácilmente apreciables en las coníferas y en algunas frondosas.
- Médula: es la zona más céntrica de las capas del tronco y la más vieja del árbol. Está formada por células tubulares sin prácticamente agua, que ha sido sustituida por resinas.

ESTRUCTURA MICROSCÓPICA:

La madera es un material heterogéneo, ya que, está formado por diversos tipos de células especializadas que forman tejidos. Estos tejidos se encargan de realizar las principales funciones del árbol: transportar la savia, almacenar y transformar el alimento y crear la estructura resistente o portante del árbol. La heterogeneidad de la madera será, en parte, la causa de sus propiedades.

Se puede considerar la madera como un conjunto de células alargadas en forma de tubos, paralelos al eje del árbol, muy variables, tanto en longitud y forma, como en el espesor de sus paredes y en las dimensiones interiores.

Estas células están unidas entre sí por una sustancia llamada materia intercelular o laminilla media, y a su vez trabadas por otro tipo de células, colocadas perpendicularmente a las anteriores y en el sentido radial del tronco, formando los llamados radios leñosos. La variedad de tipos de células y la forma de unirse, definen la infinidad de especies diferentes de madera que existen.

Todo ello hace de la madera un material ligero y resistente, que puede competir favorablemente con otros materiales utilizados en la construcción, en cuanto a la relación resistencia-peso específico.

En las Figuras 2.1.4 y 2.1.5 está representada la estructura microscópica de un árbol de especie conífera y frondosa [2]. Sus principales diferencias son:

- Las especies frondosas tienen una composición y estructura de tejidos más compleja que las coníferas ya que poseen muchos más tipos de células. Además, las frondosas tienen más parénquima (tejido poco especializado) en sentido transversal y en el longitudinal.
- Las frondosas tienen poros, por eso se les llama maderas porosas. Las coníferas pueden tener canales resiníferos, que son diferentes que los poros en su anatomía y aparecen en menor cantidad que los poros.
- Los radios leñosos son diferentes en frondosas y coníferas. Las coníferas suelen tenerlos uniseriados (formados por una sola hilera de células) y las frondosas tienen los radios leñosos más variables uniseriados o multiseriados.

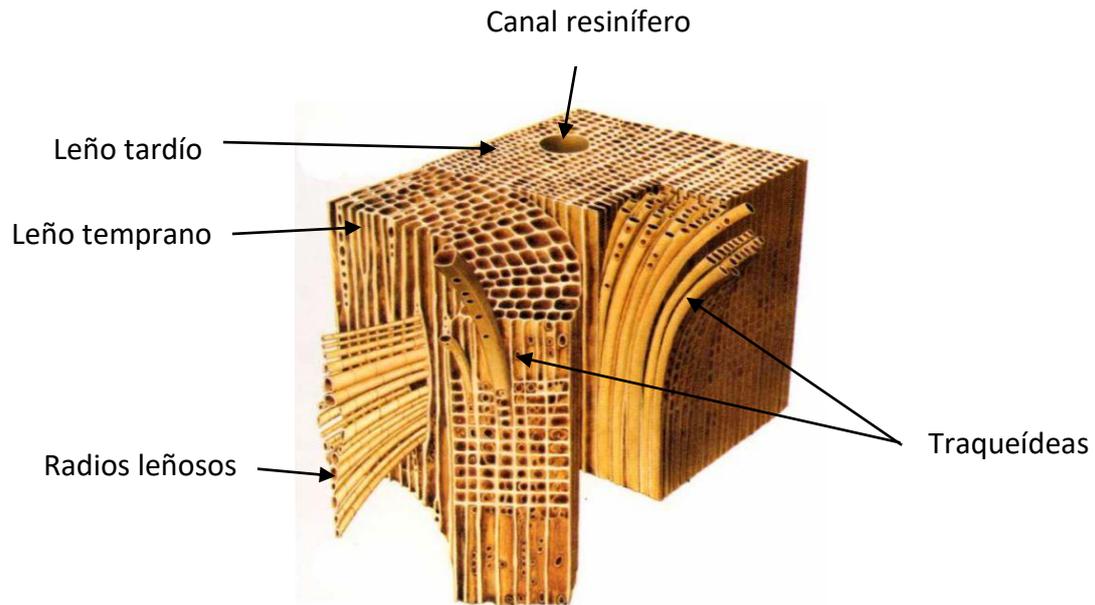


Figura 2.1.4: Estructura microscópica de un árbol. Especie conífera [2].

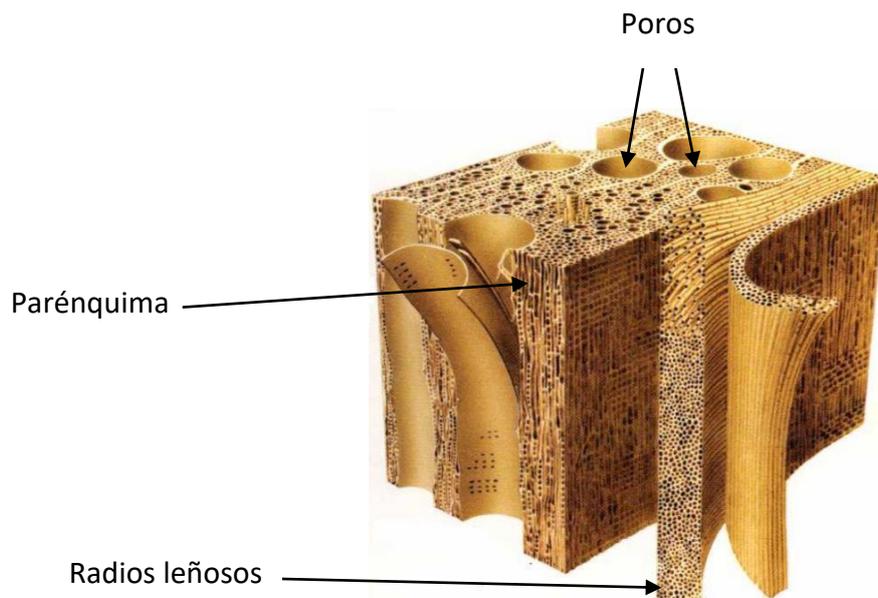


Figura 2.1.5: Estructura microscópica de un árbol. Especie frondosa [2].

Definida la estructura de la madera se puede comprender mejor porqué es un material:

- Heterogéneo: está formada por diversos tipos de células especializadas que forman tejidos y cada uno de ellos crece en una dirección, además las circunstancias ambientales influirán su desarrollo.

- Anisótropo: sus propiedades físicas y mecánicas dependen de la dirección del trabajo o esfuerzo en relación con sus fibras.
- Ortótropo: sus propiedades en tres direcciones perpendiculares (transversal, radial y tangencial) son diferentes.
- Higroscópico: tiene la capacidad de liberar y captar agua. Esta propiedad es la responsable de los cambios dimensionales en la madera.

2.2 LA MADERA DE CHOPO EN LA NORMATIVA ESPAÑOLA Y EUROPEA

Actualmente el mayor porcentaje de la madera de chopo producida en España, (prácticamente el 70%) está destinada a su manipulación y transformación para contrachapados. Esto conduce a España a ser el país líder europeo en este sector y ello conlleva a numerosos estudios en las características del chopo para el desarrollo de nuevos productos industriales tales como LVL (vigas de madera microlaminada), LSL (vigas de virutas de madera), OSB (tableros de fibras orientada), vigas laminadas o glulam (*glued laminated timber beams*), etc.

Se ha comprobado en estudios recientes (Casado y colaboradores (2002) hicieron una caracterización mecánica y clasificación de madera estructural del clon I-214 de una plantación en Palencia) que la correcta gestión de una plantación es primordial para la obtención de una madera de calidad y uno de los factores más importantes es la poda, ya que, tiene un alto impacto en la calidad de la madera por la existencia de nudos. Es decir, con una correcta poda se evitarán muchos nudos por lo tanto la madera será de mejor calidad estructural y visual.

En la actualidad se pretende poner en valor todos estos factores que antes se desconocían y otorgarle el lugar que se merece la madera de chopo en el sector de la construcción. La última norma de clasificación visual que incluyó al chopo fue la UNE-EN 56.544:1997 [3]. En las siguientes versiones quedó excluido por falta de datos. Sin embargo, Francia lo incluye en la norma NF-B52-001:2011 [4] y Alemania en la norma DIN 4074 Parte 1 [5].

Por ello, varios autores [6] tienen como objetivo volver a incluir el chopo en las normas de asignación de clase resistentes (Figura 2.2.1) y así fomentar y promover su uso estructural.

