UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE EDIFICACIÓN

**REFUERZO Y REPARACIÓN CON FRP DE VIGAS DE
MADERA ASERRADAS SOMETIDAS A FLEXIÓN**

TESIS DOCTORAL

Enrique Gómez de la Peña

Máster Universitario en Innovación Tecnológica en Edificación

Graduado en Ingeniería de la Edificación

2017

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA DE LA EDIFICACIÓN

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE EDIFICACIÓN

REFUERZO Y REPARACIÓN CON FRP DE VIGAS DE MADERA ASERRADAS SOMETIDAS A FLEXIÓN

Autor: Enrique Gómez de la Peña

Máster Universitario en Innovación Tecnológica en Edificación

Graduado en Ingeniería de la Edificación

DIRECTOR:

D. Alfonso Cobo Escamilla

Dr. Ingeniero Industrial, Arquitecto, Arquitecto Técnico

2017

TESIS DOCTORAL

REFUERZO Y REPARACIÓN CON FRP DE VIGAS DE MADERA ASERRADAS SOMETIDAS A FLEXIÓN

Autor:

Enrique Gómez de la Peña

Director de Tesis:

D. Alfonso Cobo Escamilla

Tribunal Nombrado por el Mgfco. Y Exmo Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día de de 2017.

Presidente

Vocal

Vocal

Vocal

Secretaria

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis Doctoral acuerda otorgarle la calificación de:

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

Madrid, de de 2017

ÍNDICE

Agradecimientos	I
Resumen.....	III
Summary.....	V

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción.....	2
1.2 Objetivos generales de la tesis.....	3
1.3 Estructura de la tesis.....	3

CAPÍTULO II: ESTADO ACTUAL DE LOS CONOCIMIENTOS

2.1 Introducción y materiales utilizados.....	5
2.1.1 Características generales de la madera.....	6
2.1.2 Características generales los materiales compuestos de poliéster reforzado con fibras.....	9
2.2 Clasificación de la madera.....	10
2.2.1 Normativa de aplicación	10
2.2.2 Tipos de defectos.....	11
2.3 Ensayos no destructivos aplicados a la madera aserrada.....	12
2.3.1 Velocidad de propagación de ultrasonidos.....	13
2.4 Propiedades físicas de la madera.....	14
2.4.1 Contenido de humedad.....	16
2.4.2 Densidad.....	18
2.5 Propiedades mecánicas de la madera.....	19
2.5.1 Introducción.....	19
2.5.2 Compresión paralela a la fibra.....	20
2.5.3 Tracción paralela a la fibra.....	22

2.5.4 Flexión.....	22
2.5.5 Cortante.....	25
2.5.6 Ductilidad.	26
2.6 Propiedades de la madera reforzada con sistemas FRP.....	29
2.6.1 Refuerzo de vigas de madera a flexión y cortante con FRP.....	29
2.6.2 Reparación de vigas de madera con sistemas FRP.....	32
2.6.3 Durabilidad de los refuerzos FRP relacionados con las vigas de madera.....	33
2.7 Conclusiones.....	35

CAPÍTULO III: REFUERZO Y REPARACIÓN DE VIGAS DE MADERA CON FIBRA DE CARBONO BIDIRECCIONAL

3.1 Introducción y objetivos.....	37
3.1.1 Introducción.....	37
3.1.2 Objetivos.....	38
3.1.3 Estructura del Capítulo III.....	38
3.2 Materiales empleados	39
3.2.1 Madera.....	39
3.2.2 Fibra de Carbono utilizada para el refuerzo (CFRP)	40
3.3 Programa experimental.....	41
3.3.1 Clasificación visual de la madera.....	41
3.3.2 Técnica de ultrasonidos.....	43
3.3.3 Determinación de las propiedades físicas de la madera aserrada.....	43
3.3.4 Determinación de las propiedades mecánicas de las vigas de madera de pino silvestre aserradas.....	44
3.3.5 Determinación de las propiedades mecánicas de las vigas de madera reforzadas y reparadas con CFRP.....	46
3.3.6 Ductilidad.....	48
3.3.7 Gráficos de representación realizados y comprobaciones de cálculo.....	48
3.4 Resultados obtenidos.....	51

3.4.1	Clasificación visual de la madera.....	51
3.4.2	Técnica de ultrasonidos.....	53
3.4.3	Determinación de las propiedades físicas de la madera.....	54
3.4.4	Determinación de las propiedades mecánicas de vigas a flexión sin refuerzo.....	56
3.4.5	Determinación de las propiedades mecánicas de vigas reforzadas y reparadas con diferentes configuraciones de CFRP.....	69
3.5	Análisis de los resultados.....	84
3.5.1	Análisis de la madera objeto del estudio.....	84
3.5.2	Análisis de las vigas reforzadas y reparadas con CFRP.....	88
3.6	Conclusiones del Capítulo III.....	94
3.6.1	Conclusiones sobre la madera estudiada y su comparación con la normativa de caracterización.....	94
3.6.2	Conclusiones sobre las vigas de madera reparadas con Fibra de Carbono Bidireccional.....	95
3.6.3	Conclusiones sobre las vigas de madera reforzadas con Fibra de Carbono Bidireccional.....	96

CAPÍTULO IV: REFUERZO DE VIGAS DE MADERA CON DIFERENTES SISTEMAS FRP

4.1	Introducción y objetivos.....	98
4.1.1	Introducción.....	98
4.1.2	Objetivos.....	98
4.1.3	Estructura del Capítulo IV.....	99
4.2	Materiales empleados	99
4.2.1	Madera.....	99
4.2.2	Fibras utilizadas para el refuerzo.....	101
4.2.3	Resina epoxi utilizada.....	102
4.3	Programa experimental.....	102
4.3.1	Clasificación de la madera empleada.....	102

4.3.2	Caracterización de la madera empleada y ensayos realizados.....	104
4.3.3	Configuración de ensayos de caracterización de vigas reforzadas.....	107
4.4	Resultados obtenidos.....	110
4.4.1	Ensayo de velocidad de propagación de ultrasonidos.....	110
4.4.2	Propiedades físicas de la madera estudiada.....	112
4.4.3	Ensayo a flexión en 4 puntos a vigas sin reforzar.....	113
4.4.4	Ensayo a flexión en 4 puntos a vigas reforzadas con 1 lámina de FRP en su cara inferior.....	116
4.4.5	Ensayo a flexión en 4 puntos a vigas reforzadas con 2 láminas de FRP en las caras laterales de la viga.....	123
4.4.6	Ensayo a flexión en 4 puntos a vigas reforzadas con 2 láminas de FRP en la cara inferior de la viga.....	131
4.4.7	Cálculo de Módulo de Elasticidad Global de vigas sometidas a flexión en 4 puntos y de piezas sometidas a compresión.....	138
4.4.8	Ensayos a compresión.....	140
4.5	Análisis de los resultados.....	142
4.5.1	Análisis de caracterización de la madera empleada.....	142
4.5.2	Análisis de caracterización mecánica de vigas reforzadas con FRP.....	146
4.5.3	Análisis comparativo en módulo de elasticidad con y sin refuerzo y resistencia final alcanzada por las vigas.....	153
4.6	Conclusiones del Capítulo IV.....	155
4.6.1	Conclusiones sobre la madera estudiada y su comparación con la normativa de caracterización.	155
4.6.2	Conclusiones sobre la disposición del refuerzo en las vigas.....	155
4.6.3	Conclusiones sobre la influencia del Módulo de Elasticidad del refuerzo sobre la resistencia de las vigas reforzadas.....	156
4.6.4	Conclusiones sobre los tipos de FRP empleados en los refuerzos.....	157

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES FINALES

5.1 Conclusiones finales de vigas reparadas y reforzadas con Fibra de Carbono Bidireccional	159
5.2 Conclusiones finales de vigas de madera aserrada reforzadas con diferentes sistemas FRP.....	160

CAPÍTULO VI: FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

6.1 Futuras líneas de investigación.....	163
Referencias.....	164
Anexos.....	172

AGRADECIMIENTOS

Agradecer en primer lugar a mi tutor, el Dr. Alfonso Cobo Escamilla, su dedicación y atención, confiando en mí y aconsejándome durante todo el proceso de redacción de la tesis, sin el cual no habría sido posible la realización de la misma.

Agradecer también a la Escuela Técnica Superior de Edificación y a la UPM, por brindarme la posibilidad de realizar esta tesis, facilitándome el uso de los medios disponibles en la escuela dentro del Laboratorio de Materiales de la Construcción, y al Departamento de Tecnologías de Edificación por su ayuda a la hora de difundir los resultados obtenidos a través de las publicaciones realizadas.

A la empresa Mapei S.A. por su colaboración, aportando las fibras y resinas utilizadas para la realización del Capítulo IV de la tesis y, más concretamente, a Esther González por su magnífica atención siempre que lo he necesitado. Agradecer también a la empresa Drizoro S.A.U. por aportarme la fibra de carbono utilizada en el Capítulo III y toda la información técnica necesaria para la realización de los ensayos.

Por ultimo a todos los que se han preocupado y me han estado apoyando durante este tiempo y en especial a mis padres por facilitarme el camino y hacerlo posible.

RESUMEN

Son numerosos los edificios en los cuales la madera es un material protagonista. Ha sido utilizada a lo largo del tiempo como elemento estructural, conformando los pilares y las vigas de muchas construcciones gracias a sus propiedades mecánicas. La necesidad de mantener y rehabilitar este patrimonio construido ha sido siempre una de las grandes tareas en el mundo de la arquitectura. Tradicionalmente, cuando las necesidades estructurales de un edificio cambiaban, o simplemente la estructura estaba deteriorada, la intervención mediante sistemas metálicos, o la adición o sustitución de unos elementos de madera por otros en mejor estado, eran las técnicas más comunes de intervención.

Con la aparición en el mercado de nuevos materiales, la cantidad de posibilidades de acometer una intervención estructural se han ampliado. Los materiales compuestos han sido parte importante de este cambio de prácticas. Su utilización ha sido más habitual sobre elementos de hormigón, sobre los cuales hay una mayor bibliografía y legislación escritas. Sus propiedades mecánicas con una excelente relación resistencia-peso, su gran capacidad de adaptación, y su comportamiento elástico lineal a tracción, hacen de ellos una alternativa muy efectiva para su uso en estructuras de madera.

En líneas generales, el fallo producido en vigas de madera se localiza en la cara traccionada, la cual se comporta de un modo elástico y lineal hasta que se produce el fallo final. En el caso de que la madera contenga defectos significativos, como pueden ser nudos en dicha cara, la resistencia de la viga puede bajar sustancialmente ya que supone un corte en las fibras que confieren la resistencia a tracción. El refuerzo mediante materiales compuestos en dicha cara de las vigas tiene gran interés ya que minimiza la posibilidad de una rotura prematura de la madera y puede suponer un aumento de la capacidad portante de la viga.

Los materiales compuestos de polímeros reforzados con fibra (FRP) han sido ampliamente estudiados a través de programas experimentales en los cuales se han reforzado las vigas en su cara traccionada a través de diferentes configuraciones de tejidos, platabandas y barras. Es en el ámbito de las reparaciones y la comparación de los diferentes materiales que pueden ser utilizados a día de hoy, donde la bibliografía es más escasa. Este trabajo por lo tanto, trata de aumentar el estado del conocimiento en ese sentido a través de un estudio en el cual se reparan vigas de madera con FRP de fibra de carbono (CFRP) y se realiza una comparativa en la cual se estudian diferentes fibras y se analiza el efecto de su uso como refuerzo para vigas de madera a partir de sus propiedades mecánicas.

Para realizar esta investigación, se ha dividido la fase experimental en dos programas diferenciados, adaptando los ensayos y los materiales a las condiciones de partida para la obtención de los resultados. Para el estudio de las reparaciones y los refuerzos con CFRP, se ensayaron vigas a flexión sin refuerzo para la caracterización mecánica del lote, posteriormente se repararon y se volvieron a ensayar. Para la comparación de los resultados, se realizaron los mismos ensayos en vigas reforzadas sin haber sido colapsadas previamente. La comparación de los diferentes sistemas de refuerzo de FRP se llevó a cabo realizando ensayos de flexión a vigas de madera con diferentes configuraciones de refuerzo utilizando todas las fibras disponibles: basalto, vidrio, carbono, carbono de alto módulo elástico y metálica.

Los resultados del estudio demuestran el buen comportamiento de las fibras que disponen un módulo de elasticidad más bajo (basalto y vidrio) respecto de las que tienen un módulo más alto, y que con la suficiente cantidad de fibra, se puede devolver la resistencia a una viga colapsada previamente mediante una reparación.

SUMMARY

There are numerous buildings where wood is a leading material. It has been used for a long time like a structural element, composing the columns and beams of many constructions due to its mechanical properties. The requirement to keep and rehabilitate this built heritage has always been one of the great tasks in the world of architecture. Traditionally, when the structural requirements of a building changes, or the structure was deteriorated, the intervention by metal systems, or the addition or substitution of wood elements by others in better condition, were the most common intervention techniques.

With the appearance of new materials on the market, the number of possibilities for structural intervention has increased. Composite materials have been an important part of this intervention change. Its use has been more usual on concrete elements, where a greater bibliography and legislation can be found. Their mechanical properties with an excellent resistance to weight ratio, their great adaptability, and their elastic-linear tensile behavior, make them a very effective alternative for use in wooden structures.

In general terms, the failure in wooden beams is produced in the tensile side, which behaves elastically and linearly until the final failure occurs. If the wood has many significant defects, such as knots in the face of the beam, the strength of the beam can be lowered substantially as it implies a cut in the fibers, which gives to the beam its bearing capacity. Reinforcement by composite materials on the face of the beams is very interesting, because it minimizes the possibility of premature breaking of the wood and may lead to an increase of the bearing capacity of the beam.

The composite materials of fiber reinforced polymers (FRP) have been extensively studied through experimental programs where the beams have been reinforced through different configurations of fabrics, sheets and bars. It is on the area of repairs and the comparison of different materials that can be used, where the bibliography is limited. This work tries to increase the state of knowledge with a study where wood beams are repaired with FRP of carbon fiber (CFRP) and to make a comparison with different kinds of fibers, focused on the effect of its use as reinforcement material for wood beams.

To carry out this research, the experimental phase has been divided into two different programs, adapting the tests and materials to obtain the results. For the research of repairs and reinforcements with CFRP, unreinforced beams were tested to bending up to fracture to the mechanical characterization of the wood used, and later repaired with CFRP and tested again. For the comparison of results, the same tests were performed on reinforced beams which had not previously failed. The comparison of the different FRP reinforcement systems was carried out by bending tests to wood beams with different reinforcement configurations using all the available fibers: basalt, glass, carbon, carbon with high elastic modulus and metallic fiber.

The results of the study demonstrate the good performance of the lower elastic modulus fibers (basalt and glass) in contrast to those with a higher elasticity modulus, and that with the enough amount of fiber, a repaired beam with FRP can recover its resistance.

CAPÍTULO I:

INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

La madera es un material fibroso de origen vegetal que ha sido utilizado en el ámbito de la edificación en muchos aspectos. Uno de sus usos principales es el de elemento estructural trabajando a compresión y a flexión, por lo que forma parte de un gran número de edificios existentes siendo los pilares, las vigas, partes entramadas de sus fachadas, cargaderos, etc.

El paso del tiempo puede provocar variaciones en estos edificios, el cambio de uso de los mismos como forma de reutilización de los espacios, es uno de los motivos por los que las estructuras deben ser analizadas de nuevo para ver si son capaces de soportar los nuevos requerimientos. El deterioro es otra de las consecuencias del paso del tiempo. El ataque de xilófagos, la pudrición, o el simple colapso de los elementos estructurales, provocan que el mantenimiento deba ser minucioso y continuo.

Tradicionalmente los refuerzos y las reparaciones de las estructuras de madera se han llevado a cabo mediante la sustitución de los elementos deteriorados por otros de madera nuevos en buen estado. La intervención mediante elementos metálicos también ha estado muy extendida, dando solución a muchos problemas aun hoy en día. La aparición de nuevos materiales ha aumentado ampliamente las posibilidades de intervención. Los materiales compuestos gracias a su capacidad de adaptación y su gran relación resistencia-peso, han sustituido a estos sistemas en muchos de los casos.

Su uso ha estado más relacionado con el refuerzo de estructuras de hormigón, ámbito sobre el cual existe mayor legislación que en el de las estructuras de madera, aunque en el terreno de la investigación son numerosos los estudios que tratan los refuerzos entre materiales compuestos y madera. La fibra de carbono y la fibra de vidrio han sido las tradicionalmente más utilizadas en diferentes configuraciones reforzando vigas a través de platabandas, barras y tejidos. La fibra de basalto puede ser utilizada también como refuerzo, aunque la información que se tiene es menor ya que las investigaciones en este ámbito son limitadas.

Las posibilidades brindadas por este tipo de materiales y la escasa documentación al respecto hacen que adquieran gran interés las reparaciones llevadas a cabo con estos sistemas sobre vigas de madera. Para el correcto conocimiento de las posibilidades de estos materiales sería bueno tener una comparativa entre diferentes opciones de fibras de las cuales se dispone a día de hoy para ver la respuesta de cada una de ellas en su interacción con la madera. Por todo ello este estudio tiene como objeto ahondar en estos dos aspectos para contribuir al estado del conocimiento de la materia.

1.2 Objetivos generales de la tesis

El estudio realizado tiene tres objetivos generales a través de los cuales espera aportar información valiosa al estado del conocimiento del refuerzo y la reparación de vigas de madera realizadas con FRP. Estos objetivos son:

- Estudio de las propiedades de la madera y su comparación con la normativa reguladora para su correcta caracterización.
- Conocimiento y comparación del comportamiento de las vigas de madera sometidas a flexión, reforzadas y reparadas con fibra de carbono (CFRP).
- Comparación del comportamiento de vigas de madera reforzadas con diferentes sistemas de FRP.

1.3 Estructura de la tesis

Para alcanzar los objetivos trazados, la tesis se ha estructurado en 6 capítulos.

El Capítulo I realiza una introducción donde se exponen los condicionantes de partida y se marcan los objetivos generales a cumplir.

El Capítulo II desarrolla el estado del conocimiento de la materia, realizando un estudio sobre el comportamiento físico y mecánico de la madera y de los sistemas de materiales compuestos utilizados para su refuerzo.

El Capítulo III realiza un estudio en el cual se compara el comportamiento a flexión de vigas reforzadas y reparadas con fibra de carbono bidireccional. En él se llevó a cabo una caracterización de la madera objeto del estudio ensayando vigas a flexión sin refuerzo. Estas vigas colapsadas, se repararon posteriormente con fibra de carbono y se volvieron a ensayar a flexión. Para la correcta comparación de resultados se reforzaron vigas con la misma configuración que las vigas reparadas y se ensayaron a flexión hasta su rotura.

El Capítulo IV realiza un estudio comparativo entre diferentes sistemas de refuerzo realizados con FRP y con fibra metálica. En él se ha observado el efecto de las características mecánicas de las diferentes fibras sobre las vigas. Para la correcta comparación todas las vigas reforzadas han sido estudiadas con los mismos condicionantes de partida.

El Capítulo V enumera las conclusiones finales que se han obtenido durante la realización de la investigación.

El Capítulo VI marca las posibles futuras líneas de investigación en base a las conclusiones obtenidas del estudio.

CAPÍTULO II:
ESTADO ACTUAL DE LOS
CONOCIMIENTOS

2.1 Introducción y materiales utilizados

La madera es, por excelencia, el material utilizado en construcción desde tiempos inmemorables. Por su naturaleza de esbeltez y resistencia ha sido la estructura portante principal de gran cantidad de edificaciones, así como en muchas ocasiones, material base de formación de paramentos.

No sólo se utilizó como material principal de construcción, sino que, también fue, hasta tiempos no muy lejanos, el principal material de fabricación de sistemas auxiliares de construcción.

Su carácter de fácil transformación y cualidades indudables para la resistencia y perdurabilidad en el tiempo hacen de ella la principal opción como sistema estructural en edificación en muchos países en los que es común su proliferación, perdurando así en el tiempo a pesar de la infinidad de nuevos sistemas constructivos y estructurales que se nos presentan.

Este uso tan extendido de este material, ha provocado que durante mucho tiempo se haya tenido que atender a las diferentes necesidades de mantenimiento que ha ido presentando. El fallo estructural debido al deterioro de la madera (xilófagos, pudrición, etc...), o la necesidad de nuevas disposiciones de carga de los elementos estructurales, ha hecho que los refuerzos y las reparaciones hayan sido ampliamente estudiados. Tradicionalmente el refuerzo y la reparación de la madera se han llevado a cabo mediante la adhesión de nuevas piezas de madera en correcto estado o el refuerzo mediante elementos metálicos como platabandas, vigas, etc. (*Figura 2.1*).

Figura 2.1. Refuerzo mediante platabandas metálicas en viga de madera.

En los últimos años, con la aparición de los materiales compuestos, el abanico de posibilidades ante una posible intervención se ha abierto ampliamente (*Figura 2.2*). Es extensa la gama de materiales compuestos de poliéster reforzado con fibras (FRP) que se ofrecen en el mercado para su uso en edificación, brindando unas posibilidades de refuerzo muy variadas. En muchos casos, no se puede plantear una intervención de gran entidad o dimensiones, ya que los edificios no pueden estar grandes periodos en desuso, no se

dispone de espacio suficiente para la reparación, o la estructura tiene algún tipo de protección que impide su sustitución. En estas situaciones los materiales compuestos adquieren gran interés gracias a su adaptabilidad, rapidez de ejecución y gran resistencia. Estos tres motivos, unidos a su bajo peso, han hecho que los materiales compuestos sean muy utilizados dentro de la industria, la aeronáutica o, incluso, el sector deportivo (*Machida, 1993*). En la construcción son cada vez más utilizados, como lo demuestra el gran número de publicaciones relacionadas con el tema (*Neale et al, 1992; Nanni et al, 1996; Pavez et al, 2009; Ogawa, 2000; Parra et al, 2012; Subagia et al, 2014; Ahmad et al, 2010*) y el desarrollo de sus normativas y reglamentos en diversos campos, como el de las estructuras de hormigón.

Figura 2.2. Refuerzo de estructura de hormigón con platabandas de fibra de carbono.

2.1.1 Características generales de la madera

La madera es un tejido vegetal característico de los vegetales leñosos. Es un material heterogéneo y anisótropo formado por células que conforman tubos irregulares en el eje paralelo al tronco.

Está compuesta principalmente por carbono (50%), oxígeno (40%) e hidrógeno (5%). Estos elementos forman diferentes compuestos químicos:

- Celulosa (40-50 %): constituye las paredes de las fibras (resistencia a tracción).
- Lignina (20-30 %): une las fibras de la celulosa (capacidad aglutinante).
- Hemicelulosa (20-30 %): forma parte de la matriz que aglutina las fibras (no constituye fibras por sí mismas).
- Componentes secundarios (5-7 %): resinas, grasas, ceras. Influyen en el color y toxicidad de la madera y en la apetencia o no a agentes biológicos.

En cuanto a su macroestructura, se puede considerar al tronco de un árbol como un cono o paraboloide formado por sucesivas capas superpuestas. Esto se debe a que la madera se forma en una capa existente entre corteza y madera llamada *cambium* y que, cuando las condiciones son favorables, produce madera hacia adentro y corteza hacia afuera. Este proceso es más o menos igual en toda la superficie. Cada periodo vegetativo (anual en

maderas de la zona boreal y estacional en maderas de la zona tropical) se produce una nueva capa que recubre a la anterior, son los anillos de crecimiento (*Gutiérrez, 2014*).

Esta estructura que conforma el entero de la madera, se organiza en diferentes capas (*Figura 2.3*), las cuales son, de dentro a fuera:

Figura 2.3. Sección transversal de las partes del tronco.

- Médula: parte central del tronco carente de resistencia mecánica.
- Duramen: Parte interna del tronco, caracterizada por ser de color más oscuro que el resto del mismo debido a ciertos procesos químicos, acumulación de resinas o aceites, compuesta por células inactivas que se van obstruyendo ya sea por depósito de sales minerales como oxalatos o carbonatos, o por la formación de tilosas que provoca que los elementos conductores pierdan su función. Su resistencia es mayor a la de la albura.
- Albura: parte que suscribe al duramen, de color característico más claro que este, compuesta por células activas por donde discurre savia bruta desde las raíces hacia las hojas. La albura, junto al duramen, conforman el xilema de la madera.
- Cambium: parte delgada de la madera, que se forma exteriormente al xilema y separa este del floema. Las células del cambium se dividen para dar lugar internamente a nuevas células del xilema que forman los nuevos anillos de crecimiento y externamente a las células del floema encargadas de conducir los productos de la fotosíntesis desde las hojas al resto de los órganos de la planta.
- Floema: compuesto por la corteza interna o líber y la corteza externa o peridermo.

Las células más externas del floema experimentan una suberificación y, progresivamente van dando origen a la corteza. El crecimiento secundario del tronco de los árboles origina lógicamente un aumento de la circunferencia del cambium. Para hacer frente a este aumento de circunferencia, las células del cambium experimentan dos tipos de divisiones (*Figura 2.4*). La división multiplicativa se produce periclinalmente (división en un plano paralelo al que están alojadas las células) y las dos células resultantes de la división son, a su vez, células iniciales que contribuyen a aumentar la circunferencia del cambium vascular. La división aditiva tiene lugar en sentido anticlinal (división en un plano paralelo al que están

alojadas las células). De cada dos células producidas por una división aditiva, una se conserva como célula inicial que volverá a dividirse a su vez, y la otra se transforma en célula madre del xilema o del floema respectivamente. Estas células se van diferenciando progresivamente para formar sus respectivos tipos de tejido (García, 2003).

Figura 2.4. Separación entre floema y xilema y tipos de división del cambium.

En cuanto a su comportamiento físico, podemos decir que la madera tiene dos características principales:

- Anisotropía: Debido a su estructura fibrosa, las propiedades físicas y mecánicas de la madera no son isotrópicas. La dirección de estas condiciona las características y el comportamiento de la madera. Se diferencian 3 direcciones: *Axial* o paralela a las fibras, *radial* o perpendicular a las fibras y *tangencial* o tangente a los anillos.
- Higroscopicidad: La madera tiende a equilibrar su humedad con la del ambiente. En este proceso se producen cambios en las dimensiones del material. Se distinguen 3 parámetros principales del comportamiento hídrico de la madera:
 - Contenido de humedad: relación entre el peso de agua y el peso de la madera.
 - Punto de saturación de las fibras: Contenido de humedad del agua de impregnación.
 - Humedad de equilibrio con el ambiente.

Las características físicas y mecánicas variaran con el contenido de humedad, que en estado natural es alto (50-300% dependiendo de la especie).

La humedad puede ser de 3 tipos diferentes: “de constitución”, “de impregnación” adherida a las paredes de las fibras o “libre” en las cavidades de la madera.

En cuanto a su clasificación botánica, podemos separarlas en dos grupos:

- Coníferas: Son las maderas pertenecientes al subgrupo de “blandas”. Son de crecimiento rápido y ofrecen buenas cualidades para construcción (pino, abetos, cedros...).
- Frondosas: Son las llamadas “maderas duras” (roble, haya, olmo, encina, olivo...).

Algunas de las propiedades físicas a destacar de la madera son:

- Tienen un bajo coeficiente de conductividad térmica.
- Sufren muy baja dilatación.
- Es un material combustible, aunque la carbonización exterior protege el interior.
- Y en secciones macizas, aíslan el ruido por reflexión.

2.1.2 Características generales los materiales compuestos de poliéster reforzado con fibras

Los materiales compuestos de poliéster reforzado con fibras (FRP) están cada vez más extendidos, debido a su disminución de precio y a un mejor conocimiento de su comportamiento.

Su modo de trabajo en edificación es a tracción, determinado por la dirección de las fibras. Su aplicación se ha llevado a cabo principalmente reforzando elementos flexionados o elementos sometidos a compresión mediante el confinamiento lateral de la sección. También pueden ser utilizados para el refuerzo a cortante, donde destaca el uso de laminados y barras (*Figura 2.5*).

Figura 2.5. Refuerzo a cortante en viga de hormigón mediante platabandas de fibra de carbono.

Los tejidos se presentan en diferentes configuraciones: unidireccional, bidireccional y cuadriaxial, variando la cantidad de fibra (gramaje) por m² en función de las necesidades. Destacan por su adaptabilidad y su buena relación peso/resistencia.

El módulo de elasticidad depende del tipo de fibra del que se componga el tejido, siendo más elevado el de las fibras de carbono (200.000 – 400.000 MPa) y menor en fibras de basalto y vidrio (80.000 – 90.000 MPa).

El tipo de aplicación es mediante resinas epoxi, las cuales tienen un alto poder de adhesión. Son las encargadas de transmitir los esfuerzos de la pieza a reforzar al compuesto de fibras, por lo que deben tener buena resistencia a cortante sin fluencia (*Baquer et al, 2014*). La aplicación suele ser in-situ (*Figura 2.6*), por lo que los soportes sobre los que se adhiere deben ser preparados previamente a la colocación mediante la homogeneización de la superficie donde se va a adherir y la ausencia de polvo para la correcta unión entre las interfaces.

Los FRP son sensibles a agentes externos, siendo las temperaturas extremas, los rayos UV y los posibles impactos su mayor punto débil.

Las primeras investigaciones de estos sistemas en vigas de madera datan de los años 60 (*Theakston, 1965; Biblis, 1965*), donde se reforzaron vigas con fibra de vidrio. No es hasta los 90, cuando empiezan a aparecer trabajos de vigas de madera reforzadas con fibra de carbono (*Meier et al, 1995*).

Figura 2.6. Refuerzo con fibra de carbono del puente del paseo Tollocan y Comonfort.

2.2 Clasificación de la madera

Debido a que la naturaleza de la madera hace imposible el control de su comportamiento, como podría ser el caso de los materiales férreos, se establece una clasificación visual de la misma a través de su morfología, que trata de predecir el comportamiento mecánico.

2.2.1 Normativa de aplicación

Se ha desarrollado a través de las autoridades de control competentes una serie de normas que acotan los defectos morfológicos que condicionan el comportamiento de la madera.

La clasificación visual de la madera conífera aserrada (pino silvestre) en el territorio español se rige por la norma UNE 56.544 (*UNE-EN 56.544:2011*) de noviembre de 2011.

El objeto de aplicación de esta norma es “establecer un sistema de clasificación visual aplicable a la madera aserrada para uso estructural de sección rectangular de las principales especies de coníferas españolas.”

La clasificación visual de la madera, determina la calidad de la misma en base a la evaluación de singularidades y características:

- Características generales: Contenido de humedad, densidad, dimensiones.
- Singularidades ligadas a la anatomía: Nudos, fendas, etc.
- Singularidades ligadas al aserrado de las piezas: gemas, medula.
- Alteraciones de tipo biológico que pueda presentar la madera: hongos, insectos xilófagos, plantas parásitas.
- Deformaciones de las piezas: curvatura, abarquillado y alabeo.

Una vez obtenida la calidad de la madera se debe atender a la norma UNE-EN 1.912 (*UNE-EN 1912: 2012*) que establece una relación de calidades visuales de resistencia, de especies y de procedencias de la madera.

Por último la clase resistente de la madera objeto de estudio definirá sus valores característicos a través de la UNE-EN 338 (*UNE-EN 338: 2010*) que establece un sistema de clases resistentes de uso general en el marco de las normas de cálculo estructural.

Esta norma indica para cada clase, los valores característicos de las propiedades de resistencia y rigidez y los valores de densidad, así como los criterios de clasificaciones de las poblaciones de madera, es decir, las combinaciones de especies, procedencias y calidades.

