



Universidad de Valladolid
Campus de Palencia

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIERÍAS AGRARIAS**

Máster en Ingeniería de Montes

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA ESCUADRÍA
EN LAS PROPIEDADES ELASTOMECÁNICAS DE
VIGAS DÚO DE *POPULUS* REFORZADAS CON
FIBRA DE CARBONO

Alumno: Pablo de Miguel Rábanos

Tutora: Milagros Casado Sanz

Cotutor: Roberto San Martín

Agradecimientos

En primer lugar agradecer a mi tutora Milagros, por ofrecerme la oportunidad de hacer este estudio, ayudándome siempre que lo he necesitado. También agradecer a Roberto San Martín por su gran ayuda a la hora de hacer la parte estadística.

A Harriet Umerez Olabarria y a Gonzalo Arrea Navarro porque junto a ellos la toma de datos no ha sido tan pesada, amenizándome el tiempo en el laboratorio.

Agradecer a mi familia y novia, por el apoyo moral durante todos los años tanto de la carrera como el máster, sobre todo en las épocas más críticas, cómo en exámenes.

A mis amigos de Pradoluengo, por todas las tertulias forestales que hemos tenido a lo largo de todos estos años.

Por último, gracias a todos los compañeros de la escuela que en todo momento han sido un buen apoyo, por esos buenos ratos que hemos pasado juntos.

ÍNDICE

1.- INTRODUCCIÓN.....	1
2.- ANTECEDENTES.....	100
2.1. INTRODUCCIÓN: CONSTRUCCIÓN CON MADERA. MADERA INDUSTRIALIZADA	10
2.2. MADERA ASERRADA ENCOLADA: VIGAS DÚO	12
2.2.1. <i>Introducción: Concepto de viga dúo</i>	12
2.2.2. <i>Definición</i>	13
2.2.3. <i>Composición interna de la viga dúo</i>	13
2.2.4. <i>Ventajas y limitaciones de las vigas dúo</i>	15
2.2.5. <i>Aplicaciones</i>	16
2.2.6. <i>Diferencias con la madera laminada</i>	17
2.2.7. <i>Materiales</i>	18
2.2.7.1. <i>Madera</i>	18
2.2.7.2. <i>Adhesivos</i>	20
2.2.9. <i>Propiedades</i>	21
2.2.9.1. <i>Propiedades mecánicas</i>	21
2.2.9.2. <i>Durabilidad</i>	21
2.2.9.3. <i>Comportamiento al fuego</i>	21
2.4. DESCRIPCIÓN DE LA ESPECIE	22
2.5. ESTUDIOS ANTERIORES CON VIGAS DÚO REFORZADAS.	25
3.- OBJETIVOS.....	27
4.- MATERIAL Y MÉTODOS	28
4.1.- DATOS GENERALES DE LA MUESTRA	28
4.1.1. <i>Fabricación de las probetas dúo reforzadas</i>	29
4.1.2. <i>Vigas dúo comercializadas y diferencias con las vigas dúo ensayadas</i>	32
4.2. EQUIPOS DE TRABAJO.....	34
4.2.1. <i>Equipos de ultrasonidos (Sylvatest Trio® y Fakopp)</i>	34
4.2.1.1. <i>Sylvatest Trio®</i>	34
4.2.1.2. <i>Fakopp Microsecond Timer</i>	35
4.2.2. <i>Equipo de vibraciones: PLG (Portable Lumber Grader)</i>	37
4.2.3. <i>Maquina universal de ensayos (Ibertest)</i>	38
4.2.4. <i>Otro tipo de material</i>	40
4.3. METODOLOGÍA EMPLEADA.....	43
4.3.1. <i>Descripción general</i>	43

4.3.2. Medición de las probetas.....	44
4.3.3. Clasificación visual de la madera	46
4.3.3.1. Principios de la clasificación de la madera aserrada.....	47
4.3.3.2. Criterios de medición de las características y singularidades de la madera	48
4.3.3.3. Clasificación mediante la norma (española) UNE-56544:2007.....	57
4.3.4. Ensayo de vibraciones inducidas: PLG (Portable Lumber Grader)	59
4.3.5. Ensayos con ultrasonidos (Sylvatest Trio® y Fakopp).....	66
4.3.5.1. Descripción de la técnica	66
4.3.5.2. Metodología de ensayo con el equipo Sylvatest Trio®	68
4.3.5.3. Metodología de ensayo con el equipo Fakopp	70
4.3.6. Caracterización mecánica de la madera mediante la maquina universal de ensayos (UNE-EN 408:2011).....	71
4.3.6.1. Determinación del módulo de elasticidad global a flexión (MOEG)	72
4.3.6.2. Determinación de la resistencia flexión estática (MOR).....	75
4.3.7. Determinación de las propiedades físicas.....	77
4.3.7.1. Determinación de la densidad	77
4.3.7.3. Determinación de la humedad	78
4.4. DETERMINACIÓN DE LOS VALORES CARACTERÍSTICOS.....	78
4.4.1. Introducción.....	78
4.4.2. Cálculo de los valores característicos.....	79
4.4.3. Valor característico de resistencia a flexión (módulo de rotura a flexión MOR)	79
4.4.4. Valor característico de la densidad.....	81
4.4.5. Valor característico del módulo de elasticidad	82
4.4.6. Asignación de las clases resistentes.....	84
4.5. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE LOS DATOS.....	85
5.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	877
5.1. CLASIFICACIÓN VISUAL	87
5.2. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA	89
5.3. ANÁLISIS DESCRIPTIVO DE LAS VARIABLES CLASIFICATORIAS	91
5.4. ESTADÍSTICA COMPARATIVA	95
5.4.1. Estadística comparativa: lote de probetas dúo reforzadas y lote de vigas dúo reforzadas.....	96
5.4.1.1. Análisis comparativo (probeta dúo-viga dúo) de las variables del ensayo de flexión (Norma UNE 408): MORc y MOE ₁₂	97
5.4.1.2. Análisis comparativo (viga dúo-probeta dúo) de la densidad según norma UNE 408.....	101
5.4.1.3. Análisis comparativo (viga dúo-viga maciza) de las variables del ensayo de vibraciones inducidas: Frecuencia media plg y MOEplg	103

5.4.1.4. Análisis comparativo (viga dúo-viga maciza) de las variables de los ensayos de ultrasonidos con el equipo Sylvatest Trio: VdSy y MOEdSy	107
5.4.1.5. Análisis comparativo (viga dúo-viga maciza) de las variables de los ensayos de ultrasonidos con el equipo Fakopp: VdFk y MOEdFk	111
<i>5.4.2. Estadística comparativa lote vigas dúo reforzadas.</i>	<i>115</i>
5.4.2.1. Análisis comparativo de la densidad, según norma UNE 408, con la densidad del PLG	115
6.- CONCLUSIONES.....	1187
7.- BIBLIOGRAFÍA.....	1222

ÍNDICE DE TABLAS

MATERIAL Y MÉTODOS

Tabla 4.1. Reducción dimensional máxima permitida en piezas ya clasificada

Tabla 4.2. Especificaciones para la clasificación de piezas de sección rectangular con anchura $b \leq 70$ mm

Tabla 4.3. Clases resistentes para coníferas y chopo a partir de los valores característicos del Módulo de elasticidad dinámico y la densidad.

Tabla 4.4. Tabla resumen de clases resistentes para coníferas y chopo a partir de determinados valores característicos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 5.1. Clasificación visual del lote de vigas dúo reforzadas según Norma UNE 56544:2007

Tabla 5.2. Estadística descriptiva ensayos destructivos, para las probetas dúo reforzadas con fibra de carbono

Tabla 5.3. Estadística descriptiva ensayos no destructivos, para las probetas dúo reforzadas con fibra de carbono

Tabla 5.4. Estadística descriptiva ensayos no destructivos, para las probetas dúo no reforzadas con fibra de carbono

Tabla 5.5. Tabla de rendimientos clasificatorios según norma EN 338 (ensayo de flexión) y UNE 56544 (clasificación visual)

Tabla 5.6. Tabla comparativa de los valores característicos de los ensayos de flexión y clases resistentes.

Tabla 5.7. Propuesta de clasificación de madera de chopo (Casado et al 2012).

Tabla 5.8. Módulo de elasticidad de los ensayos destructivos y no destructivos y velocidad de los ensayos.

Tabla 5.9. Análisis de Varianza para la variable MORc del análisis comparativo viga dúo - probeta dúo reforzadas

- Tabla 5.10. Análisis comparativo viga dúo – viga maciza. Variable MOR_c. Tabla de medias con intervalos de confianza del 95%. Test de Fisher, letras diferentes indican diferencias significativas (alfa= 0,05).
- Tabla 5.11. Análisis de Varianza para la variable MOE₁₂ del análisis comparativo viga dúo - probeta dúo reforzadas
- Tabla 5.12. Análisis comparativo viga dúo – viga maciza. Variable MOE₁₂. Tabla de medias con intervalos de confianza del 95%. Test de Fisher, letras diferentes indican diferencias significativas (alfa= 0,05).
- Tabla 5.13. Análisis de Varianza para la variable Densidad (norma 480) del análisis comparativo viga dúo - probeta dúo reforzadas
- Tabla 5.14. Análisis comparativo viga dúo – viga maciza. Variable Densidad (norma 480). Tabla de medias con intervalos de confianza del 95%. Test de Fisher, letras diferentes indican diferencias significativas (alfa= 0,05).
- Tabla 5.15. Análisis de Varianza para la variable $f_{m_{plg}}$ del análisis comparativo viga dúo - probeta dúo reforzadas
- Tabla 5.16. Análisis comparativo viga dúo – viga maciza. Variable $f_{m_{plg}}$. Tabla de medias con intervalos de confianza del 95%. Test de Fisher, letras diferentes indican diferencias significativas (alfa= 0,05).
- Tabla 5.17. Análisis de Varianza para la variable MOE_{plg} del análisis comparativo viga dúo - probeta dúo reforzadas
- Tabla 5.18. Análisis comparativo viga dúo – viga maciza. Variable MOE_{plg}. Tabla de medias con intervalos de confianza del 95%. Test de Fisher, letras diferentes indican diferencias significativas (alfa= 0,05).
- Tabla 5.19. Análisis de Varianza para la variable $V_{d_{sy}}$ del análisis comparativo viga dúo - probeta dúo reforzadas
- Tabla 5.20. Análisis comparativo viga dúo – viga maciza. Variable $V_{d_{sy}}$. Tabla de medias con intervalos de confianza del 95%. Test de Fisher, letras diferentes indican diferencias significativas (alfa= 0,05).
- Tabla 5.21. Análisis de Varianza para la variable MOE_{dsy} del análisis comparativo viga dúo - probeta dúo reforzadas

- Tabla 5.22. Análisis comparativo viga dúo – viga maciza. Variable $MOEd_{sy}$. Tabla de medias con intervalos de confianza del 95%. Test de Fisher, letras diferentes indican diferencias significativas ($\alpha = 0,05$).
- Tabla 5.23. Análisis comparativo probeta - viga dúo reforzadas. Variable de Varianza para la variable Vd_{Fk} . Prueba de Kruskal-Wallis.
- Tabla 5.24. Análisis comparativo probeta- viga dúos reforzadas con fibra de carbono. Variable Vd_{Fk} . Tabla de medianas
- Tabla 5.25. Análisis de Varianza para la variable $MOEd_{Fk}$ del análisis comparativo viga dúo - probeta dúo reforzadas
- Tabla 5.26. Análisis comparativo viga dúo – viga maciza. Variable $MOEd_{Fk}$. Tabla de medias con intervalos de confianza del 95%. Test de Fisher, letras diferentes indican diferencias significativas ($\alpha = 0,05$).
- Tabla 5.27. Tabla ANOVA (test F) para la DensidadPLG y Densidad real (norma UNE 408)

ÍNDICE DE FIGURAS

ANTECEDENTES

Figura 1: Detalle de la testa de una viga dúo

Figura 2.1. Distribución de los cortes del tronco para la producción de piezas para DÚO

MATERIAL Y MÉTODOS

Figura 4. 1. Lote de probetas dúo reforzadas con fibra de carbono

Figura 4.2. Esquema de una probeta dúo reforzada con fibra de carbono

Figura 4.3. tejido plano

Figura 4.4. Tejido cruzado

Figura 4.5. Equipo de ultrasonido sylvatest Trío

Figura 4.6. Equipo de ultrasonido Fakopp

Figura 4.7. Fotografía ilustrada con los equipos PLG

Figura 4.8. Equipo de vibraciones inducidas PLG en funcionamiento

Figura 4.9. Maquina universal de ensayos Ibertest ELIB-100W

Figura 4.10. Extensómetro utilizado

Figura 4.11. Cinta métrica

Figura 4.12. taladro

Figura 4.13. Xilohigrómetro

Figura 4.14. Balanza

Figura 4.15. Numerando cada una de las probetas

Figura 4.16. Esquema de medición de las piezas. L=longitud; h= anchura; b= espesor

Figura 4.17. Criterio general de nudos en cara y canto

Figura 4.18. Nudos superficiales de la cara interna

Figura 4.19. Criterios de medición y evaluación de nudos de arista

Figura 4.20. Criterios de medición y evaluación de los nudos de arista cuando existen dudas para su evaluación

Figura 4.21. Criterio de definición de nudos agrupados

Figura 4.22. Criterios de medición de nudos agrupados

Figura 4.21. Criterio de medición de fendas

Figura 4.22. Medición de la desviación de la fibra

Figura 4.23. Medición y evaluación de las gemas

Figura 4.24. Medición de las deformaciones

Figura 4.25. Medición de la anchura máxima del anillo

Figura 4.26. Introducción de datos y selección de opciones y ajuste de balanza con el PLG

Figura 4.27. Pantalla final de resultados

Figura 4.28. Ensayo PLG designando cada uno de los elementos que lo componen

Figura 4.29. Realización de los orificios para introducir las puntas de los palpadores en la realización del ensayo del sylvatest Trio.

Figura 4.30. Ensayo con el equipo de ultrasonidos sylvatest Trio

Figura 4.31. Equipo Sylvatest Trio (izquierda) y detalle de la colocación del Sylvatest Trio en la testa (derecha)

Figura 4.32. Ensayo con el equipo de ultrasonidos Fakopp

Figura 4.33. Esquema de los ensayos de determinación de Módulo de Elasticidad y tensión de rotura

Figura 4.34. Instalación del sensor de deformación

Figura 4.35. Detalle del software utilizado durante los ensayos de rotura en la máquina universal de ensayos

Figura 4.36. Ensayo de flexión, rotura de una viga dúo reforzada

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Figura 5.1. Clasificación visual según norma UNE 56544.

Figura 5.2. Gráfica de medias del MORc del análisis comparativo probeta dúo - viga dúo.

Figura 5.3. Gráfica de medias del MORc del análisis comparativo probeta dúo - viga dúo

Figura 5.4. Gráfica de medias de la variable Densidad (norma 480) del análisis comparativo probeta dúo - viga dúo

Figura 5.5. Gráfica de medias de la variable $f_{m_{plg}}$ del análisis comparativo probeta dúo - viga dúo

Figura 5.6. Gráfica de medias de la variable MOE_{plg} del análisis comparativo probeta dúo - viga dúo

Figura 5.6. Gráfica de medias de la variable Vd_{sy} del análisis comparativo probeta dúo - viga dúo

Figura 5.7. Gráfica de medias de la variable $MOEd_{sy}$ del análisis comparativo probeta dúo - viga dúo

Figura 5.7. Gráfica de medianas de la variable Vd_{Fk} del análisis comparativo probeta dúo - viga dúo

Figura 5.8. Gráfica de medias de la variable $MOEd_{Fk}$ del análisis comparativo probeta dúo - viga dúo

Figura 5.9. Gráfica de medias densidad PLG - densidad norma UNE 408.

Figura 5.10. Gráfico de caja y bigotes densidad PLG - densidad norma UNE 408

INTRODUCCIÓN

1.- Introducción

La madera ha formado parte, total o parcialmente, de las edificaciones construidas por el hombre desde el mismo neolítico; antes de que el hombre contara con herramientas con suficiente capacidad de corte como para trabajar la madera (una herramienta con suficiente capacidad de corte no tiene que ser nada más complicado que un hacha de piedra, por ejemplo) es muy probable que ya empleara la madera como material de construcción de sus primeros refugios (Borràs, X. 2010).

La madera ha sido un material tradicionalmente empleado en la construcción. Los antiguos sistemas constructivos con madera han ido evolucionando a lo largo de los siglos de forma distinta en función de las condiciones climáticas y sociales de cada zona. Por dicho motivo pueden apreciarse desde sistemas con madera muy simples a sistemas altamente sofisticados y exigentes. De la importancia que la madera ha tenido en el pasado dan fehaciente muestra los cientos de edificaciones históricas y cascos urbanos que han hecho uso de este material como elemento estructural (Queipo de Llano, et al., 2010).

Este material, ha estado muy ligado a lo largo de la historia en la construcción, también tiene unas buenas aptitudes para cumplir una función estructural; en España, este material sigue siendo considerado material no tradicional. El uso, en nuestro país de la madera en la construcción y como uso estructural se ha ido reduciendo progresivamente. Esto se debe al suministro irregular de madera (patente en los últimos 50 años), además del desarrollo de la industria de otros materiales como el acero y el hormigón armado y el desconocimiento de sus características por parte de los agentes responsables de su manejo, han traído consigo el paulatino abandono de la madera como material estructural, especialmente a lo largo de la segunda mitad del siglo XX, quedando su uso limitado a un mero material de acabado y carpintería.

Como consecuencia, se ha producido al abandono de los oficios propios de la carpintería de armar, de las labores investigadoras y del conocimiento del material.

Sin embargo, en los últimos años hemos asistido a un importante resurgimiento de la madera en su función estructural, manifestando estas carencias desde la fase de proyecto hasta la fase de ejecución de cualquier obra con madera, desde la falta de conocimiento y de herramientas de trabajo para los técnicos hasta la falta de mano de obra cualificada para el levantamiento de las estructuras de madera, pasando por el suministro del material, los controles de calidad, etc. (Esteban M. et al; 2003).

Actualmente, entre el 60 y el 80% de todas las viviendas que se construyen en países como Finlandia, Suecia, Austria, Estados Unidos y Australia, son de madera, y la gran mayoría de ellos son edificios de entramado ligero (Borràs, X. 2010).

En España, esta situación ha cambiado en el último decenio con la aprobación del Código Técnico de la Edificación (CTE), que incluye un Documento Básico de Seguridad Estructural en Madera (SE-M), basado principalmente en el Eurocódigo 5 (EC5), siendo el encargado de crear un marco reglamentario en igualdad, entre la madera en su uso estructural y el resto de los materiales de construcción, lo que va a permitir que la madera pueda competir en el ámbito estructural de la edificación, en las mismas condiciones que el resto de materiales utilizados habitualmente.

Todo ello, coincide con la necesidad de alcanzar los compromisos del Protocolo de Kyoto, ya que Europa se une a él. Éste se basa en su gran capacidad fijadora de CO₂ y su positivo efecto en la reducción de la huella ecológica dejada por el proceso de la edificación.

Las construcciones y desarrollos arquitectónicos, de todo tipo, pueden ser una fuente importante de alteración del entorno y de generación de impacto ambiental, es por ello, que se vienen llevando a cabo constantes estudios encaminados a la búsqueda del diseño óptimo de los edificios, bajo criterios sostenibles. La escala de medida de esta

protección del entorno, está enmarcada dentro de lo que se conoce como sostenibilidad, que trata de buscar las pautas a seguir en los diferentes ámbitos de nuestra vida cotidiana, con objeto de llevar a cabo un desarrollo sostenible (Orbe, A. et al., 2010).

La madera, como componente estructural de las edificaciones, presenta una serie de potenciales ventajas, tanto desde el punto de vista de la ligereza de sus diseños, como desde la perspectiva de su capacidad aislante, resistencia al fuego y los altos parámetros de sostenibilidad que supone su uso, frente a otros materiales estructurales. También aportan un gran valor estético y soluciones muy variadas.

También cabe destacar la importancia de la madera como un material natural, renovable y reciclable, cuyo consumo es positivo, ya que genera efectos medioambientales y sociales cuando procede de una gestión forestal sostenible. Las repoblaciones y los bosques aportan durante el proceso de crecimiento de la madera importantes beneficios medioambientales: regulan el ciclo hidrológico, protegen frente a la erosión hídrica y eólica, mantienen la vida silvestre y la biodiversidad y fijan el CO₂ de la atmósfera; los bosques secundarios y plantaciones forestales son uno de los grandes sumideros de dióxido de carbono que existen a nivel mundial. Según el Centro Nacional de Desarrollo de la Madera de Francia, una tonelada de madera empleada en la edificación significa 1,6 toneladas de CO₂ retiradas de la atmósfera (por sí misma almacena 1 tonelada, el resto viene del efecto sustitutorio de otros materiales emisores).

Teniendo en cuenta las especies forestales que ocupan los bosques de nuestro país, tienen un papel muy importante las de crecimiento rápido, con ello, estamos hablando de eucalipto, pino radiada y chopo. Hablando del cómputo global de madera cortada en España, ocupa alrededor del 12% de la superficie forestal arbolada y proporciona aproximadamente el 68% de las cortas anuales para todos los usos. En nuestro país, el chopo ocupa una superficie de 135.710 hectáreas y Castilla y León, con 87.000 ha

(65% del total nacional), es la Comunidad Autónoma que mayor superficie dedica a esta especie y por tanto la principal productora. Se ha plantado tanto chopo en nuestro país, ya que tiene un rápido crecimiento y se adapta muy bien a las diferentes condiciones de suelo y clima. También es un gran protector de suelos de ribera, márgenes de ríos o de suelos sueltos, ya que tiene una importante capacidad para regular y reducir la escorrentía superficial. También es muy importante su capacidad fijadora de sedimentos y contaminantes, lo que se usa como un fitorecuperador de suelos, aguas contaminadas.

El empleo de dicha madera es muy versátil, tiene propiedades, como el color claro, buenas calidades en acabados, alta homogeneidad, estabilidad dimensional y facilidad para ser trabajada (descortezado, mecanizado, encolado y terminado), resultando exitoso el cultivo del chopo. Sus aplicaciones, están evolucionando continuamente, debido a la dinámica del mercado como por el desarrollo de nuevas tecnologías industriales.

Si bien la madera de chopo obtenida de plantaciones especializadas puede ser aplicada a usos diversos, hoy principalmente se encuentra limitada a fines no estructurales. Sin embargo, a pesar que la madera de chopo posee pobres propiedades mecánicas en valores absolutos, tiene también buena homogeneidad y una alta eficiencia estructural, lo cual podría ser la clave del éxito para su expansión hacia aplicaciones estructurales. La madera de chopo podría ser utilizada ventajosamente en la porción central de elementos estructurales, cuyas partes externas se realizan con materiales más resistentes. En este caso, el diseño correcto, la seguridad del producto y la disponibilidad de información técnica precisa, son los principales factores que pueden garantizar el éxito y la utilización creciente de esta madera en el sector de la construcción (Castro, G., 2006).

El género *Populus* no tiene aplicación estructural a nivel nacional debido a la falta de normativa de clasificación para esta especie. Si bien en algunas versiones de la norma

UNE 56544:1997 se incluía junto a las coníferas, ya que presenta unas características mecánicas relativamente similares, en sus últimas versiones este género ha sido excluido de ella. La caracterización actualizada de la madera de chopo nacional quede garantizar un aumento del empleo de esta especie para su uso estructural (Casado, M. *et al.*, 2013).

La puesta en valor de la madera de chopo y sus productos derivados para uso estructural, pasa por la caracterización y un estudio de las propiedades elastomecánicas que permitan poner en el mercado un producto homogéneo y de calidad, que responda a las exigencias del usuario relativas a la seguridad y estabilidad prescritas por la actual normativa en materia de construcción, y a la vez sea rentable para el productor.

En estos últimos años, se ha producido una evolución tecnológica interesante, por lo cual, el sector de la madera ofrece nuevos productos que se adaptan a las necesidades del usuario y que cumplen con todas las prestaciones técnicas reglamentarias. Dentro de este conjunto de productos, cabe destacar, la madera encolada aserrada, denominada como vigas dúo o trío. Dicho producto responde muy bien a una fuerte demanda en el mercado español y europeo, siendo parecido estéticamente a la madera aserrada, pero garantiza ser un producto más industrializado, debido a que supone de una mayor estabilidad dimensional y gama de dimensiones, etc. En nuestro país, este tipo de productos y su tecnología llegan, en su mayoría, desde países europeos. Algunas iniciativas españolas de innovación en este campo van encaminadas a la utilización de maderas de procedencia nacional (eucalipto, pino radiata, castaño...) para la fabricación de productos estructurales (Esteban M. *et al.*; 2003).

La Universidad de Valladolid, a través del Grupo de Investigación en Estructuras y Tecnología de la Madera, investiga diversas cosas, como por ejemplo, la caracterización físico-mecánica de distintas especies (pino, castaño, chopo), además

de la clasificación estructural de la madera mediante métodos no destructivos, como por ejemplo, ultrasonido, vibraciones, resistógrafo..., así como el estudio, caracterización y clasificación mediante técnicas destructivas de productos derivados de la madera y nuevos productos, como son la madera laminada encolada y las vigas dúo y trío reforzadas con diferentes materiales. Es concretamente, en esta última línea de investigación, en la que encuadramos este estudio, formando parte del proyecto de investigación “Fabricación y caracterización de vigas de madera dúo y trío reforzadas” que tiene como objeto el refuerzo y la mejora del comportamiento mecánico, resistente y la deformabilidad de las vigas dúo o trío de madera de chopo, mediante su refuerzo con bandas encoladas de otro material colocado entre los tablonces que las forman.

El estudio realizado tiene como finalidad la caracterización mecánica de un lote de 32 probetas dúo de madera de *Populus x euroamericana* I-214 reforzadas con fibra de carbono, de dimensiones estructurales 20x10x400 cm y elaboradas de acuerdo al procedimiento de fabricación patentado por la Universidad de Valladolid bajo el título “Vigas de madera dúo y trío reforzadas mediante bandas encoladas” (Basterra Otero, L.A., 2011).

Los sistemas de diagnóstico utilizados en la actualidad podrían clasificarse en dos grupos atendiendo al daño que produce su aplicación sobre la madera estudiada. Las técnicas no destructivas son de mayor interés, ya que su aplicación no merma la capacidad resistente de la madera estudiada. Para este diagnóstico se utiliza el método de clasificación visual, el método de ultrasonidos (equipos Sylvatest® Trio y Fakopp), el método de vibraciones inducidas (equipo PLG, Portable Lumber Grader) y como última técnica no destructiva, se ha utilizado el método mecánico con el que se ha realizado el ensayo de flexión. Como técnica destructiva, impidiendo que la madera pueda ser utilizada con posterioridad y por lo tanto quedan descartados para madera puesta en obra, se ha empleado el método mecánico con el que se ha realizado el ensayo de rotura (Ibertest).

Forman también parte de los objetivos de este estudio, comparar la eficacia de los tres equipos basados en técnicas no destructivas utilizados para caracterizar mecánicamente y clasificar por calidades las vigas dúo, contrastar los resultados obtenidos en los ensayos realizados mediante técnicas no destructivas basadas en métodos acústicos (ultrasonidos y vibraciones inducidas) con los ensayos de flexión y rotura realizados mediante métodos mecánicos y, finalmente, comparar los resultados obtenidos en la caracterización elastomecánica del lote de vigas dúo reforzadas con un lote de piezas de madera maciza estructural del mismo clon.