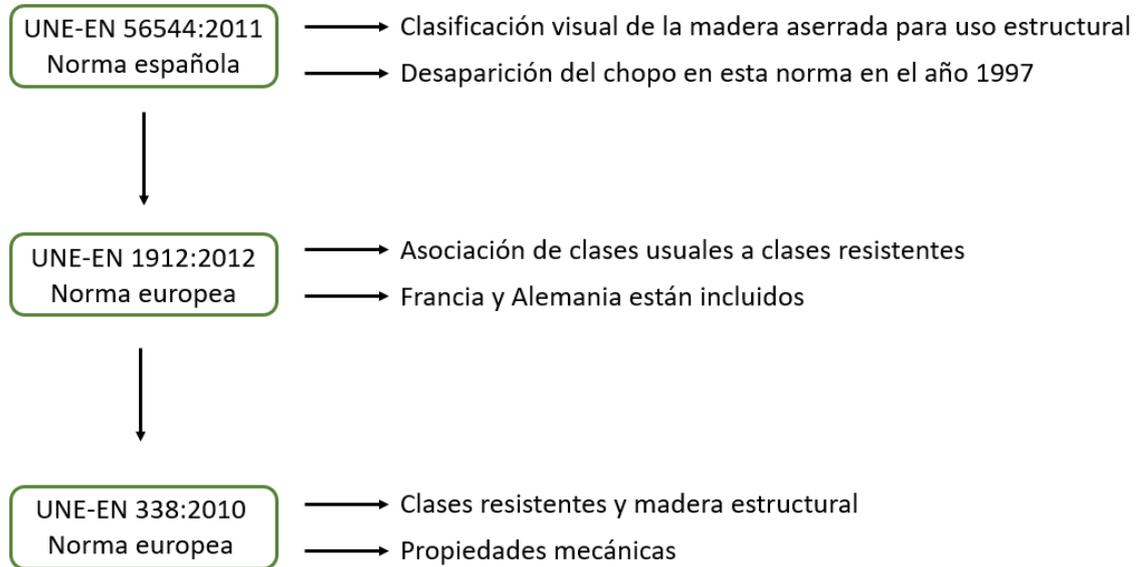


Figura 2.2.1: Esquema de las normativas europeas y españolas de clasificación de la madera.

3 CARACTERIZACIÓN DE LA MADERA: MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 MATERIALES: PLANTACIÓN Y MADERA EXTRAÍDA

Para la realización de este Proyecto se ha utilizado madera de chopo del clon I-214 extraída de una chopera de la Vega de Granada (Figura 3.1.1) con una edad de crecimiento de 9 años. Cabe distinguir dos tipos de plantaciones (Figura 3.1.2): la primera es una chopera pura compuesta por 36 árboles, con un marco de plantación de 5 x 5 m² y la segunda es una chopera mixta compuesta por 18 árboles plantados entre nogales, con un marco de plantación de 5 x 8 m², en total sumando 54 árboles. La chopera estuvo sometida a podas adecuadas durante el crecimiento para asegurar una madera con pocos nudos en los primeros 6 m de árbol.



	Plantación Granada (P1)
Localización (DMS)	37°10'01.9"N 3°36'56.5"W
Altitud (m)	651
Clima	Mediterráneo y semi-árido
Clon de chopo	I-214
Edad (Años)	9
Densidad de la plantación (m²)	5 x 5 y 5 x 8

Figura 3.1.1: Ubicación de la plantación.

En la Figura 3.1.2 los chopos están representados por elipses y los nogales por rectángulos, con sus respectivas numeraciones. Los chopos objeto de estudio son los que se encuentran dentro del cuadro con línea discontinua (véase parcela mixta chopo nogal ampliada a derecha).

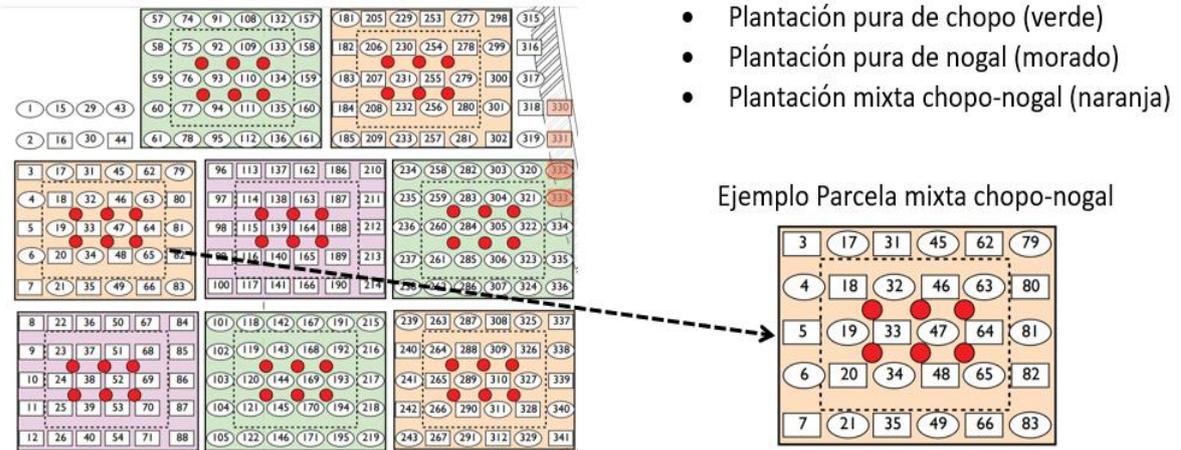


Figura 3.1.2: Representación gráfica de las parcelas de la plantación.

En primer lugar, se tomaron las medidas en árbol (Fase 1) que constan de: I) Medidas mediante forcípula en dos direcciones: dirección N-S (DBH1) y dirección E-O (DBH2); II) Medidas de propagación de la onda elástica; III) Medida de la densidad en verde. Todas estas medidas se realizaron dos veces, en octubre de 2018 y en febrero de 2019 el mismo día de la corta (Figura 3.1.3).

En segundo lugar, se apearon los árboles en febrero de 2019 y todavía en la chopera, se extrajeron dos trozas de igual dimensión desde el arranque el árbol (Figura 3.1.3). Se procede entonces a la realización de las medidas en troza (Fase 2) que constan de: I) Medida de la masa; II) Medida del volumen; III) Medidas acústicas mediante el método de resonancias.

En tercer lugar, se procedió al aserrado de las trozas para transformarlas en piezas, seguidamente se almacenaron y secaron de forma natural durante más de 6 meses. Una vez secas se transportaron al Taller de Maderas de la ETSIE (Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación) donde se procedió a su aserrado para convertirlas en probetas. Posteriormente se llevó a cabo la realización de las medidas en viga (Fase 3) donde se

midió la velocidad de propagación longitudinal paralela a la fibra mediante el método de resonancias.

En cuarto lugar, se procedió con los ensayos destructivos a compresión de las probetas en dirección longitudinal y transversal a la fibra. Por último, se midió la densidad básica y el contenido de humedad usando un extremo de las vigas ensayadas.

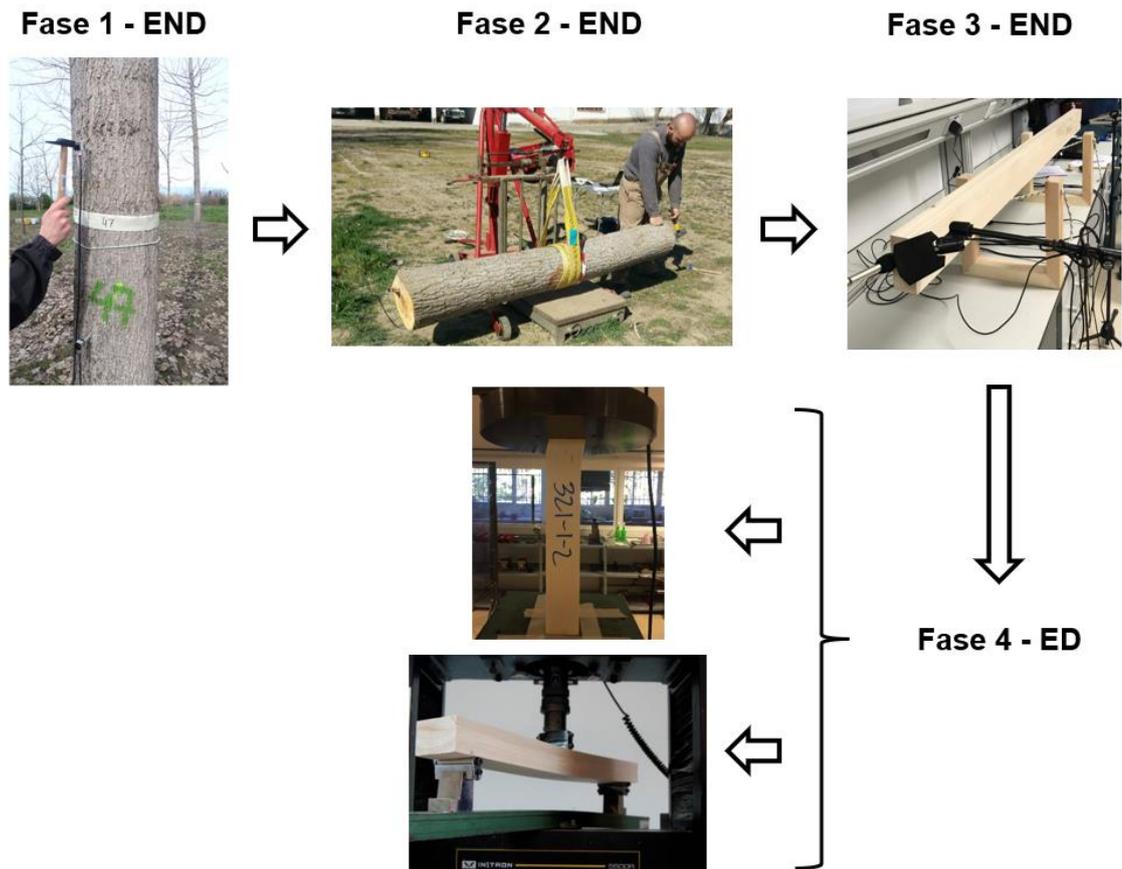


Figura 3.1.3: Esquema de las diferentes fases a las que se ha sometido a la madera. (END: ensayo no destructivo; ED: ensayo destructivo).