Las bases de cálculo se adoptarán en base al Eurocódigo 5 (*UNE-EN 1995*).

2.2.2 Tipos de defectos

Los defectos que condicionan el comportamiento de la madera son los siguientes (*Medina, 2013*).

Nudos

Son inclusiones de las ramas dentro del árbol. Pueden estar sanos y ser adherentes, con lo que no constituyen ningún defecto pues obedecen al desarrollo vegetativo, o pueden ser saltadizos o estar podridos, en cuyo caso sí determinan la calidad de la madera.

Apenas influyen en la resistencia a compresión o cortante pero reducen la resistencia a tracción o flexión debido a que son quebradizos.

Fendas

Son fisuras o agrietamientos en dirección radial y axial, que se producen en el árbol o en la madera cortada al superarse los valores de existencia por diferentes motivos, como las tensiones de crecimiento o la desecación de la madera.

Las fendas de secado son las únicas aceptadas por la normativa española con restricciones dimensionales. Se forman durante el secado de la madera. Cuando la madera pierde humedad, la merma en dirección tangencial es mucho mayor que en la dirección radial (del orden del doble), dando lugar a tensiones internas que producen una separación de las fibras en forma de fendas.

No se puede establecer que las fendas sean determinantes en el modo de rotura de las piezas, por lo que no son motivo para desencadenar fallos por cortante (*Esteban et al, 2010*).

Acebolladuras

Roturas locales producidas entre dos anillos de crecimientos vecinos, a lo largo del eje del árbol, que se producen cuando dichos anillos se desarrollan a velocidades distintas.

Doble albura

Se genera por la falta de ligninación de dos o más anillos anuales que no se transformaron a tiempo en duramen.

Inclinación de la fibra

Defecto genético bastante habitual en la madera juvenil de las coníferas y las frondosas, que se revira a derechas, pero que en la mayoría de las ocasiones se corrige con la formación de la madera madura, que se revira a izquierda.

Afecta de forma muy importante a la resistencia a flexión y a tracción.

Gemas

Falta de arista viva debido al aprovechamiento del tronco en su aserrado. La resistencia a flexión de las piezas con gemas no es inferior a la de las piezas libres de gemas. Esto podría explicarse por el hecho de que las fibras no se cortan en la superficie de la gema, como ocurre en las piezas de aristas vivas, así como al efecto de forma de la sección (*Arriaga et al, 2007*).

Pudriciones

Afección por parte de alguno de los numerosos organismos vivos que viven en la madera (hongos o agentes xilófagos).

2.3 Ensayos no destructivos aplicados a la madera aserrada

Las técnicas no destructivas empleadas en madera tratan de predecir las particularidades de la misma para la predicción previa del comportamiento físico-mecánico de esta.

El método más común de funcionamiento es el uso de la técnica de multisensores. El uso de varias de estas técnicas describe la composición de un objeto, ya que el uso de una de ellas

no detallaría por completo la composición del material. Pequeños defectos como nudos o fendas, pueden ser detectados por técnicas de transmisión de sonido (Niemz et al, 2012).

2.3.1 Velocidad de propagación de ultrasonidos

La técnica de ultrasonidos se basa en la velocidad con que las ondas sonoras son capaces de propagarse en el medio, en este caso, la madera (Figura 2.7). La presencia de defectos tales como nudos, oquedades, bolsas de resina o fendas provocarán alteraciones en la velocidad de propagación a través del medio leñoso. Se trata de una técnica muy desarrollada y sobre la que existen abundantes estudios.

La velocidad media de propagación de la onda suele estar en torno a 5.000 m/s, según datos publicados por diferentes autores (Reiterer et al, 2000).

A través de ella, junto con la densidad, se puede obtener el módulo de elasticidad dinámico tal que:

$$E_D = \rho \times v^2 \quad [1]$$

Donde:

E_D = Módulo de Elasticidad Dinámico.

ρ = Densidad de la pieza en Kg/m³.

v = Velocidad en Km/sg.

Esta relación entre la velocidad de la onda y el módulo de elasticidad aporta información sobre la calidad general de la piezas, sin embargo su relación con la resistencia ultima no es tan clara ya que esta suele depender de algún defecto local que produce la rotura y la velocidad de propagación de la onda en ese defecto, en concreto, puede tener poca influencia (Fernández-Golfín et al, 2007).

Ha sido ampliamente investigada y utilizada para la inspección de maderas aserradas en servicio (Fujii, 1990; Arriaga et al, 2005), para madera aserrada (Machado et al, 1998; Hermoso et al, 2003). Otros autores investigaron su uso en la determinación de la resistencia de abeto y sus conclusiones fueron sobre la posibilidad de realizar una efectiva clasificación a partir de las velocidades de propagación (Sandoz, 1989).

Figura 2.7. Ejemplo de medición mediante ultrasonidos.

2.4 Propiedades físicas de la madera

Las propiedades físicas de la madera son aquellas que determinan su comportamiento frente a los distintos factores que intervienen en el medio natural, sin producir ninguna modificación mecánica o química.

Higroscopicidad

La madera tiende a equilibrar su humedad con la del ambiente. En este proceso se producen cambios en las dimensiones del material. De esta forma a cada estado ambiental corresponde un grado de humedad de la madera, llamado humedad de equilibrio higroscópico.

Se mide por la variación de la densidad de la misma cuando su contenido de humedad varía en un 1% (*Argüelles et al, 2000*).

Hinchazón y merma

Las variaciones de humedad provocan cambios volumétricos en la madera. Estos movimientos solo tienen lugar cuando su contenido de humedad se encuentra por debajo del punto de saturación de las fibras.

Debido a su condición anisótropa, este cambio volumétrico no es igual en todas las direcciones: axial, radial y tangencial, siendo mayor esta última.

En la práctica, el concepto de mayor aplicación es el *coeficiente de contracción lineal* (axial o tangencial), que expresa el porcentaje de variación de las dimensiones en la dirección considerada.

Para el pino silvestre, los valores de contracción a aproximados son:

- Contracción volumétrica total = 12%.
- Contracción radial = 3,85%.
- Contracción tangencial = 6,82%.

La contracción puede tener repercusiones en la seguridad de la estructura debido a cambios volumétricos que provoquen tensiones o desajustes en los medios de unión o fendas de secado (*Argüelles, 2000*).

Propiedades térmicas

Ante la acción de variaciones de temperatura externas, la madera sufre cambios dimensionales, pero su coeficiente de dilatación es tan pequeño que en la práctica se considera despreciable (*Gutiérrez, 2014*).

Se trata también de un mal conductor térmico debido a la ausencia de electrones libres, por ejemplo, en coníferas (pinos y abetos), el coeficiente de conductividad térmica en dirección perpendicular a las fibras es 0,09 a 0,12 Kcal / mh°C.

La difusividad térmica α (m^2/s), obtenida de los parámetros anteriores, representa lo rápido que se difunde el calor por un material. La madera tiene un valor de difusividad térmica bajo: $0,13 \times 10^{-6}$, por lo que, en su mayor parte, el calor es absorbido por el material y una pequeña cantidad es conducido. Varía con la densidad y con el contenido de humedad (*Tanaka et al, 2000; Wyckhuysen et al, 2001*).

Por el contrario su calor específico, cantidad de calor necesario para incrementar su temperatura un grado por unidad de masa es muy bajo, por lo que no necesitamos de mucho aporte de energía para llegar a los 150°C y producir por lo tanto la ignición.

Debido a estas propiedades, el comportamiento de la madera frente al fuego es mucho mejor de lo que se piensa:

- Su baja conductividad hace que una vez este ardiendo, el calor se reduzca hacia el interior de la misma.
- La carbonización superficial hace que no se produzca salida de gases al exterior ni penetración del calor hacia el interior.
- La baja dilatación térmica hace que no sufra variaciones dimensionales durante el fuego por lo que no se deforma.

Por todo esto, a la hora de realizar una estructura de madera, se deberá proteger debidamente bien sea mediante revestimientos con mayores propiedades ignífugas o bien sea aumentando la sección de cálculo de forma que, en caso de incendio, sólo se considere una parte como sección eficaz.

Propiedades eléctricas

La madera se comporta de manera general, como cuerpo aislante. Esta afirmación está sujeta a la condición de que, el contenido variable de humedad en la madera hacen que esta varíe su capacidad conductora, siendo este el factor más influyente a la hora de cuantificarla (*Fernández-Golfín et al, 2014*).

Este hecho ha sido estudiado por diversos autores, pudiendo llegar a decir que por cada reducción de humedad del 4,5%, la resistencia se multiplica por 10 (*Gutiérrez, 2014*).

Propiedades acústicas

La madera es un material poroso, por lo que absorbe el ruido aéreo que se produce dentro de una habitación, evitando la reverberación. Sin embargo es un mal aislante acústico ante ruidos aéreos entre habitaciones debido a que su peso específico es muy bajo (*Medina, 2013*).

La velocidad de propagación del sonido en la madera está en torno a 4.500 m/s en la dirección de las fibras, y de unos 3.000 m/s en la dirección perpendicular. Debido a esta propiedad podremos obtener datos como son el módulo de elasticidad a través de técnicas no destructivas de medición como es la velocidad de ultrasonido.

Dureza

La dureza o facilidad de penetración de un material en otro se determina, en la madera, mediante el ensayo de Monnin, midiendo la huella que deja un cilindro de acero de 30mm de diámetro, al que se aplica una carga de 100 Kp por centímetro de anchura de la probeta durante unos segundos. Se suele medir en dirección perpendicular a la fibra.

En general la dureza de la madera está relacionada básicamente con su densidad, pero su valor disminuye al aumentar la humedad de la madera.

Para madera de pino silvestre, la dureza de Monnin es 1,9 (*Vignote et al, 2006; Medina, 2013*).

2.4.1 Contenido de humedad

El contenido de humedad es un parámetro importante que afecta a varias propiedades físicas, mecánicas y reológicas de la madera, incluida la durabilidad, contracción-inflación, módulo de elasticidad y propiedades de resistencia (*Toratti, 1992; Ranta-Maunus, 2003; Mårtensson, 1992*).

El agua puede estar contenida en la madera de las siguientes formas (*Medina, 2013*):

- Agua de sorción; es la retenida por los grupos polares activos de la pared celular. Es el agua que más fuerte queda retenida por la pared celular. La madera puede contener un 8% en peso de agua de sorción respecto del peso de la madera seca.
- Agua de adsorción: Es la retenida en la pared celular como consecuencia de la adhesión superficial. Puede contener también hasta un 8% en peso.
- Agua de condensación o capilar. Es la retenida por las fuerzas capilares, provocadas por los espacios entre microfibras. Puede contener hasta un 14% en peso.
- Agua libre: es la contenida en el lumen de las células. Su fuerza de retención es muy pequeña, de forma que no se puede captar agua de la atmósfera, solo si la madera se sumerge en agua.

La madera recién cortada contiene del 50 al 110% de agua, proporción que se reduce a valores del orden del 16-18%, por secado al ambiente. Algunas maderas sumergidas durante algún tiempo, pueden alcanzar del 100 al 200% de contenido de humedad.

Es un material higroscópico con la capacidad de intercambiar humedad con el aire circundante dentro de su rango higroscópico, esto es entre el 0 % de contenido de humedad y el punto de saturación de las fibras de cada especie en particular (*Pérez-Peña et al, 2011*).

El contenido de humedad de equilibrio, es el estado en el cual la humedad de la madera se estabiliza con las condiciones ambientales, siendo mayor en aquellas de mayor porosidad y menor densidad. Este estado es afectado por los cambios de humedad relativa y temperatura del aire circundante. Como las condiciones ambientales varían constantemente, ninguna madera se encuentra en equilibrio estable y su contenido de humedad sigue las fluctuaciones que le condiciona el lugar en que se encuentra (*Siau, 1984; Skaar, 1988; Simpson, 1998*).

Aunque la humedad del aire es el factor más importante condicionando el contenido de humedad de la madera, otros factores son la especie, la densidad y porosidad de la madera y la del aire (Siau, 1984). Así como también, la diferencia entre albura y duramen en una misma especie y la cantidad de extractivos (Wangaard et al, 1967; Skaar, 1972; Ball et al. 2001).

Las propiedades reológicas de la madera, deslizamiento y sorción, también son afectadas por el contenido de humedad y esto tiene un importante papel en el comportamiento de los esfuerzos internos, decreciendo generalmente las magnitudes de estos (Toratti, 1992; Mårtensson, 1992; Toratti et al, 2000).

La distribución del contenido de humedad no solo depende de los agentes externos que afecten a la pieza (Fragiacomo et al, 2011), se deben tener en cuenta otros parámetros como son:

- Contenido inicial de humedad: es también un importante factor. Los gradientes de humedad están influenciados por la humedad del aire durante el servicio si estos están lejos de la humedad de equilibrio de la madera. El contenido de humedad inicial de una pieza de madera, depende también del proceso de manufactura y las condiciones de almacenaje del mismo.
- Tipo de exposición: Si la madera está expuesta a la lluvia, el problema es más complejo debido a la capacidad de difusión de agua y vapor de esta, además de su transferencia capilar.

El efecto de la humedad no afecta por igual a todas las propiedades de la madera, siendo más acusada en compresión que en tracción o flexión (Figuras 2.8 y 2.9).

Figura 2.8. Compresión (f_c), tensión (f_t), y flexión (f_m) vs percentil emparejado de abeto (*Picea abies*) en contenido de humedad del 12, 20 y superior a 28 % (Hoffmeyer, 1995).

Figura 2.9. Efecto del contenido de humedad en la resistencia tracción (izquierda) y compresión (derecha) en diferentes niveles de calidad de maderas Americanas (FPL Wood Handbook).

2.4.2 Densidad

La densidad se refiere a la relación entre el peso y el volumen de los objetos. En el caso de la madera, esta debe estar referida a un contenido de humedad concreto debido que este mismo, como ya hemos visto, puede ser muy variable, lo que influiría en el peso y, por consiguiente en la densidad. El contenido de humedad que establece para la clasificación de la madera suele ser del 12%.

Estudiando la microestructura de la madera se puede observar que la densidad real de la madera (de pared celular), compuesta por varias capas (Figura 2.10) es constante para todas las especies y alcanza el valor de 1500 Kg/m³ (Kollmann et al, 1968). Esto significa que la diferencia de densidad aparente entre las diversas especies se consigue con una mayor o menor proporción de huecos en su interior (Argüelles et al, 2000).

Figura 2.10. Esquema de la microestructura de la madera (Kollmann et al, 1968).

La densidad no es uniforme a lo ancho del tronco, como se puede ver en la Figura 2.11 (Steffen et al, 1997). En este caso particular de abeto rojo (*Picea abies*), la densidad varía desde unos 400 a 600 Kg/m³ dependiendo de la sección en que se encuentre. Esto es debido a los contenidos de resina e impurezas que pueden ser encontradas en lumen de las células que conforman albura y duramen.

Figura 2.11. Distribución de densidad (12% contenido de humedad) en dirección de la fibra determinada en probetas de 9 x 9 x 200 mm cortadas de una pieza de 67 x 195 mm libre de defectos de abeto rojo (*Picea abies*) (Steffen et al, 1997).

La madera conífera, más utilizada en construcción suele tener una densidad o peso específico entre 400 y 550 Kg/m³ y las maderas frondosas suelen estar entre 600 y 700 kg/m³. Según esta densidad se pueden clasificar en: madera muy ligera, madera ligera, madera semipesada, madera pesada y madera muy pesada (Gutierrez, 2014).

2.5 Propiedades mecánicas de la madera

2.5.1 Introducción

Las propiedades mecánicas de la madera definen el comportamiento ante acciones exteriores que va a tener esta. Debido a su conformación en forma de fibras que siguen un eje longitudinal estas son estudiadas en función de la disposición de estas y el modo de entrada en carga del elemento estructural.

Tracción y compresión paralelas a la fibra

Son aquellas que se aplican en sentido axial a las fibras de conformación del material leñoso. Es la forma de trabajo natural de la madera, proporcionando los valores más altos de resistencia.

Tracción y compresión perpendiculares a la fibra

Son aquellas que se aplican en sentido contrario a las fibras, formando un ángulo de 90° con ellas. Los esfuerzos soportados son de menor valor que las paralelas a la fibra. Esta baja resistencia se justifica por las escasas fibras que la madera tiene en la dirección perpendicular al eje del árbol (radios leñosos) y la consiguiente falta de trabazón transversal de las fibras longitudinales (Argüelles et al, 2000) haciendo que, en tracción, la resistencia sea de orden de 30 a 70 veces menor que en la dirección paralela. En compresión la reducción de resistencia es del orden de 4 veces respecto de la paralela, haciendo que el fallo se produzca por un aplastamiento sin llegar a la clara rotura (Figura 2.12).

Figura 2.12. Relación entre tensión y deformación en compresión perpendicular a la fibra (Argüelles et al, 2000).

En la Tabla 2.1 se comparan los valores de caracterización mecánica de la madera con los del hormigón y del acero, obteniéndose los siguientes resultados:

	Flexión	Tracción		Compresión		Cortante	Módulo de elasticidad
		Paral.	Perp.	Paral.	Perp.		
Madera	120	120	1,5	110	28	12	110.000
Hormigón	80	6		80		6	200.000
Acero	1700	1700		1700		1000	2.100.000

Tabla 2.1. Comparación de las tensiones admisibles en Kp / cm² de la madera, hormigón y acero (Argüelles et al, 2000).

Por lo que se sacan las siguientes conclusiones:

- Buena resistencia a flexión en relación a su peso.
- Buena capacidad de resistencia a tracción y compresión.
- Escasa resistencia a cortante, compresión y tracción perpendiculares a la fibra.
- Bajo módulo de elasticidad.

2.5.2 Compresión paralela a la fibra.

En compresión paralela a la fibra la madera tiene un comportamiento lineal inicial, que da paso a una fase elasto-plástica marcada por la rotura de fibras gradualmente en el cual la resistencia puede seguir aumentando, pero de forma impredecible. Al final de este proceso se pasa a una fase plástica en la que se llega al fallo del material (Figura 2.13).

Figura 2.13. Relación entre tensión y deformación en compresión paralela a la fibra (Argüelles et al, 2000).

Este comportamiento fue demostrado por Calderoni (Calderoni et al, 2006) en los ensayos realizados a piezas pequeñas libres de defectos, procedentes de vigas antiguas de madera. En ellos se puede observar como todas curvas de las piezas ensayadas, independientemente del origen, tienen un comportamiento muy similar en su fase elástica, pero no cuando son cargadas desde esta fase hasta la rotura. Esto es debido a la influencia que tiene la interfaz entre los elementos comprimidos, la cual sufre procesos de aplastamiento o rotación de fibras que condicionan el comportamiento a compresión, siendo inevitable ya que es condición siempre presente en este esfuerzo (Figura 2.14).

Figura 2.14. Ensayo de compresión paralela a la fibra: Probetas antes y después del ensayo (a); F- Δ curvas de las probetas del grupo A (2 x 2 x 4 cm) (b) y del grupo B (3 x 3 x 9 cm) (c); $\sigma - \epsilon$ gráfico de todas las probetas (d) (Calderoni et al, 2006).

2.5.3 Tracción paralela a la fibra

Tiene un comportamiento lineal y elástico hasta rotura en madera libre de defectos. La resistencia es mayor que la compresión paralela a la fibra, pero, en base a la normativa de clasificación esta se ve mermada debido a la influencia negativa que los defectos tienen sobre la tracción, formando puntos débiles y corte y desviación de fibras.

Este comportamiento responde a la teoría formulada por Pierce (*Pierce, 1926*) y Tucker (*Tucker, 1927*) y, más específicamente, Weibull (*Weibull, 1939*), quien trabajó sobre distintos materiales de tipo frágil incluido el hormigón, propusieron la que se ha conocido como "la teoría del eslabón más débil", según la cual "sujeta a tensión, una cadena es tan resistente como su eslabón más débil".

2.5.4 Flexión

La madera tiene, en general, un buen comportamiento a flexión en el cual se aúnan los esfuerzos de compresión, en la cara superior de la pieza, y tracción, en la cara inferior de la pieza, paralelos a la fibra.

La flexión de la madera viene marcada por la diferencia de comportamiento entre las fibras que se encuentran a compresión, de comportamiento más rígido, frente a las que se encuentran a tracción, de comportamiento elástico lineal. Newlin y Trayer (*Newlin et al, 1924*) sugirieron la que ha sido conocida como la "teoría del apoyo", según la cual las fibras de la madera en la zona comprimida de una viga trabajando a flexión, actúan individualmente como pequeñas columnas, encontrándose las fibras más altamente tensionadas ubicadas cerca del borde superior de la viga restringidas en su movimiento por el efecto de las relativamente poco tensionadas fibras que se encuentran cerca de la línea neutra.

A pesar de estar condicionada por los defectos, en flexión, la madera no puede considerarse como un material frágil ya que sólo entre el 10% y el 40% de las roturas pueden considerarse como tales, aunque deben ser tenidas en cuenta. Por otra parte, este porcentaje tiende a reducirse notablemente con la calidad de la madera, llegando a ser prácticamente cero en el caso de madera limpia (*Rouger et al, 1994*).

En una viga sometida a flexión simple, la curva tensión-deformación en compresión es solo parcialmente elástica, ya que a partir de cierta deformación ($\epsilon_{c,0,y}$), variable con la especie, se entra en una zona de deformaciones elastoplásticas, que finaliza en un tramo recto bajo tensión constante ($f_{c,0,u}$), asociada a unas deformaciones que varían entre $\epsilon_{c,0,p}$ y $\epsilon_{c,0,u}$. La curva tensión-deformación en tracción es elástica hasta la rotura, adoptando la pendiente un ángulo de inclinación (β), mayor que el de compresión en tramo elástico (α), (*Figura 2.15*) (*Baño et al, 2012*).

Figura 2.15. Valores de límite elástico y resistencia última para madera de *Pinus sylvestris* L. (Baño et al, 2012).

Si se admite la hipótesis de tensión plana de la sección, en los primeros estados de carga la ley de tensiones seguirá una distribución formada por dos rectas con diferente pendiente. Como consecuencia de este comportamiento, la fibra neutra desciende, alejándose del comportamiento clásico de la resistencia de materiales para sólidos isótropos, con la fibra neutra en el eje de la pieza para flexión simple (Figura 2.16).

Figura 2.16. Esquema de descenso de la fibra neutra en una viga sometida a flexión simple.

El modo de rotura por flexión es en todos los casos en la sección traccionada con mayor sollicitación, la cual suele coincidir en la mayoría de los casos con el centro del vano. Calderoni (Calderoni et al, 2006), comprobó mediante ensayos a flexión en 4 puntos y a 3 puntos en el centro del vano este modo de rotura, a pesar de que los esquemas de ensayo eran diferentes.

2.5.4.1 Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad (ME) es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección que se aplique la fuerza. Es por lo tanto que determinará el comportamiento a flexión de los elementos de madera en este caso.

La madera tiene un ME diferente para compresión paralela a fibra $E_{c,0}$, y para tracción paralela a la fibra $E_{t,0}$. Baño (*Baño et al, 2012*) estudio mediante un Modelo de Elementos Finitos (MEF) la relación entre la rigidez y diferentes relaciones de dichos módulos de elasticidad, mediante el estudio de vigas biapoyadas con carga centrada.

En base a los valores de módulo de elasticidad a compresión paralela a la fibra obtenidos en los ensayos experimentales de compresión paralela a la fibra a 34 probetas de 20 x 20 x 60 mm y tracción paralela a la fibra a 82 probetas de tamaños variables de pino silvestre se toma el módulo de elasticidad a tracción paralela a la fibra en función de una serie de relaciones entre ambos valores. Las relaciones consideradas son las siguientes: $E_{t,0}/E_{c,0} = 1,0$; $E_{t,0}/E_{c,0} = 1,2$; $E_{t,0}/E_{c,0} = 1,3$; $E_{t,0}/E_{c,0} = 1,4$, de modo que los módulos de elasticidad a tracción paralela a la fibra considerados en la simulación numérica son $E_{t,0} = 8.100 \text{ N/mm}^2$, $E_{t,0} = 9.720 \text{ N/mm}^2$, $E_{t,0} = 10.530 \text{ N/mm}^2$ y $E_{t,0} = 11.340 \text{ N/mm}^2$ respectivamente. Los valores de deformación y de tensión se obtienen mediante simulación numérica para cada una de las relaciones consideradas, excepto en el caso de la relación $E_{t,0}/E_{c,0} = 1,0$, que es abordable mediante la teoría de resistencia de materiales. Para abordar este cálculo, se ha tenido en cuenta la influencia del esfuerzo cortante con una relación $G = E/16$.

La *Figura 2.17* muestra la relación entre la rigidez (deformación por unidad de carga) para distintas esbelteces de una viga de sección cuadrada de 20 mm. Se aprecia que, a medida que aumenta la esbeltez, aumenta también la rigidez. Esto en parte se debe a que un aumento de $E_{t,0}$, para un valor de $E_{c,0}$ constante, implica un aumento del módulo de elasticidad medio, E_m , según la ecuación [2].

$$E_m = \frac{4 * E_{t,0} * E_{c,0}}{(\sqrt{E_{t,0}} + \sqrt{E_{c,0}})^2} \quad [2]$$

Figura 2.17. Relación entre $E_{t,0}/E_{c,0}$ en la rigidez para una viga biapoyada de diferentes esbelteces con una carga puntual centrada (*Baño et al, 2012*).

La relación que $E_{t,0}/E_{c,0}$ tiene en la deformación y en las tensiones una influencia que varía entre el 7,7% y el 16,7% sobre la deformación e influye de forma decreciente en las tensiones a medida que la luz de la viga aumenta.

Esta relación se hace notable experimentalmente en los comienzos de la carga, donde se considera el mismo comportamiento elástico para la sección entera. Una vez se alcanza el límite elástico de la parte comprimida de la sección, esta podrá seguir recibiendo carga, pero el comportamiento se alejará del marcado previamente por los módulos de elasticidad, entrando en procesos plásticos de la parte comprimida, mientras la traccionada sigue recibiendo carga y comportándose elásticamente (*Figura 2.18*).

Figura 2.18. Diagrama tensión deformación para probetas de pequeño tamaño cargadas a flexión en 4 (Be1) y 3 puntos (Be2 y Be3) y su comparación con sus módulos de elasticidad ($E = 13\,000$ Mpa para Be1 y $E = 15\,000$ Mpa para Be2 Be3) (*Calderoni et al, 2006*).

2.5.5 Cortante

El fallo por cortante de una viga de madera es debido a que la sección de esta no es capaz de absorber los esfuerzos horizontales a los que está sometida durante el ensayo a flexión a consecuencia de que la relación canto/luz es muy pequeña (normalmente se habla de una relación menor de 1/5), por lo que se produce una rotura en el sentido de la fibra. Si se provoca en el sentido radial de los anillos de crecimiento, el fallo se produce por una delaminación entre dos de ellos.

La capacidad a cortante de una viga de madera podría basarse en la capacidad de carga de la misma. Para determinar la resistencia a cortante de una viga mediante un ensayo de flexión es precisa una disposición de poca esbeltez (relacion luz/canto de la viga menor o igual a 5) (*Esteban et al, 2010*). Aun así, la presencia de defectos, principalmente en la cara traccionada de la viga, marcará significativamente el modo de rotura, haciendo que esta se produzca en la mayoría de los casos por flexión o una combinación entre flexión y cortante, de difícil definición debido a la heterogeneidad del material. El aumento de la altura de la sección, respecto del ancho, produciría un aumento de la rigidez y del momento de inercia, pero no necesariamente de la resistencia, por lo que se favorecería que el fallo de la sección se produzca mediante cortante.

Es un hecho que el aumento de la resistencia a flexión supone un aumento de las probabilidades de que la rotura se produzca por cortante. Esto fue comprobado a través del trabajo de investigación sobre resistencia a flexión de 3 especies diferentes de pino. Se observó cómo los fallos por cortante aumentaban con la calidad de la madera, obteniendo el

0% de roturas por cortante en elementos de pino radiata (menor resistencia a flexión), el 4,5% en pino silvestre y el 7,5% en pino laricio (mayor resistencia a flexión) (Íñiguez, 2007).

2.5.6 Ductilidad

Normalmente el termino ductilidad se refiere a la propiedad mecánica que describe el grado en el que los materiales pueden deformarse plásticamente sin fracturarse. Para la ingeniería estructural y para la madera en particular, no hay una definición unificada del término, ni tampoco un entendimiento común en cómo la ductilidad debe ser usada en diseño estructural. En la literatura revisada parece haber una percepción unánime de que la ductilidad es una propiedad deseada para las grandes estructuras (Malo et al, 2011).

Al menos 4 razones pueden ser enunciadas para diseñar estructuras dúctiles:

1. Para asegurar que el fallo ocurrirá por una larga deformación, que garantice la seguridad en caso de cargas inesperadas: Ductilidad estática.
2. Para permitir la redistribución de la tensión dentro de la sección y para aumentar la capacidad de carga de la estructura con respecto al valor calculado en el análisis elástico: Ductilidad estática
3. Para permitir la disipación de energía bajo carga de sismo, reduciendo así los efectos del mismo: Ductilidad dinámica.
4. Para incrementar la robustez estructural. El comportamiento dúctil es una manera de asegurarse que la estructura puede asumir largos desplazamientos y rotaciones causadas por repentinos fallos de un miembro de los que componen la estructura: Ductilidad estática.

2.5.6.1 Ductilidad en estructuras de madera

La ductilidad, como ya se ha mencionado, está relacionada con la posibilidad de alcanzar grandes desplazamientos sin perder demasiada resistencia en un material, junta, elemento o estructura cargada con control de su desplazamiento. Sin refuerzo, esto puede ser difícil de conseguir en elementos de madera a flexión, carga axil o cortante. De todos modos, se pueden obtener grandes deformaciones en madera cargada a compresión paralela y perpendicular a la fibra (Jorissen et al, 2011).

Para evitar el fallo frágil, la plastificación en flexión requiere una resistencia a tracción considerablemente superior respecto de la resistencia a compresión. Este caso lo tenemos con la madera libre de defectos. Sin embargo, la madera estructural contiene defectos, por lo que solo se dará esta situación cuando los defectos estén localizados en la zona comprimida.

Una clara situación en la se puede ver este comportamiento plástico de la madera es compresión perpendicular a la fibra, la cual, alcanzado el límite de deformaciones, su resistencia depende de la capacidad a tracción que tenga entre los anillos de crecimiento, produciéndose un deslizamiento y un aplastamiento entre ellos que da un comportamiento similar al dúctil (Figura 2.19; Calderoni et al, 2006).

Figura 2.19. Ensayo de compresión perpendicular a la fibra: Probetas antes y después del ensayo (a); F-Δ curvas de las probetas del grupo A (2 x 2 x 4 cm) (b) y del grupo B (3 x 3 x 9 cm) (c); σ – ε gráfico de todas las probetas (d) (Calderoni et al, 2006).

Como se puede observar, no es fácil identificar el estado límite último en este esfuerzo, por lo que se correspondería con el primer caso de desplazamiento horizontal representativo del diagrama tensión-deformación. A consecuencia de este comportamiento, lo que se puede considerar comportamiento plástico, no entraría dentro de los límites de servicio de las piezas.

En la Figura 2.20 se muestra las definiciones de ductilidad respecto del código Suizo para estructuras de madera SIA 265 (SIA 265) y de acuerdo a la EN 12.512 (UNE-EN 12.512). Un importante punto de discusión es cual parámetro refleja mejor la ductilidad de una estructura o elemento.

Figura 2.20. Definición del factor de ductilidad y deformación última en la curva carga-deformación en conexiones de madera de acuerdo con SIA 265 (izquierda) y EN 12.512 (derecha).