La toma de datos de las vigas dúo de este estudio, se comenzó con la clasificación visual de cada una de las vigas, llevado a cabo mediante el seguimiento de los criterios establecidos en la norma española UNE-56544: 2007, en la que también se incluye una clasificación para la madera de gran escuadría (MEG); las calidades son asignadas en función de las características y singularidades que presentan las vigas. Una vez realizado este ensayo visual, se continúan con los no destructivos.

Los Ensayos No Destructivos (END), son de mayor interés y consisten en un conjunto de pruebas a las que se somete un material para verificar su calidad o el estado del mismo, sin que sus propiedades sean afectadas por este ensayo (Acuña, L., *et al*, 2006). En estos ensayos no merma la capacidad resistente de la madera estudiada, ya que están basados en principios físicos, como ondas electromagnéticas, acústicas, elásticas, etc. y su aplicación permite caracterizar el estado y naturaleza de los materiales, así como poner de manifiesto la presencia de heterogeneidades o defectos y evaluar su tamaño, forma, situación y naturaleza de los mismos.

Antes de la realización de los siguientes ensayos, se realiza la extracción de los datos dimensionales de la probeta, de longitud, espesor y anchura. Además de la humedad de la probeta.

Primero se ha realizado el ensayo no destructivo basado en la técnica de vibraciones inducidas. Esta técnica utiliza la frecuencia natural de la pieza para llegar a definir su calidad. Para la aplicación de la técnica de vibraciones se ha empleado el equipo PLG (Portable Lumber Grader), este equipo permite medir la frecuencia y la densidad de las piezas, a partir de las cuales calcula el módulo de elasticidad dinámico y estima la resistencia; asignando una clase resistente a cada viga.

Seguidamente se ha realizado el ensayo no destructivo basado en la técnica de ultrasonidos; para lo cual se han utilizado dos equipos distintos, conocidos comercialmente con los nombres de Sylvatest® Trio y Fakopp. Este método se basa en la medición de la propagación del sonido en el medio que constituye la pieza a analizar y tiene aplicación en todo tipo de materiales. Sus distintas técnicas permiten su uso en dos campos de ensayos no destructivos: Control de calidad y Mantenimiento preventivo (Rimoldi, C.; Mariano, L., 2013). En estos ensayos se mide la velocidad de propagación de la onda de ultrasonidos a través de la madera entre un sensor emisor y otro receptor. Cuanto mayor sea el número de defectos o singularidades que presenta la pieza, a lo que se asocia una menor calidad, más obstáculos se encuentra la onda a su paso y alcanza una menor velocidad de transmisión a través de la pieza. Con estos datos se calcula el MOE dinámico.

Por último, se han realizado, mediante métodos mecánicos, el ensayo de flexión (no destructivo). Para este tipo de ensayos se ha utilizado la maquina universal de ensayos Ibertest y cada viga ha sido ensayada a flexión hasta la rotura, siguiendo el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 408, obteniéndose para cada pieza el módulo de rotura a la flexión (MOR) y el módulo de elasticidad a la flexión (MOE). Además, al tratarse de un método destructivo, la madera queda inservible después del ensayo.

La realización de los ensayos de flexión y de rotura, así como la determinación de la densidad de la pieza, permiten clasificar las distintas piezas en clases resistentes. El

cálculo de los valores característicos se realiza según lo dispuesto en la norma UNE-EN 338:2010, mientras que la asignación de clases resistentes se hace según la norma UNE-EN 384:2004.

ANTECEDENTES

2.- Antecedentes

2.1. Introducción: Construcción con madera. Madera industrializada

La madera constituye un material muy especial al ser el resultado del crecimiento de un ser vivo y, por lo tanto, su principal caracterización es la diferenciación individual, que constituye tanto una ventaja como un inconveniente, teniendo que estudiar a cada una de las especies para llegar a conocer su comportamiento (Arnáiz, J.M., 2008).

El hombre y la tecnología han evolucionado a lo largo de su historia de forma paralela. La necesidad de dominar el medio le confirió al hombre el descubrimiento y conocimiento de los materiales que la naturaleza le ofrecía. La madera fue el primer material de construcción de que dispuso el hombre, porque además de facilitar armas para la guerra y la caza, le sirvió para construir sus primeras cabañas o tapas las entradas de sus cavernas, como combustible para el fuego.

Hasta el dominio de los metales, la madera incluso fue utilizada como material en las parcelas que hoy en día sólo un metal puede ocupar en ese eslabón tecnológico. Por ejemplo, el uso durante el Neolítico de brocas de madera.

El tratado más antiguo sobre la construcción que ha llegado hasta nosotros data del siglo I a. C. sobre el año 25 a. C. Marco Vitruvio, arquitecto e ingeniero romano, escribió un extenso tratado sobre arquitectura y técnicas de construcción en Roma. Este libro además de contener comentarios sobre astronomía, relojes de sol, técnicas de construcción y materiales, se recogen las primeras descripciones sobre la composición, cualidades y uso de la madera, mostrando un especial interés sobre la influencia de la época de corta y su influencia en las características de la madera frente a agentes xilófagos.

También en las postrimerías del siglo I a. C. apareció el molino hidráulico, probablemente basado en la rueda de agua del mismo periodo. Además la construcción de grandes catedrales góticas requirió ingentes cantidades de madera para los trabajos de andamiaje y cimbrado, entre otros. Por esta razón la proliferación de aserraderos hidráulicos se extendió rápidamente.

En la Revolución Industrial se ve un desplazamiento de la madera en la construcción, viéndose desplazada por el hormigón y el acero, siendo más resistentes, dejando a la madera un uso meramente decorativo o de revestimiento (Díaz, M.G. 2012)

Hasta el momento, toda la madera utilizada había sido maciza, pero a partir del laminado se comienza a considerar a la madera entre los materiales de alta resistencia que comenzaba a despuntar, siendo posible realizar vigas compuestas y estructuras de gran importancia. Consta de diversas cualidades, como por ejemplo, la facilidad de realizar materiales de gran tamaño, minimización de las grietas y otros defectos asociados a la pérdida de humedad en piezas de gran sección, además de la posibilidad de utilizar maderas de diferentes calidades para la realización de elementos curvos. Producto de la investigación tecnológica y de la transformación e industrialización de la madera han surgido nuevos materiales constructivos de madera, tales como la citada madera laminada encolada, la madera microlaminada (LVL), la madera reconstituida (PSL) o los tableros de virutas orientados (OSB).

También se puede exaltar el progresivo avance en el campo de los materiales compuestos o sistemas de productos a base de madera, donde cada vez hay más interés sobre los productos que combinan madera con fibras de vidrio, fibra de carbono, fibras de poliéster u otros materiales no maderables; debido a las posibilidades que ofrecen para mejorar las propiedades específicas de la madera con fines estructurales y a la flexibilidad de su diseño y elaboración.

Dentro de este contexto, el de los productos tecnificados de madera y el de los materiales compuestos de madera, se sitúan las vigas dúo (madera aserrada

encolada), producto intermedio entre la madera aserrada y la madera laminada encolada, como las vigas dúo reforzadas objeto de este proyecto.

2.2. Madera aserrada encolada: Vigas dúo

2.2.1. Introducción: Concepto de viga dúo

Las vigas dúo resultan del avance científico y técnico aplicado a la ciencia de los materiales, alcanzando también el mundo de la madera para la construcción. Como fruto de los estudios basados en las características y propiedades físico-mecánicas de la madera, se ha permitido desarrollar una serie de estrategia, con el fin de alcanzar una homogeneidad y estandarización de la madera, que tienen como resultado la madera aserrada encolada.

Las vigas dúo están compuestas por madera de unas dimensiones adecuadas unida mediante uniones dentadas y encolada posteriormente, puede utilizarse tanto especies de coníferas como de frondosas, en cuando a las uniones dentadas, llamadas finger-joint pueden ser de diferentes tipos, de forma que el largo de las vigas está realmente limitado por el transporte (13 metros). Por último es muy importantes el tipo de cola a utilizar, ésta puede ser de urea, resorcina en función del objetivo buscado, las colas de poliuretano y las resinas epoxi suelen emplearse menos debido a su coste.

Éstas se forman mediante el encolado lateral de dos piezas o tablones, respectivamente, por sus caras más anchas. La madera utilizada ha sido sometida a un secado industrial previo, se obtienen vigas de madera de una gran sección y longitud, con una gran calidad visual y con propiedades mecánicas bien definidas (Schickhofer, G., 2009).

Es un producto que se encuentra entre la madera aserrada y la laminada.

2.2.2. Definición

El proyecto de norma prEN14080 (*Estructuras de madera. Madera laminada encolada y madera maciza encolada. Requisitos*) define la madera aserrada encolada como perfiles estructurales, de sección rectangular, formados por el encolado de dos o tres láminas de madera, con un espesor superior a 45 mm y menor o igual a 85 mm, dispuestas en dirección paralela al eje de las láminas. Comercialmente se conocen con el nombre de dúos o tríos.

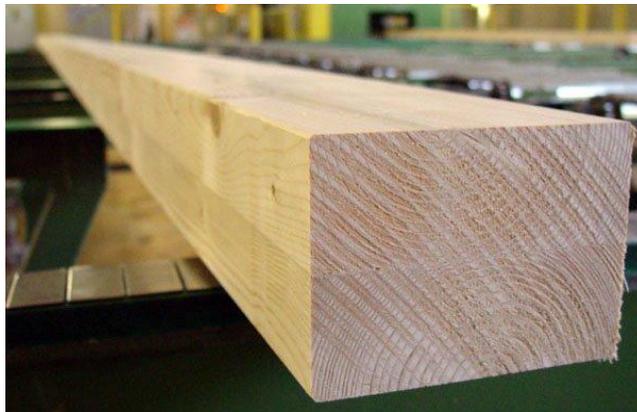


Figura 1: Detalle de la testa de una viga dúo

2.2.3. Composición interna de la viga dúo

Este concepto concreto consiste en la unión, por medio de encolado, de piezas de madera de formatos superiores a las láminas corrientes de vigas laminadas. Esta unión se realiza de forma tal que dichas piezas queden con la superficie de encolado en posición vertical, de tal modo que las caras con los anillos de crecimiento más exteriores queden en el interior de la viga y las caras que se situaban más interiormente en el tronco original, queden vistas hacia fuera (Ahvenainen, J. *et al*, 2007). Para garantizar la presencia de menos nudos y que las fendas de secado

tiendan a formarse en el interior de la nueva viga, las caras que queden vistas tienen que ser las interiores del tronco más cercano a la médula, ya que además tienen mayor durabilidad natural, sin la necesidad de la aplicación de sustancias químicas Basterra, L.A. (2011).

Según Ahvenainen, J. *et al*, (2007), es conveniente saber cómo funcionan un poco las tensiones dentro de las secciones de las vigas dúo, ya que han sido pensadas para sacarle el máximo partido a las características anisotrópicas de la madera. Para ello vamos a realizar una imagen, para visualizar las siguientes características.

En el apartado 1, de la siguiente imagen, se ve como las resistencias características de la madera de coníferas utilizada para fabricar este producto aumentan conforme nos alejamos del corazón.

En el apartado 2 de la siguiente imagen, se aprecia como uniendo los tablones obtenidos por la parte exterior donde los anillos de crecimiento del tronco son más estrechos y resistentes, se consigue generar una disposición tal de éstos, que las mayores resistencias locales del material se sitúan en las zonas que más interesan en una viga, es decir, en las de máxima tracción o compresión.

En el apartado 3 de la siguiente imagen, se observa cómo los tablones más exteriores del tronco aportan aún mayor resistencia que los interiores por ser extraídos de una zona de madera más densa.

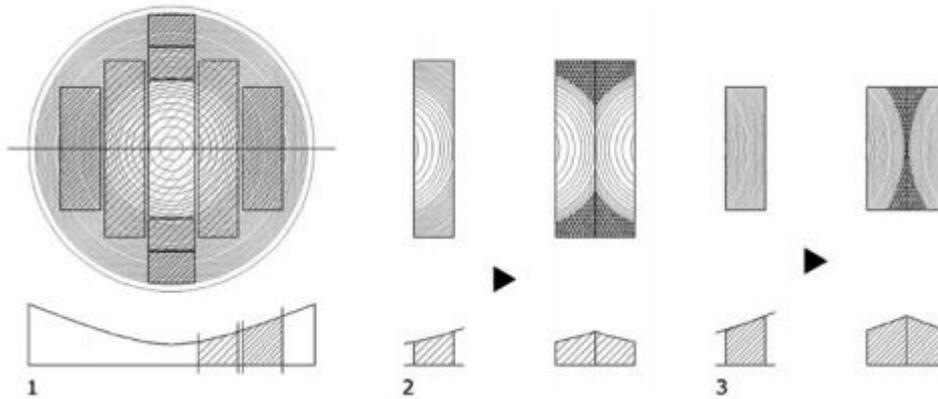


Figura 2.1. Distribución de los cortes del tronco para la producción de piezas para DÚO

Al utilizar este proceso de fabricación se consigue un aumento de la resistencia a flexión sobre el 30%, siempre que el plano de máximas tensiones se aplique en el mismo plano de unión de los tablones, es decir si colocamos la viga dúo con la línea de encolado en posición vertical.

2.2.4. Ventajas y limitaciones de las vigas dúo

El empleo de las vigas dúo o trío, tiene múltiples ventajas como por ejemplo:

- Se encolan en posición vertical con el duramen hacia el exterior. Con ello se evitan fendas y la mayor parte de las singularidades del material, y se expone al exterior la parte de la madera que dispone de mayor durabilidad natural, pudiendo prescindirse de la protección química.
- La banda de refuerzo está oculta y no es visible desde el exterior. Además al estar la banda de refuerzo encolada entre los tablones a unir, queda protegida de temperaturas elevadas en caso de incendio accidental.
- Debido al secado, al tipo de cola y al pegado, se aporta a la viga de madera un incremento de la resistencia y rigidez frente a la deformación, mejorando la

ductilidad y reduciendo la posibilidad de una rotura con cargas menores que las teóricamente previstas, causada por un nudo u otra heterogeneidad local en los tablones de madera Basterra, L.A. (2011).

- d) Los cortes más interiores presentan menos nudos, apareciendo en la cara exterior, de tal forma que se consiguen efectos decorativos y arquitectónicos especiales en todo tipo de construcciones interiores.
- e) Desde el punto de vista de las propiedades mecánicas se consigue una optimización en el uso de la madera de costeros del tronco originario, de una mayor resistencia, uniéndose para conformar piezas de mayor escuadría (Ahvenainen, J. *et al*, 2007).

A pesar de tener unas ventajas tan características, lamentablemente podemos encontrar ciertas limitaciones. Es de vital importancia el diseño de la viga para evitar el contacto directo con el agua y con el sol. Aunque la viga dúo es bastante resistente a pequeños cambios de humedad, temperatura, etc. el contacto continuo con agua o sol perjudica a la viga en poco tiempo si la estructura no está bien diseñada. Si van a ser empleadas para el exterior, estas tienen que gozar de un tratamiento químico (Ahvenainen, J. *et al*, 2007).

La preparación de la madera para el encolado y el propio encolado supone un incremento de precio y es necesario personal más especializado para su aplicación.

2.2.5. Aplicaciones

Este tipo de producto comparte los usos estructurales con los de madera aserrada y con los de madera laminada encolada en luces pequeñas y medias. Presenta la ventaja de permitir luces y escuadrías mayores que la madera aserrada.

Se puede utilizar para la elaboración de elementos estructurales bien de forma individual o bien formando sistemas estructurales, con las siguientes posibilidades:

-
- Estructura horizontal: vigas , viguetas de forjado y entrevigado de suelo. Presenta la particularidad de permitir forjados continuos gracias a su longitud y mayor sección.
 - Estructura vertical: pilares o muros entramados.
 - Estructura de cubierta: armaduras de cubierta (cerchas, correas, pares, parecillos). Es frecuente este uso ya que su longitud y sección facilita la fabricación de las mismas.

También está especialmente indicado su uso:

- Para todas las aplicaciones que exigen una gran estabilidad de la estructura, especialmente para cubiertas herméticas.
- En estructuras visibles que suponen un gran desafío estético. Se usan pocas uniones adhesivas, que además son de color claro, por lo que se puede mantener el aspecto de madera maciza.
- En las estructuras en las que es necesario evitar el uso de protección química. Al conseguir una humedad constante de la madera inferior al 15%, si se respetan las condiciones de uso, se descartan los ataques dañinos de hongos en las vigas dúo. El secado técnico de la madera es un requisito indispensable para no tener que recurrir a las protecciones químicas preventivas.

2.2.6. Diferencias con la madera laminada

Hay una serie de diferencia características con las vigas laminadas, estas son:

- En el caso de la vigas dúo/trío tiene un máximo de 80 mm. En el caso de las laminadas, teniendo en cuenta la norma EN 386, establece que las piezas

utilizadas para la fabricación de este tipo de vigas no deben de tener más de 45 mm de grueso.

- La composición de cada viga es diferente. Las laminadas están formadas por piezas colocadas horizontalmente con un mismo grosor. Todas las piezas tienen el corazón con la misma orientación (hacia abajo). Por el contrario, las vigas dúo/trío tienen las piezas posicionadas verticalmente y la zona cercana al corazón mirando hacia fuera.

2.2.7. Materiales

2.2.7.1. Madera

Especies utilizadas

Puede utilizarse cualquier especie que sea apta para el encolado de acuerdo con una calificación de un organismo competente. Las especies frecuentemente más empleadas son:

- Abeto o falso Abeto (*Picea abies* L. Karst); es la más común.
- Pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.)
- Abeto blanco (*Abies alba* Mill.)
- Pino laricio (*Pinus nigra* Arnold spp. nigra)
- Pino Oregón (*Pseudotsuga menziesii*)

En el proyecto de norma prEN 14080 se indica que para la fabricación de la madera aserrada encolada sólo podrán utilizarse las especies siguientes:

Abeto rojo, Abeto o falso Abeto (*Picea abies*), Abeto blanco (*Abies alba*), Pino silvestre (*Pinus sylvestris*), Pino Oregón (*Pseudotsuga menziesii*), Hemlock Occidental (*Tsuga*

heterophylla), Pino laricio (*Pinus nigra*), Alerce (*Larix decidua*), Pino pinaster o Pino marítimo (*Pinus pinaster*), Chopo (*Populus robusta*, *Populus alba*), Pino radiata (*Pinus radiata*), Picea Sitka (*Picea sitchensis*), Pino Amarillo del Sur (*Pinus palustris*), Cedro rojo del Pacífico (*Thuja plicata*), Cedro amarillo (*Chamaecyparis nootkatensis*).

En España se utilizan algunas especies de frondosas como el Eucalipto (*Eucalyptus globulus*), el Roble (*Quercus robur* y *Quercus petraea*) y el Castaño (*Castanea sativa*), y se está trabajando para poder incluirlas en la futura norma.

Orientación de las láminas

Las láminas posicionadas exteriormente tienen que tener el corazón mirando hacia el exterior (ver figura).

Calidad o clase resistente de la madera

Las secciones individuales de madera utilizadas en la fabricación de las vigas dúo deben clasificarse estructuralmente antes del encolado según la norma UNE-EN 14081-1 o DIN 4074-1. En principio es posible clasificar los tablonos tanto visual como mecánicamente. Para la fabricación hay que utilizar tablonos de clase resistente como mínimo S10 (según norma DIN 1052) o C24 (según norma EN 338), que constituye la clase resistente estándar en la fabricación de las vigas dúo. También es posible utilizar las clases resistente S13 o C30, aunque suelen fabricarse bajo demanda. En el caso de utilizarse tablonos con distintas clases resistentes, la clase resistente de la sección transversal total (viga dúo) será la clase resistente de la pieza o tablón más débil.

La clase resistente define todos los valores característicos como el módulo de elasticidad o flexión calculado de acuerdo a lo regulado en el CTE-DB-SE-M (Código Técnico de la Edificación, Documento Básico de Seguridad Estructural en Madera) proveniente del Eurocódigo 5.

Contenido de humedad

Para la fabricación de vigas dúo se utiliza la madera que ya ha sido sometida a un secado técnico y se realiza un control de la humedad de las láminas. Los tablones o piezas escuadradas se secan cada una de forma individual, no pudiendo superar el 15% de humedad. Así cuando se ha formado la viga dúo el secado es mínimo para evitar la aparición de grietas.

En la norma NF B52-010 se recogen los requisitos de contenido de humedad exigidos en la fabricación de madera laminada encolada (norma UNE-EN 386): para la madera no tratada con un producto protector, durante el armado el contenido de humedad de cada lamina debe estar comprendido entre el 8 y el 15% y para madera tratada entre el 11 y el 18%. En ambos casos la variación de contenido de humedad de las láminas de una misma pieza no excederá del 4%.

En el proyecto de norma prEN 14080 la especificación del contenido de humedad de la madera difiere ligeramente. El contenido de humedad de cada lámina deberá ser del 6% al 15%, a no ser que el fabricante del adhesivo requiera un margen más estrecho. Entre varias láminas dentro de una misma pieza, la diferencia de humedad no puede ser mayor del 5%.

2.2.7.2. Adhesivos

Los adhesivos que sean empleados para la pega de dos piezas de madera, tienen que ser autorizados en la fabricación de construcciones estructurales de madera y superar una serie de pruebas según las correspondientes la norma UNE.

En el proceso de encolado, se aplica una presión de entre 0,6 y 0,8 N/mm² sobre el plano de adherencia.

Generalmente se utilizan colas de resina de melanina y colas de poliuretano, permitiendo encolar elementos de construcción que transfieran cargas. También es

posible encontrar la utilización de adhesivos de urea y de resorcina, en una frecuencia bastante menor.

2.2.9. Propiedades

2.2.9.1. Propiedades mecánicas

La resistencia, rigidez y densidad del producto pueden obtenerse mediante una serie de ensayos de acuerdo a la norma prEn 14080 o a partir de la clasificación de las propiedades de las láminas. Para asignar la clase resistente en este producto hay que adoptar la misma práctica que se aplica a la madera aserrada.

2.2.9.2. Durabilidad

Como en el caso de la madera aserrada se puede elegir una especie con la durabilidad natural suficiente para la clase de uso según norma UNE-EN 350-2 o aplicar el tratamiento adecuado de protección siempre que sea impregnable.

Normalmente este producto se comercializa sin tratamiento químico de protección.

2.2.9.3. Comportamiento al fuego

La resistencia de cada pieza frente al fuego se deberá calcular de acuerdo con el DB de seguridad contra incendio o de acuerdo con la norma UNE-EN 1995-1-2. El parámetro dependiente de la madera es la velocidad de carbonización de la misma, que toma los valores eficaces de 0,8 mm/min en madera aserrada de coníferas y de 0,5 a 0.7 mm/min en la de frondosas y madera laminada encolada.

En este tipo de producto que está entre la madera aserrada y la laminada, la normativa no especifica la velocidad de carbonización que tiene cada una de ellas.

2.4. Descripción de la especie

Para la realización de este estudio, se ha elegido el clon "I-214", es un híbrido Italiano hembra. Pertenece a la especie híbrida *Populus x euramericana* (Dode) Guinier. Obtenido en el instituto de Casale Monferrato en 1929, comenzó a extenderse al finalizar la Segunda Guerra Mundial en Italia, y más tarde en la populicultura mediterránea (De la Cruz, A. C.; 2005).

La gran predisposición del género *Populus* a las hibridaciones naturales, ha hecho surgir a lo largo de la historia una serie de formas intermedias de gran importancia en la populicultura (Padró, A.; 1992). En España y Europa destaca *Populus x euramericana*, creciendo muy bien en el área mediterránea. De madre *Populus deltoides* y padre *Populus nigra*, hibridó de forma espontánea cuando el hombre los llevó de un lado a otro del Atlántico, hace más de 300 años (Padró, A.; 1992).

Esta especie híbrida es de características intermedias a las de su parentales, así *Populus deltoides* aporta sus mejores cualidades tecnológicas y *Populus nigra* aporta su facilidad para el estaquillado y su mejor adaptación al medio por ser especie autóctona.

Son árboles que necesitan suelos fértiles, con abundancia agua en movimiento en las proximidades de sus raíces. Preferencia por climas templados o templados-fríos, no distribuyéndose por zonas con inviernos cálidos. Es un especie considerada de rápido crecimiento, pudiendo alcanzar hasta los 40 metros de altura en lugares cuyas condiciones son favorables para el desarrollo del chopo. La producción de madera es muy alta, hecho que le hace muy preciado. La madera es blanda, ligera, con fibra homogénea, aptas para el aserrío, desenrollo y pasta.

Su multiplicación por estaquilla es muy buena, el cultivo es orientado principalmente a la producción de madera, presentando pequeños turnos de corta, en torno a 12-15 años cada uno. Por sus cualidades de buen crecimiento y enraizamiento se ha seguido potenciando la hibridación artificial.

Padró, A. (1992), destacó una serie de características representantes del clon "I-214", éstas son las siguientes:

- ✓ Crecimiento: muy rápido.
- ✓ Fuste: ligeramente tortuoso, sensible a la rotura por viento.
- ✓ Corteza: lisa y muy fina.
- ✓ Ramificación: tendencia a formar rápidamente ramas gruesas, es muy exigente en cuanto a podas, para evitar horquillamientos.
- ✓ Copa: bastante amplia. Poca dominancia apical.
- ✓ Madera: lisa y ligera. Calidad discutida. Válida para todas las aplicaciones industriales. Baja densidad.
- ✓ Fenología: Foliación precoz. Defoliación a medio plazo. Buen aprovechamiento del periodo vegetativo.
- ✓ Plasticidad: muy alta. Preferencias por suelos fértiles y ligeros. No excesivamente turboso y gravoso. Prefiere clima cálido.
- ✓ Propagación vegetativa: excelente, pocas marras en una plantación.
- ✓ Sensibilidad: a heladas precoces y tardías, al fototropismo y al viento.
- ✓ Producción: alcanza los 30-40 m³/ha/año en España.
- ✓ Adversidades: resiste a *Melampsora*, *Dothichiza*, *Xantomonas* y *Venturia*. Sensible al virus del mosaico y a *Marsonnina*. Esta última no muy extendida por España debido a que las condiciones climáticas no son las adecuadas para su correcto desarrollo. Como especie de crecimiento rápido que es, es susceptible al ataque de barrenadores y defoliadores.
- ✓ Datos de interés: El clon "I-214" es el más utilizado en la populicultura española. El 90% de las choperas de Castilla y León lo utilizan (Grau, J. M.;

1991). Debido a su facilidad de cultivo y crecimiento rápido, se conocen muchos datos del "I-214", al utilizarse como patrón y testigo en ensayos experimentales con otros clones. Generalmente con turno silvícola de 12 a 14 años, y, financiero de 10 a 12 años, con un marco de plantación de 6x6.

En España en estos últimos años se ha podido observar como se ha producido un aumento de la producción de madera de chopo, no solo es debido a la superficie plantada, sino también a la mejora genética de la planta utilizada y a las podas y cuidados culturales que actualmente se realizan en las plantaciones y que antes no eran tan frecuentes, contribuyendo todo ello a aumentar la producción de madera en m³ por hectárea plantada.

En España se pueden identificar 3 zonas productoras diferenciadas por el tipo de suelo, clima y método de cultivo:

- ✓ Zona del Duero (turno de 15 años).
- ✓ Zona del valle del Ebro y Cataluña (12 años).
- ✓ Zona de Granada, principalmente el valle del Genil y del Darro (turno 8-10 años).