PROCESO DE EXTRACCIÓN DE LA MADERA

En febrero de 2019 se apearon todos los chopos de la plantación (Figura 3.1.5). De cada árbol se extrajo una troza de 2 m de largo de la parte inferior (troza A) y de algunos árboles seleccionados una troza de 2 m de la parte superior (troza B). Las trozas A se usaron para caracterización de la madera y de ellas, los sobrantes se usaron para tablonés para elaboración de vigas laminadas (Figura 3.1.4). Las trozas B se usaron exclusivamente para tablonés para vigas laminadas.

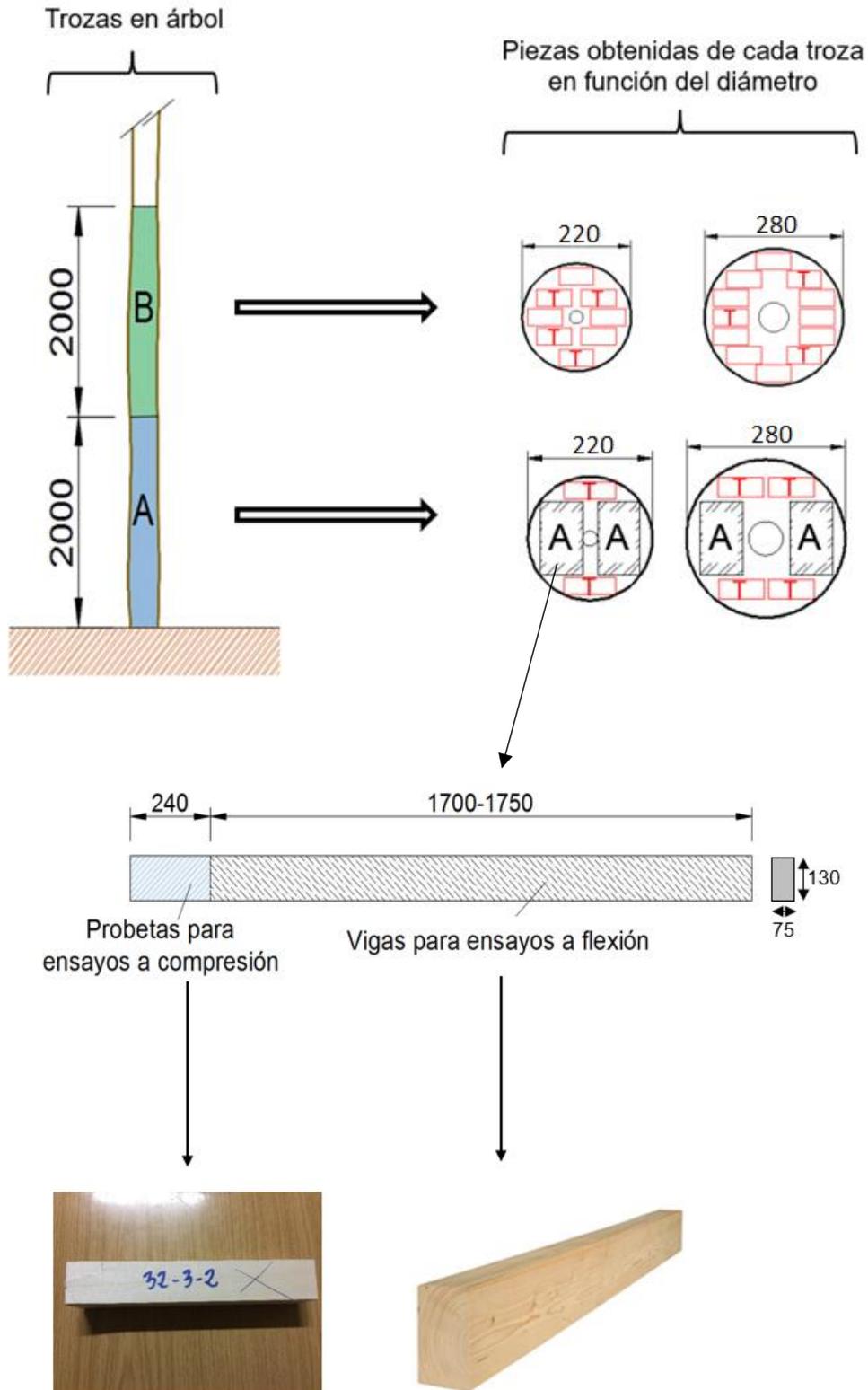


Figura 3.1.4: Esquema del proceso de extracción de las probetas. Distancias en mm.



Figura 3.1.5: Apeo de los árboles.

El aserrado se realizó en una sierra de cinta vertical con control digital de la posición de la cinta (Figura 3.1.6-izq.). De cada troza se extrajeron en primer lugar las piezas tipo A y listones para las piezas tipo T (Figura 3.1.6-der.). Tras cada corte, las piezas resultantes se nombraron según la troza de procedencia, agrupando los dos tipos de piezas en diferentes lotes. En la Figura 3.1.6-der se observan los listones para el posterior aserrado en piezas tipo T, apreciándose la importancia de la linealidad del tronco para la obtención de los diferentes tipos de piezas.



Figura 3.1.6: Aserrado de trozas. Izq.: Corte de las trozas en la sierra de cinta. Der.: Agrupación por lotes y numeración de cada pieza aserrada.

Tras el aserrado de las trozas, las piezas se transportaron a las instalaciones del IFAPA (Instituto Andaluz de Investigación y Formación Agraria, Pesquera, Alimentaria y de la Producción Ecológica) para su secado al natural. La madera se colocó en una zona cubierta pero con una gran ventilación para favorecer el secado. Las piezas se agruparon por tipo y tamaño y se dispusieron sobre pallets para evitar el contacto directo con el suelo. Además, se dejó una separación entre piezas al mismo nivel de 2-3 cm y se

colocaron rastreles de 3 cm para la separación vertical de piezas (Figura 3.1.7). Por último, se colocaron sacos en la parte superior de cada lote con el fin de ejercer peso y evitar en la medida de lo posible el alabeo de las piezas provocado por la pérdida de humedad diferencial durante el secado. Una vez secas las piezas, se transportaron al Taller de Maderas de la ETSIE y se procedió a su aserrado en probetas. De cada pieza A se extrajeron probetas para flexión y compresión, según las Figuras 3.1.9 y 3.1.4.



Figura 3.1.7: Colocación y enrastrelado de las diferentes piezas para el secado al natural.



Figura 3.1.8: Imagen de una probeta para ensayo a compresión (izquierda) y una viga para ensayo a flexión (derecha).

Las piezas se nombraron en todo el proceso, en el caso de los ensayos a compresión con un formato de nomenclatura X-Y-Z, siendo X el número de árbol; Y el número de pieza y Z el número de probeta. En el caso de los ensayos a flexión se nombraron X-Y, siendo X el número de árbol e Y el número de pieza.

La Figura 3.1.8 muestra una imagen de una probeta para ensayo a compresión y una viga para ensayo a flexión con sus respectivas nomenclaturas y tamaño final. La Figura 3.1.9 recoge esquemáticamente el procedimiento de elaboración y dimensiones.

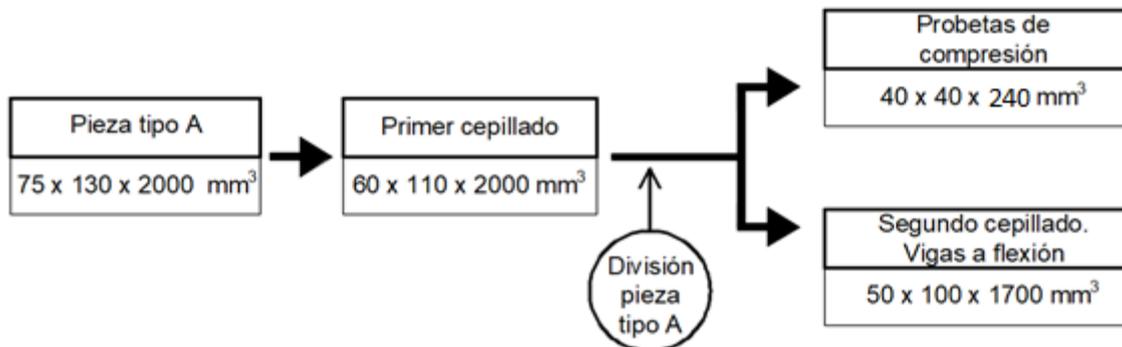


Figura 3.1.9: Esquema de procesado de las diferentes piezas durante el proceso de elaboración. Piezas tipo A.

3.2 ENSAYOS REALIZADOS

Las medidas acústicas fueron llevadas a cabo en trabajos anteriores que se engloban dentro del proyecto COMPOP y han servido como comparativa con los ensayos destructivos.