Las definiciones relativas de ductilidad (1)-(4) se muestran en la *Figura 2.21*, y las definiciones absolutas (8) y (9) necesitaran el llamado rendimiento-deformación u_y .

Figura 2.21. Definiciones de ductilidad (Stehn et al, 2002).

2.5.6.2 Análisis elástico vs análisis plástico

Los elementos de madera son diseñados normalmente mediante métodos de cálculo elástico-lineales tanto para la capacidad de carga del elemento como el cálculo de la sección. Este es el único método de cálculo para madera recomendado por el Eurocódigo 5, mientras que para otros materiales como el hormigón, acero u hormigón armado, se usa generalmente el análisis plástico para calcular la resistencia de la sección, incluso cuando el análisis elástico es usado para evaluar la demanda de resistencia (fuerzas internas) en diferentes secciones. Este tipo de cálculo, llamado elastoplástico, solo es aplicable cuando el material muestra un comportamiento dúctil. Los elementos de madera sin refuerzos, trabajando a flexión, tienen, en ocasiones, una rotura frágil sin redistribución interna de las cargas. Solo se ha podido observar algo de comportamiento plástico en secciones cargadas a compresión o en combinación de compresión (N) y flexión (M) con estrictas limitaciones de esbeltez y M/N en secciones cargadas a compresión (Buchanan, A. 1984; Steiger et al, R. 2005; Blass, H.J. 1991). Se puede concluir con que el cálculo elástico de una estructura con una evaluación plástica de la sección resistente solo es aplicable para estructuras de madera con un refuerzo dúctil.

2.6 Propiedades de la madera reforzada con sistemas FRP

2.6.1 Refuerzo de vigas de madera a flexión y cortante con FRP

Como se ha descrito anteriormente, los elementos de madera sometidos a flexión suelen fallar por rotura de sus fibras traccionadas, las cuales se comportan en modo elástico hasta que llega la rotura. Son pocos los casos en los cuales la rotura final se produce por una plastificación de la cara comprimida del elemento flectado, por lo que en líneas generales, el refuerzo de las vigas se ha producido interviniendo en la cara inferior de las fibras (cara traccionada) a través de barras, platabandas o fibras, bien embebidas en la sección o adheridas a esta cara. Los numerosos estudios de estructuras de madera reforzada con FRP se han centrado principalmente en el análisis de los comportamientos de flexión y cortante, obteniendo buenos resultados en el aumento de la resistencia y la rigidez de las vigas con diferentes configuraciones de refuerzo (*Plavris et al, 1992; Fiorelli et al, 2002; Yeou-Fong et al, 2009; Yusof et al, 2010; Gilfillan et al, 2001*), atendiendo siempre a que el tipo de refuerzo y su colocación puede influir en la respuesta final de la viga reforzada (*Schober et al, 2005*).

Los refuerzos a base de barras se han llevado a cabo mediante la inserción de las barras a modo de armado dentro de la viga o en su cara inferior. Yeou-Fong (*Yeou-Fong et al, 2014*) realizó un estudio en el cual se ensayaron vigas de madera reforzadas con barras de FRP en diferentes disposiciones de la sección de las vigas y fibras adheridas en la cara inferior de las mismas, consiguiendo aumentar la resistencia entre un 4,3 y un 9,5% (*Tabla 2.2*).

Group	Section	Location of hollow section	Strengthening material	Number of specimen
Benchmark		Nil	Nil	2
Control		Center	Nil	3
GFRP		Center	GFRP rod	3
GFRP-e		Eccentric	GFRP rod	3
G-CFRP		Center	GFRP rod and carbon fiber sheets	3

●: GFRP rod; —: Carbon fiber sheets.

Tabla 2.2. Programa experimental llevado a cabo por Yeou-Fong de refuerzo de vigas de madera mediante barras y laminado de fibra de carbono (*Yeou-Fong et al, 2014*).

El uso de laminados ha sido ampliamente estudiado y no solo para el refuerzo de madera nueva, también se ha experimentado como refuerzo de viejas vigas para el conocimiento de la interacción entre los sistemas de FRP y las estructuras en servicio de antiguos edificios. Borri (*Borri et al, 2005*) realizó una comparativa entre refuerzo con barras de carbono y tejido de fibra de carbono. El estudio se realizó mediante ensayos a vigas de madera sometidas a flexión en 4 puntos con diferentes configuraciones de refuerzo mediante barras y laminado de fibras (*Figura 2.22*), siendo más elevados los resultados obtenidos por las fibras, que llegaron a aumentar la resistencia de las vigas un 60,3%. Estos laminados han sido utilizados en algunas ocasiones por diversos investigadores para intentar solucionar los problemas de cortante mediante la colocación del laminado en las caras laterales en los lugares de mayor solicitación (*Greenland et al, 1999; Triantillou, 1997*).

Figura 2.22. Esquema de refuerzo llevado a cabo por Borri (*Borri et al, 2005*).

Las vigas reforzadas con FRP en algunas ocasiones consiguen un gran aumento de la capacidad de carga a flexión, como demostraron Kim et al., aumentándola hasta un 184% (*Kim et al, 2010*). De la Rosa (*De la Rosa et al, 2013*) obtuvo mediante un refuerzo de poliéster reforzado con fibra de carbono (CFRP) en forma de U hasta la mitad de la cara lateral de las vigas de madera aserrada (*Figura 2.23*), aumentar la resistencia un 43% respecto de vigas sin reforzar.

Figura 2.23. Configuración de refuerzo realizada por De la Rosa (*De la Rosa, 2013*).

La fibra de vidrio ha sido una de las más usadas como refuerzo de la madera. Se diferencia de la fibra de carbono en que tiene un módulo de elasticidad menor y tiene menor resistencia a tracción. Su uso se extiende desde los años 60 donde Theakston (*Theakston, 1965*) ya realizó estudios sobre vigas de madera laminada reforzadas con fibra de vidrio. Ha

sido utilizada como refuerzo en todos sus formatos comerciales; barras, platabandas, tejido, etc... Gentile (*Gentile et al, 2002*) consiguió aumentar la resistencia de vigas de madera reforzada con barras de fibra de vidrio entre un 18% y un 42% a través de un refuerzo mediante barras insertadas en la cara inferior de la viga. No solo el refuerzo en la cara traccionada ha sido utilizado, el uso de platabandas insertadas en el centro de la viga también puede ser uno de los sistemas que den solución a la necesidad de reforzar una viga, como demostraron Morales-Conde et al (*Morales-Conde et al, 2015*), aumentando la capacidad de carga hasta el 50% por encima de vigas sin reforzar con este sistema.

Los avances en los estudios realizados con FRP han provocado la incorporación de nuevos materiales como puede ser la fibra de basalto (*Subagia et al, 2014*). En este ámbito también se ha estudiado la relación entre madera y fibra. De la Rosa (*De la Rosa et al, 2013*), utilizando la configuración de ensayo expuesta en la *Figura 2.23*, obtuvo un aumento de la resistencia de las vigas del 22% con un tejido de fibra de basalto de 280 gr/m². Gary M. Raftery (*Raftery et al, 2014*) también utilizó la fibra de basalto para reforzar vigas de madera laminada, en este caso, se realizó un estudio mediante el cual el refuerzo se llevaba a cabo a través de barras de basalto insertadas en la sección de la viga mediante el uso de resina epoxi (*Figura 2.24*). El momento final de las vigas reforzadas llegó a aumentarse un 23% respecto de las que no tenían refuerzo. También aumentó la ductilidad de estas vigas, hecho que no se producía en las vigas sin reforzar cuya rotura era frágil.

Figura 2.24. Configuración ensayo de vigas de madera laminada reforzadas con barras de fibra de basalto llevada a cabo por Raftery (*Raftery et al, 2014*).

El uso de refuerzos de FRP en vigas de madera sometidas a flexión, no solo aumenta la capacidad de carga, sino que también incrementa su ductilidad. Esta característica en vigas de madera sin reforzar es escasa ya que, a pesar de que no se puede considerar un material frágil (*Calderoni et al, 2006; Rouger et al, 1994*), la mayoría de las roturas a flexión se producen en la cara traccionada, cuyo comportamiento es elástico-lineal hasta el agotamiento de la sección. El aumento de la capacidad de la ductilidad en vigas reforzadas ha sido probado en varios estudios. Dempsey (*Dempsey et al, 2006*) realizó un refuerzo compuesto por varillas de fibra de vidrio y varillas de fibra de vidrio y carbono, insertadas en el canto de la viga a través de su parte inferior (*Figura 2.25*). Las vigas reforzadas ensayadas

aumentaron el ratio de ductilidad entre un 19,7% y un 262%. También obtuvo un aumento del modo de rotura dúctil de la viga Gentile (*Gentile et al, 2002*) el cual se llevó a cabo mediante la entrada en la fase plástica de la parte comprimida de la sección. Por lo tanto, el comportamiento dúctil de una viga de madera reforzada puede venir dado mediante la aportación de un material de refuerzo en la zona traccionada que dote de comportamiento plástico a esta parte de la sección, naturalmente de comportamiento elástico-lineal, o por el aumento de resistencia de la zona traccionada hasta tal punto que el fallo se produzca a consecuencia de la plastificación de las fibras comprimidas.

Figura 2.25. Refuerzo propuesto por Dempsey mediante espiras (*Radford et al, 2002*).

2.6.2 Reparación de vigas de madera con sistemas FRP

El uso de los sistemas FRP está ampliamente estudiado en el ámbito de los refuerzos, pero no en el de las reparaciones (*Borri et al, 2003*). Son escasos los trabajos publicados sobre reparaciones de vigas de madera con estos sistemas a pesar de su fácil puesta en obra, adaptabilidad y propiedades mecánicas, que hacen de ellos una posible solución a muchas de las patologías sufridas por las vigas.

D.W. Radford (*Radford et al, 2002*) propuso el uso de varillas de fibra de vidrio insertadas en la parte inferior de la viga para el refuerzo a cortante de vigas de madera dañadas (*Figura 2.26*). Los resultados de su estudio, demostraron que con el suficiente número de barras se puede devolver la rigidez y la resistencia a vigas estropeadas.

Figura 2.26. Sistema de reparación mediante varillas de fibra de Vidrio propuesto por Radford (Radford et al, 2002).

Campilho (Campilho et al, 2009) realizó un estudio donde comparó numéricamente y experimentalmente una reparación mediante parches de CFRP realizados a pequeñas vigas de madera de 300 mm de longitud y 260 mm de luz de ensayo (Figura 2.27). El uso de dichos parches, provocó que las vigas con daños producidos en la cara traccionada de la viga, recuperasen parte de la carga, quedando cerca de la resistencia de las vigas sin daños.

Figura 2.27. Representación esquemática de las reparaciones y el esquema de ensayo realizados por Campilho (Campilho et al, 2009).

A pesar de mostrar ambos estudios unos resultados muy interesantes, resulta escasa la información que se tiene sobre las reparaciones realizadas con FRP, las cuales tienen un gran interés de aplicación en casos de intervención de estructuras en servicio.

2.6.3 Durabilidad de los refuerzos FRP relacionados con las vigas de madera

La durabilidad del refuerzo de FRP sobre la estructura de madera debe ser tenida muy en cuenta. Las condiciones ambientales como pueden ser las temperaturas extremas, ambientes alcalinos o la humedad, afectan al comportamiento no solo de la madera, sino del conjunto Madera - FRP (National Research Council, 2004; American Concrete Institute, ACI 440.2R-08). El uso de estos materiales de refuerzo en ambientes exteriores, puede provocar que la estabilidad del refuerzo se vea afectada, ya que las condiciones higrotérmicas son más extremas, situación que se ve muy aminorada cuando las estructuras son interiores y protegidas. Este hecho, aunque reduce el riesgo de degradación considerablemente, no

exige al proyectista de la intervención del análisis de la estructura (condiciones ambientales y estado de la misma) y de las propiedades físicas del sistema de refuerzo a utilizar, las cuales deben ser compatibles con las propiedades físicas y mecánicas de la madera a intervenir. En el caso de realizar dicha aplicación al exterior, la estructura deberá ser protegida correctamente y aumentar las precauciones a la hora de realizar la intervención.

Para el correcto diseño del refuerzo de FRP se deben de tener en cuenta márgenes de seguridad como por ejemplo, los que marca el ACI para el diseño de refuerzo con FRP en hormigón en su tabla 9.1 (*American Concrete Institute, ACI 440.2R-08*) (Tabla 2.3). Como se puede observar en dicha tabla, la exposición interior del FRP tiene un valor de reducción cercano a la unidad. La fibra de carbono es, dentro de los FRP, uno de los materiales que mejor aguanta los agentes ambientales y mayor durabilidad tiene.

Condiciones de exposición	Tipo de fibra	Factor de reducción ambiental C_E
Exposición interior	Carbono	0,95
	Vidrio	0,75
	Aramida	0,85
Exposición exterior (Puentes, embarcaderos y garajes abiertos al exterior)	Carbono	0,85
	Vidrio	0,65
	Aramida	0,75
Ambiente agresivo (plantas químicas y plantas de tratamiento de aguas residuales)	Carbono	0,85
	Vidrio	0,50
	Aramida	0,70

Tabla 2.3. Tabla 9.1 del ACI sobre refuerzo de FRP en estructuras de hormigón.

La temperatura de transición vítrea (T_g) es un parámetro muy importante del epoxi utilizado para el refuerzo de FRP, ya que establece las condiciones de servicio para el uso de este material. Normalmente, la T_g del epoxi se puede situar por encima de los 60°C, aunque depende de las características de cada fabricante (*FRP reinforcement in RC structures, 2007; Darbhari et al, 2003; Bootle et al, 2001*). En la mayoría de las aplicaciones, el epoxi se utiliza en una temperatura muy por debajo de T_g , es decir, en estado vítreo. Generalmente, cuando el material se expone en un ambiente higrotérmico la T_g disminuye y, por lo tanto, la temperatura de servicio del material cambia. Esta modificación en la T_g refleja el grado de plastificación de resina y de las interacciones de agua / resina que se produce en el material (*Zhou et al, 1999*), lo cual debe ser tenido muy en cuenta en el caso del refuerzo de vigas de madera, debido a sus propiedades higrotérmicas. La excesiva rigidez de las fibras o de la resina utilizada como refuerzo, unido a los cambios volumétricos de la madera ante los cambios de la humedad, pueden aumentar el tamaño y número de fendas de las vigas (*Timber structures. National Research Council, 2005*).

2.7 Conclusiones

La madera es un material anisótropo y heterogéneo ampliamente utilizado como parte de los sistemas estructurales de muchos de los edificios del patrimonio construido. La necesidad de mantenimiento de dichos edificios, hace que sea necesario el estudio de las diferentes posibilidades de refuerzo que pueden ser utilizadas para dar solución a la cantidad de posibles intervenciones que se deben llevar a cabo a consecuencia del deterioro de estas estructuras. Los materiales compuestos suponen una de las posibilidades más versátiles para el refuerzo estructural. En este sentido, son abalados por la gran cantidad de estudios que se han desarrollado en el ámbito del refuerzo de vigas de madera con diferentes sistemas FRP, obteniendo resultados muy positivos consiguiendo aumentar tanto la resistencia de las vigas como la rigidez.

Tras la revisión de la bibliografía, se ha detectado que la gran mayoría de estudios se encaminan hacia el análisis de los refuerzos, siendo escasa la información que se tiene sobre reparaciones realizadas con estos sistemas, las cuales son de gran interés en ámbito de la rehabilitación. Para el correcto conocimiento del funcionamiento de las diferentes opciones de FRP a emplear a la hora de acometer una intervención, sería interesante tener una comparativa de estos sistemas en las mismas condiciones de partida. Esta configuración de estudio tampoco ha sido objeto primordial de los estudios revisados, por lo que aportaría una valiosa información al estado del conocimiento.

CAPÍTULO III:
REFUERZO Y REPARACIÓN DE
VIGAS DE MADERA CON FIBRA
DE CARBONO BIDIRECCIONAL

3.1 Introducción y objetivos

3.1.1 Introducción

La madera es el elemento principal de los sistemas estructurales de muchos edificios del patrimonio construido. Ha sido y sigue siendo utilizada como elemento estructural a compresión, formando parte de los pilares de muchos edificios, y como elemento sometido a flexión conformando viguetas y vigas de forjados, así como la formación de muchas cubiertas.

El mantenimiento y conservación de este patrimonio está cada vez más al día, siendo este el objeto de muchas de las intervenciones que se llevan a cabo en edificios antiguos. Los elementos estructurales de estos edificios son el principal objeto de rehabilitación en muchos de los casos. En algunas ocasiones, estas estructuras no pueden ser sustituidas por otras nuevas, por lo que deben ser intervenidas mediante refuerzos o reparaciones. Habitualmente estas intervenciones se han venido realizando mediante elementos metálicos, pero cuando la rapidez de ejecución y la adaptabilidad son necesarias, los materiales compuestos adquieren especial interés.

Los refuerzos de vigas de madera con FRP han sido estudiados ampliamente por diversos autores desde su puesta en uso en estructuras de madera, siendo la Fibra de Vidrio y la Fibra de Carbono, los materiales más utilizados y estudiados. Los resultados en estas investigaciones han demostrado que el uso de FRP como refuerzo de vigas de madera, puede ser una opción muy interesante a la hora de intervenir elementos estructurales, consiguiendo aumentar la resistencia considerablemente con un peso y tamaño de refuerzo muy reducidos.

Este hecho demuestra que el uso de FRP es muy aconsejable a la hora de intervenir elementos de madera. Esta situación y la poca existencia de literatura al respecto, plantea la realización de un programa experimental mediante el cual se pueda conocer el efecto de las reparaciones realizadas con Fibra de Carbono Bidireccional (CFRP) en vigas de madera previamente colapsadas. Para ello, se realiza un estudio en el cual se repararan varias vigas con Fibra de Carbono. Para su compresión y análisis, también se estudia la madera que va a ser ensayada hasta el colapso y posteriormente reparada, y se realiza una comparativa con la misma configuración de ensayo en vigas reforzadas sin haberse ensayado previamente. Para el mejor conocimiento de las diferentes intervenciones de las diferentes situaciones en las cuales puede ser utilizada dicha intervención se plantea en diferentes hipótesis donde varían tanto la aplicación de la carga como el tipo de refuerzo realizado.

Mediante este trabajo se pretende conocer el efecto de la reparación realizada con CFRP sobre vigas colapsadas previamente, su comparación con los refuerzos realizados en las mismas condiciones y su efecto sobre la madera sobre la que se aplica el refuerzo o la reparación.

3.1.2 Objetivos

Los objetivos particulares de este capítulo, en referencia a los objetivos generales marcados en la tesis son:

- Caracterización real de vigas de madera sometidas a flexión y su comparación con la normativa de caracterización vigente con el fin de conocer si los datos aportados por la norma pueden ser utilizados a la hora de intervenir vigas de madera.
- Conocer el efecto del refuerzo y de la reparación con CFRP de vigas de madera sometidas a flexión para su posterior comparación.
- Analizar la efectividad de los diferentes tipos de refuerzo sobre vigas reforzadas y sobre vigas reparadas.

3.1.3 Estructura del Capítulo III

El Capítulo III, se estructura en 6 subcapítulos más un anexo de las fichas de los elementos de madera utilizados para el estudio, el cual se encuentra al final de la tesis.

En el punto 3.1 se presenta una pequeña introducción donde se encuadra al lector sobre el objeto del estudio y se explica el objetivo trazado con el estudio realizado.

Los materiales empleados durante la realización del estudio se presentan en el punto 3.2, describiéndose sus características y condiciones de puesta en uso en el laboratorio.

El punto 3.3 detalla el programa experimental empleado, describiendo los condicionantes de caracterización de la normativa y los ensayos realizados para la caracterización tanto física como mecánica de las vigas ensayadas. Se indican también las consideraciones para la realización de los cálculos realizados a la hora de obtener los resultados.

Los resultados se muestran en el punto 3.4 a través de gráficos y tablas que muestran los datos de caracterización obtenidos de los diferentes ensayos y cálculos realizados.

Los resultados son analizados en el punto 3.5. En él se compara los resultados de caracterización de la madera empleada con la normativa de caracterización, y se analiza el efecto de la disposición y de los diferentes tipos de refuerzo empleados.

Las conclusiones de los datos recogidos durante el programa experimental se trazan en el punto 3.6. En ellas, se da respuesta a las cuestiones marcadas en los objetivos del estudio.

3.2 Materiales empleados

3.2.1 Madera

Se dispone de 21 vigas de madera de Pino Silvestre (*Pinus Silvestris*)(de B01 a B22, exceptuado B16) procedentes del aserradero de Valsain (Segovia) de dimensiones 1090 x 155 x 78 $\pm$ 3mm (*Figura 3.1 y Tabla 3.1*), de las cuales se utilizarán la totalidad de las mismas para los ensayos de caracterización de las propiedades físicas del lote en cuestión y se ensayarán 13 a flexión, escogidas aleatoriamente, en diferentes configuraciones para la caracterización mecánica de la madera empleada (*Tabla 3.7 y 3.8*).

Se escogió una madera con una variabilidad notable, debido a que una de las principales aplicaciones de los refuerzos y reparaciones con CFRP, puede ser llevada a cabo en vigas antiguas de edificios existentes, las cuales carecen de los estándares de regulación marcados por la UNE-EN 56.544 para la aceptación y rechazo de los elementos estructurales de madera, y es interesante el analizar como afecta este tipo de intervención en esta madera.

Figura 3.1. Ensayo a flexión en 4 puntos realizado a una de las vigas.

Para llevarlo a cabo se han realizado ensayos de flexión en tres y cuatro puntos a las vigas indicadas en la prensa hidráulica modelo MIB60 y se procesan los datos mediante el software informático WINTEX 32, ambos de Ibertest, disponibles en el Laboratorio de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Edificación de Madrid. Las vigas se ensayaron en diferentes disposiciones y configuraciones para una mejor caracterización. Una vez obtenidos los resultados, se procesaron mediante las diferentes técnicas expuestas posteriormente para la caracterización de las mismas.

Las 8 vigas restantes que no se ensayaron a flexión se reforzaron con Fibra de Carbono (CFRP) en forma de U en su sección, en diferentes configuraciones, para la caracterización mecánica de las vigas reforzadas. De las vigas ensayadas previamente sin refuerzo, 8 de ellas se repararon con CFRP, siguiendo la misma configuración que las vigas reforzadas para su posterior ensayo a flexión.

Las piezas fueron acopiadas en el laboratorio de materiales donde se realizaron los ensayos, cuya temperatura se encuentra entre los 21°C y 23°C y su humedad relativa entre el 40% y el 60% durante el proceso experimental. Previamente a los ensayos las piezas han estado almacenadas en el mismo durante 2 años, por lo que no se esperan cambios higroscópicos en las mismas.

Viga	Largo (m)	Ancho (m)	Alto (m)	Viga	Largo (m)	Ancho (m)	Alto (m)
B01	1,088	0,080	0,155	B12	1,090	0,079	0,155
B02	1,088	0,077	0,154	B13	1,087	0,078	0,154
B03	1,089	0,079	0,155	B14	1,091	0,082	0,155
B04	1,089	0,077	0,157	B16	1,088	0,080	0,157
B05	1,089	0,076	0,156	B15	1,089	0,079	0,155
B06	1,089	0,080	0,156	B17	1,089	0,077	0,155
B07	1,089	0,079	0,157	B18	1,089	0,080	0,157
B08	1,089	0,079	0,155	B19	1,090	0,078	0,153
B09	1,089	0,078	0,156	B20	1,087	0,079	0,154
B10	1,089	0,078	0,156	B21	1,090	0,080	0,155
B11	1,091	0,078	0,157	B22	1,090	0,080	0,154

Tabla 3.1. Listado de vigas disponibles y sus dimensiones en metros.

3.2.2 Fibra de Carbono utilizada para el refuerzo (CFRP)

Como material de refuerzo se ha utilizado fibra de carbono bidireccional de 160 gr/m² y de 210 gr/m², suministrada por la empresa Drizoro S.A.U, cuyas propiedades mecánicas se pueden observar en la *Tabla 3.2*. Para el pegado del CFRP se ha usado una resina epoxidica bicomponente con un tiempo de curado de 5 días (*Tabla 3.3*), siguiendo las indicaciones del fabricante. La puesta en uso se llevó a cabo aplicando una primera capa sobre la viga con un rendimiento de 0,5 Kg/m² para la adhesión de la fibra. Una vez se produce el primer pegado de fibra se aplicó una capa de resina epoxi por cada capa de fibra con un rendimiento de 0,3 kg/m².

Se decidió utilizar un tejido bidireccional debido a que la rotura de las vigas ensayadas a flexión sin refuerzo fue muy aleatoria. De este modo, al realizarse la reparación, se garantiza que se absorben los esfuerzos críticos en todas las direcciones.

Tipo de fibra	Disposición de las fibras	Densidad del tejido (gr/m ²)	Espesor del tejido (mm)	Resistencia a tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)
160	Bidireccional	160	0.04	4,757	208,590
210	Bidireccional	210	0.06	4,589	197,875

Tabla 3.2. Valores de caracterización del CFRP empleado para el refuerzo de las vigas.

Nombre del producto		MAXEPOX-CS
Versión		S
Proporción mezcla peso	Resina	4
	Endurecedor	1
Peso específico (25º)	Resina	1,14
	Endurecedor	0,97
Tiempo de curado (d)	23º	5

Tabla 3.3. Valores de caracterización de la resina epoxi empleada para la unión del CFRP con la viga.

3.3 Programa experimental

3.3.1 Clasificación visual de la madera

Para la clasificación de las piezas de manera visual, cada país tiene su propia normativa, la cual, a través de la especie de procedencia, calidad y restricciones dimensionales de los defectos, encuadra la madera en una u otra clase resistente.

Las vigas se clasificaron visualmente según la norma UNE 56.544: "Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural" de 2011 (UNE-EN 56.544). Una vez clasificadas, se encuadraron dentro de la clase resistente MEG (Madera Estructura de Gruesa Escuadría) debido a que contaban con un espesor mayor de 70 mm. Las restricciones morfológicas de los defectos para la aceptación o rechazo de las piezas se pueden observar en la *Tabla 3.4*.

CRITERIOS DE CALIDAD		MEG
DIÁMETRO DE LOS NUDOS SOBRE LA CARA (h)		$d \leq 2/3$ de "h"
DIÁMETRO DE LOS NUDOS SOBRE EL CANTO (b)		$d \leq 2/3$ de "b"
ANCHURA MÁXIMA DEL ANILLO DE CRECIMIENTO. Pino silvestre		Sin limitación
FENDAS	De secado	$f \leq 3/5$ Las fendas de contracción 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 Abatimineto	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 2/5 de la sección o de la superficie externa de la pieza
DESVIACIÓN DE LA FIBRA		1 : 6 (16,7%)
GEMAS	Longitud	$\leq 1/3$ de "L"
	Dimensión relativa	$g \leq 1/3$
MEDULA		Admitida
ALTERACIONES BIOLÓGICAS		
Muérdago (<i>V.album</i>)		No se admite
Azulado		Se admite
Pudrición		No se admite
Galerías de insectos xilófagos		No se admite
DEFORMACIONES MÁXIMAS		
Curbatura de la cara		20 (10) mm (para una longitud de 2 m)
Curbatura del canto		12 (8) mm (para una longitud de 2 m)
Alaveo		2 (1) mm (por cada 25 mm de "h") (para una longitud de 2 m)
Abarquillado		Sin limitación

Tabla 3.4. "Tabla 3. Especificaciones para la clasificación de piezas de sección rectangular con anchura >70 mm" (UNE-EN 56.544).

Una vez conocidas las restricciones tipológicas y dimensionales de los defectos característicos de la madera a clasificar, se procedió a la clasificación de la misma.

La clase resistente se asignó en base a la norma UNE EN 1912: 2012 “Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de calidades visuales y especies” (UNE-EN 1.912), la cual determina que “la madera de pino silvestre de calidad MEG se corresponde con la clase resistente C22” (Tabla 3.5).

Clase resistente	País que publica la norma de clasificación	Calidad (véase la nota 2)	Especies Nombre comercial	Procedencia	Identificación botánica (véase la tabla 3)	Observaciones
C22	España	MEG	Pino Silvestre	España	47	El grosor y anchura mínima es 70 mm

Tabla 3.5. “Tabla 1. Asignación de calidades de especies de coníferas y chopo a clases resistentes según la UNE-EN 1912: 2012”.

La norma UNE-EN 338: 2010 “Madera estructural. Clases resistentes”, indica los valores de caracterización de cada una de las clases resistentes. Se pueden observar en la Tabla 3.6.

		Coníferas y Chopo											
		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Propiedades de resistencia (en N/mm²)													
Flexión	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
Tracción paralela a la fibra	$f_{t,0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30
Tracción perpendicular a la fibra	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Compresión paralela a la fibra	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29
Compresión perpendicular a la fibra	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2
Cortante	$f_{v,k}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Propiedades de rigidez en kN/mm²													
Módulo de elasticidad medio paralelo a la fibra	$E_{0,medio}$	7	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13	14	15	16
Módulo de elasticidad paralelo a la fibra (5% percentil)	$E_{0,05}$	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 elasticidad medio perpendicular a la fibra	$E_{90,medio}$	0,23	0,27	0,3	0,32	0,33	0,37	0,38	0,4	0,43	0,47	0,5	0,53
Módulo medio de cortante	G_{medio}	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00
Densidad (en kg/m³)													
Densidad	ρ_k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460
Densidad media	ρ_{medio}	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550

Tabla 3.6. “Tabla 1. Clases resistentes. Valores característicos”, según la norma UNE-EN 338: 2010.

3.3.2 Técnica de ultrasonidos

Se realizaron medidas de tiempo de propagación de ondas de ultrasonido en las piezas a ensayar. Para ello se utilizó un comprobador ultrasónico cat. E 46 (*Figura 3.2*), el cual da la medición del tiempo de propagación, expresado en microsegundos de vibraciones ultrasónicas a través de los materiales.

Para la toma de datos se dividió cada cara de pieza en 3 partes y se tomó la medida en cada una de ellas con una ubicación aleatoria cada vez, dentro de cada parte. Para garantizar la correcta transmisión de las ondas fue necesario utilizar vaselina neutra en las interfaces osciloscopio-pieza.

Figura 3.2. Ultrasonic tester E46 para la realización del ensayo (izquierda). Lectura transversal de velocidad de propagación de ultrasonido en pieza a ensayar (derecha).

Una vez obtenidos los resultados, se procedió al cálculo del módulo de elasticidad dinámico de las piezas a través de la ecuación [1].

3.3.3 Determinación de las propiedades físicas de la madera aserrada

3.3.3.1 Contenido de humedad

La larga estancia en el laboratorio ha hecho que la madera se encuentre en equilibrio con el ambiente, por lo que no se han producido cambios higroscópicos durante la realización de los ensayos.

La humedad relativa durante el acopio y la realización de los ensayos dentro del laboratorio de materiales de la Escuela Técnica Superior de Edificación de Madrid se encontró entre el 40% y el 60%.

Para la determinación del contenido de humedad se procedió al desecado de 4 probetas tipo “rebanada”, que se extrajeron de piezas ya ensayadas y constituían una muestra representativa de las vigas a ensayar. Para la realización del mismo se introdujeron en la estufa marca CONTERM, modelo 2000201, disponible en el laboratorio a temperatura de 103 ± 3 °C, tomando medidas del peso periódicamente hasta que este fue constante.

3.3.3.2 Densidad

La densidad se calculó a través de la medición de las dimensiones de las caras de las piezas y posterior cálculo de su volumen y la obtención de su peso a través de la balanza de precisión de la que se dispone en el laboratorio marca JADEVER, modelo D-6300-RS.