Actualmente la populicultura está enfocada a tres vías según Padró, A. y Alonso, N.; (2003), la de conservación, mantenimiento de las zonas pobladas con bosque naturales degradados y poblados principalmente por las especies autóctonas (*P. alba*, *P. nigra* y *P. tremula*). La populicultura de producción, intensiva (utilización de clones altamente productivos) y sostenible (utilización de clones rústicos y frugales). Por último la populicultura para la producción de biomasa, cultivos forestales de alto potencial energético, turnos cortos.

En España, las especies forestales de crecimiento rápido ocupan un 18% de la superficie forestal arbolada, de las cuales 128832 ha corresponden a choperas y producen 757262 m³ de madera (Anuario de Estadística Agroalimentaria, MAPA,

2004). En la Comunidad de Castilla y León es donde se encuentra la mayor superficie de terrenos dedicada a la populicultura (65%), seguida de Aragón (7,6%) y Castilla la Mancha (6%). La Comunidad Autónoma de Madrid, con 2376 ha de choperas (1,8%) presenta producciones de casi 4000 m³ (con corteza) de madera de chopo.

2.5. Estudios anteriores con vigas dúo reforzadas.

No hay muchos estudios realizados anteriormente sobre probetas o vigas dúo reforzadas con fibra de carbono, por ejemplo nuestras 32 probetas dúos con las que hemos trabajado, proceden de 25 vigas dúo de *Populus x euroamericana* I-214 reforzadas con fibra de carbono, utilizadas por Zan, M. M. (2013) para realizar su trabajo, en el que se estudiaron las propiedades elastomecánicas de dichas piezas y su comparación con un proyecto que estudió dichas propiedades de piezas de madera maciza.

Sus conclusiones fueron favorables para las vigas dúo en general, consiguiendo un producto final más homogéneo, disminuyendo la variabilidad y mejorando las características elastomecánicas de la madera, permitiendo aumentar el número de vigas clasificadas como estructurales. La mejora obtenida es escasa y no se pudo cambiar la clase resistente, quedando el lote clasificado en la más baja (C-14), limitando su uso estructural.

Otro artículo anterior al indicado es el de Acuña, L. *et al.* (2012), cuyo título es "Ensayo de resistencia de las vigas dúo de chopo, *Populus x euroamericana* I-214, con refuerzo de fibra de carbono". Este informe presenta los resultados recogidos en la comparación de las propiedades elastomecánicas entre una serie de vigas de madera maciza y una serie adicional de cinco vigas dúo, de la misma especie de chopo, reforzadas con fibra de carbono y con fibra de vidrio. Dicha prueba se llevo a cabo

según la norma EN-408 Europea, obteniendo valores para el módulo de ruptura (MOR) y el módulo de elasticidad (MOE) para cada uno de la serie de prueba.

En sus conclusiones no hubo diferencias estadísticamente significativas en los valores medios, para las propiedades estructurales de las vigas de madera maciza y vigas dúo sin refuerzo. Las pruebas muestran que todos los valores de MOE y MOR de todas las series dúo fueron significativamente superiores a los de la madera sólida, con incrementos en los valores de MOR de entre 30 y 57%. Las vigas con fibra de lino seco presenta los valores de mayor MOR, mientras que las reforzado con fibra de carbono, los valores más altos de MOE. Finalmente, los resultados de las pruebas mostraron, que las vigas reforzadas con fibra de carbono tenían valores significativamente más altos para las propiedades del material.

OBJETIVOS

3.- Objetivos

1. Describir el estado del arte y los antecedentes que existen sobre las vigas dúo reforzadas.
2. Ensayar por métodos no destructivos probetas dúo reforzadas con fibra de carbono empleando ultrasonidos.
3. Caracterizar el lote de las probetas dúo reforzadas mediante los ensayos de flexión según normas europeas EN 408.
4. Comparar las características elastomecánicas obtenidos en las probetas dúo reforzadas de madera de *Populus x euroamericana* I-214 con el lote original de vigas dúo reforzadas de las que procede.
5. Comparar los resultados obtenidos en las probetas dúo reforzadas de los métodos de ensayo no destructivo con los ensayos de flexión utilizados para determinar la clase resistente.
6. Comparar la eficacia de dos equipos de ultrasonidos distintos, Sylvatest trio y Fakopp Microsecond Timer, para la clasificación de calidades de las vigas dúo reforzadas.

MATERIAL Y MÉTODOS

4.- Material y métodos

4.1.- Datos generales de la muestra

Las muestras de este trabajo están compuestas por un lote de 32 probetas dúo de madera de *Populus x euroamericana* I-214 reforzadas con fibra de carbono. Las piezas son rectangulares, estando sus dimensiones entre 4x6x120 cm, aunque en todas ellas varían un poco; se pueden caracterizar todas ellas por su homogeneidad en lo relativo a sus escuadrías y a sus características.

Las piezas de madera utilizadas en la fabricación de probetas dúo son de una chopera situada en el municipio de Santa María del Rey, en la Provincia de León. Éstas han sido adquiridas por el Laboratorio de Tecnología de la Madera de la Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias de Palencia (Universidad de Valladolid).

En este estudio también cabe destacar un segundo lote de 25 vigas dúo de la misma especie, pero con diferentes dimensiones. Las de este lote son 20x10x400 cm. Éstas fueron ensayadas por M^a del Mar Zan Gómez en el año 2013, en el "*estudio de caracterización mecánica de vigas dúo reforzadas de madera de Populus x euroamericana I-214 y análisis comparativo con madera maciza del mismo clon*", y con él se va a realizar un análisis comparativo con el lote de 32 probetas dúo reforzadas descrito en el párrafo anterior.



Figura 4. 1. Lote de probetas dúo reforzadas con fibra de carbono

4.1.1. Fabricación de las probetas dúo reforzadas

Las probetas dúo reforzadas se han fabricado en la Carpintería Navas de Santovenia de Pisuerga (Valladolid) de acuerdo al procedimiento de fabricación patentado por la Universidad de Valladolid bajo el título “Vigas de madera dúo y trío reforzadas mediante bandas encoladas” (inventor: Basterra, L.A., 2011).

Cada probeta dúo está formada por dos tablas no clasificadas como madera para uso estructural, de dimensiones 2x6x120 cm, unidas entre sí longitudinalmente a través de sus caras mediante una resina epóxica y lleva intercalada una lámina de refuerzo de fibra de carbono, en la mitad de la anchura de las caras internas de la viga, de dimensiones 5 x120 cm (ver figura 4.2.).

La forma de encolado de la probeta dúo es en vertical, con el duramen hacia el exterior, y está diseñada de forma que los anillos de crecimiento más exteriores queden en el interior de la pieza, y las caras que se sitúan más interiormente en el

tronco original, quedan vistas hacia afuera, sacando el máximo partido de las características anisotrópicas de la madera (Ahvenainen, J. 2007). El refuerzo de la fibra de carbono se coloca en la zona de la viga que, una vez puesta en obra va a soportar los máximos esfuerzos de tracción.

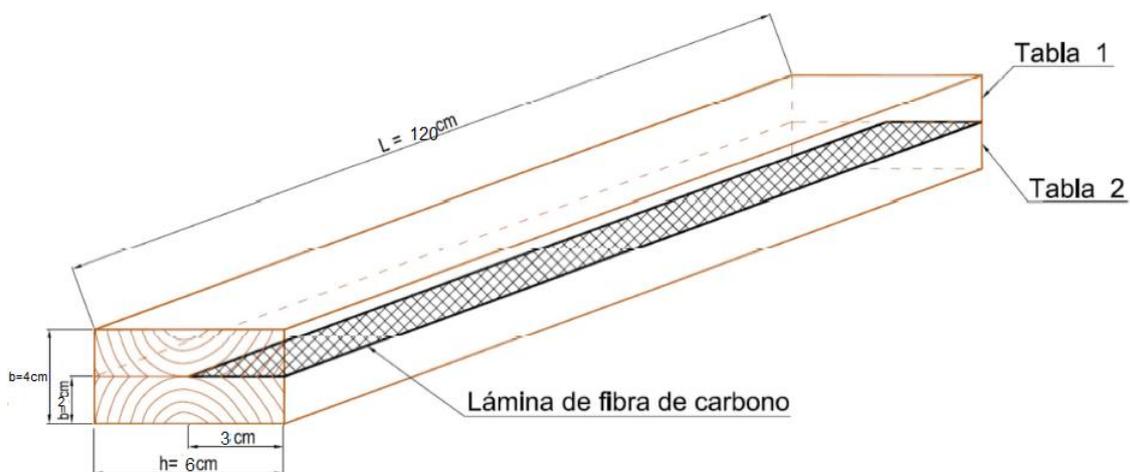


Figura 4.2. Esquema de una probeta dúo reforzada con fibra de carbono

Las etapas del proceso de fabricación son las siguientes:

1. Recepción de las tablas en la carpintería y apilado hasta alcanzar una humedad del 12%.
2. Se realiza un cepillado y regresado de las tablas seleccionadas, manteniendo una sección rectangular con unas dimensiones aproximadas de $4 \times 6 \times 120\text{ cm}$.
3. Se encolan las caras internas de ambas tablas con una resina, ayudado de un rodillo.
4. Se coloca además una lámina de fibra de carbono de $5 \times 120\text{ cm}$ sobre la mitad de ancho de la superficie de la cara encolada de una de las tablas y aplicación de la cola también sobre la tira de fibra de carbono con ayuda de un rodillo.

5. Se juntan ambas caras de las piezas, sometiéndose a una presión mediante gatos o sargentos, sujetándose ambas piezas con precisión.

Siguiendo este proceso de fabricación, se garantiza para la probeta dúo un aumento de resistencia y rigidez frente a la deformación, con la consiguiente mejora de durabilidad; además impide que la pieza sufra una rotura si se aplican cargas menores que las teóricamente previstas, consecuencia de defectos de la madera (Basterra, LA. 2011).

Estas probetas dúo son reforzadas, ya que se ha añadido además de la cola fibra de carbono.laminada, SikaWrap® 230 C/90, de la casa comercial Sika. Este tejido de fibra de carbono se aplica en seco, es un compuesto más ligero que el acero, con igual resistencia, inmune a la corrosión, que puede adoptar diversas formas y adaptarse a las necesidades de múltiples sectores.

Para la aplicación de la fibra de carbono, lo primero que se hace es de forma mecánica o manual la deposición de la fibra en la base de la madera. Se genera vacío en el molde cerrado, con el tejido de carbono seco en su interior, para, a continuación transferir la resina a presión hasta llenar el molde. La resina en forma de película semidura se coloca en el molde al mismo tiempo que el tejido seco. Se aplica presión, impregnándose.

Es importante destacar que dependiendo de la orientación del tejido, la tela de carbono puede ser más fuerte en una dirección determinada o igualmente fuerte en todas las direcciones (Llano, C.; 2011).

Los siguientes son los tejidos más comunes:

- El tejido plano es aquel en el que cada hilado longitudinal y transversal pasa por encima de un hilo y por debajo del próximo. Esta fabricación proporciona una tela reforzada, siendo muy estable, por lo que difícilmente se distorsiona (Llano, C.; 2011).

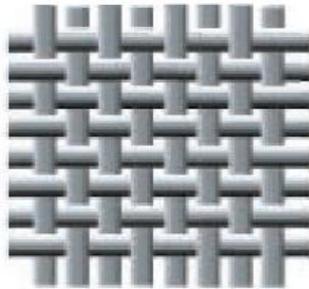


Figura 4.3. tejido plano

- En el tejido cruzado el número de hilados longitudinales que pueden pasar sobre los transversales (y recíprocamente) pueden variarse, dando distintas construcciones de tejidos cruzados. Éstos se marcan más fácilmente que los tejidos planos y son fácilmente humedecidos para que se adhieran a la resina (Llano, C.; 2011).

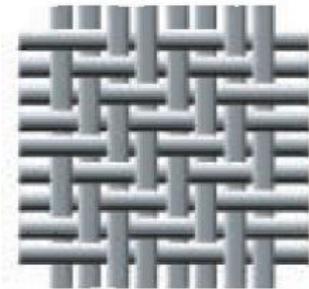


Figura 4.4. Tejido cruzado

4.1.2. Vigas dúo comercializadas y diferencias con las vigas dúo

ensayadas

Las vigas dúo son perfiles de madera de sección rectangular, que constan de dos piezas de madera escuadradas pegadas entre sí, teniendo las láminas exteriores el corazón hacia el exterior. Dichas piezas son sometidas a un secado especial, industrial, clasificación estructural según su clase resistente y estrictos controles de

calidad. Debido al seguimiento de este proceso, podemos gozar de una sección de madera en bruto sin grietas y de gran calidad, con propiedades definidas.

Están disponibles en numerosas longitudes y secciones transversales. Se ofrecen por lo general en las denominadas “secciones preferentes”, que son las secciones que están escalonadas en una retícula definida y deben cubrir el campo de aplicaciones principales. En principio la sección máxima está limitada, no obstante, por los requisitos para la sección individual [anchura máxima (paralela a la junta de encolado) 240 mm, grosor máximo (perpendicular a la junta encolado) 80 mm y superficie máxima de la sección individual 150 mm].

Para fabricar estas vigas, la madera utilizada está sometida a un secado técnico, secándose cada tablón de manera individual, no superando los 15% de humedad. La diferencia entre dos maderas individuales no puede superar el 4%.

Las resinas que actúan como adhesivo deben ser prácticamente invisibles en las uniones. Estos adhesivos deben ser los autorizados en la fabricación de construcciones estructurales de la madera. Se suelen emplear colas de resina de melanina y colas de poliuretano.

La mayoría de vigas dúo son fabricados con *Picea*, aunque también se pueden construir con otros tipos de madera, de especies de abeto, pino o alerce; éstas tienen que cumplir y adaptarse a las clases resistentes definidas en la norma EN 338.

Las 32 probetas dúo con las que trabajamos en este estudio, se han fabricado con madera de un chopo híbrido, llamado *Populus x euroamericana*. Cada una de las piezas individuales, que forman en su conjunto una viga dúo, no han sido clasificadas como madera para uso estructural y entre ambas piezas llevan un refuerzo encolado de fibra de carbono. Lo que se quiere conseguir con este estudio, es que a partir de una viga dúo reforzada con fibras de carbono, obtengamos un producto final con unas características mejoradas.

4.2. Equipos de trabajo

4.2.1. Equipos de ultrasonidos (Sylvatest Trio® y Fakopp)

La historia de la técnica de ultrasonidos ha cambiado con el paso del tiempo, debido a que originariamente, fue utilizada sobre metales y posteriormente en hormigón, para empezar a utilizarse a partir de los años 50 sobre madera. Esta técnica no destructiva, a partir de la velocidad de paso de la onda y con buena estimación de la densidad, permite calcular el módulo de elasticidad en obra y laboratorio (Carballo, *et al* 2009).

En este estudio se van a utilizar dos tipos diferentes de técnicas de ultrasonidos, denominados, Sylvatest® Trio y Fakopp MicrosecondTimer.

4.2.1.1. Sylvatest Trio®

Sylvatest Trio permite una graduación mecánica de los troncos y de los árboles vivos para permitir una valoración de la madera como material estructural. Puede utilizarse también para hacer graduaciones de vigas estructurales en el contexto de las nuevas normas europeas (C16, C40, C70) u otras normas. El aparato ofrece una evaluación de las propiedades mecánicas residuales de la madera usada en las vigas estructurales. En caso de análisis científico basado en probetas, Sylvatest Trio permite calificar un muestreo de maderas.

Este aparato está formado básicamente por un generador de ultrasonidos, compuesto por una pantalla digital y una batería recargable, además de un par de palpadores metálicos, de forma cilíndrica con terminación en punta cónica, que les permite una sencilla sujeción a la madera. Estos palpadores se conectan al sistema principal mediante unos cables de conexión de diferentes medidas.

Con este equipo podemos medir el tiempo (μs) que tardan las ondas ultrasónicas, con una frecuencia de 30 kHz, en recorrer la distancia que separa el palpador emisor del

receptor. Los palpadores se colocarán totalmente enfrentados entre sí, cada uno en uno de los dos extremos de las tablas y de forma paralela a estas (Pozo, P. C.; 2013).



Figura 4.5. Equipo de ultrasonido sylvatest Trío

4.2.1.2. Fakopp Microsecond Timer

Este método no destructivo, se usa para detectar el tamaño y localización de zonas huecas o podridas en el interior de un tronco, madera... usando varios sensores situados en su circunferencia que miden la velocidad del sonido, esta velocidad es más baja en las zonas huecas o corroídas.

Este equipo de ultrasonidos se basa en la generación de ondas ultrasónicas provocadas por impacto, y se distingue del anterior en la frecuencia de emisión de la onda acústica (23 kHz) y en la forma de producirla, ya que es por excitación mecánica mediante un golpe sobre uno de los sensores (Carballo, et al 2009).



Figura 4.6. Equipo de ultrasonido Fakopp

El equipo mide el tiempo (en microsegundos) que tarda la onda ultrasónica en llegar del palpador emisor (el que recibe el impacto con un martillo de silicona) al palpador receptor. Estos palpadores, previamente se han dispuesto sobre las probetas de forma paralela en el caso de las vigas macizas y oblicua en el caso de las vigas dúo y trío reforzadas con fibra de carbono, gracias a que éstos, tienen forma de clavo y permiten clavarlos sobre la madera sin problemas.

La medición en el caso de las vigas dúo y trío encoladas y reforzadas con fibra de carbono, se realiza de manera oblicua para medir el tiempo que transcurre la onda en llegar desde la tabla superior a la inferior, atravesando la línea de cola y la fibra de carbono. Aunque el resultado pueda variar de las mediciones obtenidas sobre la madera maciza, debemos tener en cuenta que esta diferencia será mínima pues la onda tiene que atravesar la cola y la fibra de carbono en un espacio mínimo en comparación con la longitud total de la viga, por lo que el resultado variará, pero no de manera significativa.

Estos palpadores están conectados al equipo de medición mediante cables que transmiten la información al display.

La presión de contacto entre el palpador y la madera también es determinante en la intensidad de la señal recibida, existiendo un requerimiento mínimo (DUOS, 2.005). De ahí la ventaja del empleo de palpadores que se clavan, porque además de asegurar un contacto óptimo, la presión existente es suficiente y constante (Díaz, M.A.; 2012).

4.2.2. Equipo de vibraciones: PLG (Portable Lumber Grader)

El equipo PLG (Portable Lumber Grader) está formado por un ordenador con un software adecuado, balanza, micrófono, apoyo de poliuretano, amplificador y martillo, en la figura 4. 7. se muestra esquemáticamente la instalación del equipo para un correcto funcionamiento del mismo.

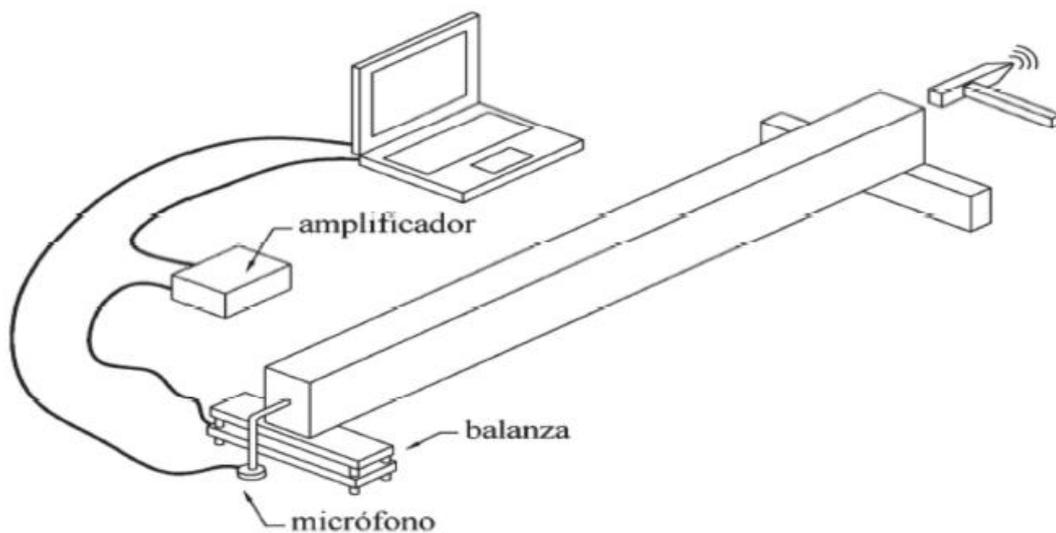


Figura 4.7. Fotografía ilustrada con los equipos PLG

Este equipo permite clasificar la madera según la normativa UNE-EN-338:2010 para la clasificación resistente de madera estructural a través de la determinación del Módulo

de Elasticidad Dinámico y la densidad de cada pieza (Casas, P.; 2010). En la siguiente figura 4.8. se puede observar el equipo PLG y sus accesorios.



Figura 4.8. Equipo de vibraciones inducidas PLG en funcionamiento

4.2.3. Máquina universal de ensayos (Ibertest)

Para la realización de los ensayos destructivos de las muestras, se ha empleado la máquina universal de ensayos E.L.I.B.-100W Ibertest.

Esta máquina se compone de un potro o bancada de fundición de grandes dimensiones y gran peso que evita el movimiento de las muestras de grandes dimensiones cuando la máquina está trabajando. Sobre la bancada se disponen una serie de accesorios para la realización de los ensayos con probeta de menores dimensiones.

La máquina se encuentra conectada a un ordenador que dispone de un software específico donde se introducen las condiciones concretas de cada ensayo, permite recoger los datos obtenidos y manejar la máquina dependiendo de las circunstancias de cada ensayo.

Para este estudio fin de Máster se ha necesitado calcular el MOEG y el MOR según la norma UNE-408 que son ensayos que miden la flexión en los cantos de las probetas, para lo que se ha necesitado equipar a la máquina con un accesorio metálico longitudinal respecto de la posición en la que se van a colocar las probetas y que dispone de dos puntos que aplicarán la carga.

Para la medición del MOEG. se emplea otro accesorio denominado extensómetro, que mide la deformación del punto medio de la probeta, situado en el centro del canto de la misma.



Figura 4.9. Máquina universal de ensayos Ibertest ELIB-100W

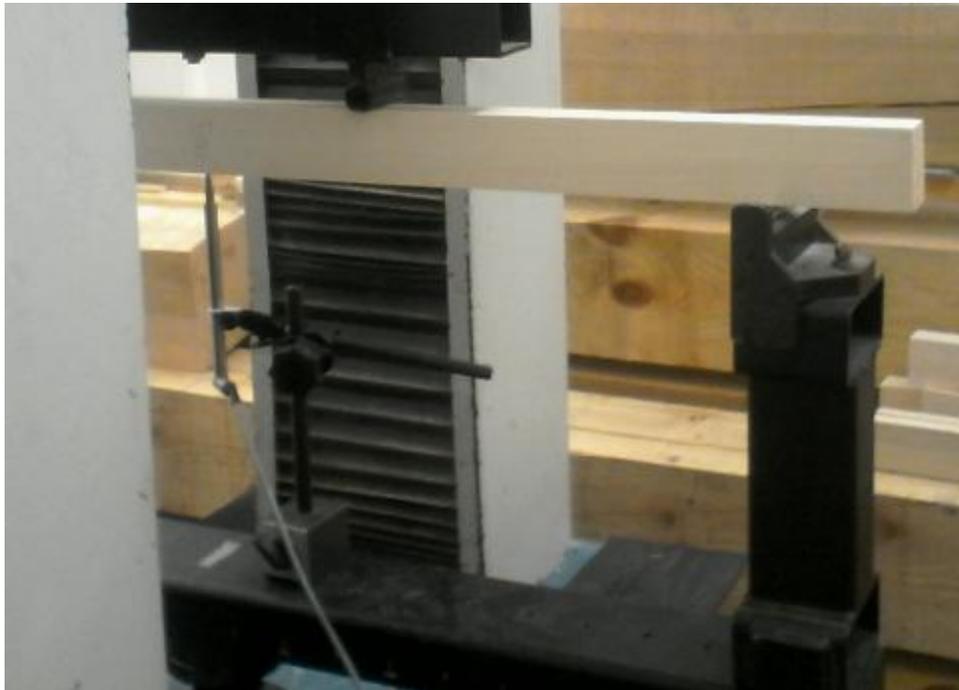


Figura 4.10. Extensómetro utilizado

Las probetas se colocan sobre dos apoyos que se desplazan sobre un carril metálico situado sobre el suelo en función de las dimensiones de las probetas.

El manejo de la máquina se realiza desde el ordenador, donde se introducen las condiciones del ensayo y las dimensiones de la viga, mediante el “*Programa de software WINTEST 32 para ensayo de materiales*”.

4.2.4. Otro tipo de material

Además de los equipos y máquinas utilizados para la realización de los ensayos, se han utilizado una serie de herramientas auxiliares con las que se han realizado las medidas de todas y cada una de las probetas, se han marcado, etc.

Se ha marcado y medido previamente al ensayo la longitud de cada una de las probetas, y una vez ensayadas se ha medido una sección de cada una de ellas cortadas previamente con las medidas reflejadas en la norma, para el cálculo de su densidad.

El material y herramientas auxiliares utilizadas son:

- Cinta métrica: con una precisión de 1mm, se ha utilizado para realizar todas las mediciones de la clasificación visual de cada una de las probetas (dimensiones, singularidades, etc). En los ensayos ultrasonidos se usa para medir la distancia a la que decían ponerse los palpadores, y en el de flexión para la colocación correcta de las vigas en la máquina universal.



Figura 4.11. Cinta métrica

- Rotulador: para identificar cada una de las vigas dúo en las caras y testas de cada probeta.
- Taladro y broca de 5 mm: se han realizado en las testas de la probeta unos agujeros de ese diámetro, para colocar los palpadores y realizar el ensayo de ultrasonidos con el equipo sylvatest Trío.



Figura 4.12. taladro

- Xilohigrómetro: con este aparato se realiza la medición de la humedad de la madera (si ésta es superior al 8%). Este dato era necesario para introducirlo en el software informático del equipo de vibración PLG y realizar la corrección por contenido de humedad.



Figura 4.13. Xilohigrómetro

- **Balanza** (Gran precisión. STB-10K): se trabaja con una precisión de 0,01 gramos, se ha utilizado para medir el peso de las probetas del ensayo de densidad y humedad.



Figura 4.14. Balanza

Todos los equipos e instrumentos descritos en este apartado pertenecen y han sido facilitados por el Laboratorio de Maderas de la E.T.S.I.I. Agrarias de Palencia (Universidad de Valladolid).

4.3. Metodología empleada

4.3.1. Descripción general

Se inicia el análisis de un lote de 32 probetas dúo reforzadas con su identificación mediante una numeración correlativa. Se realiza en cada probeta las mediciones oportunas (longitud, anchura, espesor, peso, humedad), para posteriormente sacar la densidad oportuna de cada pieza y realizar los cálculos que vengan a cuento.

Posteriormente se realiza la clasificación visual según la norma española *UNE-56544:2007 Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas*. Dicha norma se encarga de realizar un sistema para clasificar visualmente la madera aserrada estructural en función de las características y singularidades de la madera.

Una vez realizada la clasificación visual, se hace el ensayo de vibraciones inducidas mediante el equipo PLG (Portable Lumber Grader). Al realizar dicho ensayo se obtienen el Módulo de Elasticidad Dinámico y la densidad y se asigna una clase resistente a cada viga. Antes de realizarlo se tuvo que tomar el dato de la densidad con el xilohigrómetro para introducirla como dato en el software informático del PLG.