3.2.1 MEDIDAS ACÚSTICAS EN ÁRBOL ($MoE_{din,F1}$)

MEDIDAS DE DENSIDAD EN VERDE

Mediante el uso de barrena de Pressler se extrajo una muestra cilíndrica de 5 mm de diámetro por árbol (Figura 3.2.1-der). Justo después de la extracción, se pesó en una báscula de precisión de 0.001 g (Figura 3.2.1-izq) y se midió el volumen de la muestra para sacar la densidad del árbol en verde.



Figura 3.2.1: Extracción de una muestra en árbol en pie mediante barrena Pressler.

MEDIDAS ACÚSTICAS MEDIANTE LA TÉCNICA TOF

Se realizaron medidas de la velocidad de propagación de una onda elástica a lo largo de una distancia de 60 cm, centrada en la altura del DBH (*Diameter at Breast Height*) y en dirección paralela al eje del árbol (Figura 3.2.2). Con las velocidades obtenidas y la densidad en verde medida en árbol, se obtuvo el módulo dinámico $MoE_{din,F1}$ (Ecs. 1 y 2). Para el cálculo del módulo elástico de cada árbol se usó el valor medio de la densidad en verde para parcelas pura y mixta, ya que la densidad no se midió en todos los árboles.

$$MoE_{din,F1} = \rho_a \cdot v^2, \quad (1)$$

$$v = \frac{d}{t}, \quad (2)$$

dónde ρ_a es la densidad en verde, v es la velocidad de propagación de la onda, d es la distancia entre sensores y t es el tiempo.

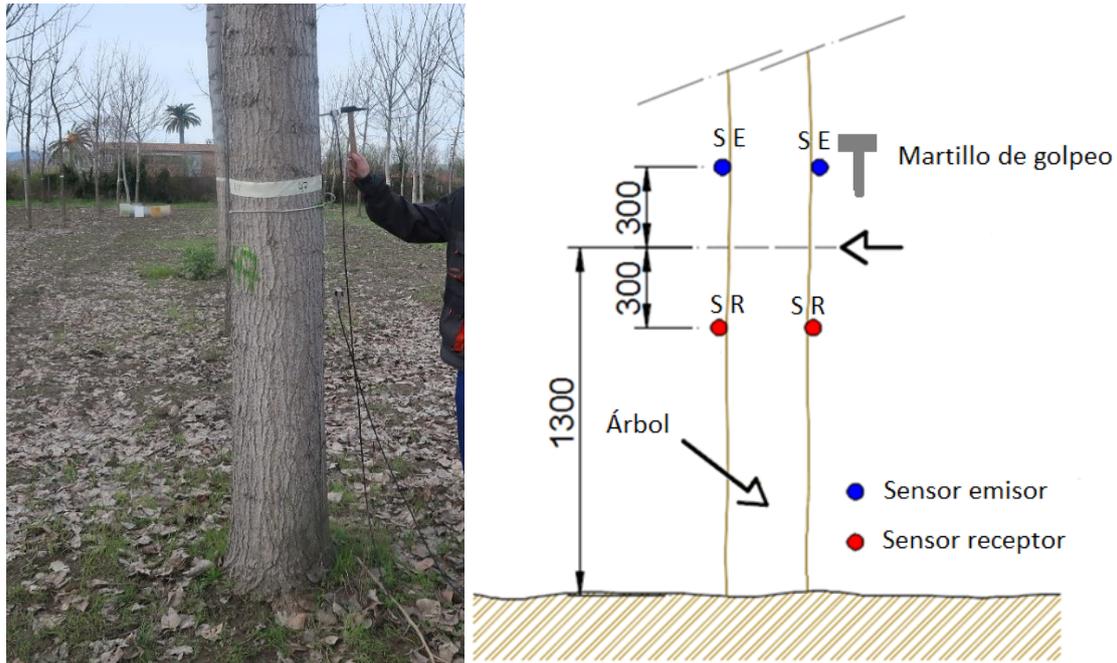


Figura 3.2.2: Medida de velocidad de propagación de una onda elástica mediante la técnica ToF. Distancias en mm.

3.2.2 MEDIDAS ACÚSTICAS EN TROZA (MoE_{din,F2})

MEDIDAS DE DENSIDAD EN TROZAS

Todas las trozas A, cuyo uso fue el de caracterización de la madera, se pesaron mediante báscula industrial sobre el terreno después de la corta, como se ve en la Figura 3.2.3. Asimismo, se midió el diámetro en las dos testas de la troza, de forma que el volumen de cada troza se calculó mediante la fórmula de cono truncado (Ec. 3):

$$V = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot l \cdot (r_1^2 + r_2^2 + r_1 \cdot r_2), \quad (3)$$

dónde r_1 y r_2 son los radios de las dos testas de la troza y l la longitud de la troza. La densidad de la troza se obtuvo a partir del peso y del volumen medido.



Figura 3.2.3: Pesada de trozas con báscula industrial.

MEDIDAS ACÚSTICAS MEDIANTE EL MÉTODO DE RESONANCIAS

En cada troza A se midió la velocidad de propagación de la onda acústica longitudinal mediante el método de resonancias (Ecs. 4 y 5), usando la frecuencia fundamental, tal y como se muestra en la Figura 3.2.4.

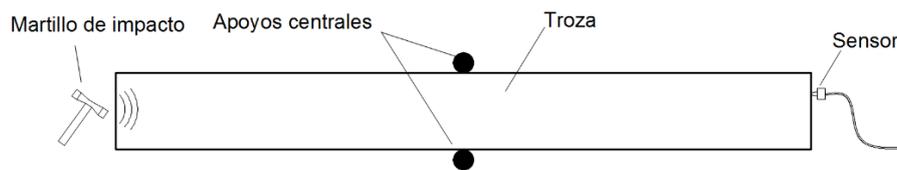


Figura 3.2.4: Medida de la velocidad de propagación de ondas elásticas en troza mediante el método de resonancias.

$$MoE_{din,F2} = \rho_t \cdot v^2, \quad (4)$$

$$v = 2\pi \cdot f_1, \quad (5)$$

dónde ρ_t es la densidad en troza, v es la velocidad de propagación de la onda y f_1 es la primera frecuencia de resonancia.

3.2.3 MEDIDAS ACÚSTICAS EN VIGA ($MoE_{din,F3}$)

MEDIDAS ACÚSTICAS MEDIANTE EL MÉTODO DE RESONANCIAS

Tras la clasificación visual, se midió la velocidad de propagación longitudinal paralela a la fibra mediante el método de resonancias (Ecs. 6 y 7) en las 124 vigas (Figura 3.2.5) y se obtuvo el módulo de elasticidad dinámico ($MoE_{din,F3}$). La densidad se obtuvo a partir del peso y el volumen de cada viga.

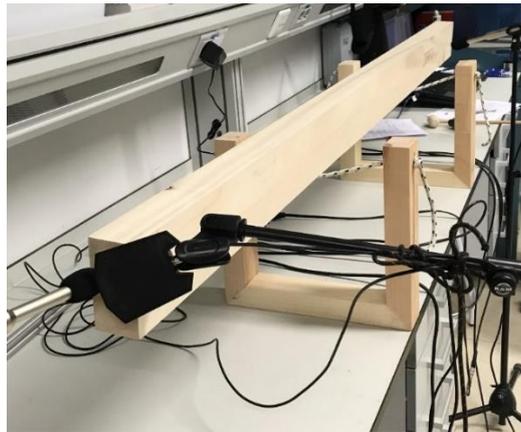


Figura 3.2.5: Ensayo de resonancias para obtener la velocidad de propagación y el $MoE_{din,F3}$ en vigas.

$$MoE_{din,F3} = \rho_t \cdot v^2, \quad (6)$$

$$v = 2\pi \cdot f_1, \quad (7)$$

dónde ρ_v es la densidad en viga, v es la velocidad de propagación de la onda y f_1 es la primera frecuencia de resonancia.

3.2.4 ENSAYOS A COMPRESIÓN. DIRECCIÓN DE LA FIBRA: $fc,0$ y $E,0$

Tras el mecanizado de piezas, se llevaron a cabo los ensayos a compresión de los 54 árboles, en función del diámetro de cada troza se obtuvieron un número de probetas determinado. En el caso de la plantación pura se obtuvieron 4 probetas de cada troza, sumando un total de 144 y en el caso de la plantación mixta se mecanizaron 4 - 8 probetas por troza, sumando un total de 108. Por tanto, para el total de toda la plantación se obtuvieron 252 probetas.