Debido a que la madera sufre variaciones dimensionales durante su proceso de adaptación higroscópica al ambiente en el cual se encuentra, se obtuvieron 3 medidas de cada una de las caras mediante un calibre y un metro en el caso del eje longitudinal, en diferentes posiciones, y la posterior media aritmética de las mismas, para la determinación de la medida de caracterización.

3.3.4 Determinación de las propiedades mecánicas de las vigas de madera de pino silvestre aserradas

Para la obtención de las medidas que permitiesen obtener el comportamiento a flexión y cortante de la madera, se procedió a la realización de ensayos mecánicos a las mismas.

3.3.4.1 Flexión y cortante

El comportamiento a flexión se caracterizó a través de los ensayos de flexión en 4 puntos y 3 puntos realizados en la prensa hidráulica modelo MIB60, con capacidad de carga de 600 kN y el software informático WINTEX 32, ambos de Ibertest. Se realizaron estas dos configuraciones para observar el cambio de comportamiento de las vigas según la configuración de ensayo. La elección de las piezas para cada ensayo fue aleatoria y se puede observar en la *Tabla 3.7*.

Viga	Ensayo de flexión		Viga	Ensayo de flexión	
	3 puntos	4 puntos		3 puntos	4 puntos
B01		X	B12		X
B02	X		B13		X
B03	X		B14		X
B04		X	B15		X
B05	X		B17		X
B06		X	B18		X
B07		X	B19	X	
B08		X	B20	X	
B09		X	B21		X
B10	X		B22		X
B11		X			

Tabla 3.7. Tipo de ensayo realizado a cada viga.

3.3.4.2 Ensayo a flexión en 4 puntos

Se ensayaron 8 piezas de madera de pino silvestre de las medidas especificadas con anterioridad. El ensayo consistió en la aplicación de un desplazamiento constante de la prensa (15 mm/min) y la aplicación de la carga en 4 puntos (*Figura 3.3 y 3.4*). Una vez

realizado el ensayo se procesaron los datos obtenidos para la realización de las gráficas de caracterización correspondientes.

Figura 3.3. Esquema del ensayo a flexión en 4 puntos.

Para la mejor comprensión de los resultados, se procedió a dibujar una cuadrícula de 50 x 20 mm (Figura 3.4 y 3.5) previa al ensayo. De este modo se observan a simple vista la evolución de los procesos causantes del fallo.

Figura 3.4. Foto del ensayo a flexión en 4 puntos.

Figura 3.5. Croquis de la cuadrícula dibujada en las caras de las piezas antes de su ensayo.

3.3.4.3 Ensayo a flexión en 3 puntos

Se ensayaron 4 piezas de madera de pino silvestre de las medidas especificadas con anterioridad. Al mismo modo que el ensayo a flexión en 4 puntos se realizó un desplazamiento constante de la prensa y la aplicación de la carga en 3 puntos (aplicación de la carga en mitad del vano) (*Figura 3.6 y 3.7*). Una vez realizado el ensayo se procesaron los datos obtenidos para la realización de las gráficas de caracterización correspondientes.

Figura 3.6. Esquema de ensayo a flexión en 3 puntos.

Figura 3.7. Foto de ensayo a flexión en 3 puntos.

3.3.5 Determinación de las propiedades mecánicas de las vigas de madera reforzadas y reparadas con CFRP

Para poder comprobar la eficacia de los refuerzos de CFRP aplicados sobre las vigas que previamente han colapsado, en primer lugar se han ensayado las vigas de madera a flexión hasta rotura, y en segundo lugar se han reparado con CFRP y se han vuelto a ensayar hasta rotura. De este modo puede comprobarse la diferencia entre el comportamiento inicial (viga sin refuerzo) y de la viga reparada. A su vez se han ensayado vigas reforzadas, sin ensayarlas previamente, para comprobar la diferencia entre vigas nuevas reforzadas y las vigas que han sido reparadas. Con esta configuración de ensayo pueden conocerse las diferencias entre los comportamientos de i) las vigas de madera sin refuerzo, ii) las vigas de madera colapsadas y reparadas y iii) las vigas de madera reforzadas.

Los ensayos se han realizado a flexión en tres y cuatro puntos, igual que las vigas ensayadas sin refuerzo, colocando las vigas de canto (*Figuras 3.3 y 3.6*), en diferentes configuraciones (*Tabla 3.8*) para comprobar la efectividad de los refuerzos de CFRP. Se han ensayado 13 vigas a flexión sin refuerzo y 8 vigas reforzadas con CFRP. Posteriormente se han reparado 8 vigas de las previamente ensayadas sin refuerzo con 1 o 2 capas de CFRP de diferentes

gramajes para la comparación de resultados con las vigas reforzadas. Una vez reparadas, las vigas se ensayaron con la misma configuración que el ensayo previo realizado sin refuerzo. Todos los ensayos se llevaron a cabo hasta que se produjo la rotura total de las vigas en todos los casos. Para la identificación de las vigas reforzadas y reparadas se ha creado un código del tipo X/Y/Z donde: X indica el número de viga (B00); Y indica el tipo de refuerzo: F: Reparada, R: Reforzada; y Z indica las capas del refuerzo y el gramaje del mismo (capas /gramaje). Los ensayos se llevaron a cabo en el laboratorio de la Escuela Técnica Superior de Edificación de Madrid, de la Universidad Politécnica de Madrid, con una prensa hidráulica modelo MIB60 de Ibertest de 600 kN de capacidad de carga, controlando el desplazamiento a una velocidad de 15 mm/min.

El refuerzo se realizó en forma de U sobre la cara traccionada (*Figuras 3.8 y 3.9*), llegando hasta el 75% de la altura de las caras laterales de la viga para garantizar que los daños sufridos durante el ensayo a flexión de las vigas sin refuerzo eran reparados.

Figura 3.8. Esquema de la colocación del refuerzo de FRP.

Viga	Ensayo de flexión		Ensayo sin fibra y posterior reparación	Refuerzo de FRP tipo U. Nº de capas/gramaje del FRP en gr/m²
	3 puntos	4 puntos		
B01		X	-	-
B02	X		-	-
B03	X		-	2/210
B04		X	-	1/160
B05	X		-	-
B06		X	-	-
B07		X	X	1/160
B08		X	-	1/210
B09		X	X	1/210
B10	X		X	2/160
B11		X	X	2/160
B12		X	-	-
B13		X	X	1/160
B14		X	X	2/210
B15		X	-	-
B17		X	X	1/210
B18		X	-	2/160
B19	X		-	2/160
B20	X		X	2/210
B21		X	-	1/210
B22		X	-	2/210

Tabla 3.8. Configuración de los ensayos de resistencia a flexión realizados a las vigas.

Figura 3.9. Ensayo a flexión en 3 puntos de la viga B03R210-2 con refuerzo de CFRP en forma de U.

3.3.6 Ductilidad

Para obtener un comportamiento dúctil de las vigas a flexión es necesario que las fibras traccionadas tengan un comportamiento plástico, mayor que las comprimidas, lo que, en el caso de la madera es difícil al tener un comportamiento elástico-lineal en tracción. Otra forma de obtener un comportamiento dúctil en la configuración de ensayo realizada, sería el caso en que las fibras de tracción tuviesen mucha más resistencia que las comprimidas y el fallo se produjese por rotura de estas últimas (tipo aplastamiento).

El modo de fallo obtenido tras los ensayos a piezas a flexión sin refuerzo, desecha la posibilidad de existir comportamiento dúctil en las vigas ensayadas.

Se ha observado dos modos de fallo (más adelante se detallarán en profundidad):

- Rotura por cortante, por lo que no se producen procesos de plastificación de la parte comprimida de la pieza.
- Rotura por flexión debido a la existencia de un punto débil por un defecto: en este caso el fallo por dicho punto secciona la viga al instante, por lo que tampoco se obtendrá comportamiento dúctil.

Sin embargo, las piezas ensayadas una vez han sido reparadas si muestran un comportamiento que se podría denominar dúctil ya que, como se comprobará posteriormente, la descarga que sufren una vez adquirida la máxima tensión de ensayo es paulatina y permite alcanzar unos desplazamientos mayores. Lamentablemente, dicho comportamiento no se puede contabilizar debido a que, aunque es claro, no sigue un patrón de comportamiento marcado en todas las vigas.

3.3.7 Gráficos de representación realizados y comprobaciones de cálculo

3.3.7.1 Gráficos de representación realizados

Para el análisis de los datos se procedió a la representación de gráficos de caracterización del comportamiento a analizar:

- Tensión-Desplazamiento (MPa - mm): Se obtendrá mediante el cálculo de la tensión producida por las cargas de la prensa en base a la configuración del ensayo y su comparación con el desplazamiento producido por el mismo, una vez corregidas las

hendiduras producidas en los apoyos de la pieza. Los resultados se procesarán en base a los datos generados por el software de la prensa durante el ensayo.

3.3.7.2 Comprobaciones de cálculo realizadas en base a normativa

Para la comparación de los resultados obtenidos, se calcularon previamente los estados límites últimos de servicio en base al Eurocodigo 5 (UNE-EN 1995), con los datos de caracterización aportados por la norma UNE EN 338: 2010 (UNE-EN 338:2010) para maderas de conífera, Clase resistente C22:

Momento máximo

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{P \times L}{3} \quad \text{ó} \quad \frac{P \times L}{4} \quad [3]$$

Donde:

$M_{m\acute{a}x}$ = Momento máximo a L/3 o L/2 dependiendo de la configuración del ensayo.

P = Fuerza en N.

L = Longitud del vano.

Cortante Máximo

$$V_{m\acute{a}x} = P \quad [4]$$

Donde:

$V_{m\acute{a}x}$ = Cortante máximo a L/3 o L/2, dependiendo de la configuración de ensayo.

P = Fuerza ejercida en N.

Flecha máxima

$$F_{m\acute{a}x} = \frac{P \times L^3}{48 \times E \times I} \quad [5]$$

Donde:

$F_{m\acute{a}x}$ = Flecha máxima en el centro del vano.

P = Fuerza ejercida en N.

L = Longitud del vano en m.

E = Módulo de elasticidad medio paralelo a la fibra en N/mm².

I = Momento de inercia de la sección en mm⁴.

Momento de inercia de la sección

$$I = \frac{b \times h^3}{12} \quad [6]$$

Donde:

I = Momento de inercia de la sección en mm⁴.

b = base de la sección en mm.

h = Altura de la sección en mm.

Momento resistente de la sección

$$W = \frac{b \times h^2}{6} \quad [7]$$

Donde:

W = Momento resistente de la sección en mm³.

b = ancho de la sección mm.

h = canto de la sección en mm.

Resistencia de las vigas ensayadas

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad [8]$$

Donde:

σ = Tensión producida por la carga aplicada en MPa.

M = Momento flector en Nmm.

W = Momento resistente de la sección en mm³.

Módulo de elasticidad global

- *Piezas ensayadas a flexión en 3 puntos*

$$E = \frac{P \times L^3}{48 \times \delta \times I} \quad [9]$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad global en N/mm².

L = luz del ensayo en mm.

P = Incremento de carga en un tramo de comportamiento elástico de la pieza en N.

δ = incremento de deformación correspondiente a $F_2 - F_1$ en mm.

I = Momento de inercia de la sección en mm⁴

- *Piezas ensayadas a flexión en 4 puntos*

$$E = \frac{P' \times L}{18 \times \delta \times I} \left(\frac{5L^2}{9} \right) \quad [10]$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad global en N/mm².

L = luz del ensayo en mm.

P' = Incremento de carga en un tramo de comportamiento elástico de la pieza en N. En este caso será la mitad de la carga marcada por la prensa hidráulica.

δ = incremento de deformación correspondiente a $F'_2 - F'_1$ en mm. En este caso la flecha se referirá al desplazamiento medido en la vertical de los apoyos centrales en los cuales se aplicó la carga.

I = Momento de inercia de la sección en mm⁴

Para el cálculo del módulo de elasticidad se escogió un tramo común a todas las piezas en las cuales tuviesen un comportamiento elástico-lineal. Este tramo fue entre los 10 y los 12 kN. Una vez escogido el tramo, se obtuvieron los desplazamientos de cada una de las piezas para el procesamiento de las fórmulas y la obtención de los resultados.

3.4 Resultados obtenidos

3.4.1 Clasificación visual de la madera

Una vez acotados los defectos de las vigas de madera (consultar fichas adjuntas en los anexos) se procedió a su clasificación en base a la norma UNE 56.544. Los resultados se pueden observar en la *Tabla 3.9*.

Viga	Calidad	C-22 / Rechazo	Motivo del rechazo
B01	MEG	Rechazo	Nudo en la cara
B02	MEG	Rechazo	Nudo en la cara
B03	MEG	C-22	-
B04	MEG	C-22	-
B05	MEG	C-22	-
B06	MEG	C-22	-
B07	MEG	C-22	-
B08	MEG	C-22	-
B09	MEG	C-22	-
B10	MEG	C-22	-
B11	MEG	C-22	-
B12	MEG	C-22	-
B13	MEG	Rechazo	Nudo en la cara
B14	MEG	C-22	-
B15	MEG	Rechazo	Nudo en la cara
B17	MEG	Rechazo	Nudo en la cara
B18	MEG	C-22	-
B19	MEG	C-22	-
B20	MEG	Rechazo	Nudo en la cara
B21	MEG	Rechazo	Nudo en la cara
B22	MEG	Rechazo	Galerías de Xilófagos

Tabla 3.9. Clasificación visual de la madera en base a la norma UNE 56.544.

El número de rechazos obtenido es elevado (38%), siendo el principal motivo la existencia de nudos en la cara por encima de lo permitido por la norma. Solo uno de los casos se trata de un rechazo debido a la existencia de galerías de insectos xilófagos, aunque no se aprecia la existencia de los mismos ni la evolución de las galerías durante el proceso experimental.

3.4.2 Técnica de ultrasonidos

Después de realizar las lecturas de propagación de onda de ultrasonidos se obtuvieron los resultados, los cuales se puede observar en la *Tabla 3.10*.

Viga	Promedio lectura longitudinal μs	Promedio lectura transversal 1 (ancho) μs	Promedio lectura transversal 2 (canto) μs
B01	228,43	40,70	101,10
B02	212,07	39,17	100,83
B03	225,97	42,00	95,70
B04	209,93	41,50	82,13
B05	203,60	38,30	88,03
B06	211,40	44,03	71,67
B07	203,57	43,67	83,90
B08	213,93	43,60	91,77
B09	197,60	45,17	84,20
B10	225,67	38,27	75,07
B11	193,30	45,97	91,87
B12	209,20	36,30	75,73
B13	227,47	47,33	93,17
B14	183,23	44,20	77,07
B15	216,40	39,80	84,03
B17	207,30	34,80	95,47
B18	218,13	41,60	70,20
B19	269,93	36,70	87,47
B20	211,40	38,53	90,00
B21	219,97	38,47	95,17
B22	207,90	46,60	76,07

Tabla 3.10. Tiempo de propagación de ultrasonido en las vigas objeto de estudio.

Una vez obtenida la velocidad de propagación se procedió al cálculo del módulo de elasticidad dinámico (*Tabla 3.11*).

Viga	Vel. Propagacion longitudinal (Km/s)	Vel. Propagación transversal 1 (Km/s)	Vel. Propagación transversal 2 (Km/s)	Mod. Ed. Longitudinal. (MPa)	Mod. Ed. Transversal 1 (MPa)	Mod. Ed. Transversal 2 (MPa)
B01	4,76	1,97	1,53	10.635,3	1.811,3	1.102,0
B02	5,13	1,97	1,53	12.418,7	1.823,5	1.100,5
B03	4,82	1,88	1,62	11.089,6	1.689,3	1.252,5
B04	5,19	1,86	1,91	12.793,2	1.636,7	1.737,2
B05	5,35	1,98	1,77	13.868,8	1.908,8	1.522,3
B06	5,15	1,82	2,18	13.318,4	1.656,6	2.378,0
B07	5,35	1,81	1,87	14.106,9	1.613,4	1.726,1
B08	5,09	1,81	1,69	16.697,7	2.115,6	1.838,4
B09	5,51	1,73	1,85	16.372,5	1.607,6	1.850,4
B10	4,83	2,04	2,08	11.924,0	2.127,4	2.211,4
B11	5,64	1,70	1,71	14.782,9	1.336,2	1.355,4
B12	5,21	2,18	2,05	15.264,9	2.663,2	2.355,3
B13	4,78	1,65	1,65	14.734,9	1.752,2	1.763,0
B14	5,95	1,86	2,01	20.391,8	1.979,7	2.326,7
B15	5,03	1,98	1,84	14.228,3	2.213,6	1.911,5
B17	5,25	2,21	1,62	11.168,4	1.981,3	1.066,8
B18	4,99	1,92	2,24	12.061,1	1.789,7	2.420,5
B19	4,04	2,13	1,75	10.338,9	2.864,1	1.940,1
B20	5,14	2,05	1,71	13.679,0	2.174,6	1.514,8
B21	4,96	2,08	1,63	12.034,0	2.119,7	1.300,1
B22	5,24	1,72	2,02	15.644,8	1.677,4	2.332,8
Promedio	5,12	1,92	1,82	13.693,06	1.930,58	1.762,18

Tabla 3.11. MOE dinámico de la madera de pino en base a las lecturas de propagación de ultrasonido.

El módulo de elasticidad dinámico paralelo a la fibra se encuentra en 13,7 kN/mm² y el perpendicular a la fibra en torno a los 1,85 kN/mm².

3.4.3 Determinación de las propiedades físicas de la madera

3.4.3.1 Contenido de humedad

Después de tener las probetas durante 14 días en la estufa a una temperatura de $103 \pm 3^{\circ}\text{C}$, se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 3.12.

Probeta		P-1	P-2	P-3	P-4
Peso inicial día 10/06/2014 en Kg		1,0104	0,6949	0,7463	1,1254
Densidad (Kg/m ³)		576,65	516,70	491,80	531,86
Medicion	Fecha	Peso en Kg			
Dia 1	11/06/2014	0,9442	0,6417	0,6983	1,0671
Dia 2	12/06/2014	0,9373	0,6401	0,6942	1,0577
Dia 3	13/06/2014	0,9346	0,6394	0,6935	1,054
Dia 4	16/06/2014	0,9313	0,6389	0,6919	1,0504
Dia 5	17/06/2014	0,9297	0,6374	0,6905	1,0481
Dia 6	18/06/2014	0,9282	0,637	0,6901	1,0473
Dia 7	23/06/2014	0,9204	0,6314	0,6854	1,0406
Dia 8	24/06/2014	0,9202	0,6311	0,6849	1,0402
Contenido de humedad en %		9,8	10,1	9,0	8,2
Humedad media en %		9,3			

Tabla 3.12. Contenido medio de humedad de la madera objeto de estudio.

El contenido de humedad medio de las piezas es del 9,3%. Esto indica que las vigas se encuentran 2,7 puntos por debajo del contenido medio de humedad de referencia marcado por la normativa en el 12%.

3.4.3.2 Densidad

Una vez obtenidas las dimensiones mediante la medición de sus caras y hallado el peso a través de una balanza, se obtuvo la densidad de las piezas (Tabla 3.13).

Viga	Largo (m)	Ancho (m)	Alto (m)	Peso (Kg)	Dens. (Kg/m ³)
B01	1,088	0,080	0,155	6,325	468,82
B02	1,088	0,077	0,154	6,087	471,81
B03	1,089	0,079	0,155	6,367	477,47
B04	1,089	0,077	0,157	6,259	475,43
B05	1,089	0,076	0,156	6,259	484,77
B06	1,089	0,080	0,156	6,821	501,89
B07	1,089	0,079	0,157	6,658	492,93
B08	1,089	0,079	0,155	8,593	644,40
B09	1,089	0,078	0,156	7,143	539,06
B10	1,089	0,078	0,156	6,785	512,04
B11	1,091	0,078	0,157	6,200	464,06
B12	1,090	0,079	0,155	7,505	562,30
B13	1,087	0,078	0,154	8,425	645,25
B14	1,091	0,082	0,155	7,976	575,19
B15	1,089	0,079	0,155	7,492	561,84
B17	1,089	0,077	0,155	5,260	404,70
B18	1,089	0,080	0,157	6,619	483,92
B19	1,090	0,078	0,153	8,248	634,07
B20	1,087	0,079	0,154	6,842	517,38
B21	1,090	0,080	0,155	6,624	490,09
B22	1,090	0,080	0,154	7,643	569,15
Promedio	1,089	0,079	0,155	6,959	522,69

Tabla 3.13. Densidad de las vigas de madera medidas en Kg/m³.

La densidad media obtenida es de 522,69 Kg/m³, lo cual entra dentro de los límites marcados por AITIM (*Gutierrez, 2014*) para madera de conífera, cuya densidad la encuadra entre 400 y 550 Kg/m³.

3.4.4 Determinación de las propiedades mecánicas de vigas a flexión sin refuerzo

3.4.4.1 Flexión y cortante

3.4.4.1.1 Ensayos a flexión en 4 puntos

Los resultados obtenidos en estos ensayos muestran claramente una diferenciación entre las piezas en función de su aceptación o rechazo por la norma UNE 56.544 de clasificación visual (*Figura 3.10*). Se encuentran dos grupos, uno en el que están los rechazos que rompen entre 14,7 y 19 MPa y otro en el que están las piezas aceptadas por la norma las cuales rompen entre 35,3 Y 50 MPa.

En todos los casos las piezas se dispusieron de la forma mas beneficiosa para el ensayo, por lo que los defectos de mayor tamaño se situaron en la cara comprimida.

Figura 3.10. Diagrama Tensión – Desplazamiento de las vigas ensayadas a flexión en 4 puntos.

Modo de rotura de las piezas ensayadas

VIGA B01 (Rechazo)

La primera rotura se produce fuera del tercio central a flexión dentro de la cara traccionada a los 14,7 MPa, evolucionando de forma rasante hacia el centro de la pieza. Después de esta se produce una descarga de la pieza hasta los 5,8 MPa, retomando otra vez la carga hasta la rotura final, que se produce condicionada por el nudo nº 7, situado en la cara traccionada a los 16,4 MPa, evolucionando diagonalmente hasta el apoyo central derecho. Esto es debido a que en el centro de la viga se dispone dicho nudo, produciendo un corte de fibras y, por consiguiente, una disminución de la capacidad de tracción de las mismas (*Figura 3.11*).

Figura 3.11. B01 durante y después del ensayo a flexión en 4 puntos.

VIGA B06

La pieza rompe a cortante por su apoyo izquierdo, con una evolución de la fractura paralela a la fibra (de forma rasante) hasta el tercio central, a los 46,1 MPa, perdiendo capacidad portante hasta los 32,0 MPa.

Se produce una recuperación de carga alcanzando los 48,15 MPa como estado límite último, produciéndose el fallo final a cortante desde el apoyo derecho, seccionando la pieza paralelamente a las fibras hasta el tercio central.

Figura 3.12. Pieza B06 durante el ensayo a flexión en 4 puntos, junto con galgas extensométricas y estado de la sección central después del ensayo.

La *Figura 3.12*, denota que, aun siendo una pieza aceptada por la norma, sin, aparentemente, grandes defectos, los pequeños cambios e irregularidades presentes en las fibras leñosas, así como los pequeños nudos internos, condicionan el modo de rotura. En este caso, la rotura natural de las fibras traccionadas debería ser por el centro del vano de la pieza, marcado con rotulador rojo, pero, los pequeños defectos han condicionado su modo de rotura, haciendo que las fracturas en la cara traccionada se hayan producido a uno y otro lado del centro de la pieza, evolucionando de abajo a arriba a medida que la carga aumentaba.

VIGA B07

Se produce una primera fractura a flexión con una gran componente a cortante a los 24,1 MPa, que hace reducir la resistencia de la viga hasta los 22,7 MPa. Una vez alcanzada esta resistencia, la pieza se recupera hasta la rotura final (*Figura 3.13*).

La rotura final se produce por su parte derecha a cortante a los 35,3 MPa. Se produce una fractura múltiple en dirección de las fibras que parte del centro de la viga hasta su cara izquierda. Las 4 fracturas planas son equidistantes desde la parte inferior hasta la mitad de la sección.

Figura 3.13. Ensayo a flexión en 4 puntos de la viga B07 durante y después del ensayo.

VIGA B09

La viga rompe a los 48,15 MPa a cortante, seccionandola longitudinalmente a través de uno de sus anillos de crecimiento. La separación de fibras se produce desde el lateral derecho hasta la cara posterior del tercio central desde esa cara. Se produce una segunda rotura en el tercio superior, uniendo una fenda longitudinal en la cara y la médula que se dispone en la cara contraria, que una vez producida la primera rotura, se convierte en cara traccionada de la sección (*Figura 3.14*).

Figura 3.14. Rotura por ensayo flexión en 4 puntos de pieza B09.

VIGA B11

La rotura se produce por cortante a los 32,9 MPa, describiendo un plano que parte del apoyo inferior izquierdo y sigue la dirección de las fibras perpendicularmente a los anillos de crecimiento. La viga se recupera admitiendo más carga hasta que se produce una segunda rotura por cortante a la altura del centro de la sección a los 32,4 MPa, evolucionando igualmente a lo largo de la dirección de las fibras y en sentido perpendicular a los anillos de crecimiento (*Figura 3.15*).

Figura 3.15. Viga B11 durante y después del ensayo a flexión en 4 puntos.

VIGA B13 (*Rechazo*)

Se produce una rotura a flexión a los 14,75 MPa, producida por el nudo número 5, situado en la cara traccionada. La rotura viene debida a los numerosos nudos que presenta la pieza dentro del tercio central. Presenta una rotura rasante a la altura del centro de la sección, que retoma la rotura por flexión rápidamente una vez alcanza el nudo 2 (*Figura 3.16*).

Figura 3.16. Viga B13 durante y después del ensayo a flexión en 4 puntos.

VIGA B14

Se produce una primera rotura sin manifestación visible en las caras que hace que la viga se descargue desde los 36,6 MPa hasta los 14,5 MPa. Una vez producida esta la viga se recupera admitiendo más carga hasta el fallo final a los 39,0 MPa. La rotura final se produce por cortante en el tercio central de la altura de la misma a los 36,8 MPa, evolucionando desde el lateral derecho a lo largo de $2/3$ de la longitud hasta atravesar el tercio central de la pieza. La rotura se produce a través del plano descrito por uno de los anillos de crecimiento, coincidente con el nudo número 4 situado a $1/3$ de la longitud de la pieza desde dicha cara. Finalmente se produce un pequeño plano de rotura a flexión con una importante componente a cortante, coincidente con el nudo 4 a $1/3$ de la longitud desde la cara derecha (*Figura 3.17*).

Figura 3.17. Fallo a cortante de la pieza B14.

VIGA B15

Se produce una primera rotura por flexión a los 40,8 MPa dentro del tercio central de la viga, en la cara traccionanda, delaminandose en planos paralelos a la fibra y dirección contraria a la rotura inferior. Una vez producida esta, la pieza baja hasta los 30,13 MPa y empieza a recuperarse hasta producirse la rotura total de la sección por flexión a los 38,7 MPa. La evolución de la fractura se hace desde la parte izquierda del tercio central diagonalmente hasta el nudo 5. Entre la primera rotura y la definitiva se producen una serie de roturas las cuales podrían responder a un comportamiento dúctil de la madera (*Figura 3.18*).

Figura 3.18. Primera rotura y fallo posterior de la viga B15.

VIGA B17

La viga rompe a flexión en el lateral derecho del tercio central a los 19,8 MPa, a la altura del nudo nº 2, evolucionando hacia el centro de la pieza a la vez que sube hacia la fibra neutra. Una vez producida la primera rotura, se produce una segunda rotura de fibras en la cara previamente comprimida, que al producirse el primer fallo, pasan a estar traccionadas (*Figura 3.19*).

Figura 3.19. Rotura de la pieza B17 debido al ensayo a flexión en 4 puntos.

3.4.4.1.2 Ensayos a flexión en 3 puntos

En este caso, los resultados son muy dispares en cuanto a comportamiento, ya que se ven fallos tanto a resistencia alta, como sería el caso de la B05 que rompe a los 38,7 MPa, a baja resistencia como la viga B20 (rechazo), que rompe a los 14,2 MPa, o los casos de las vigas B02 (rechazo) y B10 que tienen un comportamiento similar a pesar de que una sea rechazo y la otra no. Este comportamiento puede ser observado en la *Figura 3.20*, que muestra el diagrama Tensión – Desplazamiento obtenido tras los ensayos de las piezas.

Figura 3.20. Diagrama Tensión-Desplazamiento de las vigas ensayadas a flexión en 3 puntos.

Se puede observar que las resistencias obtenidas por las piezas ensayadas a 3 puntos son ostensiblemente menores que las obtenidas por las piezas ensayadas a 4 puntos, teniendo en este caso unos valores máximos de 38,5 MPa, frente a los 49,7 MPa obtenidos en el ensayo a 4 puntos, suponiendo una reducción en los valores máximos del 33%.

Modo de rotura de las piezas ensayadas

VIGA B02 (Rechazo)

La rotura se produce a flexión, dentro del tercio central de la sección, marcada por el nudo nº 8 a los 30,1 MPa. La fractura evoluciona hacia el centro de la sección terminando en el centro de la cara, inicialmente comprimida (*Figura 3.21*).

Figura 3.21. Rotura de la pieza B02 tras el ensayo a flexión a 3 puntos.

VIGA B05

Se produce una primera rotura a los 33,7 MPa, de pequeñas dimensiones, a flexión a la altura del nudo 6 dentro del tercio central en la cara traccionada. La pieza sigue cargando hasta los 38,5 MPa, en los que se produce el fallo de la sección por cortante, con importante componente de flexión, desde la parte derecha del cuadrante más bajo, evolucionando diagonalmente hacia el centro de la sección donde a la altura de la fibra neutra, la pieza rompe a flexión hasta que se encuentra con el nudo 5, seccionando la viga por completo (*Figura 3.22*).

Figura 3.22. Rotura de la pieza B05 tras el ensayo a flexión a 3 puntos.

VIGA B10

Se producen 3 tipos de rotura. La primera a 26,4 MPa, a flexión dentro del tercio central de la pieza coincidente con 2 pequeños nudos en la cara traccionada. La evolución de dicha rotura es de forma rasante conectando la segunda fractura. En esta se produce el fallo principal de la pieza. Rompe a cortante a los 30,0 MPa por la parte izquierda de la viga, evolucionando en dirección paralela a la fibra, siguiendo la dirección de las fendas que tiene en dicha cara, y radialmente a través de uno de los anillos de crecimiento.

Por último rompe a flexión por el centro de la pieza hasta agotar su resistencia, pero sin alcanzar los máximos valores (*Figura 3.23*).

Figura 3.23. Rotura de la pieza B10 después del ensayo a flexión en 3 puntos.

VIGA B20 (Rechazo)

La viga carga hasta los 14,6 MPa y rompe por cortante produciéndose 2 fracturas que abarcan la sección de la pieza. Estas se desarrollan paralelas a la fibra y perpendiculares al sentido radial de los anillos de crecimiento. Arranca desde la parte derecha inferior y evoluciona hasta el centro de la sección (*Figura 3.24*).

Figura 3.24. Modo de rotura de la pieza B20 tras en ensayo a flexión en 3 puntos.

Resumen de resultados obtenidos y comprobación de cálculo mediante Eurocódigo 5

En la *Tabla 3.14* se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de flexión realizados a las vigas sin refuerzo. A su vez se han realizado comprobaciones de cálculo mediante el Eurocódigo 5 (*UNE-EN 1995*) en base a los valores marcados por la clase resistente C-22 para su comparación con los resultados experimentales.