A continuación se realizan los ensayos de ultrasonidos, para comenzar utilizamos el sylvatest Trio® y seguidamente el Fakopp. Con ambos equipos se ha realizado la medición del tiempo de transmisión de la onda sónica en lectura directa de testa a testa.

Para finalizar todos los ensayos, se realiza el destructivo, en el cual se posiciona la viga en la Máquina Universal de Ensayos Ibertest para determinar el Módulo de Elasticidad Global a Flexión (MOEG) y la resistencia a flexión estática (MOR).

Los datos obtenidos en cada uno de los ensayos tanto destructivos como no destructivos, se van introduciendo en una hoja EXCEL XP, agrupándose en una única hoja con cada uno de los ensayos ordenados, con sus determinadas unidades, para finalmente realizar el tratamiento estadístico con el programa informático STATGRAPHICS®.

4.3.2. Medición de las probetas

Lo primero que se ha hecho es nombrar cada una de las probetas para tenerlas localizadas y no confundirnos a la hora de referirnos a cada una de ellas.

Para la realización de la medición de cada una de las probetas, se ha utilizado una cinta métrica, para poder medir las distintas variables que utilizaremos posteriormente para diferentes cálculos. Se toman la longitud, el ancho y el espesor de cada una de ellas.

Además mediante la balanza, se pesa cada una de las piezas. Además se toma la humedad de cada pieza con un xilohigrómetro.



Figura 4.15. Numerando cada una de las probetas

4.3.3. Clasificación visual de la madera

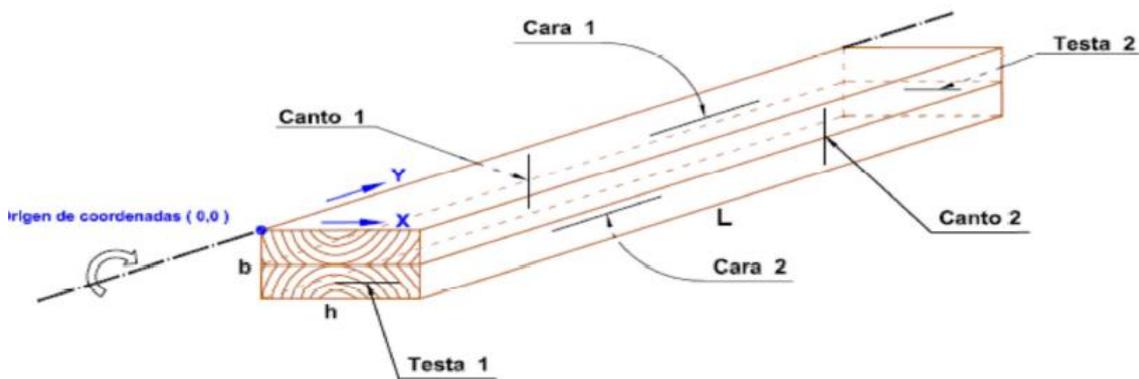


Figura 4.16. Esquema de medición de las piezas. L=longitud; h= anchura; b= espesor

La norma UNE 56544:2007 *Clasificación visual de la madera para uso estructural. Madera de coníferas* nos sirve para realizar la clasificación visual de las probetas dúo reforzadas. Esta norma es de aplicación a la clasificación de la madera aserrada de sección rectangular destinada a usos estructurales de las principales especies de coníferas españolas. Además recoge las combinaciones entre especie y calidad, y sus respectivas clases resistentes consideradas en la norma UNE-EN 338.

Esta norma hace la clasificación de la madera estructural en función de sus características y singularidades que pueden cuantificarse de forma visual; algunas de ellas tienen relación con las particularidades de crecimiento del árbol (presencia y tamaño de nudos, desviación de la fibra, fendas, anillo de crecimiento, deformaciones de la pieza, etc.), otras tienen relación con las circunstancias particulares del aserrado (gemas) o el estado fitosanitario de la madera (azulado, pudrición).

Se ha tomado la probeta dúo como una unidad, y de acuerdo con dicha norma, se ha identificado cada singularidad, dimensiones y posición que ocupan dentro de la pieza. Las probetas han sido numeradas de la primera hasta la 32. Se ha marcado cada una de las caras y sus testas, siguiendo el esquema de la figura 4.15.

4.3.3.1. Principios de la clasificación de la madera aserrada

La clasificación de la madera aserrada de uso estructural que determina su calidad resistente se basa en la evaluación de las siguientes características y singularidades:

A. Características generales:

- Contenido de humedad
- Densidad
- Dimensiones

B. Singularidades ligadas a la anatomía de la madera:

- Nudos
- Bolsas de resina
- Entrecasco
- Fendas
- Desviación de la fibra
- Madera de reacción y juvenil
- Anillos de crecimiento

C. Singularidades ligadas al aserrado de las piezas:

- Gemas
- Médula

D. Alteraciones de tipo biológico que puede presentar la madera:

- Alteraciones por hongos (azulado, pasmo, pudriciones,etc.)
- Alteraciones por plantas parásitas (muérdago)
- Alteraciones por insectos xilófagos.

E. Deformaciones de las piezas:

- Curvatura de cara
- Curvatura de canto
- Abarquillado
- Alabeo

4.3.3.2. Criterios de medición de las características y singularidades de la madera

Dimensiones:

En el contexto de esta norma se denomina anchura de cara (h) a la mayor dimensión perpendicular al eje longitudinal de una pieza de madera, y espesor (b), o grosor (también a veces llamado canto), a la distancia entre caras de una pieza de madera aserrada (ver figura 4.15).

Medición de nudos:

Los diámetros de los nudos se miden perpendicularmente al eje longitudinal de la pieza.

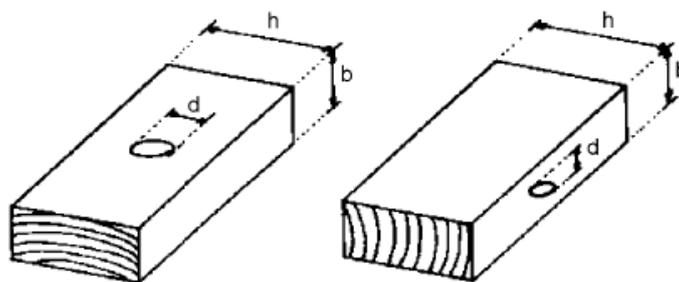


Figura 4.17. Criterio general de nudos en cara y canto

Los nudos que presenten un diámetro inferior o igual a 10 mm pueden despreciarse, excepto los pasantes, se denominan de esta forma a los que se manifiestan en al menos dos superficies opuestas.

También se desprecian los nudos superficiales de la cara interna, aquella que se encuentra más cerca de la médula y la contiene o está muy próxima a ella. Si aparecen en la arista o en el canto se miden y evalúan como nudo de arista o de canto respectivamente, véase en la siguiente figura.

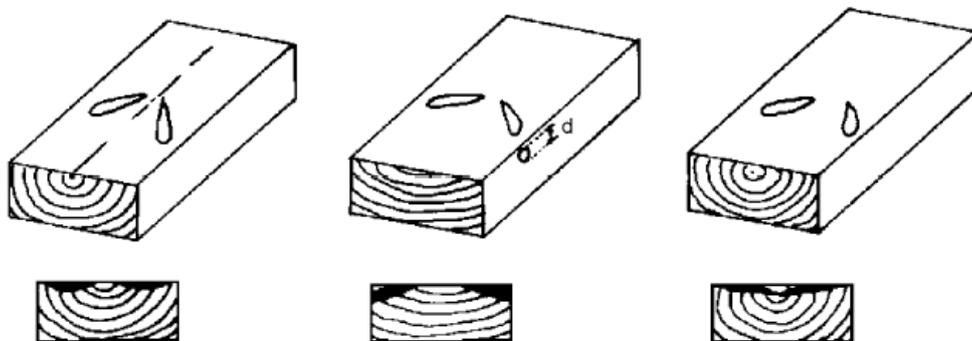


Figura 4.18. Nudos superficiales de la cara interna

La corteza presente alrededor de un nudo también se incluye en la dimensión del mismo.

Los nudos de arista son aquellos que se manifiestan en dos superficies contiguas, cara y canto. Se miden y evalúan en aquella superficie que los corte más perpendicularmente, se puede observar en la figura 4.18. En caso de duda se toma la relación que resulte más desfavorable (entre $d1/b$ y $d2/h$), véase la figura 4.19.

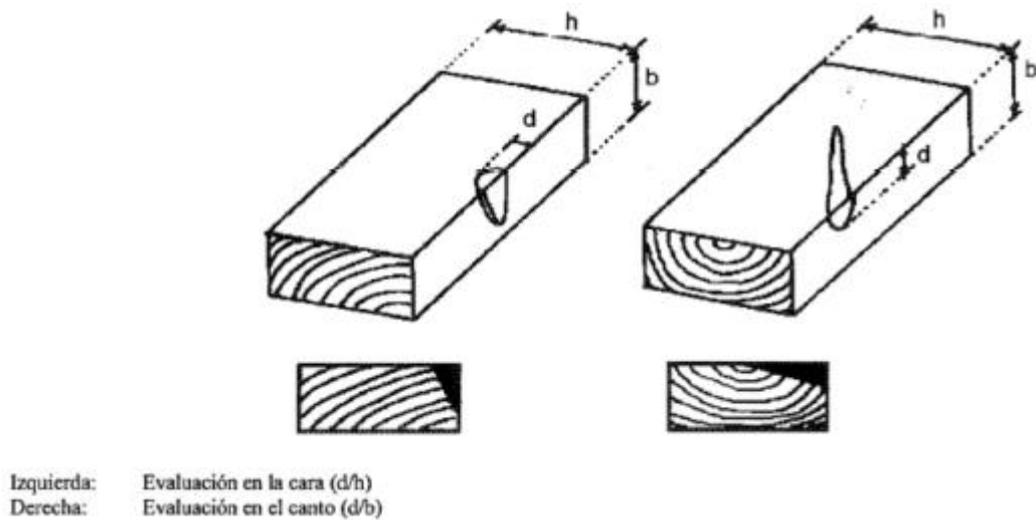


Figura 4.19. Criterios de medición y evaluación de nudos de arista

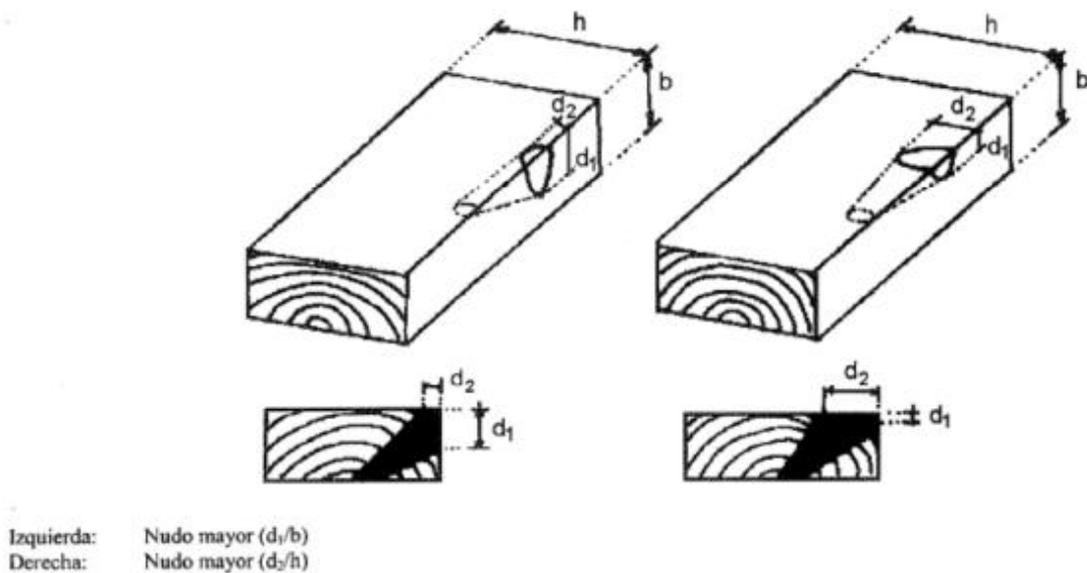
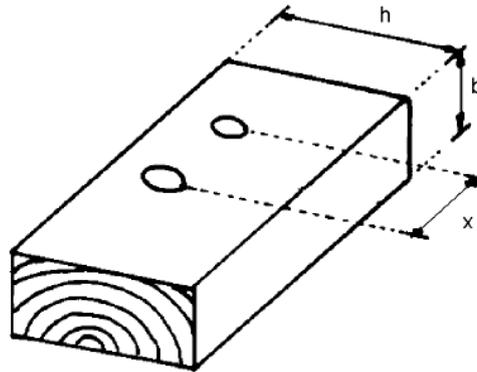


Figura 4.20. Criterios de medición y evaluación de los nudos de arista cuando existen dudas para su evaluación

Los nudos agrupados sobre la cara o el canto, son aquellos cuya distancia entre centros, medida según el eje longitudinal de la pieza, sea menor o igual que 150 mm,

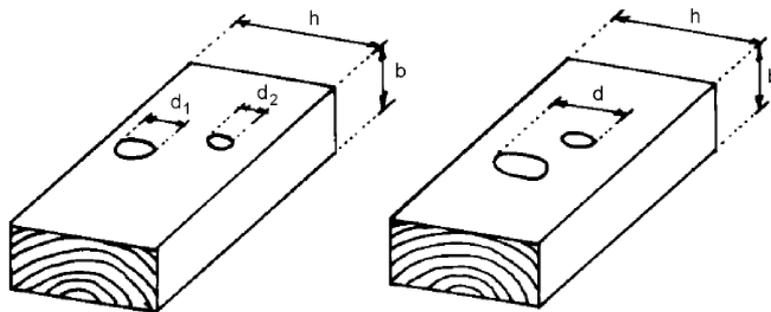
o menor o igual a la anchura de la pieza cuando ésta sea menor de 150 mm, se puede observar en la siguiente figura.



Nudos agrupados si $x \leq 150$ mm para $h \geq 150$ mm y $x < h$ para $h < 150$ mm.

Figura 4.21. Criterio de definición de nudos agrupados

Cuando los nudos agrupados no se solapan sobre la dirección perpendicular al eje longitudinal de la pieza, se miden por la suma de sus diámetros. Cuando los nudos agrupados se solapan sobre la dirección perpendicular al eje longitudinal de la pieza, se miden globalmente.



Izquierda: Diámetro del nudo: $d = d_1 + d_2$
Derecha: Diámetro del nudo: d

Figura 4.22. Criterios de medición de nudos agrupados

Entrecasco:

Se miden según su longitud (en mm), en la dirección paralela al eje de la pieza.

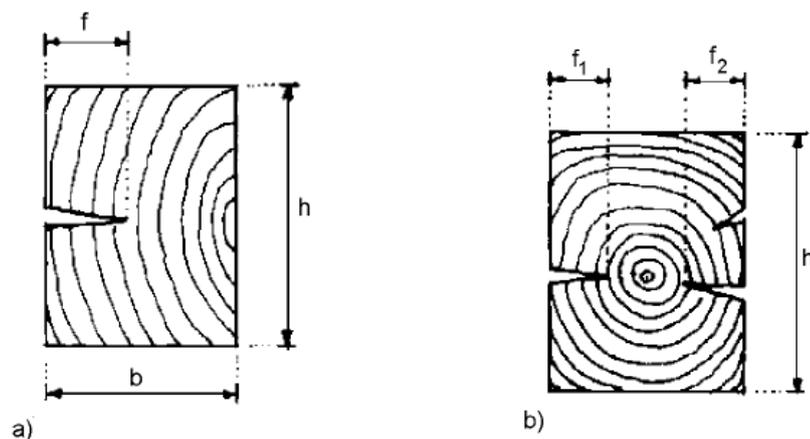
Fendas:

Las fendas son las separaciones de las fibras (raja o hendidura), en dirección longitudinal.

Una fenda es pasante cuando se extiende entre dos superficies opuestas. Según la superficie donde se manifiesten, las fendas pueden ser de cara, de canto o de testa. Las fendas de cara o de canto pueden afectar o no a las testas.

Solo son permitidas las fendas de contracción y en los términos considerados en la tabla de especificaciones de la norma UNE 56544:2007.

La medición es realizada con una galga de 0,2 mm de espesor. No hay que tener en cuenta cuando las fendas tengan una longitud inferior a la menor dimensión de 1/4 de la longitud de la pieza, o de 1 m. Las fendas cuyas anchura sea menor de 1 m quedan despreciadas.



Izquierda: Evaluación de la fenda: f/b
Derecha: Evaluación de las fendas: $(f_1 + f_2)/b$

Figura 4.21. Criterio de medición de fendas

Acebolladuras:

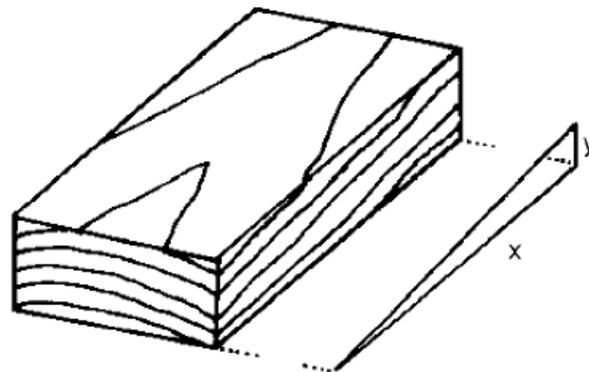
Las acebolladuras son la separación total o parcial de dos anillos de crecimiento contiguos. Es fácilmente reconocible en la sección transversal. Se toma nota de su presencia o ausencia.

Desviación de la fibra:

Se refiere a la desviación general, despreciándose la desviación local producida en el entorno de los nudos.

Se denomina desviación de la fibra a su desviación media respecto del eje longitudinal de la pieza. Ésta se mide sobre 1 m de longitud en la zona más desfavorable.

la desviación de la fibra se expresa como el cociente entre la desviación de la fibra y la longitud sobre la que se ha realizado la medición.



Medición de la desviación: y/x

Figura 4.22. Medición de la desviación de la fibra

Gemas:

Es la superficie redondeada general de un tronco con, o sin corteza, que se manifiesta sobre las aristas de la pieza de madera aserrada.

Se evalúa por su longitud (L) y por su dimensión transversal en relación a la longitud de la pieza y a las dimensiones de la sección (g), respectivamente, en la sección de máxima pérdida de arista. Si la gema se manifiesta en más de una zona de una misma arista, se suman las diferentes longitudes.

Evaluación de la sección transversal:

$$g = \text{máx.} \left(\frac{h - h_1}{h}, \frac{b - b_1}{b}, \frac{b - b_2}{b} \right)$$

Las anteriores variables significan:

- b y h : Grosor y anchura respectivamente.
- $h-h_1$, $b-b_1$ y $b-b_2$: grosor y anchura de las gemas respectivamente.

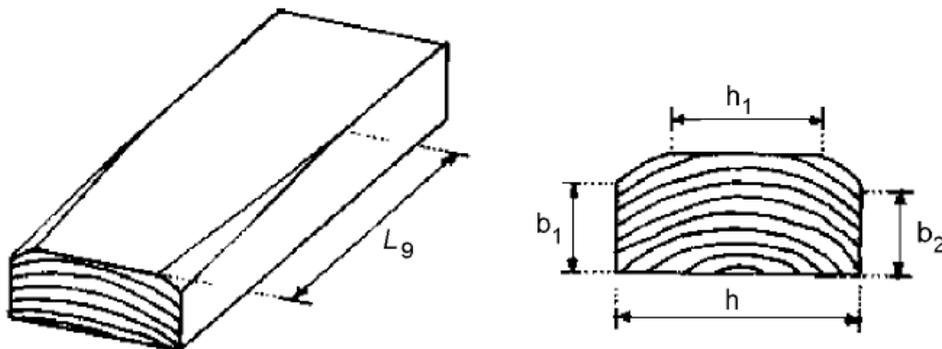


Figura 4.23. Medición y evaluación de las gemas

Médula:

Es una zona situada en el interior del primer anillo de crecimiento, constituida fundamentalmente de tejido blando. Se evalúa su presencia o ausencia.

Deformación de las piezas:

Hay tres formas de deformación de las piezas:

- Curvatura de cara y canto: Hay que medir la deformación máxima en un tramo de 2 m de longitud. Si la longitud de la pieza es menor de 2 m, se mide entre los extremos de la misma. El resultado es expresado en mm por cada 2 m de longitud.
- Alabeo: se evalúa como la deformación máxima de la superficie sobre la longitud representativa de 2 m. El resultado es expresado en mm por cada 25 mm de anchura.
- Abarquillado: se evalúa como la deformación máxima sobre la anchura de la sección. El resultado es expresado en mm por cada 25 mm de anchura o como fracción de la anchura total de la cara.

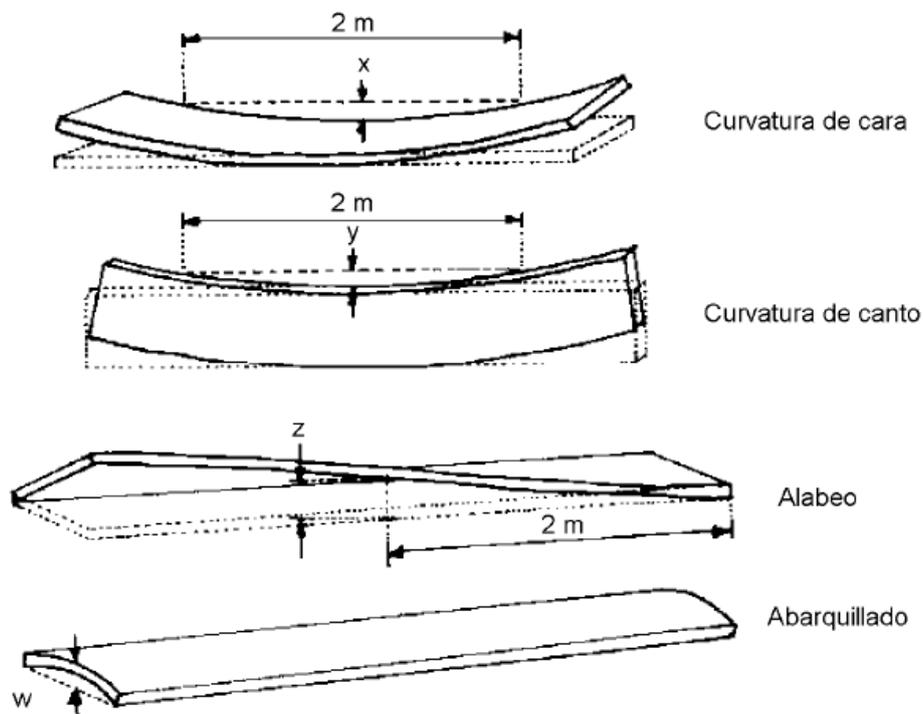


Figura 4.24. Medición de las deformaciones

Madera de reacción:

Es un tipo de madera que presenta características anatómicas diferenciadas, formada normalmente en partes de ramas y troncos inclinados y curvados sometidas a tensiones elevadas, cuando el árbol intenta coger su posición actual.

Se evalúa midiendo la longitud y la anchura en el rectángulo que queda inscrita, y se expresa como la fracción de la sección o de la superficie que ocupa referida a la sección o superficie total.

Madera juvenil:

Afecta a especies de coníferas en los primeros anillos de crecimiento. Estructura anatómica diferente de la madera adulta. Presenta valores elevados de la contracción longitudinal.

No existen métodos prácticos y objetivos para la evaluación de su presencia, la norma no introduce limitación directa alguna a su presencia aunque si establece un mecanismo indirecto para limitarla cuando la madera se clasifica y comercializa en condición húmeda.

Anchura del anillo de crecimiento:

No hay una relación estadísticamente significativa entre el tamaño medio de los anillos de crecimiento y la resistencia de la madera.

Cuando los anillos de crecimiento son verdaderamente anchos, quiere decir de la existencia de madera juvenil. La norma incluye una limitación sobre la anchura del anillo, aplicable solo cuando la madera se clasifica y comercializa húmeda.

La anchura máxima del anillo se determina en el segmento más largo que se puede trazar perpendicularmente a los anillos de crecimiento y que atraviesa a la pieza transversalmente.

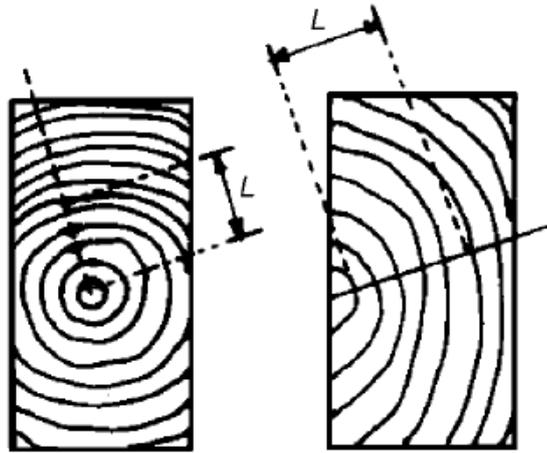


Figura 4.25. Medición de la anchura máxima del anillo

4.3.3.3. Clasificación mediante la norma (española) UNE-56544:2007

En esta norma se establecen dos calidades para las piezas con grosor menor o igual a 70 mm, denominadas ME-1 y ME-2 (en las que las siglas ME significan Madera Estructural), siendo las características admisibles para cada clase de calidad las que se especifican en la tabla 2. Para las piezas con espesor mayor que 70 mm, la norma establece una única calidad denominada MEG (la sigla G significa Gruesa escuadría), cuyas especificaciones se recogen en la tabla 3.

Si las piezas de madera clasificadas sufren una mecanización posterior (cepillado, desdoblado o corte) que modifique su espesor o su anchura, la reducción de las dimensiones respecto de las medidas nominales no debe ser superior a la considerada en la tabla 4.1. Si la reducción fuera superior, la madera debe volver a clasificarse con relación a sus nuevas dimensiones.