El fin de este ensayo es obtener la resistencia máxima a compresión en sentido longitudinal de la fibra, $f_{c,0}$ (Ec. 8). El ensayo se llevó a cabo en el laboratorio del departamento de materiales y construcción de la ETSIE, para ello se utilizó una prensa multiensayo de 100 kN usando el modo ensayo a compresión por posición. Se aplicó un incremento monótono del desplazamiento a una velocidad de 0,6 mm/min, siguiendo las indicaciones de la norma UNE-EN 408:2011 [7] (Figura 3.2.6). Dentro de estos ensayos, se monitorizaron con galgas extensométricas 4 árboles de la parcela mixta y 8 de la parcela pura, con 2 probetas por árbol escogidas aleatoriamente. Se colocaron dos galgas extensiométricas en el centro geométrico de la probeta. Una de las galgas se dispuso en sentido longitudinal a las fibras para obtener el módulo de elasticidad o rigidez ($E_{,0}$) (Ec. 9). A través de la relación tensión/deformación se obtuvo el módulo de rigidez en un intervalo entre el 20% y el 50% de la tensión máxima de rotura. La segunda galga en la cara opuesta, en sentido transversal, se dispuso con el fin de obtener el coeficiente de Poisson, ν (Ec. 10). Por último, se obtuvo el valor medio por árbol de resistencia a compresión, $f_{c,0}$, módulo elástico o módulo de Young ($E_{,0}$) y el coeficiente de Poisson (ν) de los árboles medidos.

$$f_{c,0} = \frac{Q}{A} , \quad (8)$$

$$E_{,0} = \frac{f_{c,0 \ 50\%} - f_{c,0 \ 20\%}}{\varepsilon_{L50\%} - \varepsilon_{L20\%}} , \quad (9)$$

$$\nu = \frac{\varepsilon_{T50\%} - \varepsilon_{T20\%}}{-\varepsilon_{L50\%} - \varepsilon_{L20\%}} , \quad (10)$$

dónde Q es la carga, A es la sección perpendicular a la dirección de carga, $f_{c,0 \ 50\%}$ y $f_{c,0 \ 20\%}$ son la tensión, $\varepsilon_{L50\%}$ y $\varepsilon_{L20\%}$ son la deformación longitudinal y $\varepsilon_{T50\%}$ y $\varepsilon_{T20\%}$ son la deformación transversal al 50% y al 20% de tensión máxima de rotura, respectivamente.

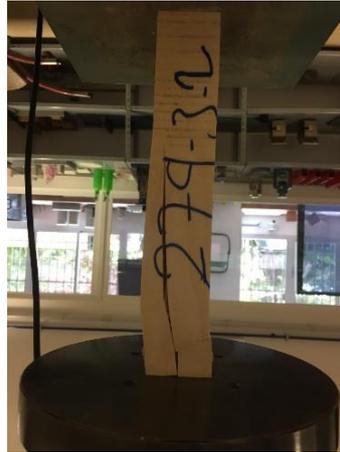


Figura 3.2.6: Ensayo a compresión en dirección de la fibra.

3.2.5 ENSAYOS A COMPRESIÓN PERPENDICULAR A LA FIBRA: $f_{c,90}$ y $E_{,90}$

Tras los ensayos a flexión, se extrajeron de las partes sin daño probetas para su ensayo a compresión transversal a la fibra de dimensiones $100 \times 100 \times 50 \text{ mm}^3$. Se extrajeron 2 probetas por árbol, coincidiendo con los árboles en los que se midió el módulo de elasticidad en dirección longitudinal a la fibra ($E_{,0}$). El ensayo se llevó a cabo en la misma prensa que los ensayos a compresión paralela a la fibra, usando el modo ensayo a compresión por posición. En este caso se aplicó con un incremento monótono del desplazamiento a una velocidad de $2,35 \text{ mm/min}$, siguiendo las indicaciones de la norma UNE-EN 408:2011 [7]. Se dispusieron dos galgas extensiométricas (Figura 3.2.7), pero debido al tipo de ensayo y deformaciones de la probeta, únicamente se pudo obtener el módulo elástico en la dirección transversal a la fibra ($E_{,90}$) mediante la galga situada en dicha dirección. Finalmente se obtuvo la resistencia máxima a compresión perpendicular a la fibra $f_{c,90}$ y $E_{,90}$ (Ecs. 11 y 12), respectivamente.

$$f_{c,90} = \frac{Q}{A}, \quad (11)$$

$$E_{,90} = \frac{f_{c,0\ 50\%} - f_{c,0\ 20\%}}{\varepsilon_{L50\%} - \varepsilon_{L20\%}}, \quad (12)$$

dónde Q es la carga, A es la sección perpendicular a la dirección de carga, $f_{c,0\ 50\%}$ y $f_{c,0\ 20\%}$ son la tensión y $\varepsilon_{L50\%}$ y $\varepsilon_{L20\%}$ son la deformación longitudinal al 50% y al 20% de tensión máxima de rotura, respectivamente.



Figura 3.2.7: Ensayo a compresión perpendicular de la fibra.

MEDIDA DE LA DENSIDAD BÁSICA Y EL CONTENIDO DE HUMEDAD

Por último, de un extremo de las vigas ensayadas a flexión se extrajeron probetas de 100x100x50 mm³ para la medida de la densidad básica (humedad al 0%) y contenido de humedad (%) de las vigas durante los ensayos a flexión. El contenido de humedad se obtuvo por desecación en estufa a 102 ± 2°C según la norma UNE-EN 13183-1:2002 [8] durante 24 h, comprobándose cada dos horas, que este tiempo es suficiente para conseguir la estabilización en el caso de la madera de chopo (Figura 3.2.8). Este valor se obtiene por la diferencia de masa en estado inicial y en estado anhidro (Ec. 13). La masa en estado anhidro es la empleada para obtener la densidad básica (ρ_b) (Ec. 14).

$$H (\%) = \frac{P_H - P_{H0}}{P_{H0}} \cdot 100 , \quad (13)$$

$$\rho_b = \frac{P_{H0}}{V_{H0}} , \quad (14)$$

dónde P_{H0} es el peso en estado anhidro, P_H es el peso a temperatura ambiente y V_{H0} es volumen en estado anhidro.



Figura 3.2.8: Proceso de secado, obtención de masas y probetas de densidad.

4 CARACTERIZACIÓN DE LA MADERA: RESULTADOS

4.1 RESULTADOS A COMPRESIÓN EN LA DIRECCIÓN DE LA FIBRA

A continuación, se muestran los resultados del módulo de resistencia ($f_{c,0}$) (valor medio de la plantación y valores máximos por árbol) en los ensayos a compresión en la dirección de la fibra para el conjunto total de las probetas separadas en plantación mixta y plantación pura.

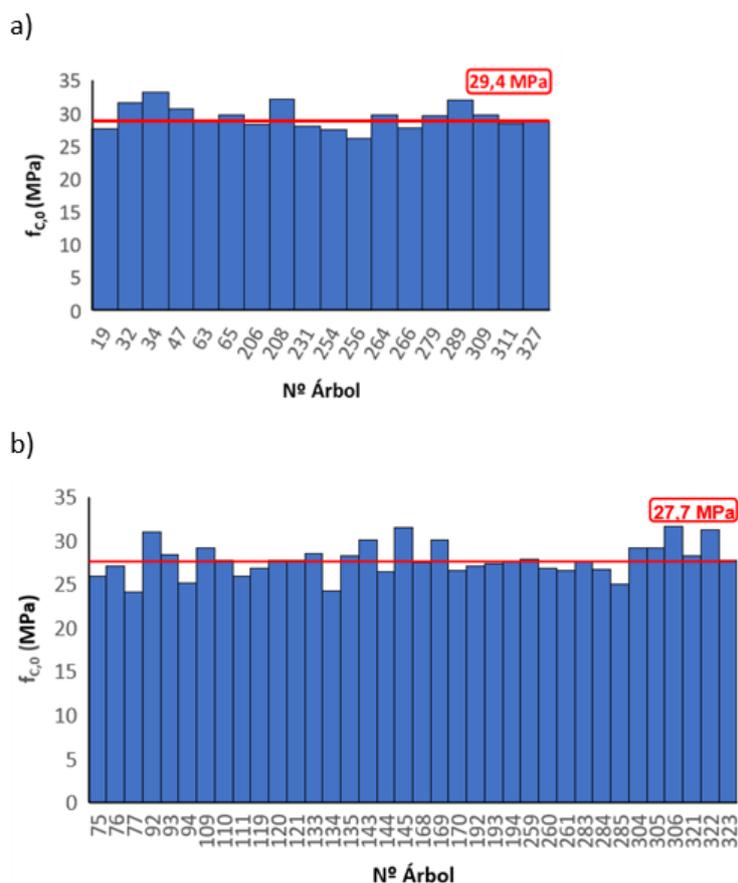


Figura 4.1: Resistencia a compresión en la dirección de la fibra. Línea roja: valor medio. a) Plantación mixta. b) Plantación pura.

Plantación	$f_{c,0}$ (MPa)	$f_{c,0}$ (MPa)	$f_{c,0}$ (MPa)
	Valor medio	Percentil 5%	Percentil 95%
Mixta	29,4 ± 6,4	27,2	32,2
Pura	27,7 ± 6,8	24,8	31,3
Total	28,7 ± 7,2	25,4	32,0

Tabla 4.1: Tabla de valores para la resistencia a compresión en la dirección de la fibra de la plantación mixta y pura.

Como se observa en la Figura 4.1-a no existe una gran dispersión entre los resultados arrojando un valor promedio de 29,4 MPa, mientras que en el caso de la plantación pura (Figura 4.1-b) fue de 27,7 MPa, siendo un 6% menor, entrando dentro de la desviación estándar por lo que se estiman iguales ambas plantaciones. En referencia al percentil 5% se observa que la plantación mixta arroja un 4,6% más que la plantación pura y respecto al percentil 95% la plantación mixta presenta un 1,4% más que la plantación pura, considerándose estas diferencias despreciables (Tabla 4.1).

En la Figura 4.2 se representa a modo de ejemplo la resistencia a compresión frente al tiempo de las 6 probetas correspondientes al árbol 19 de la plantación mixta. Se observa un comportamiento lineal hasta los 25 MPa aproximadamente, a partir de los cuales la madera empieza a plastificar observándose un comportamiento en el cual algunas probetas comienzan un ligero descenso, mientras que otras probetas llegan al colapso.