VIGA	Clase Resis.	Ensayo a flexion	Carga máx. (kN)	Momento máx. (kNm)	Cortante max. (kN)	Desp. max. (mm)	Resis. última flexión (MPa)	Resis. Última cort. (Mpa)	Tipo de rotura	Comentario
B01	Rech.	4 pts	31,2	5,2	15,6	17,2	16,4	1,9	Flexión	Pres. de nudo
B02	Rech.	3 pts	38,1	9,5	19,1	18,2	30,1	2,3	Flexión	Pres. de nudo
B05	C-22	3 pts	48,7	12,2	24,4	12,4	38,5	3,0	Flex/Cort	Pres. de nudo
B06	C-22	4 pts	94,4	15,7	47,2	54,0	49,7	5,8	Cortante	
B07	C-22	4 pts	67,1	11,2	33,6	22,3	35,4	4,1	Cortante	
B09	C-22	4 pts	91,4	15,2	45,7	23,2	48,2	5,6	Cortante	
B10	C-22	3 pts	33,4	8,4	16,7	18,7	26,4	2,0	Cortante	Pres. de nudo
B11	C-22	4 pts	62,4	10,4	31,2	23,4	32,9	3,8	Cortante	
B13	Rech.	4 pts	13,0	2,2	6,5	23,8	6,8	0,8	Flexión	Pres. de nudo
B14	C-22	4 pts	74,0	12,3	37,0	35,2	39,0	4,5	Cortante	
B15	C-22	4 pts	77,4	12,9	38,7	29,5	40,8	4,7	Flexión	
B17	Rech.	4 pts	37,5	6,3	18,8	14,6	19,8	2,3	Flexión	Pres. de nudo
B20	Rech.	3 pts	18,5	4,6	9,3	4,8	14,6	1,1	Flex/Cort	Pres. de nudo
Resultados medios										
3 puntos		C-22	41,1	10,3	20,5	15,6	32,4	2,5	Cortante	-
		Rechazo	28,3	7,1	14,2	11,5	22,4	1,7	Flexión	Pres. de nudo
4 puntos		C-22	77,8	13,0	38,9	31,3	41,0	4,8	Cortante	-
		Rechazo	27,2	4,5	13,6	18,5	14,3	1,7	Flexión	Pres. de nudo
Comprobaciones en base al Eurocódigo 5, Clase resistente C-22										
Sección tipo 79x155 mm flex en 4 ptos										
		C-22	41,8	7,0	20,9	6,0	22,0	3,8	-	-
Sección tipo 79x155 mm flex en 3 ptos										
		C-22	27,8	7,0	13,9	4,0	22,0	3,8	-	-

Tabla 3.14. Tabla resumen de los resultados obtenidos mediante los ensayos a flexión a las vigas objeto de estudio y comprobación de resultados analíticamente en base al Eurocódigo 5.

Los resultados muestran unos valores últimos de carga, resistencia a flexión y momento flector un 86% superiores de media, en el caso de las piezas aceptadas por la norma UNE 56.544 de clasificación visual de la madera, respecto de los obtenidos mediante los modelos de cálculo, en el caso de la flexión en 4 puntos y un 47% respecto de las ensayadas a 3 puntos.

En el caso de la resistencia a cortante sólo las piezas ensayadas a 4 puntos superan la resistencia establecida por la norma en un 26%, mientras que las ensayadas a 3 puntos se quedan un 34% por debajo de lo establecido por la norma.

El desplazamiento máximo en el centro del vano obtenido durante los ensayos han sido 3 y 4 veces superiores a los predichos mediante los modelos de cálculo aplicados en base a los valores de la norma.

Los rechazos muestran resultados discrepantes, tomando valores, en la mayoría de los casos, inferiores a lo establecido por la norma y en algunos, superiores. Es por esto que no se obtiene fiabilidad en la respuesta de los mismos.

Se denota por lo tanto que, el modo de aplicación de las cargas y la presencia y situación de los defectos, condicionan tanto el modo de rotura, como los estados últimos de servicio de un elemento de madera sometido a flexión.

3.4.4.2 Módulo de elasticidad de las piezas ensayadas

El módulo de elasticidad global medio obtenido entre los 10 kN (f_1) y los 12 kN (f_2) de ensayo para las piezas objeto del estudio ha sido de 3.278 MPa (Tabla 3.15). Se puede observar que las piezas que suponen rechazo para la norma UNE-56544 tienen un módulo de elasticidad menor en un 35,6%.

Piezas ensayadas a flexion en 3 puntos			
VIGA	f1 (mm)	f2 (mm)	MOEG (Mpa)
B02 (Rech)	2,25	2,91	2575
B05	1,17	1,48	5483
B10	2,58	3,34	2236
B20 (Rech)	1,41	2,10	2463
Piezas ensayadas a flexion en 4 puntos			
B01 (Rech)	1,99	2,50	2.469
B06	1,41	1,66	5.036
B07	1,35	1,72	3.403
B09	0,97	1,25	4.496
B11	1,54	1,96	2.998
B13 (Rech)	2,01	2,53	2.421
B14	1,31	1,65	3.703
B15	1,48	1,90	2.998
B17 (Rech)	1,90	2,44	2.331
MOEG C-22			3.794
MOEG Rechazo			2.452
MOEG			3.278

Tabla 3.15. Módulo de Elasticidad Global calculado a partir del desplazamiento obtenido en los ensayos de flexión realizados.

Estos resultados no pueden ser referenciados a la norma ya que esta carece de valores referidos al Módulo de Elasticidad a flexión de la madera.

3.4.5 Determinación de las propiedades mecánicas de vigas reforzadas y reparadas con CFRP

En este apartado se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de flexión realizados a las vigas reparadas y reforzadas con Fibra de Carbono Bidireccional, en diferentes configuraciones. En cada subapartado se muestran los resultados obtenidos por cada configuración de refuerzo compuesto por las vigas reparadas y las vigas reforzadas y una comparación con las vigas sin reparar correspondientes. Finalmente se muestra una tabla resumen donde se disponen los resultados conjuntos de cada tipo de intervención y su comparación con los resultados medios obtenidos por las vigas sin reforzar.

3.4.5.1 Vigas reforzadas y reparadas con 1 capa Fibra de Carbono Bidireccional de 160 gr/m²

En este subapartado se muestran los resultados obtenidos por las vigas intervenidas con 1 capa de CFRP de 160 gr/m² (*Figura 3.29 y Tabla 3.16*). Las vigas reparadas obtuvieron una resistencia un 50,8% por debajo de la media obtenida por las vigas sin reforzar y las vigas reforzadas un 44,0%. Además, en los dos casos la capacidad de desplazamiento mermó en comparación con las vigas sin reforzar.

Modo de rotura de las vigas

VIGA B07F160-1

La rotura se produce a los 16,30 MPa a cortante en el plano de rotura descrito previamente en el ensayo anterior. Una vez realizada esta rotura, la pieza se recupera admitiendo más carga hasta que se produce una rotura final en la cara inferior de la viga a los 19,02 MPa en el tercio central de la misma (*Figura 3.25*).

Figura 3.25. Viga B07 durante el ensayo a flexión en 4 puntos con refuerzo de 2 capas de Fibra de Carbono de 160 gr/m².

VIGA B13F160-1

La rotura se produce por un corte de la fibra de carbono a los 11,17 MPa siguiendo el patrón de la rotura del ensayo previo, cuyo fallo se produjo por flexión. En este caso, la viga no se recupera, teniendo al final del ensayo pequeñas roturas de la fibra hasta que se produce la rotura final (*Figura 3.26*).

Figura 3.26. Viga B13 durante el ensayo a flexión en 4 puntos con refuerzo de 1 capa de Fibra de Carbono de 160 gr/m².

VIGA B04R160-1

La rotura se produce a tracción (flexión) en la cara inferior de la viga a los 23,54 MPa en el centro del vano, seccionando tanto fibra como viga en un plano perpendicular a la sección. La rotura se produce de un modo frágil simultáneamente en fibra y madera (*Figura 3.27*).

Figura 3.27. Viga B04 durante el ensayo a flexión en 4 puntos con refuerzo de 1 capa de Fibra de Carbono de 160 gr/m².

VIGA B12R160-1

Se producen diversas roturas, una primera a los 10,82 MPa a cortante en la parte izquierda de forma rasante, a la cual se suceden un par de roturas a flexión en el centro del vano, y una cuarta rotura final a cortante en la parte derecha superior de forma diagonal a la sección. Las roturas se producen de forma simultánea sin dar capacidad a la viga a que recupere carga (*Figura 3.28*).

Figura 3.28. Viga B12 durante el ensayo a flexión en 4 puntos con refuerzo de 1 capa de Fibra de Carbono de 160 gr/m².

Figura 3.29. Diagrama Tensión – Desplazamiento de las vigas ensayadas a flexión, reforzadas y reparadas con 1 capa de CFRP de 160 gr/m².

VIGA	Tension (MPa)	Desp. max. (mm)	Tension (30,7 MPa)	Desp. max. (22,9 mm)
B07F160-1	19,02	30,90	- 38,0 %	34,9 %
B13F160-1	11,17	6,16	-63,6 %	-73,1 %
B04R160-1	23,54	6,52	-23,3 %	-71,5 %
B12R160-1	10,82	3,26	-64,8 %	-85,8 %

Tabla 3.16. Comparación de resultados de las vigas ensayadas a flexión, reforzadas y reparadas con 1 capa de CFRP de 160 gr/m², con los resultados medios de las vigas ensayadas a flexión sin refuerzo.

Figura 3.30. Viga B13 y B13F160-1 durante el ensayo a flexión en 4 puntos.

3.4.5.2 Vigas reforzadas y reparadas con 2 capa Fibra de Carbono Bidireccional de 160 gr/m²

En este subapartado se muestran los resultados obtenidos por las vigas reparadas y reforzadas con 2 capas de Fibra de Carbono Bidireccional de 160 gr/m² (Figura 3.35 y Tabla 3.17). Las vigas reparadas obtuvieron una resistencia muy similar a la de las vigas sin reforzar, quedándose un 2,7% por debajo de la media obtenida. Las vigas reforzadas aumentaron la resistencia respecto de las vigas sin reforzar un 14,7%. Las vigas reparadas consiguieron aumentar su capacidad de desplazamiento considerablemente, aumentado su desplazamiento máximo en el centro del vano un 28,7%, mientras que las vigas reforzadas la redujeron, obteniendo un desplazamiento máximo un 29,7% menor.

VIGA B10F160-2

Se producen dos roturas. Una primera rotura a cortante en la dirección de la rotura previa a los 14,20 MPa. Una vez producida, la pieza sigue cargando hasta que se produce la rotura final a flexión debido a un corte de las fibras en la parte inferior izquierda del tercio central a los 26,7 MPa.

La rotura a cortante producida evoluciona hasta llegar a la cara comprimida cortando todas las fibras y llegando hasta la parte superior. De esta forma, se produce el seccionamiento de la pieza por la parte central de esta a la altura del apoyo. Por último se produce el fallo final a flexión (*Figura 3.31*).

Figura 3.31. Viga B10 durante el ensayo a flexión en 3 puntos con refuerzo de 2 capas de Fibra de Carbono de 160 gr/m².

VIGA B11F160-2

Se produce un primer fallo a los 18,10 MPa en la cara comprimida a cortante, de forma rasante siguiendo la dirección de las fibras. La pieza sigue recuperando carga hasta que se produce el fallo final (33,07 MPa) por un corte de las fibras de carbono, siguiendo el fallo previo producido en el ensayo sin refuerzo en la dirección de las fibras.

Se puede observar cierto despegue de la segunda capa de fibras (*Figura 3.32*).

Figura 3.32. Viga B11 durante el ensayo a flexión en 4 puntos con refuerzo de 2 capas de Fibra de Carbono de 160 gr/m².

VIGA B18R160-2

Se produce una primera rotura por cortante a los 36,06 MPa, la viga sigue admitiendo carga hasta que se produce el colapso final de modo frágil, seccionando la pieza en dos mitades a los 38,85 MPa (*Figura 3.33*).

Figura 3.33. Viga B18 durante el ensayo a flexión en 4 puntos con refuerzo de 2 capas de Fibra de Carbono de 160 gr/m².

VIGA B19R160-2

La pieza rompe a tracción en el centro del vano a los 31,6 MPa, sufre una pequeña recuperación hasta que evoluciona la rotura de tracción y se produce el fallo final a los 29,63 MPa en el mismo lugar que la primera rotura. En este caso, la pieza se mantiene íntegra a pesar del agotamiento de la sección (*Figura 3.34*).

Figura 3.34. Viga B19 durante el ensayo a flexión en 4 puntos con refuerzo de 2 capas de Fibra de Carbono de 160 gr/m².

Figura 3.35. Diagrama Tensión – Desplazamiento de las vigas ensayadas a flexión, reforzadas y reparadas con 2 capas de CFRP de 160 gr/m².

VIGA	Tension (MPa)	Desp. max. (mm)	Tensión (30,7 MPa)	Desp. max. (22,9 mm)
B10F160-2	26,7	31,22	-13,0 %	36,3 %
B11F160-2	33,07	27,74	7,7 %	21,1 %
B18R160-2	38,85	15,35	26,5 %	-33,0 %
B19R160-2	31,6	16,85	2,9 %	-26,4 %

Tabla 3.17. Comparación de resultados de las vigas ensayadas a flexión, reforzadas y reparadas con 2 capas de CFRP de 160 gr/m², con los resultados medios de las vigas ensayadas a flexión sin refuerzo.

3.4.5.3 Vigas reforzadas y reparadas con 1 capa Fibra de Carbono Bidireccional de 210 gr/m²

En este subapartado se muestran los resultados obtenidos por las vigas reparadas y reforzadas con 1 capas de Fibra de Carbono Bidireccional de 210 gr/m² (*Figura 3.40 y Tabla 3.18*). Las vigas reparadas obtuvieron una resistencia muy similar a las vigas sin refuerzo, aunque en este caso superaron dicha resistencia en un 2,4%. Las vigas reforzadas aumentaron la resistencia respecto de las vigas sin reforzar un 32,2%. Como ocurrió con las vigas reforzadas y reparadas con 2 capas de 160 gr/m², las vigas reforzadas aumentaron la capacidad de deformación, aumentando su desplazamiento en el momento de máxima resistencia un 16,3% y las vigas reforzadas disminuyeron dicha capacidad, obteniendo un desplazamiento inferior a las vigas sin reforzar en 20,2%.

VIGA B09F210-1

La rotura se produce a cortante a los 43,80 MPa siguiendo el plano de rotura previo obtenido en el ensayo a flexión realizado previamente. Posteriormente se suceden pequeñas recuperaciones de carga a las cuales van sucediéndose pequeñas roturas de fibra, produciendo un descenso de la resistencia paulatino hasta que se produce la pérdida total de resistencia (*Figura 3.36*).

Figura 3.36. Viga B09 durante el ensayo a flexión en 4 puntos con refuerzo de 1 capas de Fibra de Carbono de 160 gr/m².

VIGA B17F210-1

El fallo de la pieza se produce a causa de la rotura de la fibra en el mismo lugar donde se había producido la rotura en el ensayo previo. Dicha rotura se produce a los 17,09 MPa, siendo en este caso rotura por tracción de las fibras (flexión). Una vez se produce el fallo principal, la pieza pierde una gran cantidad de resistencia, tendiendo una pequeña recuperación sin llegar a ser considerable hasta que se produce la rotura final (*Figura 3.37*).

Figura 3.37. Viga B17 durante el ensayo a flexión en 4 puntos con refuerzo de 1 capa de Fibra de Carbono de 210 gr/m².

VIGA B08R210-1

La rotura se produce a cortante de forma rasante en la dirección perpendicular a los anillos de crecimiento a los 54,67 MPa. Se produce un despegue de casi toda la fibra en la cara de la pieza, iniciado en la parte comprimida de la misma, la viga recupera la carga hasta que se produce un fallo a flexión a los 44,42 MPa, descendiendo la resistencia considerablemente hasta la pérdida total de capacidad de carga (*Figura 3.38*).

Figura 3.38. Viga B08 durante el ensayo a flexión en 4 puntos con refuerzo de 1 capas de Fibra de Carbono de 210 gr/m².

VIGA B21R210-1

La pieza rompe a los 21,46 MPa a tracción en el tercio central de la luz de ensayo. La rotura se produce de forma progresiva, de la cara inferior hacia el centro de la sección. Como se observa en el *Figura 3.39*, la pérdida de carga es progresiva, a diferencia de la gran mayoría de vigas, donde se produce una rotura principal a la cual le suceden recuperaciones de carga y pérdidas importantes de la misma. En este caso dicha perdida de carga se produce hasta los 20,38 MPa, donde la viga pierde por completo su capacidad portante.

Figura 3.39. Viga B21 durante el ensayo a flexión en 4 puntos con refuerzo de 1 capas de Fibra de Carbono de 210 gr/m².

Figura 3.40. Diagrama Tensión – Desplazamiento de las vigas ensayadas a flexión, reforzadas y reparadas con 1 una capa de CFRP de 210 gr/m²

VIGA	Tension (MPa)	Desp. max. (mm)	Tension (30,7 MPa)	Desp. max. (22,9 mm)
B09F210-1	43,8	48,06	42,7 %	109,9 %
B17F210-1	19,09	5,2	-37,8 %	-77,3 %
B08R210-1	54,67	21,63	78,1 %	-5,5 %
B21R210-1	26,48	14,92	-13,7 %	-34,8 %

Tabla 3.18. Comparación de resultados de las vigas ensayadas a flexión, reforzadas y reparadas con 1 capa de CFRP de 210 gr/m², con los resultados medios de las vigas ensayadas a flexión sin refuerzo.

3.4.5.3 Vigas reforzadas y reparadas con 2 capas Fibra de Carbono Bidireccional de 210 gr/m²

En este subapartado se muestran los resultados obtenidos por las vigas reparadas y reforzadas con 2 capas de Fibra de Carbono Bidireccional de 210 gr/m² (Figura 3.45 y Tabla 3.19). Las vigas reparadas aumentaron la resistencia respecto a las vigas sin refuerzo un 34,5%, y las vigas reforzadas la aumentaron un 84,1%. En este caso ambas intervenciones consiguieron aumentar también la capacidad de desplazamiento de las vigas un 57,6% superior en el caso de las vigas reparadas y un 8,5% superior en caso de las vigas reforzadas.

VIGA B14F210-2

La rotura se produce a los 45,23 MPa cortando las fibras siguiendo el patrón de la rotura del ensayo previo. La viga tiene una pequeña rotura a los 20,00 MPa, aunque no pierde apenas capacidad portante, recuperándose hasta el fallo final. Aunque la resistencia máxima se alcanza a los 45,23 MPa, la pérdida de capacidad portante es paulatina y prolongada hasta que se agota la sección a los 13,90 MPa. Este tipo de rotura responde a un comportamiento dúctil de la viga.

A consecuencia de la primera rotura se produce un pequeño despegue de las fibras en la zona de la rotura (*Figura 3.41*).

Figura 3.41. Viga B14 durante el ensayo a flexión en 4 puntos con refuerzo de 2 capas de Fibra de Carbono de 210 gr/m².

VIGA B20F210-2

La pieza rompe a los 37,43 MPa, a cortante, de forma rasante debido a un corte de las fibras siguiendo el plano de rotura producido en el ensayo previo. Al igual que sucede con la viga B14F210-2, la rotura se produce de forma que las fibras van rompiendo poco a poco, siendo un modo de rotura de tipo dúctil. Aunque la resistencia máxima se alcanza a los 37,43 MPa, la viga sigue deformando hasta que se produce la rotura final a los 18,91 MPa (*Figura 3.42*).

Figura 3.42. Modo de rotura de la pieza B20 tras en ensayo a flexión en 3 puntos reforzada con 2 capas de 210 gr/m² de fibra de carbono bidireccional.

VIGA B03R210-2

La viga rompe de modo frágil a flexión a los 53,3 MPa, en el centro del vano. En este caso no hay recuperación posterior de la viga, por lo que se produce la pérdida total de capacidad portante (*Figura 3.43*).

Figura 3.43. Viga B03 durante el ensayo a flexión en 4 puntos con refuerzo de 2 capas de Fibra de Carbono de 210 gr/m².

VIGA B22R210-2

Se producen numerosas roturas a cortante (60,90 – 59,75 – 45,67 MPa), sin mostrarlas en la fibra, hasta que se produce la rotura final a cortante 32,57 MPa, sigue cargando un poco hasta que acerca al apoyo derecho y rompe por flexión (Figura 3.44).

Figura 3.44. Viga B22 durante el ensayo a flexión en 4 puntos con refuerzo de 2 capas de Fibra de Carbono de 210 gr/m².

Figura 3.45. Tensión – Desplazamiento de las vigas ensayadas a flexión, reforzadas y reparadas con 2 capas de CFRP de 210 gr/m².

VIGA	Tension (MPa)	Desp. max. (mm)	Tension (30,7 MPa)	Desp. max. (22,9 mm)
B14F210-2	45,23	31,06	47,3 %	35,6 %
B20F210-2	37,43	41,11	21,9 %	79,5 %
B03R210-2	53,3	24,43	73,6 %	6,7 %
B22R210-2	59,75	25,28	94,6 %	10,4 %

Tabla 3.19. Comparación de resultados de las vigas ensayadas a flexión, reforzadas y reparadas con 2 capas de CFRP de 210 gr/m², con los resultados medios de las vigas ensayadas a flexión sin refuerzo.

3.5 Análisis de los resultados

3.5.1 Análisis de la madera objeto del estudio

3.5.1.1 Criterios de aceptación en base a la norma UNE 56544

El número de rechazos es elevado respecto del montante total de piezas (38%). El principal motivo es la presencia de nudos en alguna de las caras, principalmente en la superior e inferior. A pesar de ser un número elevado, los resultados obtenidos de resistencia de las piezas justifica dicho rechazo ya que la resistencia se reduce en un 35% de media en las piezas ensayadas a flexión en 3 puntos, y en un 58% en las ensayadas a flexión en 4 puntos.

Cabe resaltar que la disposición de los defectos que provocan el rechazo por la normativa es clave en la respuesta de la viga, como es el caso de la pieza B02, la cual, se dispuso el nudo que ocupaba toda su sección y motivaba el rechazo de la misma por la norma en la cara comprimida a la hora del ensayo. La respuesta mecánica fue muy similar a la de la pieza B10, alcanzando resistencias muy parejas. Este comportamiento confirma la teoría de otros autores (*Medina, 2013*) que exponen que los nudos de la madera apenas influyen en su resistencia a compresión. Por lo tanto debería ser considerado el modo de trabajo al cual estará sometido el nudo a la hora de ser considerado como motivo para la aceptación o rechazo de una pieza de madera. De esta manera, piezas cuyo modo de trabajo vaya a ser la compresión, podrían tener unos límites de aceptación mayores y podrían ser utilizadas piezas que son rechazadas por la norma con los criterios actuales.

3.5.1.2 Propiedades físicas de la madera estudiada y velocidad de propagación de ultrasonido

El estudio de la densidad y el contenido de humedad encuadró a la madera dentro de los límites de referencia marcados por otros autores (*Gutierrez, 2014*) y por la normativa vigente, los cuales marcan la densidad de la madera de conífera usada en construcción entre

los 400 y los 550 Kg/m³ y un contenido de humedad medio para la caracterización mecánica de la misma de un 12%.

La densidad media obtenida es de 526 Kg/m³ y el contenido de humedad medio de un 9,3%. Estos datos confirman los valores de referencia, por lo que la piezas objeto de estudio pueden ser aceptadas como características de su especie, estando en unas condiciones para poder dar unos resultados representativos de caracterización.

No así pueden ser consideradas si las comparamos con la norma UNE-338, la cual las encuadra dentro de la clase resistente C-22, con una densidad media de 410 Kg/m³. Si se referencian los datos experimentales con los de las tablas de la norma (*Tabla 3.6*), se obtiene que la madera pertenecería a una clase resistente C-45. Como se puede ver más adelante, los datos de resistencia obtenidos experimentalmente estarían más cerca de dicha clase resistente que de la marcada por la norma. Se destaca por lo tanto el carácter conservador de la normativa, encuadrando a toda la madera con un canto superior a 70 mm como MEG, clase resistente C-22, no siendo, en este caso, representativa de los especímenes ensayados.

El mismo caso sucede con la velocidad de propagación de ultrasonido, que coincide con los datos aportados por otros autores previamente, encuadrándola en 5000 m/s en la dirección paralela a la fibra (*Reiterer et al, 2000*), por lo que el módulo de elasticidad dinámico se encuentra dentro de los mismos valores en ambos casos (13.500 Mpa).

Se puede concluir que se trata de una madera de Pino Silvestre, característica de su especie, que no está correctamente representada en la norma vigente.

3.5.1.3 Resistencia última y su comparación con los métodos de cálculo del Eurocódigo 5

La resistencia última mostrada por las vigas aceptadas por la norma UNE-56.544 durante los ensayos experimentales es ostensiblemente mayor a la marcada por la norma UNE EN-338:2010 para la clase resistente C-22 para calidad MEG a la cual pertenece la madera objeto del estudio. Dicha norma marca una resistencia a flexión de 22 MPa sin distinción para el modo de aplicación de la carga. Los resultados obtenidos denotan que, a pesar de encontrar diferencias en los dos casos de aplicación de la carga (41 MPa en el caso de las ensayadas a flexión en 4 puntos y 32,4 MPa en las ensayadas a 3 puntos) los valores finales de resistencia son, de media, entre un 47% y un 86% mayores a los marcados por la norma, lo cual resalta el lado de la seguridad en el que se encuentran dichos valores de caracterización.

La elección del momento o la resistencia a soportar, respecto de la carga última, a la hora de escoger una sección que tenga que soportar un esfuerzo de flexión, es la opción más indicada. Esto es debido a que la diferencia de cargas últimas en las piezas aceptadas por la norma UNE-56.544 es del 47%, mientras que entre momentos y resistencias es del 20%.

Esto se debe a que el momento (y por consiguiente la resistencia, calculada a partir del momento flector y el momento resistente de la sección) considera el modo de entrada en carga del elemento a flectar, por lo que tiene en cuenta el tipo de trabajo que el elemento estructural va a realizar, mientras que la carga no lo considera.

3.5.1.4 Modo de rotura de las vigas ensayadas

A pesar de que la madera a flexión no tiene un modo de rotura claro en todos los casos, en los ensayos realizados se pueden englobar en 2 grupos diferenciados:

- Roturas a flexión: compuesto principalmente por elementos rechazados por la norma de clasificación visual.
- Roturas a cortante (rasante): compuesto por piezas aceptadas por la norma.

Las roturas de forma rasante se han producido porque la sección de la pieza no ha sido capaz de soportar los esfuerzos de cortante en la dirección de las fibras (*Figura 3.46*), siendo la lignina y la hemicelulosa de conformación del tronco las que tienen que soportar dicho esfuerzo y cuya resistencia es muy baja. De este modo queda marcado que la resistencia a cortante paralela a la fibra es donde la madera tiene menor capacidad de carga.

Figura 3.46. Viga B10 con fallo producido cortante.

Las roturas a flexión han venido provocadas claramente por defectos en la cara de las piezas que suponía un corte de las fibras longitudinalmente y por lo tanto un punto débil (*Figura 3.47*). Esto ha sido debido a que los nudos son quebradizos a tracción, por lo que la disposición de los mismos en la cara traccionada, o cerca de ella, ha supuesto la pérdida de sección efectiva trabajando a tracción, produciendo una rotura prematura de la pieza. Este desajuste entre la resistencia a tracción y a compresión ha provocado que no se produzca ninguna interfaz crítica en la cual, los esfuerzos a cortante paralelos a la fibra de la pieza rompan esta.

Figura 3.47. Viga B13 con fallo producido a flexión.

3.5.1.5 Comparación del MOEG con los aportados por la norma UNE-338

Si se comparan los resultados medios obtenidos en el cálculo del módulo de elasticidad global de las piezas (3.278 MPa de media), se puede observar que no guarda relación con ninguna de las clases resistentes que aparecen en dicha norma (*Tabla 3.6*). Es por lo tanto resaltable que sería interesante que la norma indicase un módulo de elasticidad a flexión a modo de caracterización de este material en uno de sus modos de trabajo más comunes.

Si se profundiza un poco más, se puede observar que solamente aporta un Módulo de Elasticidad paralelo a las fibras y otro perpendicular. Esta situación no es real ya que, la deformación a compresión y tracción en la dirección de las fibras, a pesar de ser elástico-lineal en ambos casos en valores iniciales, no es la misma. Este comportamiento se puede ver si analizamos los gráficos de caracterización realizados por diversos autores (*Argüelles et al, 2000; Baño et al, 2012*) (*Figuras 2.13 y 2.15*) en los cuales se puede observar como a compresión se necesita una tensión mucho menor que a tracción para obtener la misma deformación.

Comportamiento similar, pero de signo contrario, ocurre con la compresión y tracción perpendicular a la fibra. En este caso, la resistencia a compresión en esta dirección es mucho mayor que la tracción, ya que esta última dependería única y exclusivamente de la lignina y de la hemicelulosa, carentes de resistencias, cuya única misión es el aglutinamiento de las fibras. Por esto, no podemos esperar el mismo comportamiento de deformación de la madera en ambas direcciones.

Es por esto por lo que se considera que la norma UNE-338, no aporta información suficiente para la caracterización de los Módulos de Elasticidad de la madera a flexión

3.5.1.6 Comparación final de resultados con las clases resistentes de la norma UNE-EN 338:2010

En base a la norma UNE-EN 56.544:2011 “Clasificación visual de la madera aserrada para su uso estructural. Madera de coníferas”, toda la madera con un canto superior a 7 cm, se encuadra dentro de la calidad MEG. A esta calidad de madera a su vez, se le asigna por la norma UNE-EN 1912:2012, “Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de calidades visuales y especies”, la clase resistente C-22. Los valores característicos de dicha clase resistente se encuentran recogidos en la norma UNE-EN 338:2010, “Madera estructural. Clases resistentes”. Dichos valores, como se puede ver en la *Tabla 3.20*, distan totalmente de

acercarse a los obtenidos experimentalmente. En la mayoría de los casos, los experimentales superan con creces a los normativos, en otros sin embargo, no llegan a alcanzarlos, como es el caso de la resistencia de cortante.

	Valores de caracterización				
	Experimentales		C-22	Clase con valores más cercanos	
	3 puntos	4 puntos		3 puntos	4 puntos
Resistencia a flexión (MPa)	32,4	41,0	22	C 30 (30)	C 40 (40)
Resistencia a cortante (MPa)	2,5	4,8	3,8	< C14 (3,0)	> C24 (4,0)
E paralelo a la fibra (MPa)	-	-	10.000	< C14 (7.000)	< C14 (7.000)
E perpendicular a la fibra (MPa)	-	-	330	> C50 (330)	> C50 (330)
E a flexión (Mpa)	3.794		-	-	
Densidad media (Kg/m³)	526,36		410	C-45 (520)	

Tabla 3.20. Comparación de resultados obtenidos mediante ensayos experimentales y valores de referencia según el marco legislativo.

Como se observa en la *Tabla 3.20*, las resistencias a flexión obtenidas experimentalmente corresponderían a unas clases resistentes muy superiores a la establecida por la clase C-22, a pesar de las diferencias entre la flexión en 3 y 4 puntos sean considerables, encuadrando la madera como C-30 y C-40 respectivamente.

Los resultados de resistencia a cortante muestran valores discrepantes, siendo superiores en flexión en 4 puntos e inferiores en 3 puntos respecto de la clase resistente de referencia.

En cuanto al módulo de elasticidad obtenido, no se ve representado por ninguno de los definidos por la normativa. La densidad tampoco correspondería con su clase resistente.