DIMENSIONES "c" (Espesor o anchura de cara en mm)	$c \leq 50$	$50 < c \leq 100$	$100 < c \leq 150$	$c > 150$
Reducción máxima del espesor o anchura de cara en mm	1,5	3	5	6

Tabla 4.1. Reducción dimensional máxima permitida en piezas ya clasificada

CRITERIOS DE CALIDAD		ME-1	ME-2
DIÁMETRO DE LOS NUDOS SOBRE LA CARA (h)		$d \leq 1/5$ de "h"	$d \leq 1/2$ de "h"
DIÁMETRO DE LOS NUDOS SOBRE EL CANTO (b)		$d \leq 1/2$ de "b" y $d \leq 30$ mm	$d \leq 2/3$ de "b"
ANCHURA MÁXIMA DEL ANILLO DE CRECIMIENTO ⁽¹⁾			
– Pino silvestre		≤ 4 mm	Sin limitación
– Pino laricio		≤ 5 mm	Sin limitación
– Pino gallego y pinaster		≤ 8 mm	Sin limitación
– Pino insigne (radiata)		≤ 10 mm	Sin limitación
		$f \leq 2/5$	$f \leq 3/5$
FENDAS	De secado ^{(2) (3)}	Las fendas de secado sólo se consideran si su longitud es mayor que la menor de las dimensiones siguientes: 1/4 de la longitud de la pieza y 1 m.	
	– Rayo – Heladura – Abatimiento	No permitidas	
ACEBOLLADURAS		No permitidas	
BOLSAS DE RESINA y ENTRECASCO		Se admiten si su longitud es menor o igual que 1,5·"h"	
MADERA DE COMPRESIÓN		Admisible en 1/5 de la sección o de la superficie externa de la pieza	Admisible en 2/5 de la sección o de la superficie externa de la pieza
DESVIACIÓN DE LA FIBRA		1:10 (10%)	1:6 (16,7%)
GEMAS			
– longitud		$\leq 1/4$ de "L"	$\leq 1/3$ de "L"
– dimensión relativa		$g \leq 1/4$	$g \leq 1/3$
MÉDULA ⁽¹⁾		Admitida No admitida si se clasifica en húmedo	Admitida
ALTERACIONES BIOLÓGICAS			
– Muérdago (<i>V. album</i>)		– No se admite	
– Azulado		– Se admite	
– Pudrición		– No se admite	
– Galerías de insectos xilófagos		– No se admiten	
DEFORMACIONES MÁXIMAS ^{(2) (3) (4)}			
– Curvatura de cara		10 mm (para una longitud de 2 m)	20 mm (para una longitud de 2 m)
– Curvatura de canto		8 mm (para una longitud de 2 m)	12 mm (para una longitud de 2 m)
– Alabeo		1 mm (por cada 25 mm de "h") (para una longitud de 2 m)	2 mm (por cada 25 mm de "h") (para una longitud de 2 m)
– Abarquillado		sin limitación	sin limitación
<p>(1) Estos criterios sólo se consideran cuando se comercializa en húmedo.</p> <p>(2) Estos criterios no se consideran cuando la clasificación se efectúa en húmedo.</p> <p>(3) Referidas a un 20% de contenido de humedad.</p> <p>(4) Puedan aceptarse deformaciones mayores siempre que no afecten a la estabilidad de la construcción (porque puedan corregirse durante la fase del montaje) y exista acuerdo expreso al respecto entre el suministrador y el cliente.</p>			

Tabla 4.2. Especificaciones para la clasificación de piezas de sección rectangular con anchura $b \leq 70$ mm

4.3.4. Ensayo de vibraciones inducidas: PLG (Portable Lumber Grader)

Una vez que ya se ha realizado la clasificación visual, con el seguimiento exhaustivo de cada uno de los pasos, hemos comenzado a realizar el ensayo de vibraciones inducidas con el equipo PLG (Portable Lumber Grader).

Según Casado, M. *et al.* (2007) es un método de vibraciones inducidas basado en principios similares a la técnica de ultrasonidos, relaciona la velocidad de propagación de una onda (provocada por un impacto) con el módulo de elasticidad. El equipo registra la frecuencia de resonancia de una onda provocada por el impacto de un martillo en la madera, determina el Módulo de Elasticidad Dinámico y asigna una clasificación estructural según la norma EN 338.

Este método es válido tanto para coníferas como para frondosas, si trabajamos con chopo, se debe ensayar de tal manera como si fuese una conífera, ya que son muy parecidas ambas propiedades resistentes y el número de errores obtenidos al realizar los cálculos desciende considerablemente.

Parámetros:

Antes de realizar el ensayo de PLG, hay que poner en el programa informático una serie de parámetros; permitiendo así un correcto funcionamiento del equipo y la buena aplicación de clasificación según las características que tenga cada pieza. Los parámetros de los que hablamos, son los siguientes:

- Dimensiones de la pieza: de cada muestra, se introduce la longitud, el ancho y el espesor expresados en cm. Con tales datos el programa del equipo calcula la densidad.
- Nivel de ruidos y eco: el nivel de eco del lugar donde se efectúa el ensayo debe ser tenido en cuenta, ya que provoca alteraciones en la medida de la frecuencia de la onda. El software del PLG diferencia entre el ruido de fondo y la señal de graduación. El nivel de ruido establece correctamente que la

evaluación automática comience sólo si la vibración longitudinal es generada por el impacto de un martillo en la pieza.

- Diferencia de humedad: es la diferencia entre el contenido de humedad que tiene la madera actualmente y el contenido de humedad en un futuro en las condiciones de servicio de la madera expresado en porcentaje.

El PLG está calibrado para un contenido de humedad en la madera de un 12%.

- Grupo de especies: debido a que la estructura interna de cada tipo de madera influye en la velocidad de propagación de la onda. El equipo permite distinguir solamente entre coníferas y frondosas. Como hemos indicado al inicio de este apartado, con la especie trabajada, *Populus x euroamericana* se incluye dentro del grupo de las coníferas para realizar el ensayo.

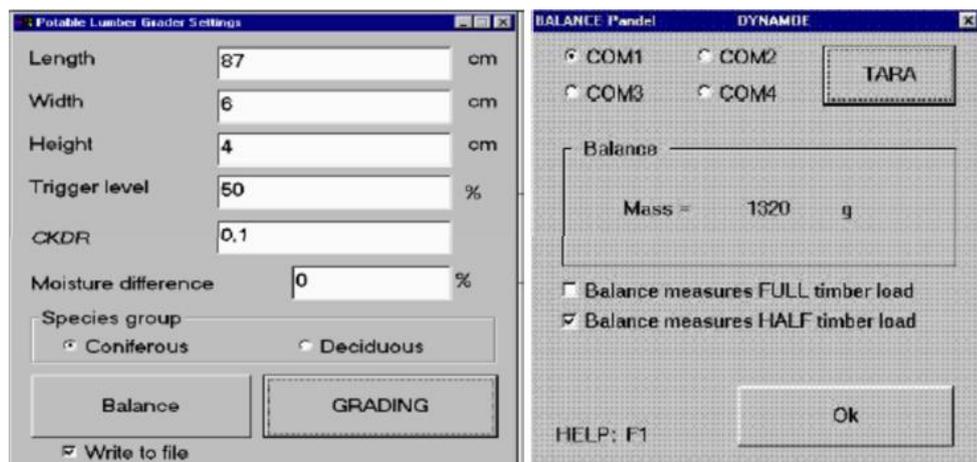


Figura 4.26. Introducción de datos y selección de opciones y ajuste de balanza con el PLG

- Balanza: se selecciona el puerto 1 (COM1), que aparece por defecto en el programa, y se obtiene el peso de la viga. Dependiendo de si la viga es más o menos larga, el programa permite determinar si se selecciona la mitad del peso (HALF), para longitudes mayor de 2 metros, o el peso total para longitudes

inferiores a los 2 metros. En este estudio se ha seleccionado la primera opción, ya que se trabaja con vigas de 4 metros de longitud.

- **Clasificación:** cuando ya he medido los datos anteriores oportunos, doy un golpe con el martillo en una testa de la viga y aparecen los datos obtenidos (onda vibracional, transformación FFT de la onda, módulo de elasticidad, densidad, dimensiones introducidas y clasificación resistente de la madera). También se analiza el sonido de la frecuencia de la vibración, por el equipo PLG, mediante un análisis del espectro.

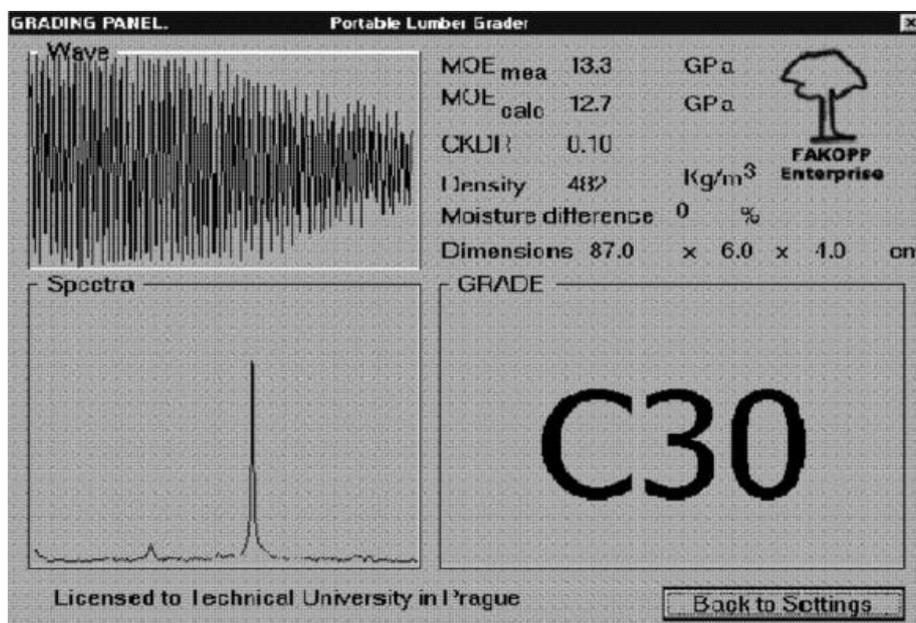


Figura 4.27. Pantalla final de resultados

Técnica del impacto:

El ensayo PLG, consiste en provocar una vibración en la probeta dúo como consecuencia del golpe dado por un martillo en el extremo opuesto de la testa, adonde está ubicado un micrófono. El impacto dado a la pieza no debe ser muy débil, ya que no sería registrado. Tampoco tiene que ser exceso de fuerte, ya que se produciría una

saturación de sonido. A ser posible el golpe debe ser lo más paralela posible a la dimensión principal de la pieza.



Figura 4.28. Ensayo PLG designando cada uno de los elementos que lo componen

Metodología de ensayo:

Para seguir con el ensayo, describimos la metodología a seguir para realizar el ensayo. Se coloca la probeta dúo de canto sobre dos apoyo rígidos que constan unas bandas almohadilladas de poliuretano para que no se tengan en cuenta las vibraciones que se puedan producir.

Uno de los apoyos tiene la función de ser una balanza (tarada previamente), registrando la mitad de la masa de la pieza y el otro, es simplemente un apoyo.

En el otro extremo de la balanza, se sitúa el micrófono, cercano a la testa de la viga, pero que no está en contacto con ella.

Cuando se ha colocado correctamente la viga, se introducen los parámetros oportunos en el programa, procediéndose posteriormente a golpear con el martillo a la viga por una de las testas (testa opuesta a donde esté colocado el micrófono). El programa estima la frecuencia de vibración, y con la ayuda de los parámetros metidos al software anteriormente, el programa nos calcula la densidad (kg/m³), la velocidad (m/sg), el Módulo básico de elasticidad dinámico (MOEd o E_{dyn}) en GPa, y asigna una clase resistente de acuerdo a la norma UNE 338.

Se han obtenido resultados de densidad, frecuencia, velocidad y Módulo de elasticidad dinámico para cada una de las láminas de madera que forman la viga dúo. Con dichos datos se ha realizado el valor medio de cada uno de ellos para cada viga.

Descripción de la técnica:

Con el ensayo PLG lo que se quiere obtener es el módulo de elasticidad dinámico longitudinal, que es calculado por el mismo programa, utilizando la ecuación de la onda de vibración longitudinal de una barra delgada libre de soportes, mediante la siguiente expresión:

$$E_{dyn} = \left(2 \cdot L \cdot \frac{fn}{n} \right) \cdot \rho$$

Las anteriores variables significan:

- E_{dyn} : Módulo de Elasticidad dinámico (GPa)
- L : Longitud de la pieza (m)

- f_n : Frecuencia de la resonancia (Hz)
- n : modo de vibración (1: fundamental, 2: armónico)
- ρ : la densidad (kg/m³)

La velocidad de la onda en la dirección longitudinal en el modo armónico ($n=1$), corresponde a la velocidad del sonido a lo largo de una barra uniforme y viene dada por la siguiente expresión:

$V = 2 L f$, siendo V la velocidad de propagación longitudinal de la onda en m/s.

A partir de la siguiente ecuación, el PLG analiza el sonido de la frecuencia de la vibración.

$$E_{dyn} = 0,92 \cdot \rho \cdot (2 \cdot L \cdot f_1)^2 \cdot \left(1 + \frac{\Delta H}{50} \right)$$

Las anteriores variables significan:

- ΔH la diferencia de humedad al 12%.
- 0,92 = coeficiente experimental definido por el software del equipo
- ρ = la densidad
- L = longitud de la pieza
- f_1 : Frecuencia de la resonancia

Por otro lado, la densidad la determinamos a través de esta ecuación:

$$\rho = \frac{m}{L \cdot b \cdot h \cdot \left(1 + \frac{\Delta H}{100} \right)}$$

Las anteriores variables significan:

- L = longitud de la pieza (cm)

- b = ancho de la pieza (cm)
- h = espesor de la pieza (cm)
- m = masa de la pieza (kg)
- ΔH = diferencia de humedad al 12%

Los resultados se corrigen a un valor de referencia de 12% de humedad, ya que la velocidad de propagación y densidad, dependen del contenido de humedad de la madera.

Según la norma UNE 338 hay que asignar la clase resistente, para ello según la siguiente tabla, como se puede observar a través del módulo de elasticidad dinámico y la densidad.

Clasificación	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
E_{dyn} (GPa) o MOEd	7	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13	14	15	16
ρ (kg/m ³)	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550

Tabla 4.3. Clases resistentes para coníferas y chopo a partir de los valores característicos del Módulo de elasticidad dinámico y la densidad

Procesado de la información:

Los resultados que se van obteniendo se fueron anotando en un fichero de la hoja de cálculo Excel, elaborando de esta forma los resultados. Aunque también se iban almacenando automáticamente en el programa PLG.

4.3.5. Ensayos con ultrasonidos (Sylvatest Trio® y Fakopp)

Al haberse realizado el ensayo de vibraciones inducidas con el equipo PLG, se van a someter cada una de las probetas dúo reforzadas con fibra de carbono a un ensayo de ultrasonidos, con el Sylvatest y el Fakopp.

El método de ultrasonidos consiste en generar una onda de frecuencia.

Esta técnica no destructiva, a partir de la velocidad de paso de la onda y con buena estimación de la densidad, permite calcular el módulo de elasticidad en obra y laboratorio (Carballo, *et al* 2009).

4.3.5.1. Descripción de la técnica

Las propiedades físicas de la madera están directamente relacionadas con la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas a lo largo de la madera. Mediante los equipos Sylvatest Trio y Fakopp, se han realizado los ensayos para determinar la velocidad de propagación. Los equipos nombrados, registran el tiempo, medido en μs , que tarda una onda ultrasónica de una frecuencia de 22 kHz (Sylvatest Trio®) y 23 kHz (Fakopp) en recorrer la distancia que separa un palpador emisor de un palpador receptor. Con estos datos obtenidos, hallamos la velocidad:

$$V = L/t$$

Las anteriores variables significan:

- L = distancia entre palpadores (m)
- t = tiempo que tarda el palpador receptor en recibir la onda emitida por el palpador emisor (s). El Sylvatest y el Fakopp obtienen los resultados en μs (10^{-6}s).
- V = velocidad de propagación longitudinal de la onda ultrasónica a través de la madera (m/s).

Partiendo de la velocidad de una onda elástica en una barra y supuesta la elasticidad lineal de la misma, se llega a la expresión de la velocidad de propagación, a partir de la cual se puede despejar y calcular el módulo de elasticidad dinámico (MOEd ó E) conociendo la densidad y la velocidad de la onda.

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Las anteriores variables significan:

- V = velocidad de propagación de la onda (m/s)
- E = módulo de elasticidad dinámico del material (MOE) en (N/mm²)
- ρ = densidad del material ensayado (Kg/m³)

Los valores de la velocidad deben corregirse con el contenido de humedad de cada viga de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$V_{12\%} = \frac{V_H}{1 - 0,0053 \cdot (H - 12)}$$

Las anteriores variables significan:

- $V_{12\%}$ = la velocidad de propagación de la onda (m/s) al 12% de humedad.
- V_H = la velocidad de propagación de la onda (m/s) a la humedad en que se realizaron las medidas.
- H = humedad de la madera (%) a la que se realizaron las medidas.

Una vez hayamos corregido el valor de la velocidad al 12% de humedad, hay que realizar el cálculo del módulo de elasticidad dinámico (MOEd) de las vigas, siguiendo la ecuación siguiente que queda de despejar el MOE en la original:

$$MOEd = \frac{V_{12}^2 \cdot \rho_{12}}{10^6}$$

Las anteriores variables significan:

- $MOEd$ = módulo de elasticidad dinámico (N/mm²)
- $V_{12\%}$ = velocidad de propagación longitudinal de las ondas ultrasónicas a través de la madera (m/s)
- ρ = densidad de la viga ensayada (Kg/m³)

4.3.5.2. Metodología de ensayo con el equipo Sylvatest Trio®

En la realización de este ensayo de ultrasonidos no destructivo, hay que tener en cuenta el lugar de colocación de cada uno de los palpadores en las piezas que vamos a estudiar, porque hay varios métodos de medición. En el presente estudio se han realizado dos métodos, que son:

- Directo: ambos palpadores se introducen en los orificios, de forma perpendicular, en las testas de cada una de las dos tablas que forman la probeta dúo, evitando un poco las zonas que tengas defectos acusados.
- Indirecto: un palpador se introduce en una tabla y el otro en la otra, ambas forman la misma probeta dúo reforzada.

El orificio realizado en las tablas de las probetas dúo reforzadas, es realizado con un taladro con las siguientes dimensiones, un diámetro de 5 mm y una profundidad de 1 cm. En estos agujeros se tiene que introducir la punta del palpador emisor y receptor.



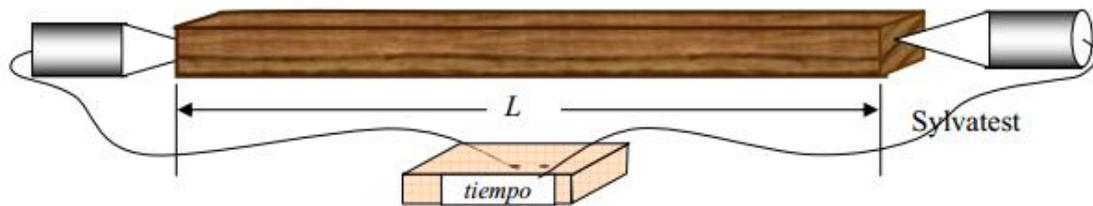
Figura 4.29. Realización de los orificios para introducir las puntas de los palpadores en la realización del ensayo del sylvatest Trio

Para realizar este ensayo no destructivo se han realizado los agujeros en las testas de las tablas que forman la probeta dúo reforzada. Los orificios están situados a 2 cm de ambos extremos de la testa de cada una de las tablas y a 1 cm de los bordes superior e inferior de la testa de la probeta.

Una vez realizados los orificios se introduce la punta de los palpadores de forma que queden enfrentados, para que la onda ultrasónica se propague paralelamente al eje longitudinal de cada lámina de madera, realizándose de este modo dos medidas directas de testa a testa en cada lámina.

Además de las medidas directas se van a realizar las indirectas, de forma que un palpador quede en una tabla y el otro palpador quede en la otra tabla, de la misma

probeta dúo reforzada. De tal manera que la onda ultrasónica tiene que pasar a través de la fibra de carbono, con la que hemos unido las dos tablas de la probeta dúo reforzada.



4.30. Ensayo con el equipo de ultrasonidos sylvatest Trio

4.3.5.3. Metodología de ensayo con el equipo Fakopp

También se ha realizado el ensayo con el equipo de ultrasonido Fakopp, mediante el método directo e indirecto. Se ha seguido un procedimiento muy similar al realizado con el equipo Sylvatest Trio, la diferencia es que no se han realizado agujeros para introducir los palpadores, sino que éstos tienen una terminación en punta afilada, y se han clavado con la ayuda de un martillo de goma.



4.31. equipo Sylvatest Trio (izquierda) y detalle de la colocación del Sylvatest Trio en la testa (derecha)

La señal generada para tomar los resultados, se realiza por el golpeo del emisor o el sensor de entrada. Para cada medida se han realizado dos repeticiones, tomando de ambas su valor medio.

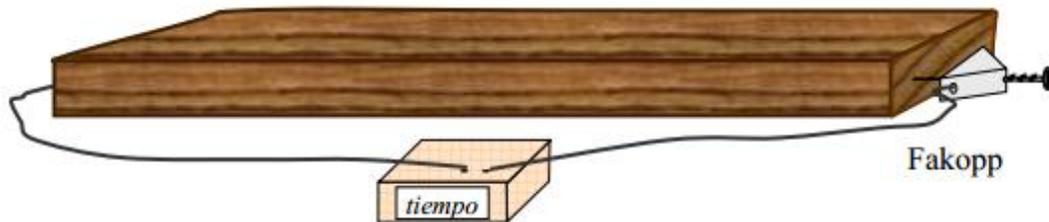


Figura 4.32. Ensayo con el equipo de ultrasonidos Fakopp

4.3.6. Caracterización mecánica de la madera mediante la máquina universal de ensayos (UNE-EN 408:2011)

Los ensayos de flexión se han realizado según la norma UNE-EN 408:2011: "Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas".

Con este ensayo se obtuvieron los siguientes datos para cada viga:

- Módulo de Elasticidad Global (MOEG) en N/mm^2
- Tensión de rotura a flexión (MOR) en N/mm^2

Se ha empleado para ello la máquina universal de ensayos electromecánica, modelo ELIB-100 w de la casa IBERTEST, de 100 kN de carga máxima, existente en el laboratorio de Tecnología de la Madera de la Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias (Universidad de Valladolid). Esta máquina está compuesta por un potro o bancada de grandes dimensiones, en los que están colocados los accesorios necesarios para el ensayo.

En el caso particular de los ensayos a flexión, la máquina posee un travesaño metálico, el cual dispone de dos puntos de carga sobre la viga. La probeta se coloca

horizontalmente sobre el canto en dos apoyos fijos. Estos apoyos han de separarse 18 veces la altura del canto de la viga, según se indica en la norma UNE-EN 408:2004, para esto dichos apoyos se pueden mover a lo largo de un carril metálico situado en el suelo hasta alcanzar la distancia deseada.

Por otro lado, para los ensayos de la determinación del módulo de elasticidad global a flexión (MOEG), debe colocarse un sensor de la deformación o extensómetro sobre soporte vertical.

Las variables de funcionamiento de la máquina para el ensayo se seleccionaron a través del software del ordenador conectado a la máquina, dependiendo del canto de la pieza a ensayar con la velocidad adecuada para que el ensayo se realice según la norma indicada anteriormente.

4.3.6.1. Determinación del módulo de elasticidad global a flexión (MOEG)

Los ensayos para la determinación del módulo de elasticidad global a flexión han sido realizados teniendo en cuenta la norma UNE-EN 408:2011, la cual es aplicable a vigas acondicionadas a atmósferas normalizadas de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ y $65 \pm 5\%$ de humedad relativa. Se considera que la viga está acondicionada cuando ésta llega a un peso constante, es decir, cuando tras dos pesadas sucesivas realizadas en un intervalo de 6 horas no difieren en más de 0,1% de la masa de la probeta.

Para que este ensayo se pueda realizar es necesario que las probetas posean una longitud igual o mayor a 19 veces la altura del canto. En este caso, no se ha eliminado ninguna probeta al cumplir todas estas características.

Los ensayos del módulo de elasticidad global a flexión (MOEG) miden la deformación de la viga en el punto central de la misma, tomando como referencia de la deformación, 18 veces la altura del canto, es decir, la deformación respecto a los apoyos. La pieza es sometida a dos cargas simétricamente colocadas en dos tercios de la luz. Siempre que fuese necesario, se han introducido unos topes laterales para

evitar el vuelco o pandeo lateral de la probeta, de tal forma que permitan la deformación de ésta sin provocar resistencia de rozamiento significativa.

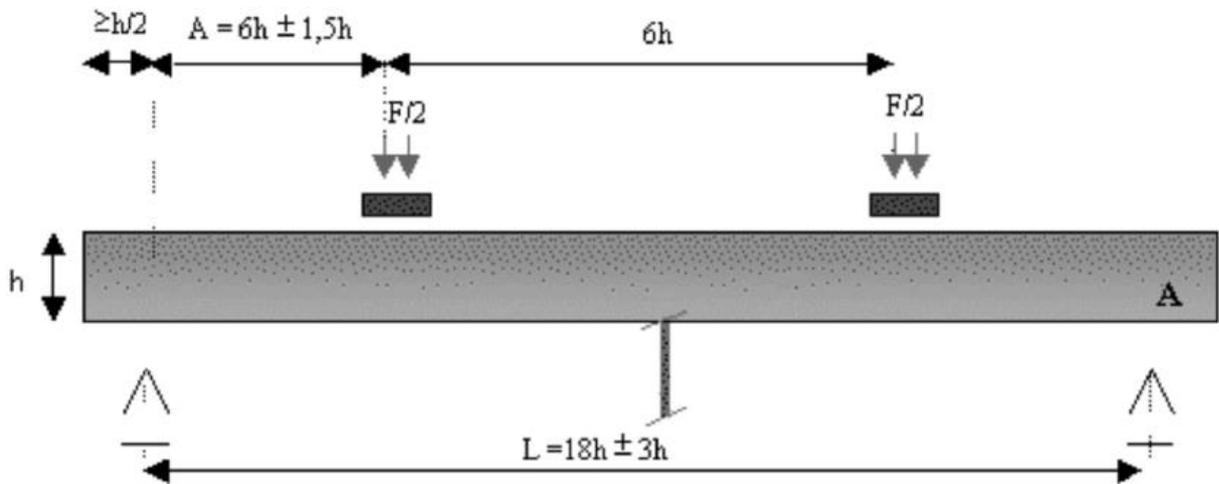


Figura 4.33. Esquema de los ensayos de determinación de Módulo de Elasticidad y tensión de rotura

Lo que parece una i latina mayúscula de la figura 4.34. representa el sensor de la deformación de la viga, que se sitúa en el centro del canto interior, o lo que es lo mismo, en la fibra extrema de la zona traccionada.



Figura 4.34. Instalación del sensor de deformación

Para poder realizar el ensayo correctamente se introducen en el programa informático de la máquina los datos relativos al tipo de ensayo (norma, modo de ensayo, modo de control, velocidad, temperatura, etc.) y los datos de la probeta a ensayar (número de muestra, dimensiones, distancia, etc.). Dentro de los datos del ensayo, la velocidad dependerá de la sección de la pieza y debe ser la adecuada para que el tiempo que dure el ensayo esté dentro de las pautas de la norma (300 ± 120 s).

Hay que ajustar la altura de trabajo de la máquina hasta que los puntos de presión del travesaño metálico superior queden a cierta distancia de la viga y se comienza el ensayo calibrando el extensómetro. El sensor queda calibrado cuando la línea de referencia que aparece en la gráfica de la figura 4.36 se sitúe en la zona roja.

Una vez que el sensor ha sido calibrado, se continúa con el ensayo de flexión y se comienza a aplicar la carga, que se tiene que realizar con una velocidad constante. Al terminar el ensayo a flexión la máquina se detiene y retiramos el extensómetro, continuando con el ensayo hasta que se produce la rotura de la pieza. Los resultados que se obtienen se muestran tal y como están en la figura 4.36.