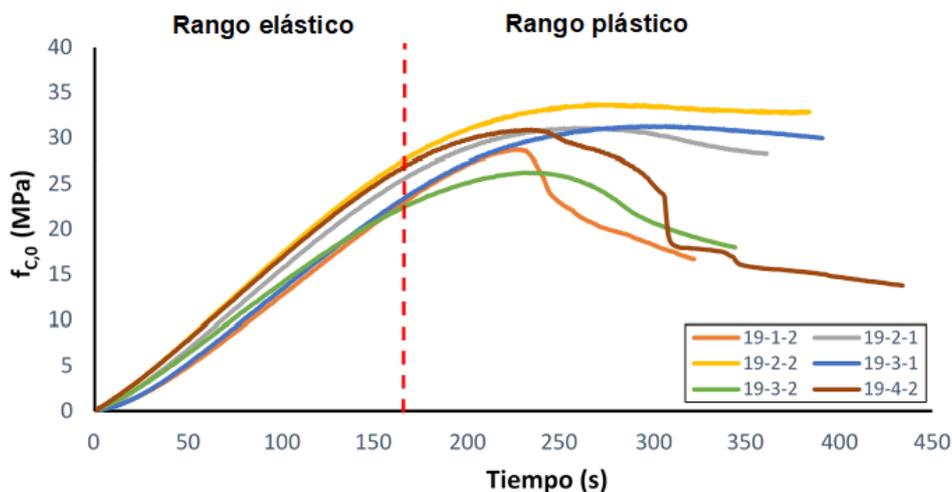


Figura 4.2: Curva tensión-tiempo del árbol 19.

Las Figuras 4.3-a y 4.3-b muestran los resultados del módulo de elasticidad (E_0) (valor medio de la plantación y valores máximos por probeta) en los ensayos a compresión en la dirección de la fibra para las probetas escogidas aleatoriamente a las cuales se le colocaron dos galgas extensiométricas en el centro geométrico.

Como se observa en la Figura 4.3-b la mayor probeta alcanzó un valor de 8286 MPa mientras que la menor alcanzó un valor de 3805 MPa, esto quiere decir que entre la mayor y la menor probeta hubo una diferencia del 117%, asociándose a que la rigidez en la madera depende de:

- La desviación de la fibra, que en el chopo es baja pero aun así influye;
- Las propiedades mecánicas del árbol;
- La correcta geometría de la probeta;
- La propia estructura de la madera.

Por tanto, queda patente la importancia de realizar un elevado muestreo de las probetas de ensayo. Por otro lado, aunque se observa una gran dispersión, la diferencia entre el valor medio de la plantación mixta y pura es tan solo del 3% quedando dentro de la misma covarianza, por lo cual se pueden estimar iguales.

En la Figura 4.4 se observa que una vez que se produce plastificación en las probetas, estas presentan una elevada dispersión, esto puede asociarse a la heterogeneidad de la madera una vez excedido su rango elástico.

En referencia al percentil 5% se observa que la plantación mixta arroja un 12% más que la plantación pura, una diferencia a tener en cuenta y respecto al percentil 95% la plantación mixta arroja un 0,7% más que la plantación pura considerándose esta diferencia despreciable (Tabla 4.2).

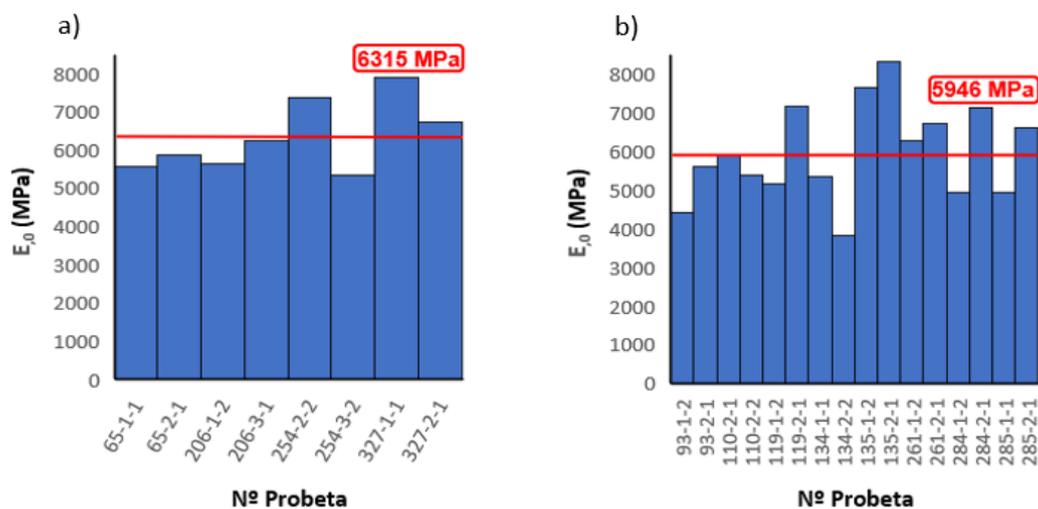


Figura 4.3: Módulo de elasticidad a compresión en la dirección de la fibra. Línea roja: valor medio. a) Plantación mixta. b) Plantación pura.

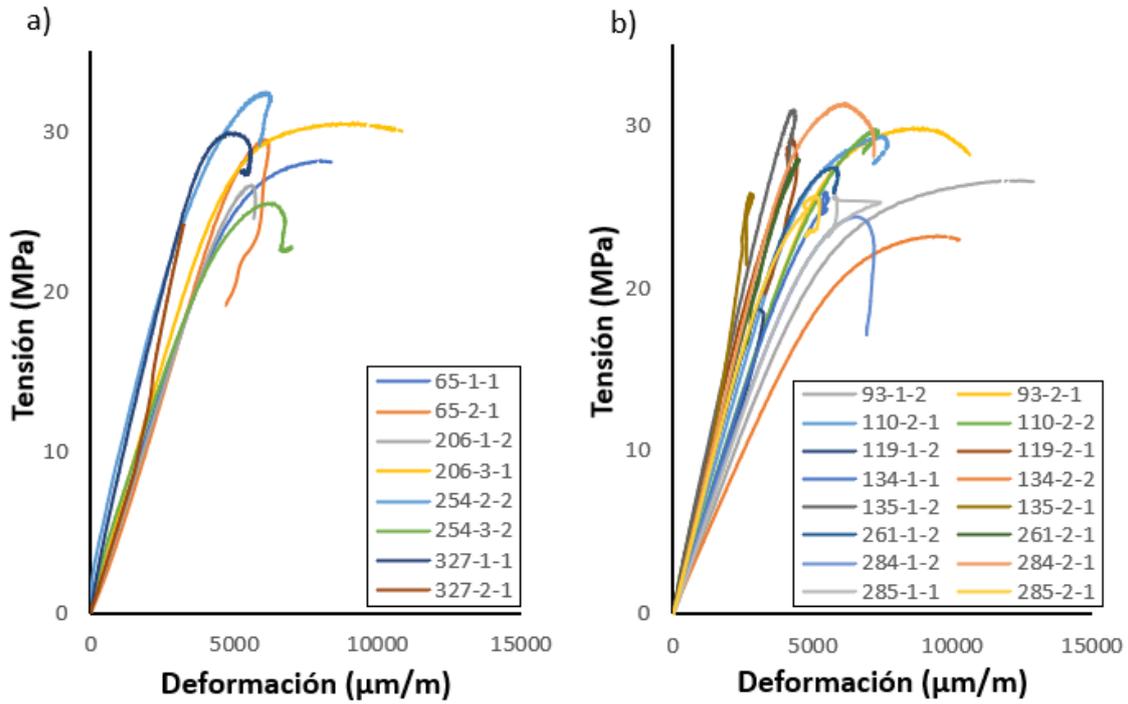


Figura 4.4: Curva tensión-deformación longitudinal

Plantación	E_0 (MPa) Valor medio	Poisson (ν)	E_0 (MPa) Percentil 5%	E_0 (MPa) Percentil 95%
Mixta	$6315 \pm 14,5$	0,40	5421	7684
Pura	$5946 \pm 20,7$	0,40	4266	7794
Total	$6069 \pm 18,6$	0,40	4495	7833

Tabla 4.2: Tabla de valores para el módulo de elasticidad de la plantación mixta y pura.

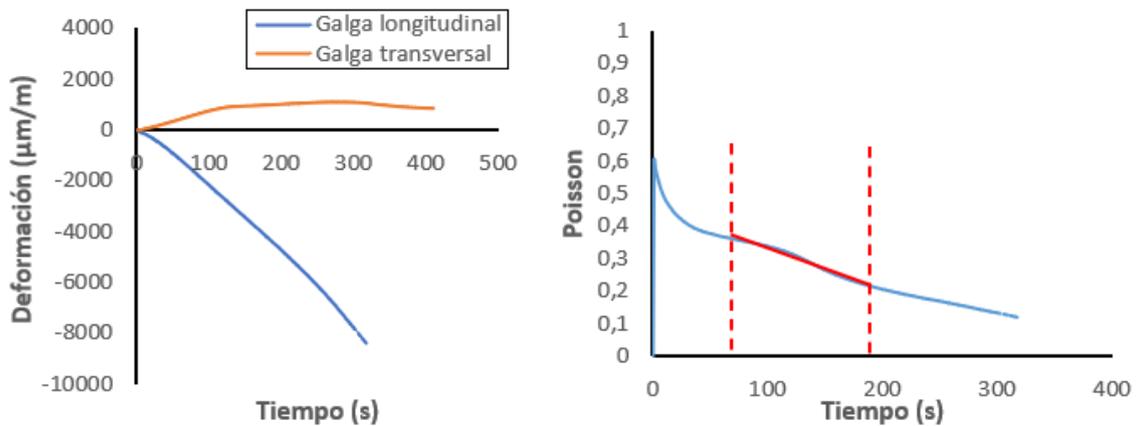


Figura 4.5: Ejemplo de una medida en la probeta 65-1-1. Izq.: Deformación frente al tiempo. Der.: Variación del coeficiente de Poisson frente al tiempo. Línea roja discontinua: Límites de cálculo del coeficiente de Poisson.