Por todo esto se considera que, partiendo de la norma UNE-EN 1912:2012 no se debería encuadrar a toda la madera de la clase MEG (Madera Estructural, Gruesa Escuadria), con la misma clase resistente, ya que los valores de resistencia a flexión, son muy superiores a los de la clase C-22. Del mismo modo, se remarca el bajo grado de definición de los valores característicos de dicha madera, debido a la discrepancia de resultados o la no representación de los mismos, como es el caso del Módulo de Elasticidad a flexión.

3.5.2 Análisis de las vigas reforzadas y reparadas con CFRP

3.5.2.1 Refuerzo con 1 capa de fibra de carbono bidireccional de 160 gr/m²

Las vigas reforzadas y reparadas con fibra de carbono de 160 gr/m² no obtienen unos resultados muy satisfactorios. Las vigas reforzadas rompieron de modo frágil, a flexión principalmente, aunque también se observó componente de cortante en la viga B12R160-1. Ambas obtienen un resultado de resistencia muy por debajo de la media (-44,0%) y mermaron significativamente su capacidad de desplazamiento. Su resultado de resistencia y

su modo de rotura frágil hacen que el comportamiento de ambas vigas (B04R160-1 y B12R160-1) se asemeje más al de las vigas sin refuerzo, pero reduciendo significativamente su capacidad de desplazamiento, por lo que el refuerzo no es capaz de soportar el fallo de la madera y aguantar las tensiones derivadas del mismo.

La viga B07F160-1 tiene un cambio de comportamiento significativo respecto del primer ensayo, el diagrama Tensión-Desplazamiento (*Figura 3.29*) muestra como la viga merma significativamente su módulo de elasticidad y su resistencia. La rotura de la misma se produce a base de las pequeñas roturas de la fibra a medida que aumentaba la resistencia, por lo que la viga muestra un comportamiento mucho más dúctil que antes de realizarse el refuerzo. Tanto la carga como la descarga se producen paulatinamente. La viga B13F160-1 sin embargo tuvo una rotura mucho más rápida, en este caso se produjo una pequeña rotura de la fibra antes del fallo final, aunque cuando llegó este la viga perdió por completo su capacidad portante. Las dos vigas se quedaron muy por debajo de la resistencia previa y de la de las vigas sin reforzar, por lo que la reparación fue muy poco efectiva en términos de resistencia.

Los refuerzos y reparaciones con fibra de carbono de 160 gr/m² no son suficientes para dotar a las vigas de mayor resistencia de la que obtendrían sin refuerzo, prevaleciendo el comportamiento de la madera sobre el del efecto del refuerzo en el caso de las vigas reforzadas y obteniendo unos valores de resistencia muy bajos en el caso de las vigas reparadas.

3.5.2.2 Refuerzo con 2 capas de fibra de carbono bidireccional de 160 gr/m²

Las vigas reforzadas y reparadas con 2 capas de fibra de carbono de 160 gr/m² obtienen unos resultados más satisfactorios que las vigas reforzadas y reparadas con 1 capa. En este caso, a pesar de que las vigas reforzadas siguen teniendo una capacidad de desplazamiento menor, la resistencia aumentó significativamente, quedándose en valores superiores a las vigas sin reforzar.

Las vigas reforzadas con 2 capas de 160 gr/m² aumentaron la resistencia respecto de las vigas sin refuerzo (+14,7%) aunque mermaron su capacidad de desplazamiento a consecuencia de la rigidez del refuerzo. Las vigas tienen en ambos casos una recuperación de carga una vez producida la primera rotura hasta que se produce la rotura final de modo frágil a flexión por el centro del vano.

Las vigas reparadas obtuvieron un comportamiento más cercano al obtenido en los ensayos a flexión sin refuerzo que en el caso de la reparación con 1 capa. Su valor de resistencia fue muy cercano al de las vigas sin reparar, quedándose solamente un 2,7% por debajo de este valor. Según muestra el *Figura 3.35* fue la fibra la que soportó toda la tensión del ensayo, como así muestran las pequeñas roturas de la fibra en la fase de carga mostrada con pequeños saltos de resistencia, produciéndose en la misma ubicación de la rotura previa.

Una vez producida la rotura principal, la viga B11F160-2 tuvo una pequeña recuperación antes de la rotura final. Este comportamiento, unido al aumento de la capacidad de desplazamiento (+28,7%) marca el carácter de comportamiento dúctil de la viga reparada. En ambos casos el aumento de la rigidez de la viga fue de menos a más hasta alcanzar la máxima tensión de la fibra.

3.5.2.3 Refuerzo con 1 capa de fibra de carbono bidireccional de 210 gr/m²

Las vigas reforzadas y reparadas con 1 capa de CFRP de 210 gr/m² superan los valores de las vigas sin refuerzo, aunque la capacidad de desplazamiento sigue siendo inferior en el caso de las vigas reforzadas respecto de las vigas sin refuerzo. Se observa que los resultados son muy diferentes incluso entre especímenes, obteniendo en los dos casos, una viga con una respuesta inferior en resistencia y desplazamiento respecto de la otra.

Las vigas reforzadas aumentan la resistencia respecto de las vigas sin reforzar un 32,2%, aunque pierden capacidad de desplazamiento, quedándose por debajo un 29,7%. La viga B21R210-1 obtuvo una resistencia mucho menor que la viga B09R210-1. La gran cantidad de nudos localizados en el centro del vano, provocó la rotura prematura de esta a flexión que, a pesar del refuerzo, llegó hasta los 26,48 MPa, estando por debajo de las vigas sin refuerzo, aunque por encima de los valores alcanzados por las vigas rechazadas ensayadas sin refuerzo. La viga B08R210-1 obtuvo unos valores de resistencia muy superiores. En este caso, la viga B08 se trata de una viga aceptada por la norma sin ningún defecto significativo. A pesar de obtener resultados diferentes, se observa una gran influencia de la fibra, provocando una respuesta muy positiva de una viga con defectos muy significativos en el centro del vano, de la cual se esperaba unos valores de resistencia muy bajos, como así ha ocurrido en casos anteriores de vigas con nudos en el centro el vano situados cerca de la cara traccionada.

Las vigas reparadas, consiguen un valor de resistencia cercano al de las vigas sin refuerzo, aumentando este en un 2,4%, y el desplazamiento un 16,3%. El modo de rotura, al igual que en casos anteriores fue a partir de las roturas de la fibra, observándose, más acentuado en el caso de la viga B09F210-1, una serie de recuperaciones antes de producirse la descarga total. La rotura de la fibra, siguió el patrón marcado en los ensayos previos, los cuales fueron cortante en la viga B09 y flexión en el caso de la viga B17. Aunque se observa que los resultados son muy diferentes entre las dos vigas reparadas, si se comparan con los resultados obtenidos por las mismas vigas sin uso CFRP, ambas dos consiguen llegar a unos valores de resistencia muy cercanos a los obtenidos en los ensayos previos, por lo que la fibra es capaz de devolver la capacidad portante a las vigas rotas previamente.

3.5.2.4 Refuerzo con 2 capas de fibra de carbono bidireccional de 210 gr/m²

Las vigas reforzadas y reparadas con 2 capas de CFRP de 210 gr/m² aumentan tanto la resistencia como la capacidad de desplazamiento en ambos casos respecto de las vigas sin reforzar.

Las vigas reforzadas aumentan su resistencia un 84,1% y su capacidad de desplazamiento un 8,5% respecto de las vigas sin reforzar. La viga B03R210-2 rompe a flexión en el centro del vano de modo frágil y la viga B22R210-2 sufre numerosas roturas a cortante hasta que se produce la rotura final del mismo modo.

Las vigas reparadas rompen siguiendo el patrón de rotura previo que fue de cortante en ambos casos, superando el valor de referencia de las vigas sin reforzar en un 34,5%. También consiguen aumentar su capacidad de desplazamiento un 57,6%. Al igual que en los casos anteriores, después de producirse la rotura principal, la pérdida de carga se lleva a cabo paulatinamente, produciéndose una serie de roturas hasta que ocurre la rotura final. Si se analizan los datos conjuntamente, se comprueba que con la suficiente cantidad de material, se puede devolver e incluso incrementar la resistencia de vigas que han perdido por completo su capacidad de carga, dotándolas además de un carácter dúctil en su modo de rotura, comportamiento muy difícil de obtener en los ensayos previos realizados, donde la gran mayoría de las vigas rompían de modo frágil.

3.5.2.5 Análisis conjunto de las vigas reparadas con CFRP

El análisis de los resultados obtenidos permite comprobar que las vigas reparadas con una sola capa de carbono de 210 gr/m², o con 2 capas de 160 gr/m², han obtenido valores de resistencia cercanos a los valores medios de resistencia de las vigas sin refuerzo, 8,7 MPa superiores a los de la clase C-22 marcados por la UNE-338 (*Tabla. 3.6*). La reparación con 2 capas de 210 gr/m² muestra una resistencia superior un 34,5% a la media de resistencia de la madera del ensayo (*Tabla 3.21*). Los desplazamientos obtenidos en todos los casos son superiores a los valores medios de las vigas sin reforzar, aumentando en algunos casos hasta el 57,6%, lo que supone dotar a las vigas de mayor ductilidad, carente en vigas de madera sin refuerzo sometidas a flexión. Estos resultados son especialmente interesantes si se tiene en cuenta que todas las vigas ensayadas en este grupo no tenían capacidad de carga debido a que en los ensayos previos se había llegado hasta su rotura, por lo que las tensiones de tracción fueron absorbidas exclusivamente por la fibra de carbono. La rotura del CFRP en todos los casos se produjo siguiendo el patrón marcado por la rotura en los ensayos previos de las vigas sin reforzar. Esto fue debido a que en dicho punto no se produce pegado entre fibra y madera, creando un punto débil, absorbiendo todos los esfuerzos la fibra de carbono. En los casos en que la rotura previa se había producido por cortante, marcando un plano rasante entre las fibras de madera, la viga se comportó como dos piezas deslizantes, una encima de la otra, cortándose la fibra de carbono en dicho plano. Estas piezas con rotura

previa a cortante, alcanzaron en todos los casos mayor resistencia que las vigas con la misma configuración de reparación que habían roto previamente a flexión. Esto es debido a que al romper a cortante de forma rasante, la cara inferior de la viga se vio menos afectada, teniendo menos irregularidades que las que rompieron a flexión. Se destaca por lo tanto la importancia de la regularización del soporte a la hora de ser intervenido, para evitar esfuerzos puntuales que en la fibra que pueden ser críticos.

Tipo de refuerzo	Reparada o Reforzada	Tensión (MPa)	Desp. max. (mm)	Tensión (30,7 MPa)	Desp. max. (22,9 mm)
Refuerzo 210-2	F210-2	41,3	36,1	+34,5%	+57,6%
	R210-2	56,5	24,9	+84,1%	+8,5%
Refuerzo 210-1	F210-1	31,4	26,6	+2,4%	+16,3%
	R210-1	40,6	18,3	+32,2%	-20,2%
Refuerzo 160-2	F160-2	29,9	29,5	-2,7%	+28,7%
	R160-2	35,2	16,1	+14,7%	-29,7%
Refuerzo 160-1	F160-1	15,1	18,5	-50,8%	-19,1%
	R160-1	17,2	4,9	-44,0%	-78,6%

Tabla 3.21. Valores de comparación entre los ensayos a flexión realizados a las vigas reforzadas y reparadas en sus diferentes configuraciones y sus valores de referencia previos, con los valores medios obtenidos en los ensayos a flexión a todas las vigas sin refuerzo.

Figura 3.48. Comparativa entre vigas reparadas, vigas reforzadas con CFRP bidireccional con los valores medios obtenidos en los ensayos a flexión realizados a todas las vigas sin refuerzo.

3.5.2.6 Análisis conjunto de ensayos de vigas reforzadas sin rotura previa

La resistencia de las vigas reforzadas depende la cuantía del refuerzo colocado. En la *Figura 3.48* y en la *Tabla 3.21* se muestra una comparación entre los valores medios de las resistencias y desplazamientos en el momento de máxima tensión alcanzados por vigas reparadas (previamente colapsadas) y vigas reforzadas. Puede comprobarse que la resistencia de las vigas reforzadas es superior en todos los casos al de las vigas reparadas y los desplazamientos últimos de las vigas reforzadas son siempre inferiores al de las reparadas. El refuerzo con 1 capa de 160 gr/m^2 no ha alcanzado los valores medios de resistencia de las vigas sin refuerzo. A partir del refuerzo con 2 capas de 160 gr/m^2 los valores de resistencia empiezan a superar a la media, obteniendo un aumento de la resistencia entre el 14,7% y el 84,1% a medida que se aumenta el gramaje y las capas del refuerzo. Se observa un aumento de la rigidez de las vigas debido a la diferencia de módulos de elasticidad, muy superior en la fibra de carbono. Los CFRP han provocado una regularización de los fallos en vigas reforzadas, aumentando el modo de rotura por flexión en un 37% (*Tabla 3.22*). Se ha de tener en cuenta que los fallos producidos por flexión sin refuerzo han sido motivados por la presencia de nudos, mientras que los fallos producidos por flexión en piezas reforzadas han sido en el centro del vano (*Figura 3.49*), por lo que la fibra actúa como un regularizador de esfuerzos, evitando que se produzcan puntos débiles que provoquen la rotura. De este modo el modo de fallo se hace más predecible y controlable.

En algunos casos se observó como la fibra situada en la cara comprimida de la viga se despegó durante la realización del ensayo, por lo que el refuerzo con fibra en situaciones en las que esta tenga que soportar esfuerzos de compresión debe garantizarse la correcta unión entre la interfaz espécimen / refuerzo, ya que el despegue de este puede provocar una mayor delaminación debido a que se arrastre al resto de fibra, afectando al refuerzo de la cara traccionada y haciendo que no sea efectivo (*Figura 3.50*).

Figura 3.49. Rotura a flexión de la viga B03R210-2 durante el ensayo a flexión en 3 puntos.

Figura 3.50. Delaminación de la fibra de carbono en la viga B08R210-1 durante el ensayo a flexión en 4 puntos.

	Flexión	Cortante	Flex/Cort
Vigas sin refuerzo	38%	47%	15%
Vigas reforzadas	75%	25%	

Tabla 3.22. Porcentaje de modo de rotura principal en el ensayo a flexión de vigas sin refuerzo y reforzadas sin haber sido ensayadas previamente.

3.6 Conclusiones del Capítulo III

3.6.1 Conclusiones sobre la madera estudiada y su comparación con la normativa de caracterización

La madera ensayada es una madera con un gran número de defectos que acentúan su heterogeneidad, como así muestra la gran variabilidad de resistencia obtenida entre los 48,2 MPa de la viga B09 (aceptada) y los 6,80 MPa de la viga B13 (rechazo). Dicha variación es provocada en este caso por la presencia de nudos en la cara traccionada de la viga, los cuales suponen un corte de las fibras que provoca la pérdida de resistencia a tracción. La norma UNE-EN: 56.544 traza las restricciones dimensionales de los defectos de la madera que, en base a los resultados obtenidos, en los cuales se observa una clara diferencia de resistencia entre vigas aceptadas por la norma y vigas rechazadas (Tabla 3.14), están correctamente trazadas. Si bien es cierto que la viga B02 alcanza los 30,1 MPa de resistencia a pesar de considerarse rechazo, valor muy cercano de los 30,7 MPa de resistencia media obtenida por la totalidad de las vigas. Esto es debido a que el nudo que provocó su rechazo se situó en la cara superior (comprimida), confirmando que la influencia de los nudos de madera a compresión es muy baja. Por lo tanto, la norma debería considerar la localización de los nudos en los criterios de aceptación de los especímenes. De este modo se podrían ser aceptar un gran número de piezas que son rechazadas por la norma y se conseguiría un mayor aprovechamiento de la madera.

La presencia de estos nudos ha condicionado también el modo de rotura de las vigas, obteniendo rotura por flexión en las vigas rechazadas, y cortante en las vigas aceptadas por la norma UNE-EN: 56.544. Las vigas aceptadas rompieron de forma rasante ya que la sección no fue capaz de absorber el cortante en la dirección de las fibras a consecuencia del ensayo de flexión. Esto es debido a que la madera tiene una resistencia muy baja a cortante en la dirección de las fibras, ya que dicho esfuerzo recae sobre la lignina y la hemicelulosa que aglutinan las fibras pero carecen de resistencia.

Las resistencias medias obtenidas experimentalmente están muy por encima de la marcada por la norma UNE-EN: 338 para la clase resistente C-22, obteniendo 32,4 MPa en las vigas ensayas a flexión en 3 puntos y 41,0 MPa en las vigas a flexión en 4 puntos. La asignación de dicha clase resistente por la norma UNE-EN: 1912 para todas las escuadrías con un ancho superior a 7 cm no es representativa de los valores experimentales obtenidos. Se destaca por lo tanto el lado de la seguridad en el cual se encuentran ambas normas, asignando mediante la clase resistente C-22 unos valores de resistencia a las vigas por debajo de los obtenidos posteriormente en la fase experimental.

3.6.2 Conclusiones sobre las vigas de madera reparadas con Fibra de Carbono Bidireccional

Las vigas reparadas con CFRP son capaces de recuperar e incluso aumentar su resistencia inicial con la suficiente cantidad de material, como así han demostrado las vigas reparadas con 2 capas de 160 gr/m² y las reparadas con 1 capa de 210 gr/m² que llegaron a alcanzar valores muy cercanos a la media obtenida por las vigas sin reforzar, y por las reparadas con 2 capas de 210 gr/m² que aumentaron la resistencia de referencia un 34,5%. Las vigas reparadas con 1 capa de 160 gr/m² alcanzaron valores un 50,8% por debajo de la resistencia media de las vigas sin refuerzo, por lo que no resulta aconsejable su utilización para este tipo de intervención.

La reparación con fibra de carbono provocó un aumento de la ductilidad de las vigas debido al modo de rotura mediante pérdida paulatina de capacidad de carga una vez alcanzada la máxima resistencia. En los casos en los que la resistencia igualó e incluso superó a la de las vigas sin refuerzo, la capacidad de desplazamiento aumentó desde +16,3% (1 capa de 210 gr/m²) a +57,6 % (2 capas de 210 gr/m²).

La resistencia de estas vigas fue proporcionada únicamente por la fibra de carbono ya que las vigas carecían de capacidad portante. Así lo demostró el modo de rotura el cual se produjo en todos los casos por la zona en la cual se había producido la rotura en el ensayo previo de cada viga, siendo este el punto más débil de la viga reparada. Debido a este comportamiento la viga sufre un descenso del módulo de elasticidad en cada caso hasta que la fibra entra en carga y aumenta dicho valor. Este hecho se debe tener en cuenta a la hora

de realizar una intervención ya que los desplazamientos iniciales de la viga pueden provocar fallos en elementos secundarios que dependan de la misma.

3.6.3 Conclusiones sobre las vigas de madera reforzadas con Fibra de Carbono Bidireccional

Las vigas reforzadas obtuvieron una resistencia superior a las vigas reparadas en todos los casos. Al igual que en el caso anterior, la fibra de 160 gr/m² no obtiene unos resultados favorables, quedándose un 44,0% en resistencia por debajo de la marcada por las vigas sin reforzar. Es a partir del refuerzo con 2 capas de 160 gr/m² cuando la resistencia aumenta entre el 14,7% y el 84,1%.

Las vigas aumentan su rigidez a consecuencia del refuerzo. La capacidad de desplazamiento se ve afectada, comenzando muy por debajo de la marcada por las vigas sin reforzar con el refuerzo de 1 capa de 160 gr/m², reduciéndose un 78,6%. A medida que se aumenta el refuerzo, la capacidad de desplazamiento aumenta, pero es sólo con el refuerzo con 2 capas cuando llega a superar a las vigas sin refuerzo, aumentando un 8,5%.

La fibra de carbono regularizó los esfuerzos críticos en las vigas de madera con defectos, reforzando las zonas donde se ubicaban los nudos y consiguiendo así reducir la heterogeneidad. De este modo, la carencia de resistencia de la madera en la zona de nudos, es asumida por la fibra, que consigue repartir las cargas y homogeneizar la resistencia de la viga.

Al igual que en el caso anterior, el uso de un gramaje superior en el refuerzo favoreció la resistencia del conjunto, como puede ser comprobado en el caso de las vigas reforzadas con 1 capa de fibra de carbono de 210 gr/m² que obtuvo unos resultados más elevados que las reforzadas con 2 capas de fibra de 160 gr/m².

CAPÍTULO IV:
REFUERZO DE VIGAS DE
MADERA CON DIFERENTES
SISTEMAS FRP

4.1 Introducción y objetivos

4.1.1 Introducción

Como se ha podido observar en el estado del actual de los conocimientos, el uso de fibras para el refuerzo de vigas de madera está bastante extendido, sobre todo el uso de fibra de carbono y fibra de vidrio. Han sido las fibras más utilizadas durante mucho tiempo, pero según han avanzado los años, la aparición de nuevas fibras y materiales ha hecho que el abanico de posibilidades se haya abierto. Conocidos los beneficios del uso de este tipo de materiales, se hace interesante el estudio sobre estas nuevas posibilidades con las que se cuenta hoy en día. Por ello se plantea un estudio en el cual se comparen una amplia gama de sistemas de FRP.

Con la aplicación de dichos sistemas, se podrá comparar en base a las características de cada uno de ellos la respuesta de las vigas de madera cuando se realiza un refuerzo, observándose el efecto de la disposición del mismo y la relación entre la elasticidad del material de refuerzo y la resistencia final del sistema. Dicho aspecto es de amplio interés ya que, como se ha comprobado en trabajos previos, el uso de FRP como refuerzo, merma y condiciona la capacidad de desplazamiento de las vigas en algunas situaciones, no siendo en todos los casos beneficioso para la viga.

En esta fase se ha estudiado el comportamiento a flexión de vigas de madera reforzadas con diferentes tipos de FRP. Para ello se han realizado ensayos de caracterización física y mecánica (flexión y compresión) a la madera utilizada y ensayos de flexión a vigas de madera con diferentes composiciones de forma y tipología de refuerzo de FRP. Para la realización de los ensayos a flexión se han utilizado diferentes tipos de fibras de refuerzo, así como de disposición y número de capas.

Para la elaboración del estudio se ha utilizado madera de pino silvestre de 1ª calidad para homogeneizar su comportamiento y fibras de carbono (normal y de alto módulo elástico), de basalto, de vidrio y fibra metálica. A través de esta fase experimental se pretende conocer la influencia de las diferentes fibras en la resistencia mecánica y la rigidez de las vigas.

El análisis del comportamiento mecánico de las vigas se lleva a cabo mediante una comparación de la resistencia de las diferentes vigas con los diferentes tipos de fibra y sin ellos. Se considera que los cambios de comportamiento de la madera serán debido a las propiedades de la fibra ya que la matriz epoxídica utilizada para la unión entre las piezas dispone de una elasticidad mayor que el material de refuerzo.

4.1.2 Objetivos

Los objetivos de esta parte de la tesis son los de contribuir al conocimiento de los refuerzos con materiales compuestos en vigas de madera. Para ello se han marcado los siguientes objetivos particulares:

- Comparar los valores de caracterización obtenidos experimentalmente con los marcados por la norma UNE-EN 338, para la clase resistente objeto del estudio, tanto resistencia a flexión como en compresión.

- Comparar las distintas resistencias de las vigas, dependiendo de los diferentes tipos de fibra utilizados para el refuerzo a flexión.
- Comparar la eficacia de la disposición y tipo de refuerzo en las vigas reforzadas sometidas a flexión.

4.1.3 Estructura del Capítulo IV

El Capítulo IV, se estructura en 6 puntos los cuales desarrollan el programa experimental llevado a cabo y su proceso de análisis.

En el punto 4.1 se introduce la materia, encuadrándola dentro de los condicionantes de partida que se trazan para el estudio.

Los materiales que se han utilizado se presentan en el punto 4.2, describiéndose sus características y condiciones de puesta en uso en el laboratorio.

El punto 4.3 detalla el programa experimental empleado, la normativa utilizada para la clasificación de las vigas y los ensayos realizados para la caracterización física y mecánica de la madera empleada. Se detallan también las consideraciones para la realización de los cálculos.

Los resultados obtenidos mediante el programa experimental descrito se encuentran en el punto 4.4, donde, a través de tablas y gráficos, se exponen los datos de caracterización de cada uno de los elementos ensayados.

En el punto 4.5 se desarrolla el análisis de los resultados. Se compara la madera objeto del estudio con los datos aportados por la normativa de caracterización, se analiza el efecto de los refuerzos y de las reparaciones realizadas con CFRP en las vigas y se procede a su comparación.

Las conclusiones del estudio se enumeran en el punto 4.6, respondiendo a las cuestiones y objetivos marcados.

4.2 Materiales empleados

4.2.1 Madera

La madera objeto del estudio es de la especie Pino Silvestre (*Pinus Silvestris*), procedente de la provincia de Soria (España). La calidad es de 1ª categoría, por lo que no cuenta con defectos significativos, contando con, al menos, 3 caras limpias de defectos. De este modo se consigue la homogeneización de su comportamiento mecánico.

Se dispone de 33 vigas, de dimensiones 1100 x 100 x 46 mm (*Figura 4.1*) para la realización de los ensayos de flexión. Para la caracterización mecánica de la madera se utilizaron 5

piezas y el resto fueron utilizadas para la realización de ensayos a flexión con refuerzos. Todas las vigas fueron clasificadas físicamente en base a la norma UNE-EN 56.544.

Figura 4.1. Viga B202, perteneciente al lote de vigas de madera utilizadas para la fase experimental.

Para los ensayos de compresión paralela a la fibra se utilizaron 5 piezas prismáticas de 40x40x240 mm del mismo lote de madera utilizada para los ensayos a flexión (*Figura 4.2*).

Figura 4.2. Pieza C-01, durante el ensayo a compresión simple paralela a la fibra.

Los ensayos de contenido de humedad de la madera se realizaron a piezas tipo “rebanada” de 100x100x46mm que se obtuvieron de vigas ya ensayadas (*Figura 4.3*).

Figura 4.3. Imagen de las piezas de contenido de humedad.

Las piezas de madera fueron acopiadas en el Laboratorio de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid, cuya temperatura se encontró entre los 21°C y 23°C y su humedad relativa entre el 40% y el 60% durante el proceso experimental. Toda la madera utilizada durante la fase experimental procede de secadero, por lo que no se esperan cambios higroscópicos durante la realización del programa experimental.

4.2.2 Fibras utilizadas para el refuerzo

Las fibras utilizadas para la realización de los ensayos de flexión se pueden observar en la *Tabla 4.1* y en la *Figura 4.4*. Fueron suministradas por la empresa MAPEI, así como la resina epoxi y la imprimación necesarias para la adhesión de las fibras.

Modelo	Tipo de Fibra	Apariencia	Gramaje (gr/m ²)	Espesor equivalente tejido seco (mm)	Resistencia mecánica a tracción (MPa)	Carga máx. por ud. ancho (kN/m)	Módulo de elasticidad a tracción (MPa)	Alargamiento a rotura (%)
MapeWrap C UNI-AX	Carbono de alta resist.	Tejido Unidireccional	300	0,166	4.830	> 800	230.000	2
MapeWrap C UNI-AX HM	Carbono de alta resist.	Tejido Unidireccional	300	0,164	4.410	> 700	390.000	1,1
MapeWrap G UNI-AX	Fibra de vidrio	Tejido Unidireccional	900	0,48	2.560	1228	80.700	3
MapeWrap S Fabric	Fibra metálica	Tejido Unidireccional	2.100	0,374	> 2.845	756	210.000	> 2,6
MapeWrap B Uni-AX	Basalto de alta resistencia	Tejido Unidireccional	400	0,143	4.840	680	89.000	3,15

Tabla 4.1. Valores de caracterización de las fibras empleadas en el Capítulo IV de los ensayos realizados.

Figura 4.4. Tejidos utilizados en la fase experimental. Arriba: Fibra de Basalto (Izq.), Fibra de Carbono de Alto Módulo Elástico (Centro), Fibra Metálica (Der.). Abajo: Fibra de Vidrio (Izq.), Fibra de Carbono (Der.).

Se emplearon fibras de carbono de alta resistencia (normal y de alto módulo elástico), fibra de basalto, de vidrio y metálica. La disposición elegida del tejido en este caso fue unidireccional ya que, al tratarse de un refuerzo en la dirección de las fibras de la madera, se presentaba como la mejor construcción de tejido. Todos los refuerzos fueron llevados a cabo in-situ siguiendo las indicaciones del fabricante para la aplicación del material compuesto.

4.2.3 Resina epoxi utilizada

Para la adhesión de las fibras a las vigas de madera se utilizó resina epoxi bicomponente suministrada por MAPEI. Las características de la resina se pueden observar en la *Tabla 4.2*. Para la realización de la aplicación de la fibra se siguieron los pasos indicados por el fabricante, realizándola in-situ a la hora de reforzar las vigas. A su vez, se respetaron los tiempos de curado de 7 días, mínimo, antes de realizar cualquiera de los ensayos.

Modelo	Temp. aplicación	Tiempo de endurecimiento	Res. a tracción (MPa)	Alargamiento a tracción (%)	Res. a compresión (MPa)	Res. a flexión (N/mm ²)	E flexión (N/mm ²)	E compresión (N/mm ²)
MapeWrap 31	de +5°C a +30°C	7 días	40	1,8	70	70	3.000	1.400

Tabla 4.2. Valores de caracterización de la resina epoxi empleada para la adhesión de la fibra.

4.3 Programa experimental

Para la obtención de los resultados se realizaron ensayos de caracterización, tanto física como mecánica, a la madera utilizada a través de ensayos de compresión y flexión. Posteriormente se reforzaron las vigas de madera con el fin de comprobar la efectividad de los refuerzos. Para ello los ensayos se centraron en estudiar el tipo de refuerzo, el número de capas y su disposición.

4.3.1 Clasificación de la madera empleada

Previo a la realización de los ensayos las vigas se clasificaron visualmente según la norma UNE 56.544: “Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural” de 2011 (*UNE-EN 56.544*) en base a las acotaciones morfológicas marcadas por esta. La clasificación de las vigas las encuadró dentro de la calidad ME-1. Las restricciones morfológicas de los defectos para la aceptación o rechazo de las piezas se pueden observar en la *Tabla 4.3*.

CRITERIOS DE CALIDAD		ME1
DIÁMETRO DE LOS NUDOS SOBRE LA CARA (h)		$d \leq 1/5$ de "h"
DIÁMETRO DE LOS NUDOS SOBRE EL CANTO (b)		$d \leq 1/2$ de "b" y $d \leq 30$ mm
ANCHURA MÁXIMA DEL ANILLO DE CRECIMIENTO. Pino silvestre		≤ 4 mm
FENDAS	De secado	$f \leq 2/5$ Las fendas de contracción 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 Abatimineto	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
DESVIACIÓN DE LA FIBRA		1 : 10 (10%)
GEMAS longitud dimensión relativa		$\leq 1/4$ de "L" $g \leq 1/4$
MEDULA		Admitida. No admitida si se clasifica en húmedo
ALTERACIONES BIOLÓGICAS Muérdago (<i>V.album</i>) Azulado Pudrición Galerías de insectos xilófagos		No se admite Se admite No se admite No se admite
DEFORMACIONES MÁXIMAS Curbatura de la cara Curvatura del canto Alaveo Abarquillado		10 mm (para una longitud de 2 m) 8 mm (para una longitud de 2 m) 1 mm (por cada 25 mm de "h") (para una longitud de 2 m) Sin limitación

Tabla 4.3. Especificaciones para la clasificación de piezas de sección rectangular con anchura ≤ 70 mm (UNE-EN 56.544).

Una vez obtenida la calidad de la madera, se procedió a la asignación de clase resistente en base a la norma UNE EN 1912: 2012 "Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de calidades visuales y especies" (UNE-EN 1912), la cual asigna la clase resistente C-27 para la calidad ME-1 en la especie Pino Silvestre (Tabla 4.4).