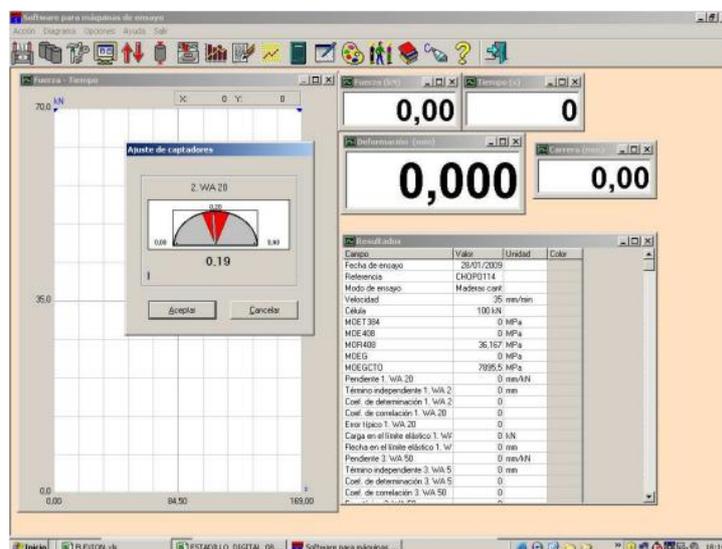


Figura 4.35. Detalle del software utilizado durante los ensayos de rotura en la máquina universal de ensayos

La ecuación que permite calcular el MOEG (N/mm²) es la siguiente:

$$MOEGTO = \frac{l^3 \times (F_2 - F_1)}{b \times h^3 \times (w_2 - w_1)} \left[\left(\frac{3 \times a}{4 \times l} \right) - \left(\frac{a}{l} \right)^3 \right]$$

Las anteriores variables significan:

- $F_2 - F_1$ = incremento de carga en la parte recta de la curva de carga-deformación.
- $w_2 - w_1$ = incremento de deformación correspondiente a $F_2 - F_1$ (mm).
- b = ancho de la sección de la pieza (mm).
- h = altura de la sección de la pieza (mm).
- a = distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo (mm).
- l = luz de la flexión de la pieza (mm).

El resultado de cálculo del módulo de elasticidad global se corrige a un contenido de humedad de referencia del 12% de acuerdo con lo descrito en la norma UNE-EN 384:2004, aumentando el valor en un 2% por cada 1% de disminución del contenido de humedad de la madera.

4.3.6.2. Determinación de la resistencia flexión estática (MOR)

El cálculo de la resistencia a flexión o tensión de rotura se basa en un ensayo de igual configuración que el descrito para el cálculo del MOEG, según la norma UNE-EN 408:2011.

Una vez finalizado el ensayo para determinar el módulo de elasticidad (MOEG) en el tramo de comportamiento elástico, hay que continuar aumentando la carga hasta que se rompa la pieza. La carga se debe aplicar con una velocidad constante de la cabeza de carga hasta la rotura.

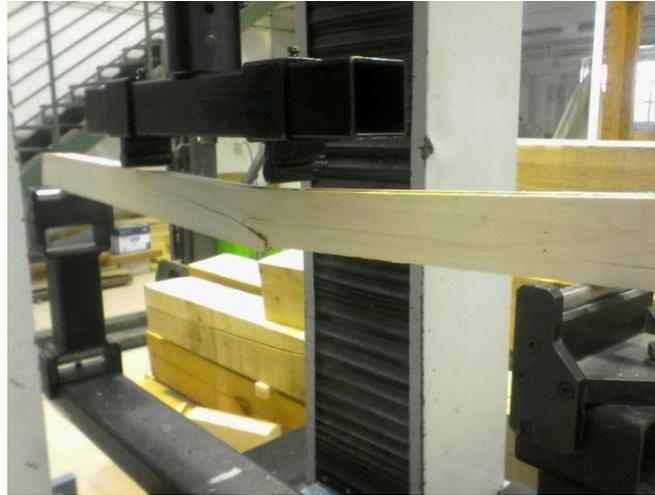


Figura 4.36. Ensayo de flexión, rotura de una viga dúo reforzada

La expresión empleada en el cálculo de la Resistencia a Flexión Estática o MOR (N/mm²) es la siguiente:

$$MOR = \frac{a \times F_{m\acute{a}x}}{2 \times W}$$

Las anteriores variables significan:

- a = distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo (mm).
- $F_{m\acute{a}x}$ = carga máxima (N).
- W = módulo resistente de la sección (mm³).

El ordenador ofrece la tensión que ha sido soportada por la probeta justo antes de su rotura (MPa o N/mm²), la deformación (mm), la carga máxima aplicada (kN) y el tiempo de realización del ensayo (s), que según la norma debe ser de 300±120 segundos. La rotura de la probeta puede ser apreciada en la figura 4.37.

4.3.7. Determinación de las propiedades físicas

4.3.7.1. Determinación de la densidad

Para la determinación de la densidad de las probetas dúo reforzadas, tenemos que tener en cuenta su fórmula para saber que valores hay que utilizar, se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{m}{v}$$

Las anteriores variables significan:

- ρ = densidad (kg/m³).
- m = peso de la muestra volumétrica determinada mediante una balanza (kg).
- v = volumen de la probeta determinado midiendo sus dimensiones con un calibre y una regla (m³).

Para realizar la siguiente ecuación nos hace falta la masa, adquirida por la balanza con una precisión de 0,01 g, además se midieron la longitud, anchura y espesor con una cinta métrica, para obtener el volumen mediante la siguiente expresión:

$$V = l * a * e$$

Las anteriores variables significan:

- V = volumen de la probeta (m³)
- l = longitud de la probeta (m)
- a = anchura de la probeta (m)
- e = espesor de la probeta (m)

Cuando se obtiene el anterior valor de la densidad, con este método se corrige a una humedad de referencia del 12% de acuerdo con lo descrito en la norma UNE-EN

384:2004, reduciendo el valor en un 0,5% por cada 1% de disminución del contenido de humedad de la madera.

4.3.7.3. Determinación de la humedad

El valor de la humedad de las probetas dúo reforzadas se ha obtenido con el xilohigrómetro. Este aparato no mide la humedad de la madera que sea menor del 8%, esa es su única limitación.

Pudimos sacar la humedad de todas las piezas, siendo su valor más alto del 8%, pero no siendo muy alto, ya que todas presentaban valores que iban del 8 al 10%.

4.4. Determinación de los valores característicos

4.4.1. Introducción

La norma europea UNE-EN 338 Madera estructural. Clases resistentes, establece y describe un sistema de clases resistentes de uso general en el marco de las normas de cálculo estructural. Indica para cada clase, los valores característicos de las propiedades de resistencia y rigidez y los valores de densidad, así como los criterios de clasificación de las poblaciones de madera (combinaciones de especies, procedencias y calidades). Esta norma es de aplicación para todas las especies frondosas y resinosas de utilización estructural.

La norma UNE-EN 338 y el sistema de clases resistentes lleva aparejado necesariamente el uso de otras normas; como la norma UNE-EN 408, que establece los criterios generales del muestreo y de los ensayos o la norma UNE-EN 384, que permite la determinación de los valores característicos de las poblaciones.

4.4.2. Cálculo de los valores característicos

La norma EN 384 Madera estructural. *Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad*, mediante una serie de procedimientos visuales y/o mecánicos, determinan los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad de poblaciones definidas. Los valores tienen la función de asignar una pareja calidad/especie a una clase resistente.

Para asignar las calidades y las especies a las clases resistentes de la norma EN 338 se determinan 3 valores característicos, siendo la resistencia a flexión ($f_m k$), el módulo de elasticidad medio paralelo a la fibra (E_0 , medio) y la densidad (ρ). También pueden tomarse otras propiedades, como el módulo de elasticidad paralelo a la fibra (5º percentil) ($E_{0,0,5}$), de la tabla 1 “Clases resistentes. Valores característicos” de la norma EN 338.

Cuando nos referimos a la población, queremos hablar del material al que se aplican los valores característicos, definidos por parámetros como la especie o grupos de especies, procedencia y calidad resistente.

Para las propiedades resistentes, módulo de elasticidad y densidad, su valor característico es el 5º percentil de la distribución estadística. Éste se define como el valor para el cual la probabilidad de obtener valores inferiores es del 5%, o dicho de otra forma, es el valor por debajo del cual se encuentran el 5% de los resultados. Para el módulo de elasticidad el valor medio es considerado también un valor característico.

4.4.3. Valor característico de resistencia a flexión (módulo de rotura a flexión MOR)

Ya se ha podido explicar en apartados anteriores, que el valor característico de la resistencia a flexión se puede calcular como el valor del 5º percentil. La Norma UNE-EN 384:2004 establece que el 5º percentil se obtiene clasificando todos los resultados

de ensayo de la muestra en orden creciente (de menor a mayor) y eligiendo el dato que deja por debajo el 5% de los valores. En el caso de que este valor no se corresponda con un dato de ensayo real, se interpola entre los datos inmediatamente superior e inferior.

Para realizar los cálculos tienen que realizarse bajo unas condiciones de referencia específicas (contenido de humedad, dimensiones de las piezas y longitud de ensayo, ...), que en el caso de no cumplirse, deben aplicarse factores de corrección facilitados por la norma.

En el caso de la humedad, las condiciones de referencia establecidas son las correspondientes a una temperatura de 20°C y una humedad relativa del 65% (para la mayor parte de las coníferas, esta humedad es del orden del 12%). También para la resistencia a flexión, se considera una altura de cara o espesor de 150 mm y unas proporciones de ensayo normalizadas indicadas en el apartado 4.3.5. *Caracterización mecánica de la madera mediante la máquina universal de ensayos (UNE-EN 408:2010)*.

Si no se cumplen estas condiciones, el 5º percentil de la resistencia a flexión se ajusta con un factor de corrección, que no es necesario para la humedad, pero sí para la dimensión de la pieza y la longitud de ensayo.

En la muestra de este estudio no ha sido necesario aplicar las correcciones por longitud de ensayo, pero sí para las dimensiones de las vigas dúo, por lo que el 5º percentil de la resistencia a flexión se ha corregido a un canto de referencia de 150 mm mediante la siguiente expresión:

$$K_h = \left(\frac{150}{h} \right)^{0,2}$$

Las anteriores variables significan:

- k_h = factor de altura
- h = espesor o la altura de canto de la viga (mm)

4.4.4. Valor característico de la densidad

Para determinar el valor característico de la densidad, previamente debe calcularse su 5º percentil. La norma UNE-EN 384:2004 establece que el 5º percentil de la densidad se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\rho_{0,5} = \bar{\rho} - 1,65 \times s$$

Las anteriores variables significan:

- ρ_{05} = 5º percentil buscado (Kg/m³)
- ρ = media de las densidades de las muestras (Kg/m³)
- s = desviación típica de las densidades (Kg/m³)

Hay una serie de condiciones que han de establecerse con respecto al 12% de contenido de humedad. Si el contenido de humedad es superior al 12%, la densidad se debe disminuir en un 0,5% por cada 1% del contenido de humedad, y cuando sea menor del 12%, se debe aumentar la densidad un 0,5% por cada 1% de variación del contenido de humedad.

la ecuación que nos permite que pasemos la densidad de la muestra a una densidad corregida del 12% es:

$$\rho_{12} = \rho_H \cdot (1 - 0,005 \cdot (H - 12))$$

Las anteriores variables significan:

- ρ_{12} = densidad corregida al 12% de humedad.
- ρ_H = densidad correspondiente a la humedad de la madera cuando se realizó el

ensayo.

- H = humedad de la madera cuando se realizó el ensayo.

4.4.5. Valor característico del módulo de elasticidad

La norma dice que el valor característico del módulo de elasticidad se puede calcular como el valor del 5º percentil ($E_{0,05}$) o bien como el valor medio de dicho módulo ($E_{0,medio}$). En este estudio se han calculado ambos valores característicos, pero la asignación a la clase resistente se ha realizado con el valor característico Módulo de elasticidad medio paralelo a la fibra ($E_{0,medio}$), que es más exigente y restrictivo.

Hay varios ensayos por los cuales podemos calcular el módulo de elasticidad, pero los más importantes son los que determinan el Módulo de Elasticidad local (MOE) y el módulo de elasticidad global de canto a flexión (MOEG). La diferencia que nos ofrecen cada uno de los valores es que para calcular el MOEG se tiene en cuenta el efecto de los esfuerzos cortantes, mientras que para calcular el MOE no.

En la actualidad es más correcto el ensayo que determina el MOEG, que es el recogido en la norma UNE-EN 384:2004. Por esta razón, en este estudio se ha calculado el módulo de elasticidad Global de canto a flexión. A partir de él se ha determinado el Módulo de Elasticidad local (MOE) para una adecuada comparación entre métodos de ensayo utilizados.

La siguiente ecuación es para calcular el valor característico del módulo de elasticidad:

$$\bar{E} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n}$$

Las anteriores variables significan:

- E = valor característico del módulo de elasticidad (MOEG) buscado (N/mm²).
- E_i = MOEG obtenido en cada viga dúo (N/mm²).
- n = número de piezas que forman la muestra.

Al igual que en casos anteriores, los cálculos realizados deben realizarse bajo unas condiciones de referencia, que en el caso de no cumplirse deben aplicarse los factores de corrección facilitados por la norma. Para dicha propiedad, solo se exige la corrección por humedad cuando las piezas se ensayan en condiciones distintas a las de referencia, pero con contenidos de humedad que están entre los valores 10% y 18%. La norma indica una corrección del 2% por cada variación del 1% del contenido de humedad de referencia; para lo cual se aplica la siguiente ecuación:

$$E_{12} = E_H \cdot (1 + 0,02 \cdot (H - 12))$$

Las anteriores variables significan:

- E_{12} = módulo de elasticidad (MOEGTO) corregido al 12% de humedad.
- E_H = módulo de elasticidad (MOEGTO) correspondiente a la humedad de la madera a la que se realizó el ensayo.
- H = humedad de la madera cuando se realizó el ensayo.

Para obtener los datos en función del módulo de elasticidad local corregido al 12% de humedad (MOE_{12}) se aplica la siguiente ecuación:

$$MOE_{12} = 1,3 \cdot E_{12} - 2690$$

Las anteriores variables significan:

- MOE_{12} = módulo de elasticidad local (MOE) corregido al 12 % de humedad.
- E_{12} = módulo de elasticidad (MOEGTO) corregido al 12 % de humedad.

Se consigue el valor característico del módulo de elasticidad como el valor del 5º percentil ($E_{0,05}$), determinándose clasificando todos los resultados del ensayo en orden de menor a mayor; siendo el quinto percentil el valor por debajo del cual se encuentra el 5% de los resultados. Al igual que para el cálculo del Módulo de Elasticidad como valor medio, se realiza la corrección por humedad y se obtienen los datos en función del módulo de elasticidad local corregido al 12% de humedad (MOE_{12}).

4.4.6. Asignación de las clases resistentes

La asignación de clases resistentes para las 32 probetas dúo se realiza a partir de la tabla de asignación de la norma EN 338, adjuntada a continuación:

Variables de clasificación	Clases resistente. Valores característicos. Coníferas y chopo.											
	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Módulo de elasticidad medio (kN/mm^2)	7	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13	14	15	16
Módulo de elasticidad (5º percentil) kN/mm^2	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,0	10,7
Módulo de rotura (N/mm^2)	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
ρ (kg/m^3)	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460

Tabla 4.4. Tabla resumen de clases resistentes para coníferas y chopo a partir de determinados valores característicos

El número que indican las clases resistentes, quiere decir el valor mínimo de la resistencia a flexión de esa clase en N/mm^2 y una letra que hace referencia al género de que se trate (C: Coníferas y D: Frondosas (Deciduous)).

La norma EN 338 establece que una población de madera puede asignarse a una clase resistente si los valores característicos de la resistencia a la flexión y densidad son iguales o mayores que los valores establecidos en la tabla 4.3. para dicha clase resistente; y si el valor característico medio de su módulo de elasticidad en flexión es igual o mayor que el percentil del 95% del valor indicado en la tabla 4.3 para dicha clase resistente.

4.5. Tratamiento estadístico de los datos

Según se iba recogiendo cada dato, se escribía en una hoja de cálculo de la aplicación Microsoft Excel. El análisis estadístico de los datos se ha realizado mediante los programas informáticos de estadística *Statgraphics Centurión XVI* y *SAS 9.2*.

Se han realizado, con los programas informáticos estadísticos nombrados anteriormente, los siguientes análisis:

- Análisis o estadística descriptiva de las variables objeto de este estudio, para lo cual se han obtenido los siguientes descriptores de cada variable: la media, como medida de tendencia central, el valor máximo y mínimo que toma la variable, el coeficiente de variación y la desviación típica como medidas de dispersión, y el número de datos o tamaño de la muestra.
- Análisis o estadística comparativa mediante los análisis de varianza (ANOVA), para comprobar si existe diferencias significativas para las distintas variables analizadas, entre el lote de las 32 probetas dúo reforzadas y el lote de las 25 vigas dúo reforzadas.

Se ha realizado un análisis de medidas repetidas, para conocer la existencia o no de diferencias significativas en la medición del módulo de elasticidad con los distintos métodos de ensayo.

El ANOVA se basa en el cumplimiento de una serie de hipótesis de partida que deben ser comprobadas:

- La variable dependiente debe medirse al menos a nivel de intervalo
- Independencia de las observaciones
- La distribución de los residuales debe ser normal
- Homocedasticidad: homogeneidad de las varianzas.

En el momento en el que se detectan diferencias significativas entre variables dependientes mediante el Test F del análisis de la varianza, se aplica el test de

múltiples rangos para saber cuáles son las medidas significativamente diferentes y obtener grupos homogéneos.

- Un análisis de correlaciones para estudiar la existencia o no de relaciones entre las distintas variables del estudio. El "coeficiente de correlación" mide el grado de intensidad o fuerza de esta posible relación entre las variables, el rango de este coeficiente va de -1 a +1. El *p-valor* prueba la significatividad estadística de las correlaciones estimadas; valores por encima de 0,05 indican que la correlación entre las variables no es estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95%, valores por debajo del 0,05 indica que la correlación entre las variables es estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95%.
- Un análisis de regresión lineal. Esta técnica estadística se ha utilizado para estudiar la relación entre variables. Este tipo de análisis explora y cuantifica la relación entre una variable llamada dependiente o explicada (*Y*) y una o más variables llamadas independientes o explicativas ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_k$); y permite obtener las ecuaciones de las funciones que relacionan las diferentes variables con fines predictivos.

Se han utilizado modelos de regresión lineales simples y múltiples, según intervenga una o varias variables independientes en el modelo, y los ajustes se han realizado por el método de mínimos cuadrados.

La bondad de los ajustes se expresa a través del "coeficiente de determinación ajustado" (R_2 ajustado), medida estandarizada que toma valores entre 0 y 1 (0 cuando las variables son independientes y 1 cuando entre ellas existe relación perfecta).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.- Resultados y discusión

En este apartado se trabaja con los resultados obtenidos tras el tratamiento estadístico de los datos recogidos en los ensayos realizados sobre el lote de 32 probetas dúo de *Populus x euroamericana* I-214, reforzadas con fibra de carbono. Los citados ensayos se han realizado siguiendo la metodología expuesta en el apartado anterior.

5.1. Clasificación visual

Mediante la norma española UNE 56544:2007, se han asignado las clasificaciones visuales, que establece un sistema de clasificación en función de las características y singularidades de la madera.

En el caso de nuestro estudio, el espesor de las piezas es menor de 70 mm, conforme a las características y singularidades de la madera esta norma establece dos calidades o clases de calidad para las piezas con grosor menor o igual a 70 mm, denominadas ME-1 y ME-2 (madera estructural de primera y segunda respectivamente). Establecía como equivalencias entre clase estructural y resistente a la C-18 para la clase estructural ME-1 y a la C-14 para la clase estructural ME-2. Todas las piezas que no están incluidas, de acuerdo con sus características visibles, en alguna de estas dos clases, se las denomina “rechazos” (R), no siendo útiles para fines estructurales, pero si para otros usos, no representando una calidad en sí misma.

Como se ha indicado en el apartado 4.3.2.3. Clasificación mediante la norma española UNE-56544:2007, para la especie de este estudio (*Populus x euroamericana* I-214) se ha considerado la equivalencia de la clase resistente C-16 de la norma EN 338 con la calidad estructural MEG.

En las siguientes tablas se pueden observar los resultados de la clasificación visual según la norma UNE 56544. En ellas se puede ver que de las 32 probetas dúo reforzadas con fibra de carbono, 17 han sido calificadas como ME-1, que se corresponde con el 53,12%, 12 como ME-2, que se corresponde con el 37,5% y las 3 restantes como "Rechazo" (R), lo que supone un 9,37% del total.

Clasificación Visual según Norma UNE 56544:2007				
Nº Vigas	Clase ME-1	Clase ME-2	Rechazo	Motivo de Rechazo
32 (100%)	17 (53,125%)	12 (37,5%)	3 (9,375%)	Nudos

Tabla 5.1. Clasificación visual del lote de vigas dúo reforzadas según Norma UNE 56544:2007



Figura 5.1. Clasificación visual según norma UNE 56544

Las piezas que han sido rechazadas (3 probetas, 9,37% del total), ha sido debido a los nudos, siendo ésta la principal causa de rechazo en las probetas estudiadas.

Si comparamos los resultados obtenidos en la clasificación visual de otros estudios (Zan, M.M.; 2013), realizados con vigas dúo de la misma especie, pero siendo las piezas más grandes, con un total de 25. Se puede observar que el porcentaje de rechazos es mucho menor en las probetas dúo, 9,37%, frente a un 24% en las vigas dúo. En comparación con este mismo estudio, los rechazos en las vigas dúo se producen debido a gemas, acebolladuras y entrecasco, al contrario que en nuestro estudio con las 32 probetas, produciéndose los 3 rechazos debido a la presencia de nudos.

En el apartado 5.3 se comparan los resultados de la clasificación visual con los obtenidos aplicando la norma EN 338 de clases resistentes a partir de los ensayos de flexión y del cálculo de los correspondientes valores característicos del MORc, MOEG y la densidad.

5.2. Estadística descriptiva

A continuación se colocan una serie de tablas, en las que se muestran los resultados del análisis estadísticos descriptivos del lote de las viga dúo reforzadas, diferenciando con o sin fibra, con los principales parámetros que hemos estudiado, el ensayo de flexión, ensayo de vibraciones inducidas con el PLG y el de ultrasonidos son los equipos sylvatest Trio y Fakkop. De cada una de las variables se muestran el valor medio, mínimo y máximo, la desviación estándar, el coeficiente de variación y el número de datos.

Estadística descriptiva : Ensayo de flexión según norma EN 408						
Parámetros	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar	CV	Nº de datos
MOEG 12%H ^a (MPa)	7865	6639,15	9981,5	902,62	11,48%	32
MORc (MPa) (valor característico)	53,09 *41,82	32,45	65,66	7,28	13,71%	32
MOE 12%H ^a (MPa)	7534,5	5940,9	10286	1113,41	15,57%	32
Densidad real 12%H ^a (kg/m ³) (valor característico)	390,38 * 357,97	355,74	434,22	19,64	5,03%	32
Humedad (%)	8,94	8,5	10,1	0,42	4,74%	32

Tabla 5.2. Estadística descriptiva ensayos destructivos, para las probetas dúo reforzadas con fibra de carbono

Estadística descriptiva : Ensayo vibraciones inducidas (PLG)						
Parámetros	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar	CV	Nº de datos
Densidad PLG 12%H ^a (kg/m ³)	404,686 *373	358,2	447,7	20,04	4,96%	32
Frecuencia PLG (Hz)	2045,25	669	2223	260,99	12,66%	32
MOE PLG 12% H (MPa)	8954,69	1000	10800	1624,63	18,14%	32

Tabla 5.3. Estadística descriptiva ensayos no destructivos, para las probetas dúo reforzadas con fibra de carbono

Estadística descriptiva : Ensayo ultrasonidos (Sylvatest Trio y Fakkop)						
Parámetros	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar	CV	Nº de datos
Vel Sy Dir 12% H ^a (m/s)	5570,95	5341,08	5795,21	112,09	2,01%	32
MOEd Sy (MPa)	12132,5	10566,2	14353,8	885,98	7,3%	32
Vel Fk Dir 12% H ^a (m/s)	5030,84	4807,62	5176,72	84,58	1,68%	32
MOEd Fk (MPa)	9885,66	8744,71	11626,7	645,48	6,53%	32

Tacla 5.4. Estadística descriptiva ensayos no destructivos, para las probetas dúo no reforzadas con fibra de carbono

Se puede ver en las tablas como la desviación estándar y el coeficiente de variación reflejan una muestra bastante homogénea, con poca dispersión; cumpliéndose un resultado al que se tenía previsto llegar con la elección de probetas dúo reforzadas con fibra de carbono.

Puede decirse que los valores obtenidos para las diferentes variables de los diferentes ensayos realizados, obteniendo resultados muy parecidos a los de Zan, M.M. (2013), ya que utilizó material de la misma procedencia. Sin embargo varían respecto a estudios de madera maciza, realizados por otros autores, como por ejemplo Casado et al. (2012) y Arrate, J. (2010). Posteriormente en el análisis estadístico ANOVA, se realizará una comparación con el estudio de Zan, M. M. (2013).

5.3. Análisis descriptivo de las variables clasificatorias

La norma UNE-EN 338 de clases resistentes establece como variables que permiten la asignación de clases resistentes a poblaciones o calidades, el módulo de rotura o resistencia a flexión (MOR_c), el módulo de elasticidad (MOE) y la densidad (ρ_k). Mediante el uso de los valores característicos de las tres variables citadas

anteriormente, se va a realiza la clasificación, éstos fueron calculados en el apartado "4. Material y Métodos". La norma considera el 5º percentil como el valor característico en el caso de la densidad y del MORc. Sin embargo en el MOE, se utiliza el valor promedio o medio.

En la siguiente tabla (Tabla 5.5.), se muestra la clasificación real de cada probeta de acuerdo a los ensayos de flexión (norma EN 408) y los rendimientos clasificatorios de acuerdo a la norma 56544 de clasificación visual.

Clase resistente (Norma EN 338)	Ensayo flexión (EN 408:2011) clasificación EN 338		UNE 56.544:2007	
C18	4 (12,5%)	24 (75%)	17 (53,13%)	29 (90,63%)
C16	9 (28,13%)			
C14	11 (34,38%)		12 (37,5%)	
Rechazo	8 (25%)		3 (9,37%)	

Tabla 5.5. Tabla de rendimientos clasificatorios según norma EN 338 (ensayo de flexión) y UNE 56544 (clasificación visual)

De acuerdo a los valores característicos de cada probeta, se clasifican en 3 grupos estructurales (C-18, C-16, C-14) y rechazo. En la tabla anterior se puede observar que un 75% de las probetas dúo reforzadas con fibra de carbono, son clasificadas como madera estructural, y el 25% que nos queda se ha agrupado como rechazo.

Estas cifras no son muy parecidas a las de clasificación visual, en la que 90,63% eran correspondientes a la madera estructural, mientras que 9,37% restantes son rechazo. Nos ha salido mejor resultado en la clasificación visual, debido a que las probetas dúo con fibra de carbono de nuestro estudio fueron fabricadas con los residuos de las vigas dúo del estudio de Zan, M. M. (2013). Al fabricarse con los restos, en el ensayo visual pueden parecer que tengan unas propiedades mecánicas buenas. Cuando se

realizan los ensayos, los resultados que se obtienen son peores que los esperados, ya que por dentro, las fibras de la madera están rotas.

Las cifras de nuestro estudio mejoran con los resultados obtenidos en el de Zan, M. M. (2013) (72% y 28% respectivamente).

De acuerdo a la equivalencia clase estructural (MEG) - clase resistente (C-16) establecida para este estudio, la norma UNE 56544:2007 sobrevaloraría la clase resistente asignada al lote al incluirlo en la C-16, clase superior a la que realmente tiene el lote (C-14) según la norma EN 338.

En la tabla 5.6. se muestran los valores característicos del lote de probetas dúo reforzadas con fibra de carbono así como las vigas dúo del estudio de Zan, M. M. (2013).