En la Figura 4.5-a, a modo de ejemplo se presenta la relación de deformaciones en sentido longitudinal y transversal, como se puede observar a compresión las deformaciones son mucho mayores en la galga longitudinal que en la galga transversal que es la que se encuentra en la dirección perpendicular a la carga.

En la Figura 4.5-b se representa el coeficiente de Poisson en un rango del 20% al 50% (línea discontinua roja). Como se observa el valor no es constante a lo largo del tiempo, por tanto, este valor se obtuvo empleando el mismo rango que se utilizó para el cálculo del E_{0} . Comúnmente en los materiales de uso en ingeniería, el valor para el coeficiente de Poisson se encuentra entre 0 y 0,5. En este trabajo, el valor obtenido ha sido de 0,4 valor coherente con la bibliografía [9].

4.2 RESULTADOS A COMPRESIÓN PERPENDICULAR A LA FIBRA

A continuación, se muestran gráficamente los resultados del módulo de resistencia ($f_{c,90}$) y módulo de elasticidad (E_{90}) (valor medio de la plantación y valores máximos por probeta) en los ensayos a compresión en dirección perpendicular a la fibra, seleccionando 2 probetas por árbol, coincidiendo con los árboles en los que se midió el módulo de elasticidad en dirección longitudinal a la fibra (E_{0}).

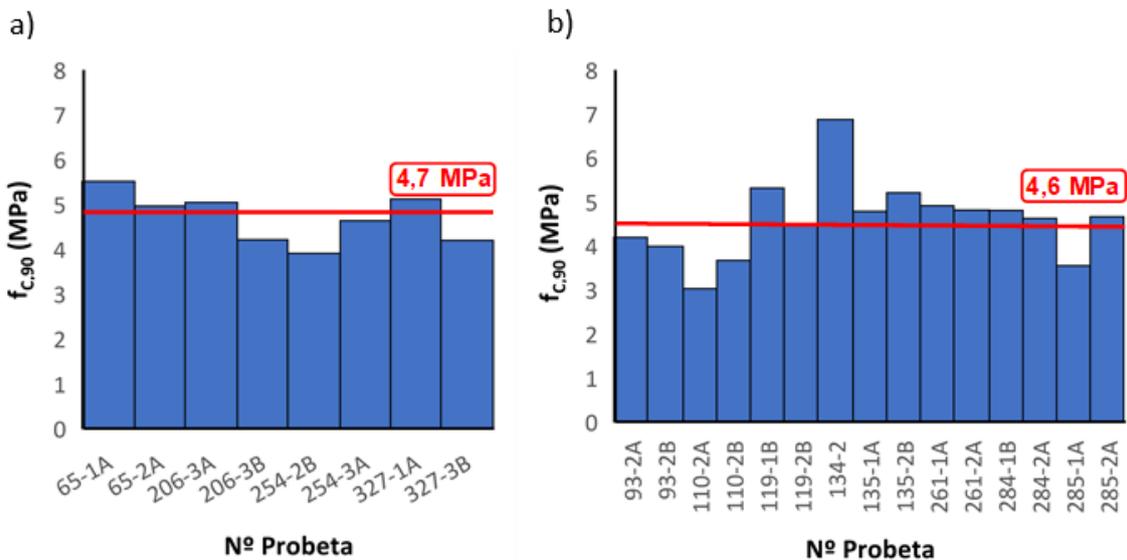


Figura 4.6: Resistencia a compresión perpendicular a la fibra. Línea roja: valor medio. a) Plantación mixta. b) Plantación pura.

Plantación	$f_{c,90}$ (MPa)	$f_{c,90}$ (MPa)	$f_{c,90}$ (MPa)
	Valor medio	Percentil 5%	Percentil 95%
Mixta	4,7 ± 11,8	4,0	5,4
Pura	4,6 ± 19,5	3,4	5,8
Total	4,6 ± 19,3	3,4	5,8

Tabla 4.3: Tabla de valores para la resistencia a compresión en la dirección perpendicular a la fibra de la plantación mixta y pura.

Como se observa en la Figura 4.6-a no hay una gran dispersión entre todos los resultados con un valor promedio de 4,7 MPa, mientras que en el caso de la plantación pura (Figura 4.8-b) fue de 4,6 MPa, considerándose similar. En referencia al percentil 5% se observa que la plantación mixta arroja un 0,6% más que la plantación pura y respecto al percentil 95% la plantación mixta arroja un 0,4% menos que la plantación pura, considerándose estas diferencias despreciables (Tabla 4.3).

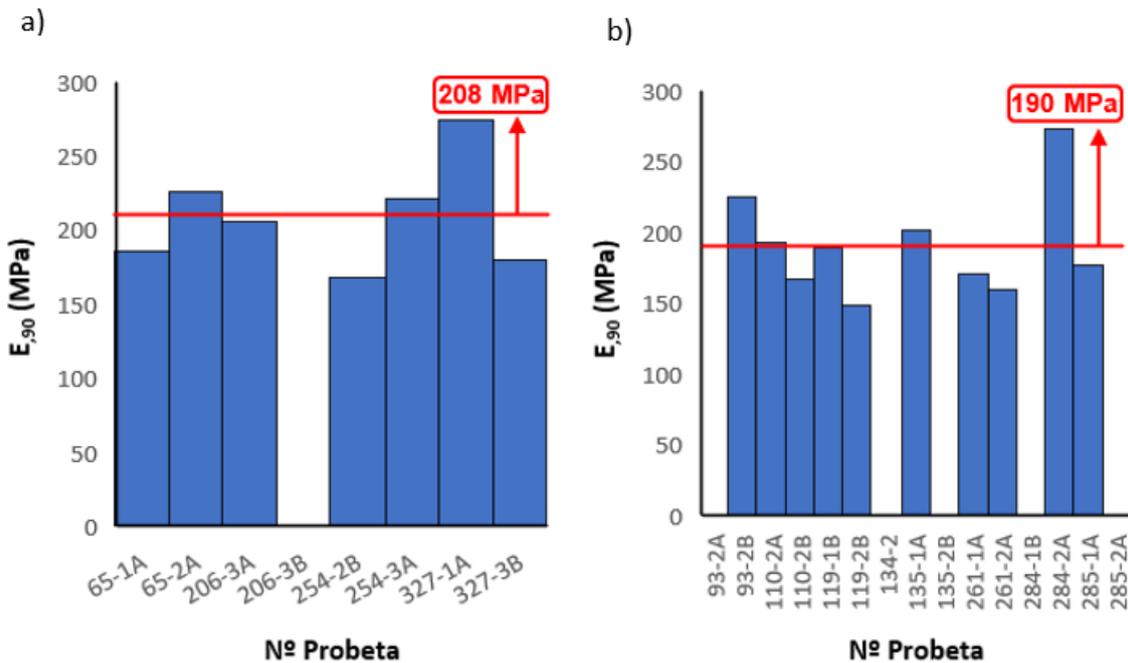


Figura 4.7: Módulo de elasticidad a compresión en dirección perpendicular a la fibra. Línea roja: valor medio. a) Plantación mixta. b) Plantación pura.

Como se observa en la Figura 4.7 la mayor probeta alcanzó un valor de 272 MPa mientras que la menor alcanzó un valor de 148 MPa, esto quiere decir que entre la mayor y la menor probeta hubo una diferencia del 84%, de nuevo asociándose a la propia heterogeneidad de la madera.

Por otro lado, aunque se observa una gran dispersión, la diferencia entre el valor medio de la plantación mixta y pura es de tan solo 18 MPa, lo que representa una diferencia de un 4,5%, que entra dentro de la misma covarianza, por lo cual se pueden estimar iguales. Las probetas que aparecen en blanco dieron resultados anómalos por lo que se han excluido del análisis.

4.3 COMPARACIÓN ENTRE MoE_{DIN} Y E_0

La Figura 4.8 representa a modo gráfico el valor medio obtenido para el módulo de elasticidad calculado mediante cuatro métodos diferentes. La línea roja representa el valor medio entre los cuatro métodos.

En la Tabla 4.4 se observa como el valor que más se aproxima a E_0 (método destructivo) es el del $MoE_{din,F2}$ (método no destructivo). La menor diferencia se consiguió entre valores medios de E_0 y $MoE_{din,F2}$ de tan solo del 0,4%. Seguidamente la diferencia entre $MoE_{din,F1}$ y $MoE_{din,F3}$ respecto a E_0 son del 10% y 7,75%, respectivamente. Por tanto, la variación media desde la fase 1 se encuentra por debajo del 10%, por lo que se consideran valores fiables para estimar las propiedades mecánicas a compresión desde las medidas no destructivas llevadas a cabo en árbol.