Clase resistente	País que publica la norma de clasificación	Calidad (véase la nota 2)	Especies Nombre comercial	Procedencia	Identificación botánica (vease la tabla 3)
C27	España	ME1	Pino Silvestre	España	47

Tabla 4.4. Asignación de calidades de coníferas y chopo a clases resistentes según la UNE-EN 1912: 2012.

En la *Tabla 3.6* se indican los valores característicos de las piezas en base a la norma UNE-EN 338: 2010 “Madera estructural. Clases resistentes”, para la clase resistente C27.

4.3.2 Caracterización de la madera empleada y ensayos realizados

La madera utilizada se caracterizó física y mecánicamente para su posterior comparación con la normativa. También se ensayaron todas las piezas mediante técnica de propagación de ultrasonidos para detectar posibles defectos e irregularidades internas de la madera.

4.3.2.1 Técnica de ultrasonidos

Se realizaron medidas de tiempo de propagación de ondas de ultrasonido en las piezas a ensayar. Para ello se utilizó un comprobador ultrasónico cat. E 46, el cual da la medición del tiempo de propagación, expresado en microsegundos de vibraciones ultrasónicas a través de los materiales.

Para la toma de datos se dividió cada cara de pieza en 3 partes y se tomó la medida en cada una de ellas con una ubicación aleatoria cada vez, dentro de cada una de las partes. Para garantizar la correcta transmisión de las ondas fue necesario utilizar vaselina neutra en las interfaces osciloscopio-pieza.

Una vez obtenidos los resultados, se procedió al cálculo del módulo de elasticidad dinámico de las piezas a través de la ecuación [1] de propagación de ultrasonidos.

4.3.2.2 Contenido de humedad

La procedencia de secadero de la madera hizo que esta perdiera el contenido principal de humedad, por lo que se encuentra muy cerca del equilibrio higroscópico. Esto, unido a la estabilidad higrotérmica del laboratorio de materiales, hizo que no se produjeran variaciones del contenido de humedad ni la aparición de fendas de secado durante la realización del programa experimental.

La humedad relativa durante el acopio y la realización de los ensayos, dentro del Laboratorio de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Edificación de Madrid, se encontró entre el 40% y el 60%.

Para la determinación del contenido de humedad se procedió al desecado de 5 probetas tipo “rebanada” de 100x100x46 mm (*Figura 4.3*), las cuales se extrajeron de vigas ya ensayadas y constituían una muestra representativa de estas. Para la realización del ensayo se introdujeron en la estufa marca CONTERM, modelo 2000201, disponible en el laboratorio, a temperatura de 103 ± 3 °C, tomando medidas del peso periódicamente hasta que este fue constante.

4.3.2.3 Densidad

La densidad se calculó a través de la medición de las dimensiones de las caras de las piezas y posterior cálculo de su volumen, y la obtención de su peso a través de la balanza de precisión de la que se dispone en el laboratorio marca JADEVER, modelo D-6300-RS.

Posteriormente se comparó con la densidad aportada por la norma de caracterización UN-EN 338 (UNE-EN 338).

4.3.2.4 Resistencia a flexión

El comportamiento a flexión se caracterizó a través de ensayos de flexión en 4 puntos realizados en la prensa hidráulica modelo MIB60 y el software informático WINTEX 32, ambos de Ibertest.

Se ensayaron a flexión 5 piezas de madera de pino silvestre de 1100x100x46 mm sin refuerzo. El ensayo consistió en la aplicación de un desplazamiento constante de la prensa y la aplicación de la carga en 4 puntos (Figura 4.5 y Figura 4.6). Una vez realizado el ensayo se procesaron los datos obtenidos para la realización de las gráficas de caracterización correspondientes. Previo al ensayo realizado hasta la rotura de las vigas, se procedió a realizar 3 precargas de 6 kN a cada una de ellas para provocar el acoplamiento entre fibras y de esta manera evitar la distorsión de los resultados.

Figura 4.5. Configuración del ensayo a flexión en 4 puntos.

Figura 4.6. Foto del ensayo a flexión en 4 puntos.

4.3.2.5 Módulo de elasticidad a flexión

Para el cálculo del módulo de elasticidad a flexión se realizaron 3 precargas de 6 kN a todas las piezas, utilizando la configuración de ensayo a flexión en 4 puntos. Una vez realizadas se tomaron los datos obtenidos entre los 4 kN y 6 kN de la tercera precarga realizada, evitando de este modo la distorsión de los datos debido al acoplamiento inicial de las fibras realizado en las dos primeras precargas.

4.3.2.6 Ensayos a compresión paralela a la fibra

Para la caracterización de la resistencia a compresión se ensayaron 5 piezas de 40 x 40 x 240 mm. El ensayo se realizó mediante control de desplazamiento de la prensa hidráulica con una velocidad constante de 15 mm/min. Las dimensiones de las piezas se determinaron en base a la norma de caracterización UNE-EN 408:2011 “Estructuras de madera. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas” (UNE-EN 408), que establece que “la probeta debe tener una sección transversal completa y una longitud igual a seis veces la menor dimensión de la sección” (Figura 4.7).

Figura 4.7. Ensayo a compresión simple paralela a la fibra realizado a la pieza C-04.

4.3.2.7 Ductilidad

En este caso tampoco se obtiene comportamiento dúctil ya que, a pesar de que las vigas apenas tienen defectos, la rotura se produce de manera frágil mayoritariamente. Para obtener comportamiento dúctil, como ya se ha enunciado, se necesitaría comportamiento plástico en fibras traccionadas, lo cual es contrario al comportamiento natural de la madera, o aplastamiento plástico de fibras comprimidas, hecho que tampoco se produce durante la realización de los ensayos.

El modo de rotura obtenido durante los ensayos ha sido el siguiente:

- Rotura principal a flexión, con pequeña componente a cortante en algunos casos, de manera frágil mayoritariamente.

De esta manera se descarta el comportamiento dúctil de las vigas ensayadas.

4.3.2.8 Comprobaciones de cálculo realizadas en base a normativa

Para la comparación de los resultados obtenidos, se calcularon previamente los estados de servicio en base al Eurocodigo 5 (UNE-EN 1995), con los datos de caracterización aportados por la norma UNE EN 338: 2010 (UNE-EN 338:2010) para maderas de conífera, Clase

resistente C27. Las comprobaciones de cálculo se realizaron siguiendo las ecuaciones [3], [4], [5], [6], [7], [8] y [10].

4.3.3 Configuración de ensayos de caracterización de vigas reforzadas

Se realizaron ensayos con 5 tipos de fibras unidireccionales diferentes. La disposición del refuerzo de las vigas se puede ver en la *Figura 4.8* y en la *Figura 4.9*. Se procedió a reforzar en el 90% de la luz de ensayo en 1 y 2 capas inferiores y 1 capa en cada uno de los laterales. Se decidió realizar este tipo de refuerzo, sin reforzar al 100% la luz de la viga debido a que el refuerzo dispuesto en la cara inferior se podía ver afectado debido a que se quedase enganchado en los apoyos inferiores y esto condicionase los resultados, no siendo comparables con los resultados del refuerzo en la cara lateral.

El refuerzo lateral consta de 2 láminas del mismo tamaño que las utilizadas en las vigas reforzadas en la cara inferior, situadas en la parte traccionada de las dos caras laterales de la viga, como se puede ver en la *Figura 4.9*. Las fibras utilizadas en el refuerzo lateral fueron las mismas que las utilizadas en el refuerzo inferior, cuyas propiedades se pueden ver en la *Tabla 4.1*.

Figura 4.8. Disposición del refuerzo en la cara inferior de las vigas.

Figura 4.9. Disposición del refuerzo en las caras laterales de las vigas.

Todos los ensayos se realizaron utilizando la 5 fibras diferentes, exceptuando el ensayo de flexión con dos capas en la cara inferior con fibra metálica debido a la imposibilidad de su ejecución en condiciones óptimas a causa del volumen de la misma.

Figura 4.10. Izq: Refuerzo en cara inferior con fibras de carbono, carbono de alto módulo elástico y fibra metálica. Der: refuerzo en caras laterales con fibra de basalto.

La configuración de los ensayos de las vigas utilizadas se puede observar en la *Tabla 4.5* donde se incluyen también las vigas utilizadas en los ensayos a flexión sin refuerzo.

Los ensayos con refuerzos realizados siguieron la configuración detallada en la *Figura 4.5*, utilizada también para los ensayos de caracterización mecánica sin refuerzo.

Previo a la aplicación de las fibras, se procedió a lijar todas las piezas para la apertura del poro y a la aplicación de la imprimación bicomponente Mapewood Primer 100, según las indicaciones del fabricante, para garantizar la correcta unión de la fibra y la madera a la hora de realizar el refuerzo.

Para la identificación de las vigas se utilizó un código tipo X-YZH donde: X) indica el número de viga (B200); Y) indica el número de capas (1 o 2); Z) indica la disposición del refuerzo (I: inferior o L: lateral) y; H) indica el tipo de fibra utilizada (C: carbono; CHM: carbono de alto módulo elástico; B: basalto; G: vidrio y S: metálica).

Nº DE VIGA	Tipo de viga		FRP empleado		Disp. del refuerzo		CODIGO
	Sin Ref.	Ref.	Tipo de FRP	Nº de capas	Caras laterales	Cara inferior	
B202	X						B202
B203	X						B203
B204	X						B204
B205	X						B205
B206	X						B206
B207		X	Basalto	1		X	B207-1IB
B208		X	Carbono	1		X	B208-1IC
B211		X	Carbono	1		X	B211-1IC
B213		X	Basalto	1		X	B213-1IB
B214		X	Carbono HM	1		X	B214-1ICHM
B217		X	Vidrio	1		X	B217-1IG
B218		X	Metal	1		X	B218-1IS
B220		X	Carbono HM	1		X	B220-1ICHM
B221		X	Vidrio	1		X	B221-1IG
B222		X	Metal	1		X	B222-1IS
B223		X	Carbono	2	X		B223-2LC
B225		X	Carbono HM	2	X		B225-2LCHM
B226		X	Carbono HM	2	X		B226-2LCHM
B227		X	Vidrio	2	X		B227-2LG
B229		X	Basalto	2	X		B229-2LB
B230		X	Basalto	2	X		B230-2LB
B231		X	Metal	2	X		B231-2LS
B232		X	Metal	2	X		B232-2LS
B233		X	Carbono	2	X		B233-2LC
B234		X	Vidrio	2	X		B234-2LG
B236		X	Carbono	2		X	B236-2IC
B238		X	Basalto	2		X	B238-2IB
B239		X	Vidrio	2		X	B239-2IG
B241		X	Carbono HM	2		X	B241-2ICHM
B242		X	Carbono HM	2		X	B242-2ICHM
B244		X	Carbono	2		X	B244-2IC
B247		X	Vidrio	2		X	B247-2IG
B248		X	Basalto	2		X	B248-2IB

Tabla 4.5. Configuración de ensayo y código de las vigas utilizadas en la fase experimental.

4.4 Resultados obtenidos

4.4.1 Ensayo de velocidad de propagación de ultrasonidos

Los resultados obtenidos después de realizar las lecturas de propagación de onda de ultrasonidos se pueden observar en la *Tabla 4.6*.

VIGA	Promedio lec. long (μ s)	Promedio lec. Trans. 1 (ancho) (μ s)	Promedio lec. Trans 2 (canto) (μ s)
B202	202,67	22,23	60,20
B203	222,57	21,90	62,73
B204	213,43	22,23	60,00
B205	204,87	24,87	61,67
B206	229,33	20,60	63,20
B207	220,23	21,13	59,67
B208	206,77	22,67	61,00
B211	206,37	22,80	60,27
B213	203,70	23,13	62,03
B214	223,47	21,67	62,63
B217	219,10	23,53	64,03
B218	216,77	22,77	64,13
B220	222,67	24,10	60,60
B221	212,73	22,70	61,07
B222	229,20	21,67	60,73
B223	201,17	24,93	64,20
B225	223,80	23,03	62,33
B226	234,33	21,93	59,80
B227	205,27	21,13	64,87
B229	223,63	20,13	57,57
B230	216,93	23,17	62,67
B231	214,77	21,33	62,73
B232	204,67	25,87	59,83
B233	227,67	26,93	66,70
B234	214,43	24,10	60,73
B236	226,10	24,27	59,57
B238	223,83	22,40	61,17
B239	213,80	25,17	65,30
B241	208,43	20,97	62,10
B242	229,83	25,43	63,03
B244	202,07	24,03	59,97
B247	204,93	22,83	64,17
B248	216,87	22,30	58,20
MEDIA TOTAL	215,95	22,97	61,78

Tabla 4.6. Tiempo de propagación de ultrasonido en las vigas objeto de estudio en microsegundos.

Una vez obtenida la velocidad de propagación se procedió al cálculo del módulo de elasticidad dinámico (*Tabla 4.7*).

Como se observa, los resultados son bastante parejos en todas las vigas, por lo que se determina la similitud en composición interna de la madera de todas las vigas. Así como la ausencia de grandes defectos internos. Posteriormente, esto fue comprobado a través de la rotura de las vigas en el ensayo a flexión donde no apareció ningún defecto significativo interno.

VIGA	Vel. Propagacion longitudinal (Km/s)	Vel. Propagacion Trans. 1 (ancho) (Km/s)	Vel. Propagacion Trans. 1 (canto) (Km/s)	Mod. Ed. Longitudinal (MPa)	Mod. Ed. Trans 1 (ancho) (MPa)	Mod. Ed. Trans 2. (canto) (MPa)
B202	5,43	2,07	1,66	16874,4	2452,0	1580,6
B203	4,94	2,10	1,59	11694,9	2112,3	1216,6
B204	5,15	2,07	1,67	13391,2	2158,1	1400,4
B205	5,37	1,85	1,62	16120,2	1913,4	1470,4
B206	4,80	2,23	1,58	11658,8	2526,9	1268,7
B207	4,99	2,18	1,68	12887,2	2447,5	1451,0
B208	5,32	2,03	1,64	15085,3	2195,2	1432,4
B211	5,33	2,02	1,66	14937,8	2140,1	1447,5
B213	5,40	1,99	1,61	14955,1	2027,8	1332,7
B214	4,92	2,12	1,60	11468,7	2133,5	1206,5
B217	5,02	1,95	1,56	12732,4	1930,0	1232,0
B218	5,07	2,02	1,56	12888,4	2043,2	1216,8
B220	4,94	1,91	1,65	12187,9	1819,4	1359,9
B221	5,17	2,03	1,64	12098,3	1858,1	1213,4
B222	4,80	2,12	1,65	9577,0	1874,2	1127,3
B223	5,47	1,84	1,56	15165,8	1726,4	1230,6
B225	4,92	2,00	1,60	11538,2	1904,9	1229,2
B226	4,69	2,10	1,67	11744,0	2344,3	1490,4
B227	5,36	2,18	1,54	15111,4	2493,1	1250,6
B229	4,92	2,28	1,74	12853,1	2773,2	1603,1
B230	5,07	1,99	1,60	13413,8	2056,9	1328,5
B231	5,12	2,16	1,59	14379,5	2548,5	1392,8
B232	5,37	1,78	1,67	15560,3	1703,6	1504,7
B233	4,83	1,71	1,50	11522,4	1439,8	1109,4
B234	5,13	1,91	1,65	12248,4	1695,7	1261,9
B236	4,87	1,90	1,68	14187,0	2153,8	1689,3
B238	4,91	2,05	1,63	11560,5	2018,7	1279,4
B239	5,14	1,83	1,53	13659,8	1724,0	1210,2
B241	5,28	2,19	1,61	13629,7	2355,5	1269,0
B242	4,79	1,81	1,59	12594,1	1798,5	1383,8
B244	5,44	1,91	1,67	15583,8	1926,5	1462,4
B247	5,37	2,01	1,56	14209,7	2001,7	1197,9
B248	5,07	2,06	1,72	11633,4	1924,0	1334,9
MEDIA TOTAL	5,10	2,01	1,62	13307,65	2067,29	1338,91

Tabla 4.7. Velocidad de propagación de ultrasonido y módulo de elasticidad dinámico de las vigas.

El módulo de elasticidad dinámico paralelo a la fibra se encuentra en 13.300 N/mm² y el perpendicular a la fibra entre los 1.350 y los 2.050 N/mm² aproximadamente.

4.4.2 Propiedades físicas de la madera estudiada

4.4.2.2 Contenido de humedad

Después de tener las probetas durante 15 días en la estufa a una temperatura de $103 \pm 3^{\circ}\text{C}$, se obtuvieron los resultados mostrados en la *Tabla 4.8*.

Probeta		H-1	H-2	H-3	H-4	H-5
Peso inicial (Kg) día 05/05/2016		0,2167	0,2126	0,2058	0,2048	0,233
Densidad (Kg/m ³)		471,09	462,17	447,39	445,22	506,52
Medición	Fecha	Peso en Kg				
Día 1	06/05/2016	0,2004	0,1978	0,1908	0,1903	0,2176
Día 2	09/05/2016	0,1998	0,1972	0,1901	0,1895	0,2159
Día 3	10/05/2016	0,1995	0,1966	0,1900	0,1890	0,2158
Día 4	12/05/2016	0,1995	0,1966	0,1900	0,1890	0,2158
Día 5	13/05/2016	0,1994	0,1966	0,1900	0,1890	0,2157
Día 6	18/05/2016	0,1994	0,1966	0,1900	0,1890	0,2157
Día 7	19/05/2016	0,1994	0,1966	0,1898	0,1890	0,2153
Día 8	20/05/2016	0,1993	0,1966	0,1898	0,1890	0,2153
Contenido de humedad en %		8,7	8,1	8,4	8,4	8,2
Humedad media en %		8,4				

Tabla 4.8. Contenido medio de humedad de la madera objeto de estudio en el Capítulo IV.

El contenido de humedad medio de las piezas es del 8,4 %. Esto indica que las vigas se encuentran 3,6 puntos por debajo del 12% marcado por la normativa como referencia.

4.4.2.1 Densidad

Se obtuvo la densidad de la madera a través del pesado de cada una de sus piezas y el conocimiento de sus dimensiones (*Tabla 4.9*).

Viga	Peso (gr)	Dens. (Kg/m ³)	Viga	Peso (gr)	Dens. (Kg/m ³)	Viga	Peso (gr)	Dens. (Kg/m ³)
B202	2898,40	572,81	B218	2532,50	500,49	B232	2725,70	538,68
B203	2422,60	478,77	B220	2527,00	499,41	B233	2497,50	493,58
B204	2551,00	504,15	B221	2289,60	452,49	B234	2355,20	465,45
B205	2829,30	559,15	B222	2103,90	415,79	B236	3032,90	599,39
B206	2564,20	506,76	B223	2566,50	507,21	B238	2422,10	478,68
B207	2613,90	516,58	B225	2416,70	477,61	B239	2611,10	516,03
B208	2697,00	533,00	B226	2696,80	532,96	B241	2476,20	489,37
B211	2660,30	525,75	B227	2662,60	526,21	B242	2782,00	549,80
B213	2595,00	512,85	B229	2688,10	531,25	B244	2660,90	525,87
B214	2395,00	473,32	B230	2639,80	521,70	B247	2495,60	493,20
B217	2556,00	505,14	B231	2773,60	548,14	B248	2288,00	452,17

Tabla 4.9. Densidad de las vigas de madera medidas en Kg/m³.

El peso medio obtenido es de 2576,58 gr/viga y la densidad media obtenida es de **509,20 Kg/m³**. Este valor se encuentra dentro de los 400–550 Kg/m³ establecidos como densidad característica de la madera de conífera.

4.4.3 Ensayo a flexión en 4 puntos a vigas sin reforzar

Se procedió a la caracterización de las propiedades mecánicas y físicas del lote de vigas de madera disponibles de 1100 x 100 x 46 mm. Todas las vigas pertenecen a la especie Pino Silvestre, de calidad 1ª, procedente de Soria (España). La madera carece de defectos significativos, por lo que es clasificada como **calidad ME1** en base a la norma UNE-EN 56.544: 2011, obteniendo una **clase resistente C-27** asignada por la norma UNE-EN 1.912: 2012 (*UNE-EN 1.912*).

Los resultados de los ensayos de cada una de las vigas se muestran a continuación.

VIGA B202

La viga rompe a los 73,3 MPa a flexión por el centro del vano. La rotura asciende en diagonal hasta la mitad de la sección siguiendo la dirección de las fibras (*Figura 4.11*).

Figura 4.11. Pieza B202 durante el ensayo a flexión en 4 puntos.

VIGA B203

La viga rompe a los 61,4 MPa a flexión a la altura del apoyo central derecho, de manera frágil, seccionando la pieza en dos. No se denota componente de cortante en la rotura de esta, solo una pequeña fractura rasante en el centro de la sección que evoluciona hacia el centro de la pieza (*Figura 4.12 y Figura 4.13*).

Figura 4.12. Pieza B203 durante el ensayo a flexión en 4 puntos.

Figura 4.13. Pieza B203 después del ensayo a flexión.

VIGA B204

La viga rompe a los 60,4 MPa a flexión de manera frágil con alto componente de cortante. La rotura se produce en la parte inferior izquierda y evoluciona de forma semirrasante hasta la parte superior derecha de la pieza (*Figura 4.14*).

Figura 4.14. Pieza B204 durante el ensayo a flexión en 4 puntos.

VIGA B205

La viga rompe a los 75,6 MPa a flexión por el centro del vano. No se muestran señales de componente significativa de cortante en el modo de rotura, por lo que la rotura se produce por la tracción de sus fibras inferiores (*Figura 4.15*).

Figura 4.15. Pieza B205 durante el ensayo a flexión en 4 puntos.

VIGA B206

La viga rompe a los 54,3 MPa a flexión a la altura del apoyo superior izquierdo de manera frágil. Se produce una evolución de la fractura de forma semirrasante siguiendo la dirección de las fibras radialmente a través de dos fracturas. La fractura inferior llega a seccionar la pieza en su eje longitudinal desde el inicio de la rotura en parte inferior izquierda hasta la cara lateral derecha, denotando así un gran componente de cortante en el modo de rotura (*Figura 4.16*).

Figura 4.16. Pieza B206 durante el ensayo a flexión en 4 puntos.

4.4.3.1 Resumen de resultados de vigas a flexión sin refuerzo

Se trata de una madera de alta calidad, sin defectos aparentes, que rompe principalmente a flexión de un modo frágil, denotando en algunos casos componente de cortante, sin ser el

motivo principal de la rotura. Los valores de resistencia y desplazamiento se pueden ver en la *Tabla 4.10* y en la *Figura 4.17*.

A las 5 vigas se les realizaron 3 precargas de 6 kN antes de proceder a su ensayo hasta rotura. A través de estas se ha calculado el módulo de elasticidad a flexión, obteniendo un módulo medio de 8.034 MPa.

Tras los ensayos se ha obtenido un valor medio de resistencia a flexión de 65,0 MPa y una carga de 29,9 kN.

Figura 4.17. Diagrama Tensión - Desplazamiento obtenido durante la realización del ensayo a flexión en 4 puntos a vigas sin reforzar.

VIGA	Carga máx. (kN)	Momento máx. (kNm)	Cortánte max. (kN)	Desp. max. (mm)	Resis. última flex. (MPa)	Resis. última cort. (Mpa)	Tipo de rotura
B202	33,7	5,6	16,9	27,6	73,3	5,5	Flexión
B203	28,2	4,7	14,1	28,3	61,4	4,6	Flexión
B204	27,8	4,6	13,9	28,3	60,4	4,5	Flexión
B205	34,8	5,8	17,4	33,1	75,6	5,7	Flexión
B206	25,0	4,2	12,5	21,6	54,3	4,1	Flexión
MEDIA	29,9	5,0	14,9	27,8	65,0	4,9	Flexión

Tabla 4.10. Resultados de vigas ensayadas a flexión en 4 puntos sin reforzar.

4.4.4 Ensayo a flexión en 4 puntos a vigas reforzadas con 1 lámina de FRP en su cara inferior

Figura 4.18. Vigas reforzadas B207-1IB (Izq.), B208-1IC (centro) y B209-1IS (Der.).

4.4.4.1 Refuerzo con 1 capa inferior de fibra de basalto

VIGA B207-1IB

La viga rompe a los 83,9 MPa a flexión (Figura 4.21) de manera frágil por su cara inferior en el centro del vano, evolucionando hasta el apoyo superior izquierdo, seccionando la viga en dos. No se aprecia despegue de la fibra durante la realización del ensayo (Figura 4.19).

Figura 4.19. Viga B207-1IB durante el ensayo a flexión en 4 puntos.

VIGA B213-1IB

Rotura a flexión por el centro del vano de evolución oblicua con despegue de la fibra en el momento de la rotura a los 79,2 MPa (Figura 4.21). La rotura comienza a flexión en el centro del vano, evolucionando en el sentido diagonal de la fibra hasta la altura del apoyo central izquierdo, donde se produce una segunda rotura a flexión. Se produce de modo frágil (Figura 4.20).

Figura 4.20. Viga B213-1IB durante el ensayo a flexión en 4 puntos.

Figura 4.21. Diagrama Gráfico Tensión – Desplazamiento de vigas reforzadas con 1 capa de fibra de basalto.

4.4.4.2 Refuerzo con 1 capa inferior de fibra de carbono

VIGA B208-1IC

La viga rompe a los 77,6 MPa a flexión (Figura 4.24) por su cara inferior en el centro del vano con una pequeña evolución de la rotura en el sentido de las fibras, que en este caso es oblicuo. Se produce rotura de las fibras inferiores sin que esta llegue a seccionar la pieza. Se aprecia un pequeño despegue de la fibra de carbono en el momento de la rotura (Figura 4.22).

Figura 4.22. Viga B208-1IC durante el ensayo a flexión en 4 puntos.

VIGA B211-1IC

Rotura a flexión a los 74,1 MPa (Figura 4.24) con componente de cortante, despegue parcial y rotura de la fibra de carbono en el momento del fallo de la viga. La rotura se produce a la altura del apoyo central izquierda evolucionando oblicuamente hasta el apoyo central derecho (Figura 4.23).

Figura 4.23. Viga B211-1IC durante el ensayo a flexión en 4 puntos.

Figura 4.24. Diagrama Tensión – Desplazamiento de vigas reforzadas con fibra de carbono.

4.4.4.3 Refuerzo con 1 capa inferior de fibra de carbono de alto módulo elástico

VIGA B214 –1ICHM

Rotura a flexión a los 64,2 MPa (Figura 4.27) seccionando la viga en dos. La fibra se mantiene pegada a la viga después de la rotura, la cual se inicia a la altura del apoyo central izquierdo con corte de las fibras, evoluciona en la parte media de forma rasante y rompe finalmente a flexión en el apoyo central derecho seccionando la viga en dos (Figura 4.25).

Figura 4.25. Viga B214-1ICHM después del ensayo a flexión en 4 puntos.

VIGA B220 – 1ICHM

Rotura a flexión a los 66,2 MPa (Figura 4.27), de tipo frágil, que rompe viga y refuerzo simultáneamente. La rotura comienza en la zona inferior izquierda de la viga, evolucionando a flexión de forma oblicua a las fibras hasta la parte superior derecha, seccionando la pieza en dos (Figura 4.26).

Figura 4.26. Viga B220-1ICHM durante el ensayo a flexión en 4 puntos.

Figura 4.27. Diagrama Tensión – Desplazamiento de vigas reforzadas con fibra de carbono de alto módulo elástico.

4.4.4.4 Refuerzo con 1 capa inferior de fibra de vidrio

VIGA B217 – 1IG

Rotura a flexión a los 76,7 MPa (Figura 4.30) con importante componente de cortante seccionando la pieza en varios trozos. Comienza a la altura del apoyo central derecho evolucionando en 2 modos: 1) de forma rasante hacia el apoyo lateral izquierdo en paralelo a la dirección de las fibras y; 2) a flexión a la altura del apoyo donde comienza la rotura hasta que parte la viga en dos (Figura 4.28).

Figura 4.28. Rotura final de viga B217-1IG después del ensayo a flexión en 4 puntos.

VIGA B221 – 1IG

Rotura a flexión a los 77,2 MPa (Figura 4.30) altura del apoyo superior izquierdo. Se aprecia leve componente a cortante en ambas direcciones desde el centro de la rotura. La rotura evoluciona a flexión después de la rotura rasante de las fibras (Figura 4.29).

Figura 4.29. Rotura final de viga B221-1IG después del ensayo a flexión en 4 puntos.

Figura 4.30. Diagrama Tensión – Desplazamiento de vigas reforzadas con fibra de vidrio.

4.4.4.5 Refuerzo con 1 capa inferior de fibra metálica

VIGA B218 – 1IS

Rotura a flexión a los 64,63 MPa (Figura 4.33) iniciada en el apoyo central derecho con mucha componente a cortante que evoluciona en diagonal hasta la altura del apoyo superior izquierdo. Se aprecia despegue de la fibra en el momento de la rotura, sin producirse ningún tipo de rotura de esta (Figura 4.31).

Figura 4.31. Viga B218-1IS durante el ensayo a flexión en 4 puntos.

VIGA B222 – 1IS

Rotura a flexión a los 65,7 MPa (Figura 4.33) iniciada en el apoyo central derecho con componente a cortante que evoluciona hasta la altura del apoyo superior izquierdo. Se aprecia despegue de la fibra en el momento de la rotura, sin producirse ningún tipo de rotura de esta (Figura 4.32).

Figura 4.32. Viga B222-1IS durante el ensayo a flexión en 4 puntos.

Figura 4.33. Diagrama Tensión – Desplazamiento de vigas reforzadas con fibra metálica.

4.4.4.6 Resumen de los ensayos con refuerzo de 1 capa de FRP en la cara inferior de la viga

El uso de fibra no modifica el modo principal de rotura, siendo este a flexión. Se aprecia un aumento de la componente de cortante, produciendo una evolución de la rotura de modo rasante en casi todos los casos, pero sin llegar a seccionar la viga en dos. Se aumenta la resistencia generalizadamente, menos en el caso de las vigas reforzadas con fibra metálica, donde la viga B218-1IS obtiene una resistencia menor que la media obtenida por las vigas sin reforzar.

En el Figura 4.34 y en la Tabla 4.11 se puede observar el comportamiento mecánico de las vigas reforzadas. Las reforzadas con fibra de vidrio obtienen los mejores resultados en cuanto a aumento de la capacidad de desplazamiento (44,2 mm de desplazamiento en el

centro del vano) y las vigas reforzadas con fibra de basalto obtienen la mayor resistencia mecánica (81,5 MPa).

Las vigas reforzadas con fibra de carbono obtienen mayor resistencia (75,9 MPa) y módulo elástico que las vigas reforzadas con fibra de carbono de alto módulo elástico (65,2 MPa), aunque estas aumentan su capacidad de desplazamiento.

Se observa como las vigas reforzadas con fibras de mayor módulo elástico (carbono, carbono HM y metálica) obtienen peores resultados de resistencia y capacidad de desplazamiento que las vigas reforzadas con fibras de menor módulo elástico. También aumenta la componente de cortante en todos los modos de rotura de estas vigas, obteniendo una rotura más puramente a flexión en las vigas reforzadas con fibra de basalto y vidrio.

Figura 4.34. Diagrama de comparación entre vigas reforzadas y vigas sin reforzar durante el ensayo a flexión a 4 puntos.