Valores Característicos (Norma EN 338) y Clases Resistentes					
Variables	Unidad	Probeta dúo reforzada con fibra de carbono	Clase resistente	Viga dúo reforzada (Zan, M. M.; 2013)	Clase resistente
MOR _c (<i>f_{m,k}</i>)	MPa	41,82	C-40	25,38	C-24
MOE (0, medio)	MPa	7534,5	C-14	7380,64	C-14
Densidad (<i>ρ_k</i>)	Kg/m ³	357,97	C-24	345,19	C-22

Tabla 5.6. Tabla comparativa de los valores característicos de los ensayos de flexión y clases resistentes

La clasificación de la calidad estructural del lote de probetas dúo reforzadas, según los valores característicos según la norma UNE-EN 338:2010, se corresponde con la C-14; pero si se tiene en cuenta el valor del módulo de rotura y de la densidad, el lote se clasificaría como C-40 Y C-24 respectivamente. Según Casado *et al.* (2012), la resistencia es parecida a la de muchas especies de coníferas, pero su módulo de

elasticidad en comparación con ellas es algo más bajo, entonces no se ajusta a una única clase resistente de las establecidas por la norma UNE-EN 338. Debido a esto, los autores proponen establecer para esta especie una clase resistente independiente (CHP1) y (CHP2), híbrida entre las clases definidas por la norma siguiente (Tabla 5.7.).

Clases resistentes						
Valores característicos	C-14	C-15	C-18	C-24	CHP2	CHP1
MOR N/mm ²	14	16	18	24	18	22
MOE N/mm ²	7	8	9	11	6,5	8
Densidad kg/m ³	290	310	320	350	290	310

Tabla 5.7. Propuesta de clasificación de madera de chopo (Casado et al 2012)

Con la clasificación del lote de probetas dúo reforzadas con fibra de carbono, mediante la propuesta de clasificación de madera de chopo realizada por Casado et al (2012), se obtiene únicamente un 0% de probetas dúo clasificadas como rechazo, siendo el 100% restante madera estructural, con un 25% en la clase CHP2 y un 28,13% en la clase CHP1. El resultado del conjunto, en su totalidad, de probetas dúo reforzadas con fibra de carbono mejorarían las expectativas económicas de esta especie, al quedar clasificadas como madera estructural el 100% del lote.

Comparando los resultados del lote de probetas dúo reforzadas con los estudios de Zan, M. M. (2013), se puede observar que las propiedades elastomecánicas de las probetas dúo reforzadas (nuestro lote), mejoran con respecto a las de las vigas dúo (Tabla 5.6.). Si nos fijamos en la densidad, se pasa de una clase resistente C-22 a una C-24 y en el módulo de rotura de una C-24 a una C-40. Esta propiedad, definidora de la clase resistente del lote, limita de forma importante su aplicación para uso

estructural, al quedar el lote clasificado en la clase resistente inferior (C-14) de las definidas en la norma UNE-EN 338.

Con los métodos de vibraciones inducidas (equipo PLG) y de ultrasonidos (equipos Sylvatest Trio y Fakopp), como técnicas utilizadas para predecir el comportamiento elástico de la madera de las probetas dúo reforzadas, se obtienen unos valores para el módulo de elasticidad superiores a los obtenidos en el ensayo de flexión, sobrestimando la calidad de la madera; siendo mayor la sobrestimación que realizan los métodos de ultrasonidos. Las velocidades de las ondas sónicas de los equipos Sylvatest Trio y Fakopp son muy similares. (Tabla 5.8 y tablas 5.3 y 5.4).

Variable	Tipo de ensayo			
	Ensayo flexión	Ensayo vibraciones inducidas (PLG)	Ensayo ultrasonidos (Sylvatest Trio)	Ensayo ultrasonidos (Fakopp)
MOE 12% H ^a (MPa)	7534,5	8954,69	12132,5	9885,66
Velocidad (m/seg)			5570,95	5030,84

Tabla 5.8. Módulo de elasticidad de los ensayos destructivos y no destructivos y velocidad de los ensayos

5.4. Estadística comparativa

La estadística comparativa se ha realizado mediante el análisis de varianza (ANOVA), con éste se trata de comprobar si hay diferencias significativas para las diversas variables analizadas. Hay diferentes rangos de significación según el valor-p de la razón-F:

- Valor-P>0,1: no tiene diferencias estadísticamente significativas.

- Valor-P está entre 0,05 y 0,1: moderadamente significativo.
- Valor-P está entre 0,01 y 0,05: significativo.
- Valor-P está entre 0 y 0,01: altamente significativo.

Cuando Valor-P es mayor de 0,05 suele indicar que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de las variables que se comparan con un nivel de confianza del 95%; y si Valor-P es menor de 0,05, suele indicar la existencia de diferencia estadísticamente significativa.

Cuando se detectan diferencias significativas entre variables dependientes mediante el test F del análisis de varianza, se aplica el Test o la Prueba de Múltiples Rangos para obtener de forma concreta cuales son las medidas significativamente diferentes y establecer grupos homogéneos que se han indicado en las tablas mediante letras iguales o diferentes junto a la media de las variables.

Estos resultados se han acompañado de un gráfico de medias (Fisher LSD) y una tabla de medias con intervalos de confianza del 95%.

5.4.1. Estadística comparativa: lote de probetas dúo reforzadas y lote de vigas dúo reforzadas

Se ha realizado un estudio basado en la comparación del lote de 32 probetas dúo de *Populus x euroamericana* I-214 reforzadas con fibra de carbono y objeto de este estudio, con el lote de 25 vigas dúo reforzadas con el mismo material, siendo la madera de la misma especie y clon analizadas en el estudio de M^a del Mar Zan Gómez a través de las siguientes variables: módulo de rotura corregido (MOR_c) y módulo de elasticidad (MOE₁₂) del ensayo de flexión, densidad según norma 408, frecuencia media (fm_{plg}) y módulo de elasticidad (MOE_{plg}) del ensayo de vibraciones

inducidas (PLG), velocidad directa ($V_{d_{sy}}$ y $V_{d_{fk}}$) y módulo de elasticidad dinámico ($MOE_{d_{sy}}$ y $MOE_{d_{fk}}$) de los ensayos de ultrasonidos (*Sylvatest* y *Fakopp*).

5.4.1.1. Análisis comparativo (probeta dúo-viga dúo) de las variables del ensayo de flexión (Norma UNE 408): MOR_c y MOE_{12}

Para cada una de las variables se han reflejado los resultados a través de un gráfico de medias (Figura 5.2. y 5.3.), de una tabla con el análisis de la varianza (tablas 5.9. y 5.11) y de otra tabla con la media por mínimos cuadrados y la prueba de múltiples rangos (Tablas 5.)

Análisis comparativo MOR_c

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
A:Ensayo	3068,38	1	3068,38	47,11	0,000
RESÍDUOS	3582,48	55	65,136		
TOTAL (CORREGIDO)	6650,86	56			

Tabla 5.9. Análisis de Varianza para la variable MOR_c del análisis comparativo viga dúo - probeta dúo reforzadas

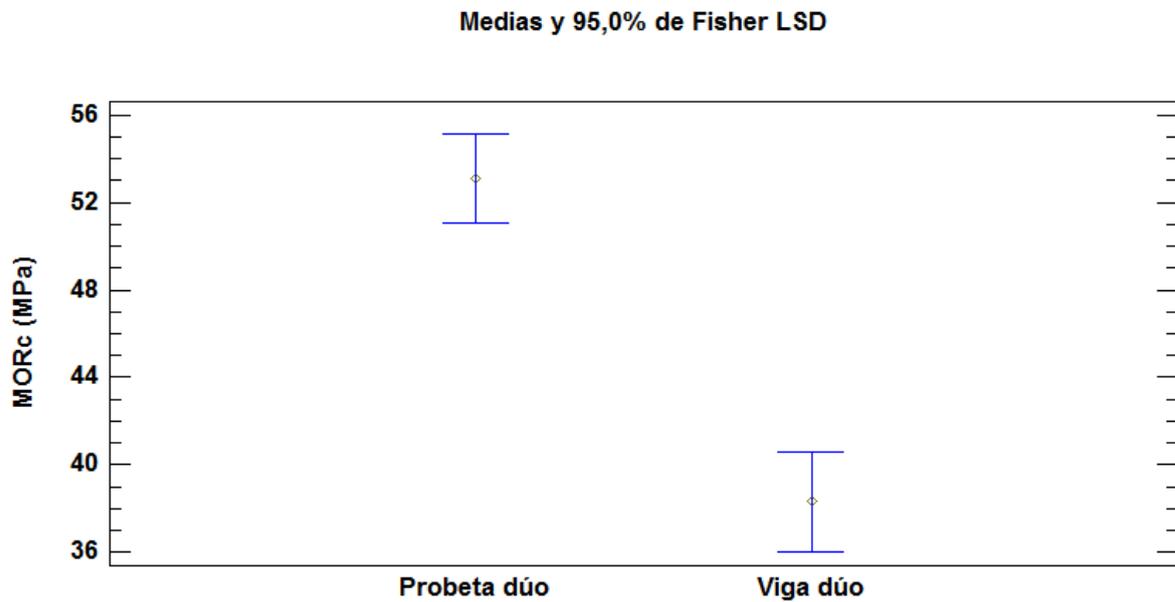


Figura 5.2. Gráfica de medias del MORc del análisis comparativo probeta dúo - viga dúo

Ensayo	Casos	Media	Error estándar	Límite inferior	Límite superior
Probeta	32	53,0946	1,42671	51,0728	55,1163
Viga	25	38,3087	1,61414	36,0214	40,5961
Contraste		Sig.	Diferencia	+/- Límites	
Probeta-viga		*	14,7859	4,31729	

Tabla 5.10. Análisis comparativo viga dúo – viga maciza. Variable MORc. Tabla de medias con intervalos de confianza del 95%. Test de Fisher, letras diferentes indican diferencias significativas (alfa= 0,05)

* indica diferencia significativa

La existencia de un p-valor inferior de 0,05, en nuestro caso 0,00, nos permite afirmar que existen diferencias significativas entre el lote de probetas dúo reforzadas y el de vigas dúo para la variable MORc del ensayo de flexión.

El valor del MORc no es parecido en ambos lotes, mejorando la variable en nuestro estudio con respecto al de Zan, M. M. (2013). Este resultado en nuestro estudio es de 53,095 (MPa), sin embargo en el de Zan, M. M. (2013) es un 38,309 (MPa), resultados bastante diferentes. En este último caso el valor característico de la variable MORc es bastante peor; se obtiene un 25,38 en las vigas dúo reforzadas frente a un valor de 41,82 para las probetas dúo reforzadas, lo que permite mejorar la clase resistente de C24 a C40 (tabla 5.6.).

Análisis comparativo MOE₁₂ ensayo de flexión

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
A:Ensayo	332275	1	332275	0,3	0,5876
RESÍDUOS	3582,48	55	1,11653E6		
TOTAL (CORREGIDO)	6,17413E7	56			

Tabla 5.11. Análisis de Varianza para la variable MOE₁₂ del análisis comparativo viga dúo - probeta dúo reforzadas

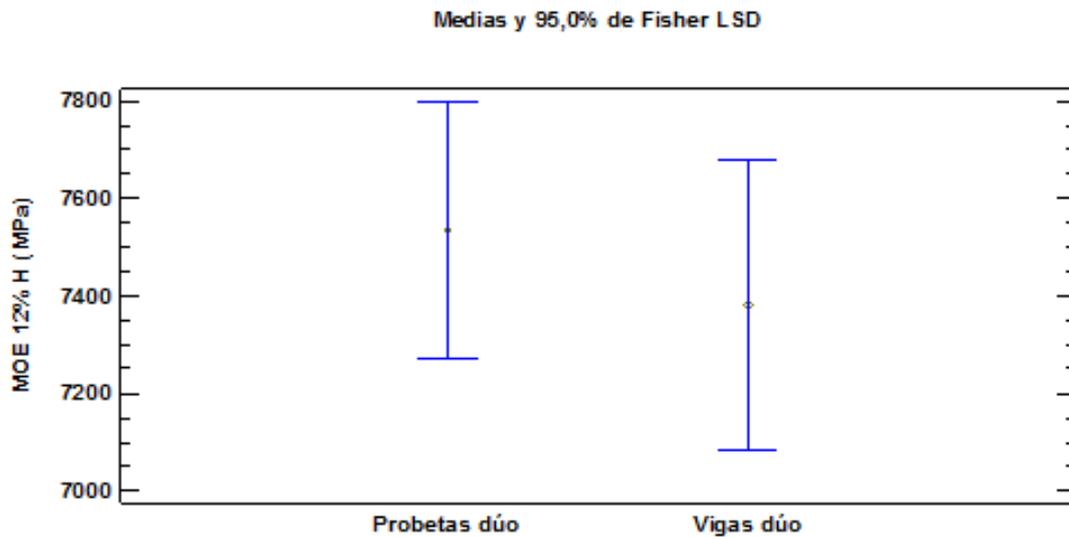


Figura 5.3. Gráfica de medias del MORc del análisis comparativo probeta dúo - viga dúo

Ensayo	Casos	Media	Error estándar	Límite inferior	Límite superior
Probeta	32	7534,5	186,793	7269,8	7799,2
Viga	25	7380,64	211,332	7081,17	7680,11
Contraste		Sig.	Diferencia	+/- Límites	
Probeta-viga			153,866	565,243	

Tabla 5.12. Análisis comparativo viga dúo – viga maciza. Variable MOE₁₂. Tabla de medias con intervalos de confianza del 95%. Test de Fisher, letras diferentes indican diferencias significativas (alfa= 0,05)

* indica diferencia significativa

A través de los resultados que se han obtenido, se puede afirmar la inexistencia de diferencias significativas entre el lote de vigas dúo y de probetas dúo para la variable módulo de elasticidad del ensayo de flexión, si nos fijamos en los p-valores superiores a 0,05 y de la prueba de múltiples rangos.

El valor del MOE₁₂ del lote de probetas dúo (7534,5 MPa) mejora, pero no de forma significativa a nivel estadístico respecto al de la vigas dúo (7380,64 MPa).

5.4.1.2. Análisis comparativo (viga dúo-probeta dúo) de la densidad según norma UNE 408

Para la variable densidad se han reflejado los resultados a través de un gráfico de medias (Figura 5.4.), de una tabla con el análisis de la varianza (tabla 5.13) y de otra tabla con la media por mínimos cuadrados y la prueba de múltiples rangos.

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
A:Ensayo	3622,47	1	3622,47	10,25	0,0023
RESÍDUOS	19439,8	55	353,45		
TOTAL (CORREGIDO)	23062,2	56			

Tabla 5.13. Análisis de Varianza para la variable Densidad (norma 480) del análisis comparativo viga dúo - probeta dúo reforzadas

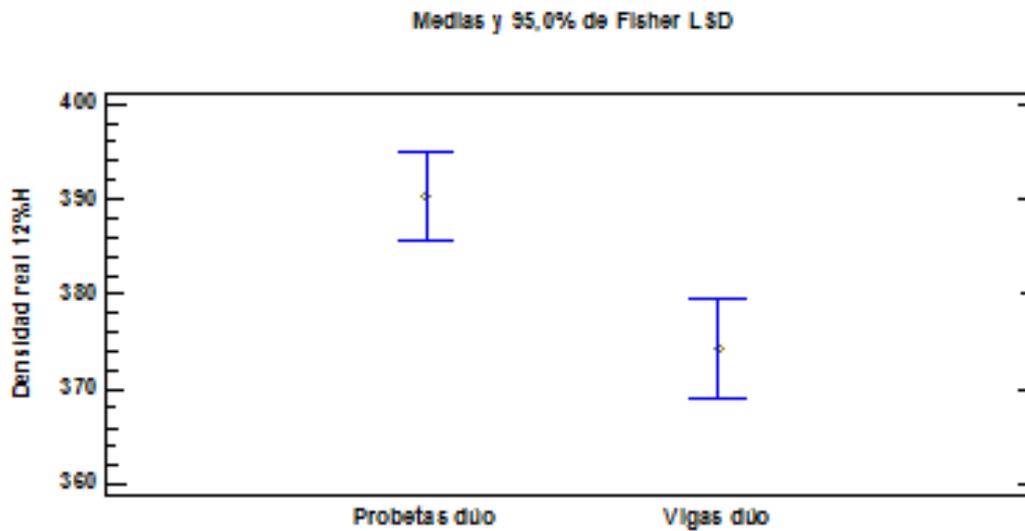


Figura 5.4. Gráfica de medias de la variable Densidad (norma 480) del análisis comparativo probeta dúo - viga dúo

Ensayo	Casos	Media	Error estándar	Límite inferior	Límite superior
Probeta	32	390,378	3,32345	385,669	395,088
Viga	25	374,313	3,76006	368,984	379,641
Contraste		Sig.	Diferencia	+/- Límites	
Probeta-viga		*	16,0655	10,0569	

Tabla 5.14. Análisis comparativo viga dúo – viga maciza. Variable Densidad (norma 480).Tabla de medias con intervalos de confianza del 95%. Test de Fisher, letras diferentes indican diferencias significativas (alfa= 0,05)

* indica diferencia significativa

A través de los resultados que se han obtenido, se puede afirmar la existencia de diferencias significativas entre el lote de vigas dúo y de probetas dúo para la variable densidad según norma UNE 480, si nos fijamos en los p-valores inferiores a 0,05 y de la prueba de múltiples rangos.

El valor de la densidad del lote de probetas dúo (390,378 kg/m³) mejora de forma significativa a nivel estadístico respecto al de la vigas dúo (374,313 kg/m³).

5.4.1.3. Análisis comparativo (viga dúo-viga maciza) de las variables del ensayo de vibraciones inducidas: Frecuencia media plg y MOEplg

Para cada una de las variables se han reflejado los resultados a través de un gráfico de medias (Figura 5.5. y 5.6.), de una tabla con el análisis de la varianza (tablas 5.15. y 5.17.) y de otra tabla con la media por mínimos cuadrados y la prueba de múltiples rangos (Tablas 5.16. y 5.18.)

Análisis comparativo Frecuencia media plg (fm_{plg})

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
A:Ensayo	2,88943E7	1	2,88943E7	750,43	0,0000
RESÍDUOS	2,1177E6	55	38503,6		
TOTAL (CORREGIDO)	3,1012E7	56			

Tabla 5.15. Análisis de Varianza para la variable fm_{plg} del análisis comparativo viga dúo - probeta dúo reforzadas

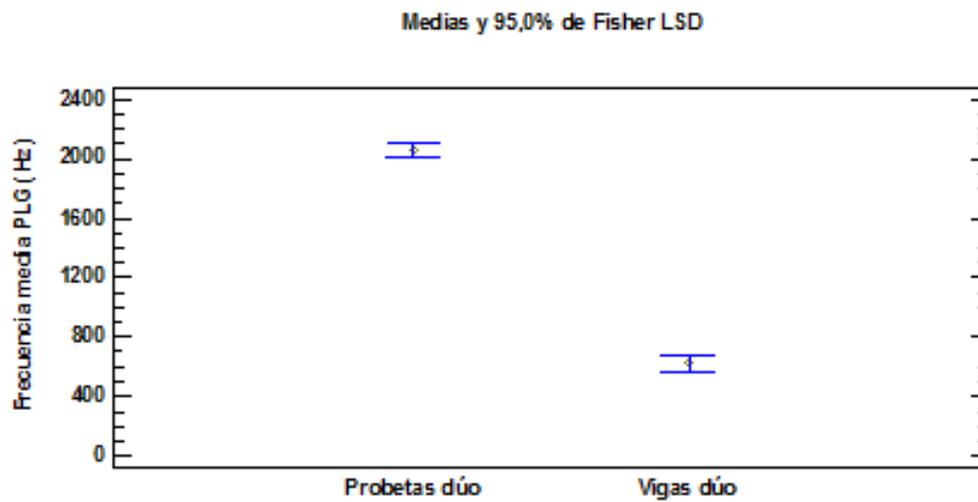


Figura 5.5. Gráfica de medias de la variable fmp_{lg} del análisis comparativo probeta dúo - viga dúo

Ensayo	Casos	Media	Error estándar	Límite inferior	Límite superior
Probeta	32	2061,48	34,6877	2012,33	2110,64
Viga	25	626,66	39,2447	571,047	682,273
Contraste		Sig.	Diferencia	+/- Límites	
Probeta-viga		*	1434,82	104,967	

Tabla 5.16. Análisis comparativo viga dúo – viga maciza. Variable fmp_{lg}.Tabla de medias con intervalos de confianza del 95%. Test de Fisher, letras diferentes indican diferencias significativas (alfa= 0,05)

* indica diferencia significativa

Análisis comparativo MOE_{plg}

Fuente	Suma de cuadrados	GI	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
A:Ensayo	1,26847E6	1	1,26847E6	0,67	0,4156
RESÍDUOS	1,03674E8	55	1,88498E6		
TOTAL (CORREGIDO)	1,04942E8	56			

Tabla 5.17. Análisis de Varianza para la variable MOE_{plg} del análisis comparativo viga dúo - probeta dúo reforzadas

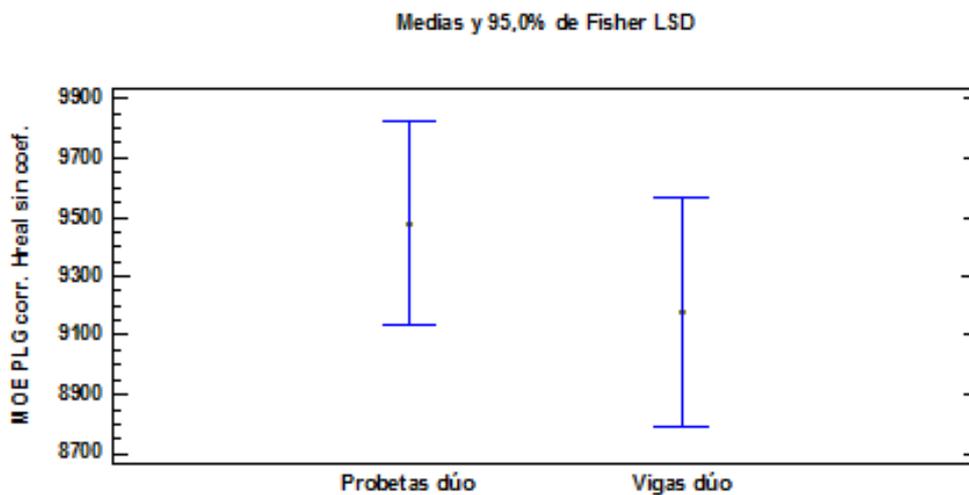


Figura 5.6. Gráfica de medias de la variable MOE_{plg} del análisis comparativo probeta dúo - viga dúo

Ensayo	Casos	Media	Error estándar	Límite inferior	Límite superior
Probeta	32	9477,55	242,705	9133,62	9821,48
Viga	25	9176,92	274,589	8787,81	9566,03
Contraste		Sig.	Diferencia	+/- Límites	
Probeta-viga		*	300,63	734,436	

Tabla 5.18. Análisis comparativo viga dúo – viga maciza. Variable MOE_{plg}. Tabla de medias con intervalos de confianza del 95%. Test de Fisher, letras diferentes indican diferencias significativas (alfa= 0,05)

* indica diferencia significativa

A través de los resultados que se han obtenido, se puede afirmar la existencia de diferencias significativas entre el lote de vigas dúo y de probetas dúo para la variable comparadas en el ensayo de vibraciones inducidas con el equipo PLG $f_{m_{plg}}$ si nos fijamos en los p-valores inferiores a 0,05 y de la prueba de múltiples rangos. Sin embargo para la variable MOE_{plg} no hay diferencias significativas.

Los valores de la frecuencia media (2061,48 Hz) y del MOE_{plg} (9477,55 MPa) del lote de vigas dúo mejoran de forma significativa a nivel estadístico, sobre todo en el caso de la variable de la frecuencia media, respecto a los valores de dichas variables, 626,66 Hz y 9176,92 MPa respectivamente, para el lote de vigas dúo.

5.4.1.4. Análisis comparativo (viga dúo-viga maciza) de las variables de

los ensayos de ultrasonidos con el equipo Sylvatest Trio: V_{dsy} y MOE_{dsy}

Para cada una de las variables se han reflejado los resultados a través de un gráfico de medias (Figura 5.7. y 5.8.), de una tabla con el análisis de la varianza (tablas 5.16. y 5.18.) y de otra tabla con la media por mínimos cuadrados y la prueba de múltiples rangos (Tablas 5.17. y 5.19.).

Análisis comparativo Sylvatest Trio: Velocidad directa (V_{dsy})

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
A:Ensayo	1,5829E6	1	1,5829E6	121,77	0,0000
RESÍDUOS	714940	55	12998,9		
TOTAL (CORREGIDO)	2,2978E6	56			

Tabla 5.19. Análisis de Varianza para la variable V_{dsy} del análisis comparativo viga dúo - probeta dúo reforzadas

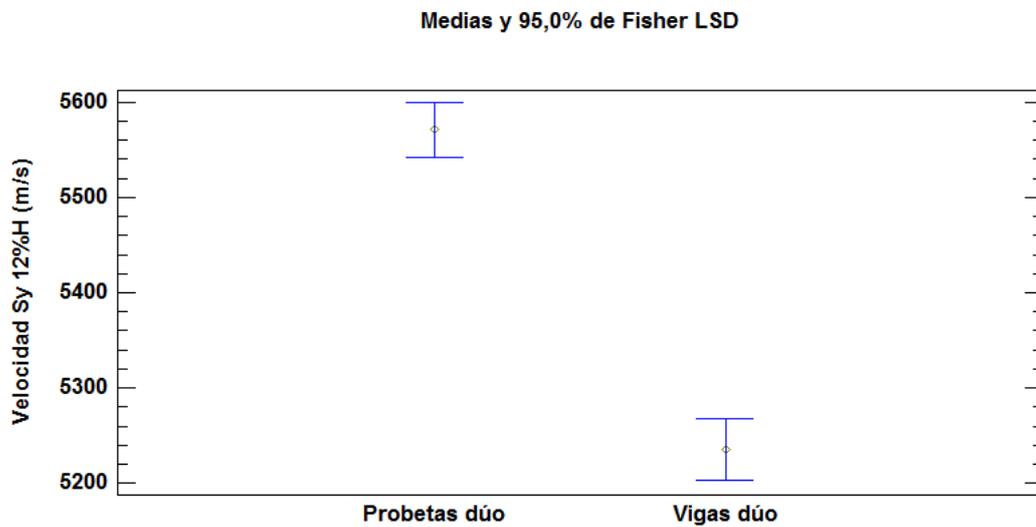


Figura 5.6. Gráfica de medias de la variable V_{dsy} del análisis comparativo probeta dúo - viga dúo

Ensayo	Casos	Media	Error estándar	Límite inferior	Límite superior
Probeta	32	5570,95	20,1548	5542,39	5599,51
Viga	25	5235,12	22,8026	5202,81	5267,43
Contraste		Sig.	Diferencia	+/- Límites	
Probeta-viga		*	335,83	60,9894	

Tabla 5.20. Análisis comparativo viga dúo – viga maciza. Variable V_{dsy} . Tabla de medias con intervalos de confianza del 95%. Test de Fisher, letras diferentes indican diferencias significativas ($\alpha=0,05$)

* indica diferencia significativa

Análisis comparativo Sylvatest Trio: MOEd_{Sy}

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
A:Ensayo	4,88049E7	1	4,88049E7	72,07	0,0000
RESÍDUOS	3,72433E7	55	677151,		
TOTAL (CORREGIDO)	8,60482E7	56			

Tabla 5.21. Análisis de Varianza para la variable MOEd_{Sy} del análisis comparativo viga dúo - probeta dúo reforzadas

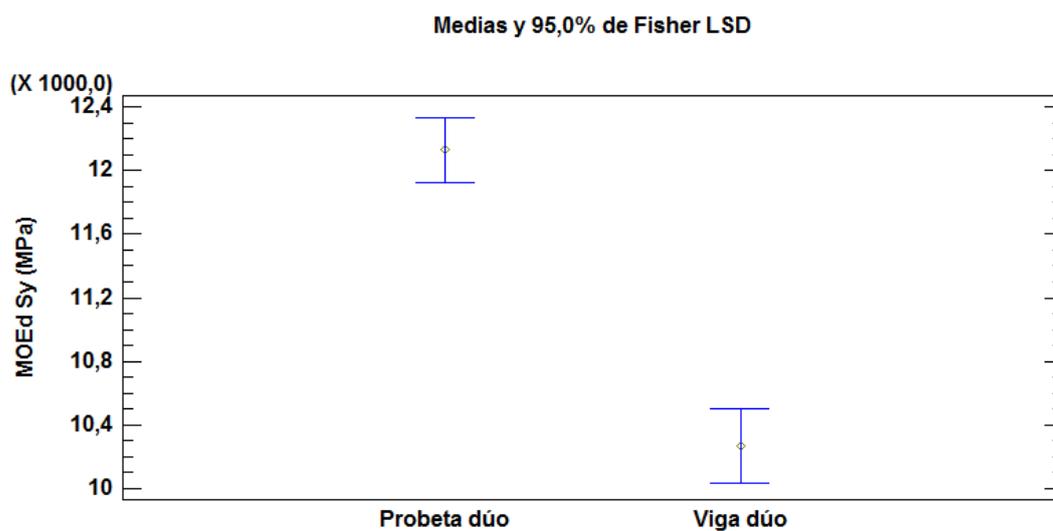


Figura 5.7. Gráfica de medias de la variable MOEd_{Sy} del análisis comparativo probeta dúo - viga dúo

Ensayo	Casos	Media	Error estándar	Límite inferior	Límite superior
Probeta	32	12132,5	145,468	11926,3	12338,6
Viga	25	10267,7	164,578	10034,5	10500,9
Contraste		Sig.	Diferencia	+/- Límites	
Probeta-viga		*	1864,76	440,193	

Tabla 5.22. Análisis comparativo viga dúo – viga maciza. Variable MOEdsy. Tabla de medias con intervalos de confianza del 95%. Test de Fisher, letras diferentes indican diferencias significativas (alfa= 0,05)

* indica diferencia significativa

A través de los resultados que se han obtenido, unos p-valores igual a 0,000, se puede afirmar la existencia de diferencias significativas entre el lote de vigas dúo y de probetas dúo para la variable comparadas en el ensayo de de ultrasonidos con el equipo Sylvatest Trio (VdSy y MOEd).