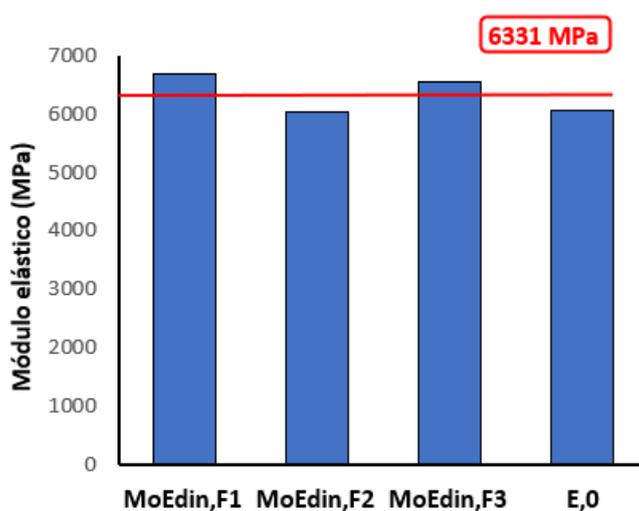


Figura 4.8: Valor medio para el módulo de elasticidad calculado por diferentes métodos.

Árbol	MoE _{din,F1} (MPa)	MoE _{din,F2} (MPa)	MoE _{din,F3} (MPa)	E ₀ (MPa)
65	6980	5979	7188	5710
206	6552	5684	6508	5916
254	6555	5548	6683	6342
327	6238	6018	6478	7292
93	6782	6417	6484	4998
110	6710	5918	6461	5625
119	7096	6024	6770	6149
134	6320	5984	6361	4574
135	6710	6355	6781	7958
261	6481	5296	5499	6482
284	6538	6297	6774	6024
285	6356	5788	6604	5756
Valor medio	6676 ± 3,9	6042 ± 5,5	6539 ± 6,1	6069 ± 15,0

Tabla 4.4: Tabla de valores para el módulo de elasticidad calculado por diferentes métodos. Valores medios con la desviación estándar.

5 CONCLUSIONES

Este Proyecto se centra en dos aspectos relacionados con el chopo, por un lado, en la caracterización mecánica de la madera de chopo del clon I-214, y por otro, comparar el módulo elástico a compresión longitudinal con el MoE_{din} en 3 fases diferentes.

Respecto a la resistencia a compresión en la dirección longitudinal, $f_{c,0}$ se obtuvo una variación del 6% entre ambas plantaciones, variación dentro de la desviación estándar de la plantación, por lo que se consideran similares.

Se han realizado ensayos a compresión longitudinal y transversal a la fibra, monitorizando parte de ellos con galgas extensiométricas. Los valores obtenidos de rigidez concuerdan con los valores de la literatura, observándose diferencias despreciables (3%) entre ambos tipos de plantación (mixta y pura), aunque si una mayor dispersión de los resultados en esta última.

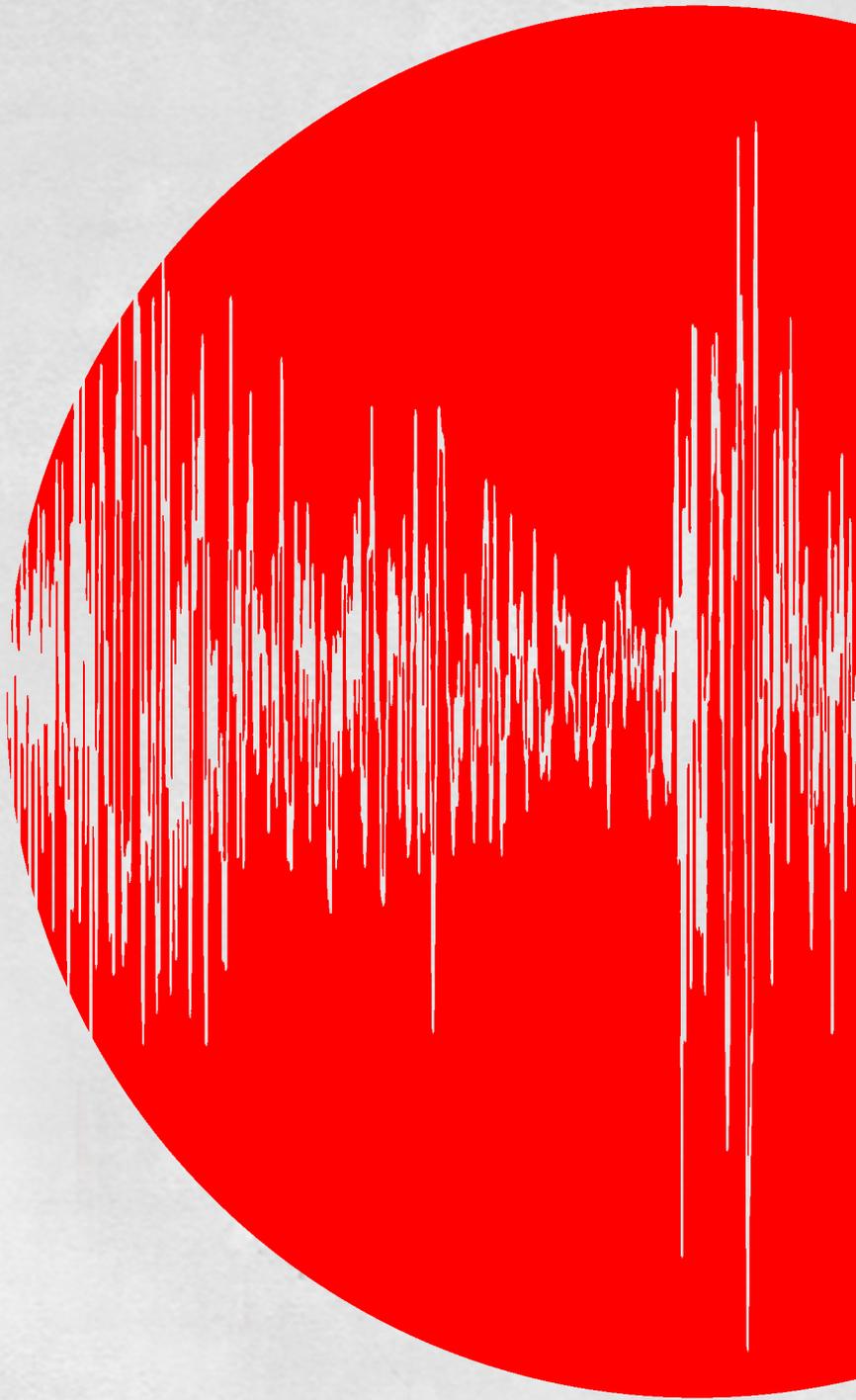
Se ha comprobado que la madera a compresión presenta un comportamiento elastoplástico bien definido, en el que en el caso de las probetas de este Proyecto se encuentra en torno a los 25 MPa.

A través de la comparación de los resultados mecánicos con los resultados de ensayos no destructivos en las 3 fases de medida (árbol, troza y viga) se ha comprobado que la variación máxima del módulo elástico en la dirección longitudinal de la fibra es de un máximo del 10%, siendo en el caso de la comparativa ensayo destructivo – ensayo no destructivo en troza de tan solo el 0.44%. Esto demuestra que los ensayos no destructivos son una herramienta eficaz y fiable para predecir el módulo elástico mucho antes incluso del corte del árbol, teniendo un impacto directo tanto en su uso como en su coste.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ronald Maxwell Campos Cisneros. (2007). Unidad temática 1, tecnología de los materiales. Recuperado de: <https://www.monografias.com/trabajos48/maderas/maderas2.shtml>
- [2] Maderera. (2005). Recuperado de: <https://www.maderea.es/madera-al-microscopio/>
- [3] UNE-EN 56.544:1997. Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural.
- [4] NF-B52-001:2011. Clasificación visual para el uso en estructuras de madera blanda y madera dura aserrada francesa.
- [5] DIN 4074 Parte 1. Clasificación de la madera según su resistencia estructural alemana. Parte 1: Madera aserrada de coníferas.
- [6] Casado, M.; Acuña, L.; Relea, E.; Basterra, A.; Ramón, G.; López, G. (2009) Structural timber classification of *Populus x euramericana* "I-214". *Holzforschung*. Vol.: 66(5), pp.: 633-638
- [7] UNE-EN 408:2011. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas.
- [8] UNE-EN 13.183:2002. Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 1: Determinación por el método de secado en estufa.
- [9] Francisco J. Rescalvo, Leandro Morillas, Ignacio Valverde-Palacios & Antolino Gallego. (2019). Acoustic emission in I-214 poplar wood under compressive loading. *European Journal of Wood and Wood Products*. Vol.: 10.1007, pp.: 00107-020-01536-7

10] Rodríguez, María. (2019). Caracterización mecánica de la madera de chopo del clon I-214 y vigas mixtas pino/ FRP con injertos de chopo. Trabajo Fin de Master, Universidad de Granada, E.T.S. de Ingeniería de Edificación.



IDIE

Investigación y Desarrollo en
INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN
Universidad de Granada

ADIME Acústica y Diagnóstico de Materiales y Estructuras