El valor del módulo de elasticidad dinámico (12132,5 m/sg) del lote de las probetas dúo mejora respecto a los valores de esa misma variable (10267,7 MPa) del lote de las vigas dúo, haciéndolo de forma significativa a nivel estadístico.

Para la variable velocidad directa del Sylvatest se obtiene un valor mayor para el lote de probetas dúo (5570,95 m/sg) respecto al de vigas dúo (5235,12 m/sg).

5.4.1.5. Análisis comparativo (viga dúo-viga maciza) de las variables de los ensayos de ultrasonidos con el equipo Fakopp: Vd_{Fk} y $MOEd_{Fk}$

Para cada una de las variables se han reflejado los resultados a través de un gráfico de medinas (Figura 5.9), de un gráfico de medias (Figura 5.10.), de una tabla con los resultados del Test de Kruskal-Wallis (tabla 5.23.) de la tabla ANOVA (tabla 5.25.), de la tabla 5.24 con los valores de las medianas y de la tabla 5.26 con la media por mínimos cuadrados y la prueba de múltiples rangos.

Análisis comparativo Fakopp: Velocidad directa (Vd_{Fk})

Ensayo	Tamaño Muestra	Rango Promedio	Estadístico	Valor-P
Probeta	32	19,125	25,8273	*3,73363E-7
Viga	25	41,64		

Tabla 5.23. Análisis comparativo probeta - viga dúo reforzadas. Variable de Varianza para la variable Vd_{Fk} . Prueba de Kruskal-Wallis

* Valor-P menor que 0,05, indica que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95,0% de confianza

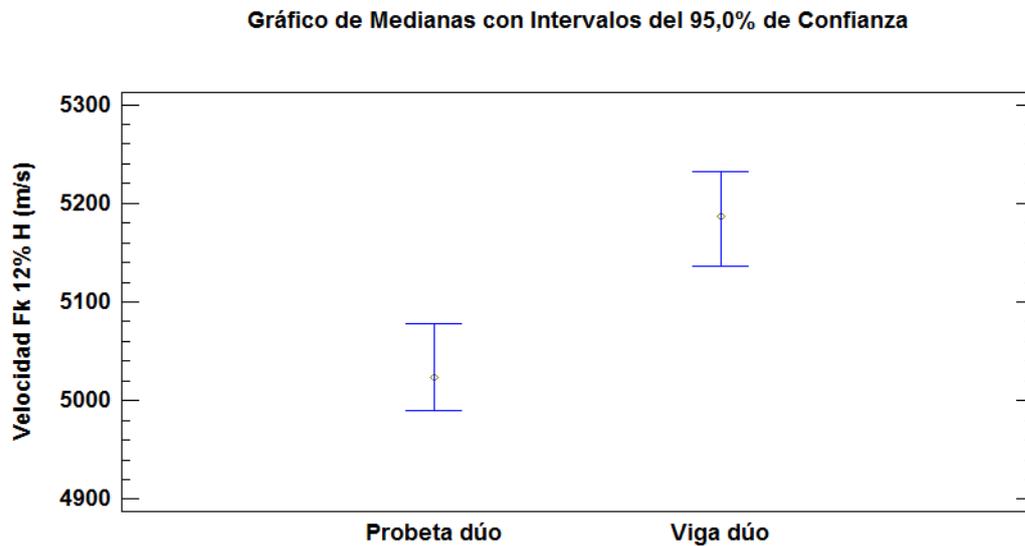


Figura 5.7. Gráfica de medianas de la variable Vd_{Fk} del análisis comparativo probeta dúo - viga dúo

Ensayo	Tamaño Muestra	Mediana	Mínimo	Máximo	Rango
Probeta	32	5024,03	4807,62	5176,72	369,109
Viga	25	5187,0	5024,59	5362,06	337,48

Tabla 5.24. Análisis comparativo probeta- viga dúos reforzadas con fibra de carbono. Variable Vd_{Fk} . Tabla de medianas

Análisis comparativo Fakopp: Modulo dinámico (MOEd Fk)

Fuente	Suma de cuadrados	GI	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
A:Ensayo	438193,	1	438193	1,02	0,3174
RESÍDUOS	2,36717E7	55	430394		
TOTAL (CORREGIDO)	2,41099E7	56			

Tabla 5.25. Análisis de Varianza para la variable MOEd_{Fk} del análisis comparativo viga dúo - probeta dúo reforzadas

Medias y 95,0% de Fisher LSD

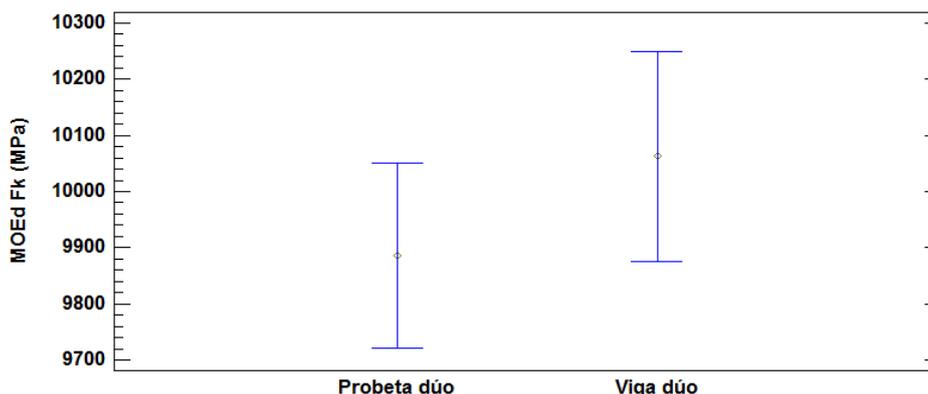


Figura 5.8. Gráfica de medias de la variable MOEd_{Fk} del análisis comparativo probeta dúo - viga dúo

Ensayo	Casos	Media	Error estándar	Límite inferior	Límite superior
Probeta	32	9885,66	115,973	9721,32	10050,0

Tabla 5.26. (Cont.) Análisis comparativo viga dúo – viga maciza. Variable MOEd_{Fk}.Tabla de medias con intervalos de confianza del 95%. Test de Fisher, letras diferentes indican diferencias significativas (alfa= 0,05)

* indica diferencia significativa

Viga	25	10062,4	131,209	9876,42	10248,3
Contraste		Sig.	Diferencia	+/- Límites	
Probeta-viga		*	-176,695	350,941	

Tabla 5.26. Análisis comparativo viga dúo – viga maciza. Variable MOEd_{Fk}. Tabla de medias con intervalos de confianza del 95%. Test de Fisher, letras diferentes indican diferencias significativas (alfa= 0,05)

* indica diferencia significativa

Los resultados indican, a través de p-valores superiores a 0,05, de la prueba de múltiples rangos y de la prueba de Kruskal Wala inexistencia de diferencias significativas entre el lote de vigas dúo y el lote de probetas dúo reforzadas con fibra de carbono para las dos variables comparadas en el ensayo de ultrasonidos con el equipo Fakopp (VdFk y MOEdFk).

Los valores de la velocidad directa (5024,03m/s) y del módulo de elasticidad dinámico (9885,66MPa) del lote de las probetas dúo empeoran, respecto a los valores de dichas variables, 5187 m/s y 10062,4 MPa respectivamente, para el lote de vigas dúo.

A modo conclusión en este apartado, indicar la existencia de diferencias significativas entre los dos lotes para la variable MORc del ensayo de flexión, la variable densidad, las variables del ensayo de vibraciones inducidas y ultrasonidos y del de ultrasonidos con el equipo Sylvates; y que dicha diferencia significativa siempre coincide con un mejora del valor de las variables para el lote de probetas dúo reforzadas con fibra de carbono. En el resto de las variables, MOE del ensayo de flexión y MOEplg, a excepción de la velocidad directa y módulo de elasticidad del Sylvatest, en que los valores son menores para el lote de probetas dúo, el valor sigue siendo superior para las probetas, pero las diferencias no son significativas a nivel estadístico.

5.4.2. Estadística comparativa lote vigas dúo reforzadas.

En este apartado se realiza una estadística comparativa de una serie de variables del estudio, como son la densidad, la humedad y el módulo de elasticidad, cuyos valores se han obtenido con distintos métodos u equipos.

5.4.2.1. Análisis comparativo de la densidad, según norma UNE 408, con la densidad del PLG

En este apartado se compara el valor de la densidad calculado según la norma UNE 408 y el valor de la densidad obtenido con el equipo PLG de vibraciones inducidas.

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	2957,98	1	2957,98	7,51	0,0080
Intra grupos	24413,6	62	393,767		
Total (Corr.)	27371,5	63			

Tabla 5.27. Tabla ANOVA (test F) para la DensidadPLG y Densidad real (norma UNE 408)

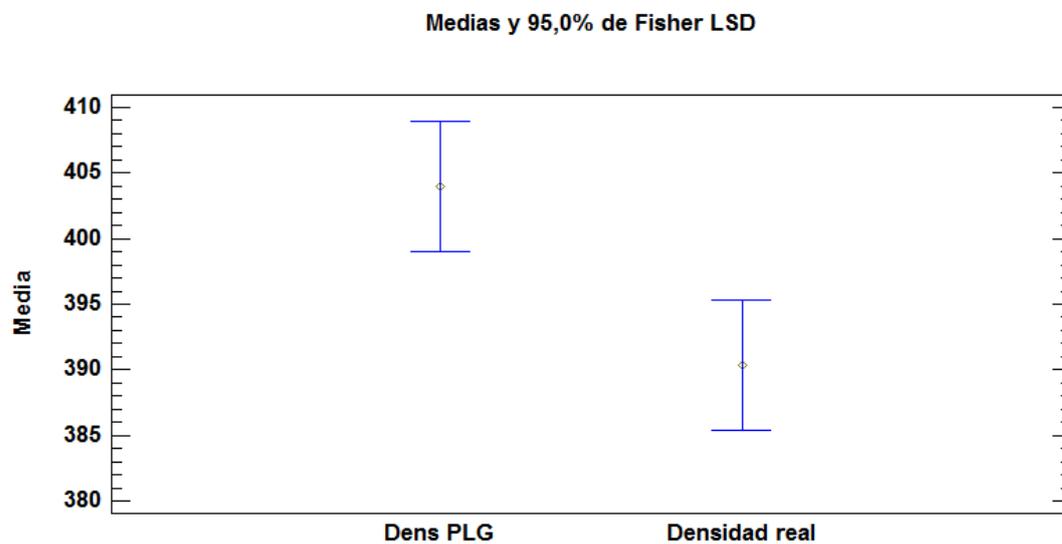


Figura 5.9. Gráfica de medias densidad PLG - densidad norma UNE 408

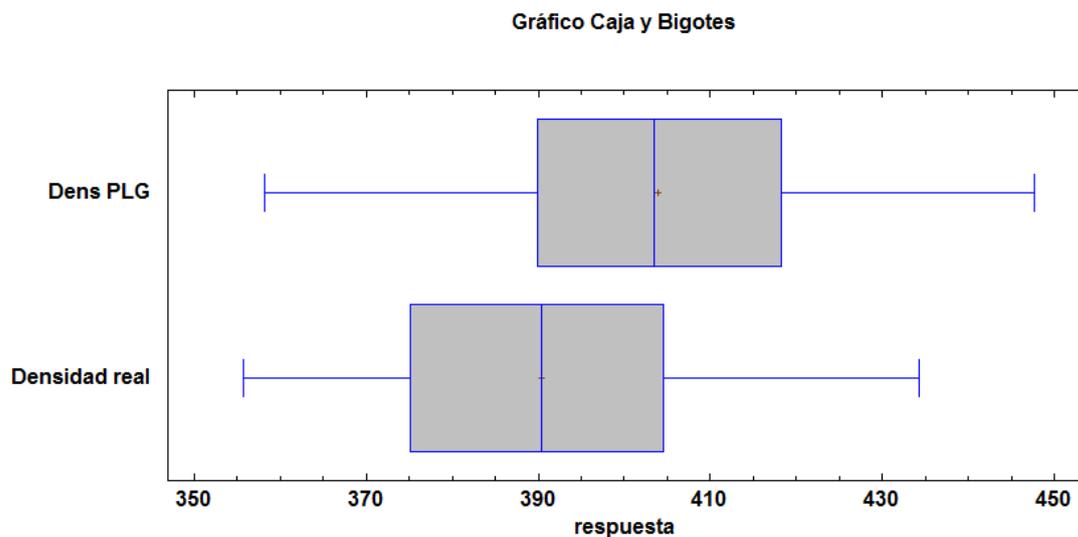


Figura 5.10. Gráfico de caja y bigotes densidad PLG - densidad norma UNE 408

Observando la tabla de medias y múltiples rangos (5.28.), el gráfico de medias (figuras 5.9. y 5.10) y la tabla anova (5.27.), que indica un p-valor menor de 0,05, se puede

afirmar que existen diferencias significativas entre el valor de la densidad calculado de acuerdo al ensayo de la norma UNE 408 y el dato de la densidad obtenido en el ensayo de vibraciones inducidas con el equipo PLG.

CONCLUSIONES

6.- Conclusiones

En este apartado se reúnen las conclusiones generales obtenidas como resultado de la realización de este estudio.

Cabe destacar con anterioridad a la exposición de las conclusiones obtenidas, que este trabajo es de los primeros estudios que se han realizado con con probetas dúo de *Populus x euroamericana* I-214 reforzadas con fibra de carbono; que unido al hecho de que se ha trabajado con madera, un material caracterizado por su heterogeneidad, y al reducido tamaño del lote, hacen que los resultados obtenidos deban tomarse con la correspondiente precaución y cautela.

1. Clasificación visual:

La clasificación visual del lote de 32 probetas dúo reforzadas con fibra de carbono, de acuerdo a los criterios de la norma UNE 56544:2007, da como resultado un 90,625% de probetas dúo clasificadas como madera estructural, un 53,125% de ME-1 y un 37,5% como ME-2. Sólo un 9,375% del lote calificado como "rechazo". Los resultados obtenidos son diferentes y mejores que los reales, ya que un 72% de las piezas se clasifican como madera estructural y el 28% restante se clasifican como "rechazo".

la principal y única causa del rechazo en las probetas es por la presencia de nudos (100%).

Si comparamos estos resultados con los obtenidos en la clasificación visual de otros estudios, por ejemplo el lote de 25 vigas dúo reforzadas de Zan, M. M. (2013), ya que nuestras probetas, con las que hemos trabajado, eran procedentes de las vigas con las que trabajó ella. Se comprueba que el porcentaje de rechazos es mucho menor en las probetas dúo reforzadas con fibra de carbono, 9,375%, frente a un 24% de las vigas dúo reforzadas. Si lo comparamos con otros estudios anteriores (Casado et al, 2012 y Arrate, J., 2010) realizados con madera maciza de la misma especie sobre

unos lotes de 338 y de 137, se comprueba que nuestro 9,375% de rechazo es mucho menor respecto a un 72,5% y 77% respectivamente en madera maciza. De este modo se ha conseguido uno de los objetivos buscados con este tipo de probetas. En la mayoría de los casos los rechazos de las vigas dúo reforzadas se deben a la presencia de nudos, gemas o deformaciones y estos defectos se reducen en la fabricación de las probetas dúo, aumentando con ello el número de vigas que se clasifican como madera estructural.

2. Estadística descriptiva:

Los valores de la desviación estándar y el coeficiente de variación reflejan una muestra bastante homogénea, con poca dispersión; cumpliéndose un resultado al que se tenía previsto llegar con la elección de probetas dúo reforzadas con fibra de carbono, un producto final más uniforme con mayores garantías de calidad.

3. Estadística comparativa lote de vigas dúo reforzadas - lote de probetas dúo:

El análisis comparativo, del lote de vigas dúo reforzadas de *Populus x euroamericana* I-214 con el lote de probetas dúo reforzadas de la misma especie, muestra la existencia de diferencias significativas entre los dos lotes para las siguientes variables:

el MORc del ensayo de flexión, la densidad, las variable frecuencia media del ensayo de vibraciones inducidas ($f_{m_{plg}}$) y las variables del ensayo de ultrasonidos con el equipo Sylvatest Trio® (V_{dsy} y MOE_{dsy}). Dicha diferencia significativa siempre coincide con una mejora del valor de las variables para el lote de probetas dúo reforzadas. En el resto de las variables, MOE del ensayo de flexión y MOE_{plg} , a excepción de la velocidad directa y módulo de elasticidad del Fakopp, en que los valores son menores para el lote de probetas dúo, el valor sigue siendo superior para las probetas, pero las diferencias no son significativas a nivel estadístico.

4. Clasificación estructural:

La clase estructural del lote de probetas dúo reforzadas, de acuerdo a los valores característicos ($MOE: 7534,5 \text{ MPa}$, $MORc: 41,82 \text{ MPa}$ y $\rho_k: 357,97 \text{ kg/m}^3$) de la norma UNE-EN 338:2010, se corresponde con la C-14; pero si se tiene en cuenta el valor del módulo de rotura y de la densidad la muestra podría clasificarse como C-40 y C-24 respectivamente. Tal y como apunta algunos autores (Casado et al, 2012) la especie *Populus x euroamericana* I-214 tiene una resistencia a flexión similar a la de muchas especies de coníferas, sin embargo su módulo de elasticidad es relativamente bajo en comparación con ellas, por lo que no se ajusta a una única clase resistente de las establecidas por la norma UNE-EN 338. Estos mismos autores proponen establecer para esta especie una clase resistente independiente (CHP1 y CHP2), híbrida entre las clases definidas por la norma.

Si se clasifica el lote con la propuesta de clasificación para la madera de chopo realizada por Casado et al (2012), se obtiene únicamente un 0% de probetas dúo calificadas como rechazo frente al 25% de la clasificación según la norma EN 338; y el 100% restante queda clasificado como madera estructural, con un 25% en la clase CHP2 y un 28,13% en la clase CHP1. El resultado del conjunto, en su totalidad, de probetas dúo reforzadas con fibra de carbono mejorarían las expectativas económicas de esta especie, al quedar clasificadas como madera estructural el 100% del lote.

Al comparar los resultados del lote de probetas dúo reforzadas con los del estudio de Zan, M. M. (2013), se comprueba que las propiedades elastomecánicas de las probetas dúo reforzadas mejoran respecto a las vigas dúo reforzadas ($MOE: 7380,64 \text{ MPa}$, $MORc: 25,38 \text{ MPa}$ y $\rho_k: 345,19 \text{ kg/m}^3$). En el caso de la densidad se pasa de una clase resistente C-22 a una C-24 y en el del MORc de una C-24 a una C-40. El módulo de elasticidad también mejora, pero no lo suficiente como para pasar a una clase resistente superior, manteniéndose en la clase más baja de las definidas por la norma UNE-EN 338, la C-14; lo que limita su uso estructural

5. Conclusión final:

A modo de conclusión final indicar que con las probetas dúo de *Populus x euroamericana* I-214 reforzadas con fibra de carbono se consigue un producto final más homogéneo, de forma que disminuya la variabilidad, y se mejoran las características elastomecánicas de la madera, de esta forma se aumentan de forma considerable el número de probetas que se clasifican como madera estructural. No obstante, la mejora obtenida es escasa, y no lo suficiente como para cambiar de clase resistente, quedando el lote clasificado en la clase más baja (C-14) de las definidas por la norma UNE-EN 338, lo que limita su uso estructural. Por otra parte sería conveniente evaluar si esa mejora compensa en relación con el coste económico que supone el incorporar la fibra de carbono al proceso de fabricación de la probeta dúo.

BIBLIOGRAFÍA

7.- Bibliografía

- Ahvenainen, J.; García Barbero, M.; (2007). Uso estructural de vigas DÚO y TRÍO. Vigas de madera compuestas por dos o tres piezas: una alternativa ideal para estructuras ligeras de alta exigencia estética. Vol. 59, 506, 117-121.
- Arnáiz Pérez, J.M. (2008). Determinación de la capacidad resistente en madera estructural de *Populus x euroamericana* y predicción de la densidad con resistógrafo y extractor de tornillos. Trabajo fin de carrera. Escuela Técnica superior de Ingenierías Agrarias. Universidad de Valladolid.
- Basterra Otero, L.A. (2011). Vigas de madera dúo y trío reforzadas mediante bandas encoladas. Patente. Oficina española de patentes y marcas. Universidad de Valladolid. Número de publicación: 2 338 743
- Borràs, X. (20/10/2010). "Breve historia de la madera como material de construcción". *eMagazine madera*, p. 6.
- Carballo, J.; Hermoso, E.; Díez, R. (2009). Ensayos no destructivos sobre madera estructural. Una revisión de 30 años en España. Revista Forestal Kurú (Costa Rica). 6(17),2009. Nota Técnica. Casado Sanz, M.; Acuña Rello, L.;
- Casado, M., Acuña, L., Vecilla, D., Basterra, A., Pando, V. Relea, E. (2007). Determinación de la capacidad resistente de la madera estructural de *Pinus sylvestris* mediante PLG. 11º Congreso Forestal Español de END. Gijón.
- Casado Sanz, M.; Acuña Rello, L.; Basterra Otero, L.A.; Ramón, G.; López, G. (2012). Structural timber classification of *Populus x euroamericana* I-214.
- Casado Sanz, M.; Acuña Rello, L.; Basterra Otero, L.A.; Heredero Muñoz, s. y San Martín, R. (2013). Estimación de la calidad de la madera en rollo de

Populus x euroamericana mediante ultrasonidos. 6º Congreso Forestal Español. Vitoria-Gasteiz.

- Casas Marcos, P. (2010). Diseño, caracterización y ensayos preliminares de vigas dúo con madera de "*Populus x euroamericana*". Escuela superior de Ingenierías Agrarias. Universidad de Valladolid.
- Castro, C. (2008). Productos. Aplicaciones del chopo en la construcción. Revista Argentina Asora, p.8.
- De la Cruz, A. C. (2005). Dinámica de nutrientes en parcelas experimentales de *Populus x euramericana* (Dode) Guinier "I-214". Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid.
- Díez, M.R.; (2006). Los ultrasonidos y la calidad de la madera estructural. Aplicación a *Pinus Pinaster* AIT. Boletín del CIDEU 2: 7-26.
- Díaz Berenguer, M.A. (2012). Caracterización y comparación elasto-mecánica de madera maciza, vigas dúo encoladas y trío reforzadas. Escuela superior de Ingenierías Agrarias. Universidad de Valladolid.
- 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 Doctoral ETSIM- Madrid.
- Grau, J. M. (1991). Ecología del chopo. Selección natural. En: El cultivo del chopo. Monografías Universitarias. Universidad Internacional Alfonso VIII. Soria. 13-49.
- Llano Uribe, C. (2011). Fibra de carbono. Presente y futuro de un material revolucionario. Revista metal actual.

- Orbe, A; Cuadrado, J.; Roji, E.; Maturana, A. (2010). Arquitectura y madera. Guía de diseño de elementos estructurales adaptada al CTE. Servicio central de publicaciones del Gobierno Vasco.
- Padró, A. (1992). Clones de Chopo para el valle medio del Ebro. Diputación General de Aragón. Servicio de Investigación Agraria. Zaragoza.
- Padró, A.; Alonso, N. (2003). Actividades relativas al cultivo y la utilización del álamo y del sauce. Comisión Nacional del chopo en España. Periodo de sesiones: 2000-2003. Comisión Internacional del Álamo.
- Pozo Rodríguez, P. C. (2013). Caracterización elastomecánica de vigas trío reforzadas con fibras artificiales, de P. pinaster Ait. (región de procedencia Meseta Castellana). Escuela superior de Ingenierías Agrarias. Universidad de Valladolid.
- Queipo de Llano Moya, J.; González Rodrigo, B.; Linares Cervera, M.; Villagría Fernández, C.; Gallego Guinea, V. (2010). Guía de construir con madera. Capítulo 0. Conceptos básicos de la construcción con madera. Confemadera.
- Rimoldi, C.; Mariano Mundo, L. (2013). Ensayos no destructivos por método de ultrasonidos. Facultad de Ingeniería. Departamento de Aeronáutica.
- Schickhofer, G., (2009). Productos de madera para la construcción. Prontuariopro: Holz. Escuela Técnica Universitaria de Graz, Austria.
- UNE-EN 384: 2004. Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad.
- UNE-EN 1912: 2005+A4. Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de calidades visuales y especies.

- UNE-EN 14081: 2006. Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por su resistencia. Parte 1: Requisitos generales.
- UNE-EN 56544: 2007. Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas.
- UNE-EN 338: 2010. Madera estructural. Clases resistentes.
- UNE-EN 408: 2011. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas.
- Zan Gómez, M. M. (2013). Estudio de caracterización mecánica de vigas dúo reforzadas de madera *Populus x euroamericana I-214* y análisis comparativo con madera maciza. Escuela superior de Ingenierías Agrarias. Universidad de Valladolid.