VIGA	Carga máx. (kN)	Momento máx. (kNm)	Cortante max. (kN)	Desp. max. (mm)	Resis. última flexión (MPa)	Resis. Última cort. (MPa)	Tipo de rotura
B208-1IC	35,7	6,0	17,9	21,47	77,6	5,8	Flexión
B211-1IC	34,1	5,7	17,1	22,05	74,1	5,6	Flexión
B207-1IB	38,6	6,4	19,3	30,56	83,9	6,3	Flexión
B213-1IB	36,4	6,1	18,2	29,70	79,2	5,9	Flexión
B214-1ICHM	29,5	4,9	14,8	26,62	64,2	4,8	Flexión
B220-1ICHM	30,4	5,1	15,2	26,44	66,1	5,0	Flexión
B217-1IG	35,2	5,9	17,6	40,44	76,5	5,7	Flexión
B221-1IG	35,5	5,9	17,7	47,86	77,1	5,8	Flexión
B218-1IS	29,6	4,9	14,8	23,07	64,3	4,8	Flexión
B222-1IS	30,2	5,0	15,1	29,69	65,7	4,9	Flexión
MEDIA 1IC	34,9	5,8	17,5	21,8	75,9	5,7	Flexión
MEDIA 1IB	37,5	6,3	18,8	30,1	81,5	6,1	Flexión
MEDIA 1ICHM	30,0	5,0	15,0	26,5	65,2	4,9	Flexión
MEDIA 1IG	35,3	5,9	17,7	44,2	76,8	5,8	Flexión
MEDIA 1IS	29,9	5,0	14,9	26,4	65,0	4,9	Flexión

Tabla 4.11. Resultados de las vigas ensayadas a flexión en 4 puntos reforzadas con 1 capa inferior de FRP.

4.4.5 Ensayo a flexión en 4 puntos a vigas reforzadas con 2 láminas de FRP en las caras laterales de la viga

Figura 4.35. Vigas reforzada con dos láminas de carbono colocadas en los las caras laterales de la viga.

4.4.5.1 Refuerzo lateral con fibra de carbono

VIGA B223-2LC

La viga rompe a los 82,6 MPa (Figura 4.38) a flexión por su sección central. Rompe por las fibras inferiores que carecen de refuerzo. La rotura comienza en el centro del vano evolucionando en oblicuo hacia la parte izquierda de la viga. Se producen varias roturas simultáneas en las cuales la viga pierde por completo la resistencia. El despegue de la fibra se produce en la primera rotura. La viga admite unas pequeñas cargas ya sin refuerzo hasta que se agota la sección (Figura 4.36).

Figura 4.36. Viga B223-2LC durante el ensayo a flexión en 4 puntos.

VIGA B233-2LC

La viga rompe a flexión a los 59,9 MPa (Figura 4.38) de modo frágil por la parte central del vano. Se produce un despegue parcial a causa de la rotura de las fibras laterales. No se aprecia evolución de la rotura de modo cortante, únicamente se rompen fibras en el centro del vano de modo traccionado (Figura 4.37).

Figura 4.37. Viga B233-2LC durante el ensayo a flexión en 4 puntos.

Figura 4.38. Diagrama Gráfico Tensión – Desplazamiento de vigas reforzadas con 2 capa de fibra de carbono en colocadas en las caras laterales.

4.4.5.2 Refuerzo lateral con fibra de carbono de alto módulo elástico

VIGA B225 - 2LCHM

Rotura a flexión a los 76,7 MPa (Figura 4.41) por el centro del vano, de modo frágil, en el cual se produce la rotura de la viga simultánea a la de la fibra. No se aprecia despegue de las fibras ni durante el ensayo ni en el momento de la rotura. Las fibras de la madera rompen a

tracción hasta la altura de la fibra neutra. No aparece ninguna rotura significativa provocada por el cortante del ensayo (*Figura 4.39*).

Figura 4.39. Viga B225-2LCHM durante el ensayo a flexión en 4 puntos.

VIGA B226 - 2LCHM

Rotura a flexión a los 72,9 MPa (*Figura 4.41*) de modo frágil, iniciada en el centro del vano y que evoluciona hacia la altura del apoyo central izquierdo donde se produce el principal fallo por flexión. No se aprecia despegue de la fibra durante el ensayo ni en el momento de la rotura (*Figura 4.40*).

Figura 4.40. Viga B226-2LCHM durante el ensayo a flexión en 4 puntos.

Figura 4.41. Diagrama Tensión – Desplazamiento de vigas reforzadas con 2 capa de fibra de carbono de alto módulo elástico, colocadas en las caras laterales.

4.4.5.3 Refuerzo lateral con fibra de vidrio

VIGA B227 - 2LG

Rotura a flexión a los 93,3 MPa (*Figura 4.44*) a la altura de ambos apoyos centrales de modo frágil. La rotura evoluciona simultáneamente de forma rasante en la dirección de la fibra y a

flexión, sin provocar el seccionamiento de esta. Se produce un despegue parcial en el momento de la rotura de algunas de las fibras usadas para el refuerzo (*Figura 4.42*).

Figura 4.42. Viga B227-2LG durante el ensayo a flexión en 4 puntos.

VIGA B234-2LG

Rotura frágil a flexión a los 72,4 MPa (*Figura 4.44*) a la altura del apoyo central derecho. La rotura comienza seccionando las fibras a flexión aunque según se acerca a la altura de la fibra neutra, evoluciona de forma rasante hasta la altura del apoyo central izquierdo, donde para la rotura. Se produce un despegue de las fibras a consecuencia de la rotura de la viga (*Figura 4.43*).

Figura 4.43. Viga B234-2LG durante el ensayo a flexión en 4 puntos.

Figura 4.44. Gráfico Tensión – Desplazamiento de vigas reforzadas con 2 capa de fibra de vidrio, colocadas en las caras laterales.

4.4.5.4 Refuerzo lateral con fibra de basalto

VIGA B229-2LB

Rotura a flexión los 88,5 MPa (Figura 4.47) a la altura del apoyo central izquierdo con despegue parcial de la fibra de refuerzo en el momento de la rotura, la cual se produce de modo frágil. No se aprecia evolución significativa de rotura por modo rasante paralelo a las fibras (Figura 4.45).

Figura 4.45. Viga B229-2LB durante el ensayo a flexión en 4 puntos.

VIGA B230-LB

Rotura a flexión a los 82,2 MPa (Figura 4.47) en el centro del vano de evolución hacia el apoyo central izquierdo. Se produce un despegue parcial de la fibra en el momento de la rotura, la cual se ocasiona de modo frágil.

Figura 4.46. Viga B230-LB durante el ensayo a flexión en 4 puntos.

Figura 4.47. Diagrama Tensión – Desplazamiento de vigas reforzadas con 2 capa de fibra de basalto en las caras laterales.

4.4.5.5 Refuerzo lateral con fibra metálica

VIGA B231-2LS

Se produce una primera rotura a flexión a los 91,9 MPa (*Figura 4.51*) que evoluciona desde la cara inferior a la altura del apoyo central izquierdo hacia el apoyo superior derecho. La pieza desciende su tensión hasta los 27,5 MPa y sigue admitiendo carga, produciéndose diversas roturas hasta que se produce la rotura final a los 36,2 MPa. En ningún momento se aprecia que la fibra se despegue de la viga (*Figura 4.48*).

Figura 4.48. Viga B231-2LS durante el ensayo a flexión en 4 puntos.

VIGA B232-2LS

Rotura a flexión a los 90,5 MPa (*Figura 4.50*) con gran componente de cortante. La rotura se inicia en el centro del vano a la altura del apoyo central derecho evolucionando de forma rasante hasta que llega al apoyo izquierdo inferior de la pieza. Una vez producida la rotura principal se producen diversas roturas hasta que la pieza rompe por completo. No se aprecia despegue de la fibra respecto de la viga en ningún momento (*Figura 4.49*).

Figura 4.49. Viga B232-2LS durante el ensayo a flexión en 4 puntos.

Figura 4.50. Diagrama Tensión – Desplazamiento de vigas reforzadas con 2 capa de fibra de metálica en las caras laterales.

4.4.5.6 Resumen de resultados obtenidos con refuerzo lateral con FRP

Las vigas reforzadas en el lateral de la cara con dos capas de FRP tienen un modo de rotura frágil, principalmente a flexión, aunque se advierte un aumento de la componente de cortante en el modo de fallo.

Se aprecia un aumento generalizado de la resistencia (*Tabla 4.12*), estando en todos los casos muy por encima de la media obtenida por las vigas sin reforzar, exceptuando el caso de la viga B233-2LC que ha quedado 5,1 MPa por debajo.

En este caso de refuerzo lateral el comportamiento de las vigas no sigue un patrón tan marcado como en el caso de las reforzadas con 1 capa de FRP en la parte inferior, aunque se sigue cumpliendo que las vigas reforzadas con un módulo de elasticidad más bajo (fibra de vidrio y basalto) obtienen unos resultados más positivos tanto en resistencia como en deformación (*Figura 4.51*), exceptuando el caso de la viga 234-2LB que, a pesar de admitir la mayor deformación de todas las vigas reforzadas en las caras laterales, obtuvo una resistencia menor que las anteriormente mencionadas.

Las vigas reforzadas con fibra metálica han obtenido unos resultados muy destacables con una media de resistencia de 91,2 MPa y 36,6 mm de desplazamiento en el centro del vano.

Figura 4.51. Diagrama Tensión – Desplazamiento de comparación entre los refuerzos realizados en las caras laterales de las vigas con las diferentes fibras utilizadas.

VIGA	Carga máx. (kN)	Momento máx. (kNm)	Cortante máx. (kN)	Desp. máx. (mm)	Resis. última flexión (MPa)	Resis. Última cort. (Mpa)	Tipo de rotura
B223-2LC	38,0	6,3	19,0	41,96	82,6	6,2	Flexión
B233-2LC	27,5	4,6	13,8	33,36	59,9	4,5	Flexión
B225-2LCHM	35,3	5,9	17,6	33,80	76,7	5,7	Flexión
B226-2LCHM	33,5	5,6	16,8	28,64	72,9	5,5	Flexión
B227-2LG	42,9	7,2	21,5	37,29	93,3	7,0	Flexión
B234-2LG	33,3	5,5	16,6	44,46	72,4	5,4	Flexión
B229-2LB	40,7	6,8	20,4	35,69	88,5	6,6	Flexión
B230-2LB	37,8	6,3	18,9	30,69	82,2	6,2	Flexión
B231-2LS	42,3	7,0	21,1	31,44	91,9	6,9	Flexión
B232-2LS	41,6	6,9	20,8	41,78	90,5	6,8	Flexión
MEDIA 2LC	32,8	5,5	16,4	37,7	71,2	5,3	Flexión
MEDIA 2LCHM	34,4	5,7	17,2	31,2	74,8	5,6	Flexión
MEDIA 2LG	38,1	6,3	19,0	40,9	82,8	6,2	Flexión
MEDIA 2LB	39,3	6,5	19,6	33,2	85,3	6,4	Flexión
MEDIA 2LS	42,0	7,0	21,0	36,6	91,2	6,8	Flexión

Tabla 4.12. Resultados de vigas reforzadas con 2 capas de FRP colocadas 1 en cada lateral de la viga.

4.4.6 Ensayo a flexión en 4 puntos a vigas reforzadas con 2 láminas de FRP en la cara inferior de la viga

4.4.6.1 Refuerzo inferior con 2 capas de fibra de carbono

VIGA B236-2IC

Se produce un despegue de la lámina inferior del refuerzo a los 65,30 MPa. La pieza sigue admitiendo carga hasta los 73,85 MPa (*Figura 4.54*) que se produce un segundo despegue de la fibra adherida a la viga. La viga se recupera y sigue admitiendo carga hasta su rotura final a los 76,54 MPa. La rotura se produce a flexión por el centro del vano, evolucionando hacia el apoyo central derecho. Dicha rotura se produce de forma frágil seccionando la viga en dos (*Figura 4.52*).

Figura 4.52. Viga B236-2IC durante el ensayo a flexión en 4 puntos.

VIGA B244-2IC

La viga rompe a flexión de modo frágil a los 82,9 MPa (*Figura 4.54*) por el centro del vano a la altura de los 2 apoyos, aunque la rotura producida a la altura del apoyo central derecho es de mucho menor porte, siendo también a flexión. La fibra se despegue a consecuencia de la rotura, aunque no se despegan las fibras entre sí. La rotura en este caso no presenta señales de cortante de forma rasante en la dirección de las fibras, siendo una rotura por tracción (*Figura 4.53*).

Figura 4.53. Viga B244-2IC durante el ensayo a flexión en 4 puntos.

Figura 4.54. Diagrama Tensión – Desplazamiento de vigas reforzadas con 2 capas de fibra de Carbono en la cara inferior.

4.4.6.2 Refuerzo inferior con 2 capas de fibra de basalto

VIGA B238-2IB

Rotura frágil a flexión a los 77,94 (Figura 4.57) MPa, a la altura del apoyo central derecho. Aunque se aprecian roturas de forma rasante a medida que evoluciona el fallo de las fibras, la principal rotura es a flexión, siendo muy poca la componente de cortante en este caso. El colapso de la viga provoca el despeque de las 2 capas de fibra de refuerzo (Figura 4.55).

Figura 4.55. Viga B238-2IB durante el ensayo a flexión en 4 puntos.

VIGA B248-2IB

Rotura a flexión a los 86,7 MPa (Figura 4.57) de modo frágil a la altura del apoyo central derecho. Se aprecia cierta componente de cortante en la rotura marcada por la evolución rasante de la rotura hacia el apoyo central izquierdo. La fibra se despega de la viga a consecuencia de la rotura de la viga (Figura 4.56).

Figura 4.56. Viga B248-2IB durante el ensayo a flexión en 4 puntos.

Figura 4.57. Diagrama Tensión – Desplazamiento de vigas reforzadas con 2 capas de fibra de Basalto en la cara inferior.

4.4.6.3 Refuerzo inferior con 2 capas de fibra de basalto

VIGA B239–2IG

Rotura a flexión a los 77,03 MPa (Figura 4.60) de modo frágil a la altura del apoyo central izquierdo, que evoluciona en diagonal subiendo hacia el apoyo central derecho. Se produce un despegue del refuerzo de fibras a consecuencia de la rotura de la viga (Figura 4.58).

Figura 4.58. Viga B239-2IG durante el ensayo a flexión en 4 puntos.

VIGA B247–2IG

Rotura a flexión a la altura del apoyo central derecho de modo frágil. La resistencia máxima se alcanza a los 83,91 MPa (Figura 4.60). Una vez alcanzada la máxima resistencia, se produce una pequeña fase de fluencia, al final de la cual se causa una primera rotura antes de la rotura final a los 74,80 MPa. La rotura final de la madera produce el despegue parcial de la fibra de refuerzo (Figura 4.59).

Figura 4.59. Viga B247-2IG durante el ensayo a flexión en 4 puntos.

Figura 4.60. Diagrama Tensión – Desplazamiento de vigas reforzadas con 2 capas de fibra de Fibra de Vidrio en la cara inferior.

4.4.6.4 Refuerzo inferior con 2 capas de fibra de basalto

VIGA B241-2ICHM

Despegue de la capa inferior de refuerzo de fibra de carbono a los 50,15 MPa (Figura 4.61). La viga se recupera y sigue admitiendo carga hasta que se produce la rotura final a flexión a la altura del apoyo central derecho a los 59,16 MPa de un modo frágil (Figura 4.63).

Figura 4.61. Viga B241-2CHM durante el ensayo a flexión en 4 puntos.

VIGA B242-2ICHM

Se produce un despegue de la capa inferior de refuerzo de fibra a los 55,60 MPa (*Figura 4.62*) a consecuencia de la deformación de la viga durante la realización del ensayo, la viga se recupera y sigue admitiendo carga hasta que se produce la rotura final a los 69,37 MPa (*Figura 4.63*) a flexión a la altura del apoyo central derecho. Evoluciona en la dirección de las fibras denotando componente de cortante.

Figura 4.62. Viga B242-2CHM durante el ensayo a flexión en 4 puntos.

Figura 4.63. Diagrama Tensión – Desplazamiento de vigas reforzadas con 2 capas de fibra de Carbono de alto módulo elástico en la cara inferior.

4.4.6.5 Resumen de resultados de vigas reforzadas en su cara inferior con 2 capas de FRP

Los resultados se pueden observar en la Figura 4.64 y en la Tabla 4.13.

Las vigas reforzadas con dos capas de FRP en su cara inferior obtienen resultados superiores a la media de las vigas ensayadas a flexión sin refuerzo, aunque las vigas reforzadas con carbono de alto módulo elástico están muy cerca de dicha cifra.

El modo de rotura principal sigue siendo de flexión, produciéndose generalmente a la altura de uno de los apoyos centrales. En caso de la que la rotura evolucione de forma rasante, esta evolución se produce sin llegar a seccionar la viga hasta sus extremos.

En este caso los refuerzos realizados con fibras con menor módulo elástico también obtienen los mejores resultados, siendo las vigas reforzadas con fibra de basalto las que obtienen mayor resistencia (82,3 MPa). Por lo tanto se cumple el mismo patrón de comportamiento que en el refuerzo realizado con 1 capa de FRP en la cara inferior, aunque en este caso el modo de rotura no ha sido tan claro.

Las vigas reforzadas con fibra de carbono de alto módulo y de carbono han sufrido roturas con despegue de fibras, previas a la rotura final.

Figura 4.64. Diagrama Tensión – Desplazamiento de vigas reforzadas con 2 capas de fibra de Carbono de alto módulo elástico en la cara inferior.

VIGA	Carga máx. (Kn)	Momento máx. (kNm)	Cortante máx. (kN)	Desp. max. (mm)	Resis. última flexión (MPa)	Resis. Última cort. (Mpa)	Tipo de rotura
B236-2IC	35,2	5,9	17,6	30,26	76,5	5,7	Flexión
B244-2IC	38,1	6,4	19,1	40,68	82,9	6,2	Flexión
B238-2IB	35,9	6,0	17,9	36,84	78,0	5,8	Flexión
B248-2IB	39,9	6,6	19,9	52,90	86,7	6,5	Flexión
B239-2IG	35,4	5,9	17,7	31,35	77,0	5,8	Flexión
B247-2IG	38,6	6,4	19,3	37,22	83,9	6,3	Flexión
B241-2ICHM	27,2	4,5	13,6	23,80	59,2	4,4	Flexión
B242-2ICHM	31,9	5,3	16,0	30,54	69,4	5,2	Flexión
MEDIA 2IC	36,7	6,1	18,3	35,5	79,7	6,0	Flexión
MEDIA 2IB	37,9	6,3	18,9	44,9	82,3	6,2	Flexión
MEDIA 2IG	37,0	6,2	18,5	34,3	80,5	6,0	Flexión
MEDIA 2ICHM	29,6	4,9	14,8	27,2	64,3	4,8	Flexión

Tabla 4.13. Resultados de vigas ensayadas a flexión en 4 puntos reforzadas con 2 láminas de FRP en su cara inferior.

4.4.7 Cálculo de Módulo de Elasticidad Global de vigas sometidas a flexión en 4 puntos y de piezas sometidas a compresión.

4.4.7.1 Modulo de Elasticidad Global de vigas sometidas a flexión en 4 puntos sin reforzar

Los resultados obtenidos del ensayo de flexión para el cálculo del módulo elástico de todas las vigas utilizadas para los ensayos se pueden observar en la *Tabla 4.14*. El módulo de elasticidad medio obtenido entre los 4kN y los 6 kN es de 7.850 MPa.

VIGA	MOEG (MPa)	VIGA	MOEG (MPa)
B202	9362	B226	7001
B203	7972	B227	8475
B204	7596	B229	8133
B205	10322	B230	7817
B206	8565	B231	8216
B207	7749	B232	8848
B208	8309	B233	6882
B211	8593	B234	7525
B213	8431	B236	7455
B214	6660	B238	7525
B217	7639	B239	8052
B218	7546	B241	7525
B220	7007	B242	7817
B221	7320	B244	7063
B222	6100	B247	8475
B223	8475	B248	7596
B225	7001	MEDIA	7850

Tabla 4.14. Resultados del MOEG calculado entre los 4kN y los 6kN de todas la vigas objeto del ensayo previamente a ser reforzadas.

4.4.7.2 Modulo de Elasticidad Global de vigas sometidas a flexión en 4 puntos reforzadas

En la *Tabla 4.15* se muestran los resultados del MOEG calculado en vigas reforzadas con fibras y su MOEG previo al refuerzo. Fueron calculados entre los 4 y los 6 kN de los ensayos a flexión realizados pertinentes.

VIGA SIN REFUERZO	MOEG (MPa)	VIGA REFORZADA	MOEG (MPa)	AUMENTO %
B207	7742	B207-1IB	8848	14,3
B213	8431	B213-1IB	8733	3,6
B208	8301	B208-1IC	9585	15,5
B211	8593	B211-1IC	9212	7,2
B214	6660	B214-1ICHM	7589	13,9
B220	7007	B220-1ICHM	9341	33,3
B217	7639	B217-1IG	8258	8,1
B221	7320	B221-1IG	9419	28,7
B218	7546	B218-1IS	8084	7,1
B222	6100	B222-1IS	8545	40,1
B223	8475	B223-2LC	8887	4,9
B233	6881,65	B233-2LC	7125	3,5
B225	7001	B225-2LCHM	8646	23,5
B226	7063	B226-2LCHM	9183	30,0
B227	8475	B227-2LG	10837	27,9
B234	7525	B234-2LG	7387	-1,8
B229	8133	B229-2LB	9516	17,0
B230	7817	B230-2LB	9670	23,7
B231	8216	B231-2LS	12528	52,5
B232	8848	B232-2LS	12483	41,1
B236	7455	B236-2IC	8658	16,1
B244	7063	B244-2IC	8475	20,0
B238	7525	B238-2IB	7894	4,9
B248	7596	B248-2IB	7972	5,0
B239	8052	B239-2IG	8848	9,9
B247	8475	B247-2IG	9255	9,2
B241	7525	B241-2ICHM	8658	15,1
B242	7817	B242-2ICHM	9819	25,6

Tabla 4.15. Comparativa del MOEG calculado entre los 4kN y los 6kN de todas la vigas objeto del ensayo previamente a ser reforzadas y una vez han sido reforzadas.

4.4.7.3 Modulo de Elasticidad Global piezas sometidas a compresión

En la *Tabla 4.16* se muestran los resultados del módulo de elasticidad obtenido entre los 10 MPa y 20 los MPa de cada una de las piezas ensayadas. Se consideró dicha franja de cálculo para el módulo de elasticidad ya que, como se puede observar en la *Figura 4.66*, todas las piezas se encontraban dentro de su fase elástica.

Los resultados son muy homogéneos en todas las piezas, exceptuando la pieza C02 que obtiene un módulo de elasticidad de 9.449 MPa, estando el resto de piezas entre los 7038 y los 7.571 MPa.

Probeta	E (Mpa)
C01	7038
C02	9449
C03	7571
C04	7038
C05	7500
MOEG MEDIO	7719

Tabla 4.16. Resultados del E (MPa) calculado entre los 10 MPa y los 20 MPa de las probetas ensayadas a compresión.

El resultado medio obtenido de las piezas ensayadas es de 7.719 MPa, estando por debajo de los 11.500 MPa marcados por la UNE-EN 338.

4.4.8 Ensayos a compresión

Se ensayaron 5 probetas a compresión de 40 mm x 40 mm x 240 mm, de la misma madera que las vigas utilizadas en los ensayos a flexión realizados, siguiendo las indicaciones de la norma de caracterización UNE-EN 408:2011 “Estructuras de madera. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas”. Todas las probetas carecían de defectos, por lo que eran aceptadas por la norma de clasificación UNE-EN 56.544 de clasificación visual. Las probetas se ensayaron hasta rotura total para obtener su diagrama caracterización mecánica (*Figura 4.66*).

En la *Tabla 4.17* se pueden ver los resultados mecánicos obtenidos durante el ensayo. En la primera columna se muestra la máxima resistencia alcanzada por la probeta; en la segunda columna se muestra el desplazamiento en el momento de máxima resistencia, y en la tercera el desplazamiento último de la probeta, considerado cuando este como el momento en el cual la probeta alcanza el 90% de su resistencia máxima, encontrándose en su fase descarga (plastificación).

Probeta	Resistencia Max. (MPa)	Desp. maxima Resistencia (mm)	Desp. último (mm)
C01	55,46	2,92	3,28
C02	56,37	2,82	3,30
C03	51,28	2,71	6,89
C04	55,97	3,64	4,13
C05	55,74	2,78	4,82
MEDIA	54,96	2,97	4,48

Tabla 4.17. Resultados de caracterización mecánica del ensayo a compresión realizado a probetas prismáticas de 40 x 40 x 240 mm.

En la *Figura 4.66* se observa el comportamiento mecánico de las probetas, donde se puede ver, que todas ellas marcan las 3 fases descritas en el estado del conocimiento del comportamiento de la madera a compresión, donde se diferencia una primera fase elástica y

lineal (alrededor de los 50 MPa de resistencia), una segunda fase elastoplástica hasta que se alcanza la máxima resistencia y por último, una fase plástica hasta que se agota la sección y se produce el fallo. Este comportamiento es menos claro en la probeta C03, donde la fase de fluencia se prolonga mientras la sección se agota paulatinamente.

La rotura vino producida por aplastamiento de fibras en la zona central de la sección de las probetas, exceptuando la probeta C03, donde dicho aplastamiento se produjo en la base de la probeta (*Figura 4.65*). La localización de esta rotura hizo que no se produjese ningún plano de deslizamiento, como así ocurrió en las demás probetas, por lo que la plastificación de la rotura fue más paulatina, prolongando el fallo final de la sección

Figura 4.65. Rotura en la base de la probeta C03 (Izq.) y Rotura en el centro de la probeta C01 (Der.).

Se observa que todas las probetas tienen un comportamiento similar en cuanto a resistencia, exceptuando la probeta C03 que alcanza un valor de resistencia más bajo. Se destaca también que la probeta C02 tuvo un Módulo de Elasticidad mayor que las demás probetas como se puede comprobar en el *Figura 4.66*.

Figura 4.66. Diagrama Tensión – Desplazamiento obtenido durante el ensayo de caracterización mecánica a compresión realizado a probetas prismáticas de 40 x 40 x 240 mm.

4.5 Análisis de los resultados

4.5.1 Análisis de caracterización de la madera empleada

4.5.1.1 Propiedades físicas y mecánicas de la madera utilizada en el estudio

La madera utilizada para el estudio se trata de una madera de calidad 1ª, de la especie *Pinus Silvestris*, procedente de Soria (España). Se trata por lo tanto de una madera muy homogénea, carente de defectos significativos, que tiene una respuesta mecánica con pocas variaciones en comparación con maderas que dispongan defectos.

La densidad obtenida en los ensayos de 509,20 Kg/m³ resulta característica de su especie que se encuadra entre los 400 - 550 Kg/m³, al igual que la velocidad de propagación de ultrasonido, que al igual que la madera utilizada en el Capítulo III, se encontró cercana a los 5.100 m/s en la dirección de las fibras (Reiterer et al, 2000) y un módulo de elasticidad dinámico cercano a los 13.300 MPa.

El diagrama obtenido en el ensayo de caracterización mecánica a compresión coincide con los modelos marcados por Calderoni y Argüelles (Argüelles, 2000; Calderoni et al, 2006) donde se puede observar claramente que la madera empleada pasa por una fase primera elástica y lineal, una segunda fase elastoplástica y una tercera fase de fluencia hasta que se produce su rotura final. Dependiendo del lugar de la rotura, se ha comprobado que la respuesta final puede ser muy diferente, aquellas piezas que rompieron por el centro del vano, crearon un plano de deslizamiento por el cual se agotó la sección, produciendo un descenso repentino de la resistencia a causa del deslizamiento del plano (Figura 4.65) o, incluso una separación de las fibras en su dirección paralela (Figura 4.67). En el caso de la

pieza C03, la rotura vino cerca de la interfaz inferior probeta-plato de la prensa. La pieza, al no contar con dicho plano de deslizamiento, fue aplastando sus fibras hasta agotar la sección. Como se puede observar en el *Figura 4.66*, la fase de plastificación de la probeta fue muy paulatina, evitando que se produjese un colapso repentino. Este comportamiento se puede observar en la *Tabla 4.17* donde el desplazamiento último considerado para dicha probeta es muy superior al del resto de especímenes y continuando con la misma tendencia descendente, destacando la tenacidad de la pieza.

Figura 4.67. Rotura de la probeta C02 en la cual se crea plano de deslizamiento y separación longitudinal de fibras.

Se destaca por lo tanto la importancia de la localización de la rotura, que, en el caso de producirse en un lugar donde las fibras están libres de confinamiento lateral, se produce un agotamiento de la sección más repentino que en aquellos casos en los que las fibras se van fracturando poco a poco desde los extremos hacia el centro de la probeta.

En cuanto a la resistencia a flexión de la madera utilizada, se observó una menor variación entre la resistencia mecánica y la capacidad de desplazamiento comparada con las vigas utilizadas en el Capítulo III de la tesis. Esto es debido a que la madera es más homogénea y no tiene grandes defectos que producen un corte de la continuidad de las fibras. La variación entre la pieza de mayor resistencia (B205 = 75,6 MPa) y la de menor resistencia (B206 = 54,3 MPa) fue de un 28,2%. Esta cifra, aun siendo mucho menor que la de la madera utilizada en el Capítulo III, destaca la heterogeneidad del material, la cual debe de ser tomada muy en cuenta a la hora de realizar cualquier cálculo para un uso estructural.

En este caso, el modo de rotura de todas las vigas fue a flexión con comportamiento frágil, bien por el centro del vano, bien a la altura de alguno de los apoyos centrales. Mayoritariamente se produjo algún tipo de evolución de la rotura en la dirección de las fibras a causa del cortante producido durante el ensayo a flexión que, aun no siendo el modo principal de rotura, sus consecuencias se pueden observar en la componente horizontal de la rotura de las piezas. Se destaca por lo tanto la poca capacidad resistente de este material en

esta dirección, que con luces pequeñas de ensayo, es muy difícil obtener una respuesta del material puramente a flexión.

4.5.1.2 Comparativa entre la madera estudiada y la normativa de caracterización

Todas las piezas utilizadas en el estudio fueron aceptadas por la norma de clasificación visual UNE-EN 56.644, que a su vez las encuadró dentro de la calidad ME-1 de la norma UNE-EN 338 “Madera estructural. Clases resistentes”. Esta madera, obtiene la clase resistente C-27 asignada por la norma UNE-EN 1.912 cuyos valores se pueden observar en la *Tabla 3.6*, correspondiente a los parámetros marcados por la norma UNE-338 (*UNE-EN 338: 2010*).

Comparativa de comportamiento a flexión y cortante

Se obtuvieron los valores de caracterización de la madera a través de los ensayos a flexión realizados a 5 de las vigas objeto del estudio. Estos valores han sido comparados con los valores de caracterización mecánica a flexión aportados por la norma UNE-EN 338 (*UNE-EN 338: 2010*) para la clase C27 en la *Tabla 4.18*, donde, en la primera línea se encuentran los valores aportados por la normativa, en la segunda línea se observan los valores medios obtenidos durante los ensayo experimentales, en la tercera línea se observan el porcentaje de variación considerando el 100% a los valores aportados por la norma UNE-EN 338 (*UNE-EN 338: 2010*), y en la cuarta fila la clase resistente que según la norma tiene los valores de caracterización obtenidos experimentalmente.

	Resis. última flexión (MPa)	Resis. Última cort. (MPa)	Densidad (Kg/m³)
C27	27,0	4,0	450
MEDIA EXP.	65,0	4,9	509
% MEDIA EXP. - C27	140,7	21,9	13,1
CLASE RESISTENTE EQUIVALENTE	> C50	C24 - C50	C40

Tabla 4.18. Comparativa entre resultados experimentales, clase resistente C27 y otras clases resistentes de la norma UNE-EN 338 de la caracterización a flexión realizada.

La resistencia a flexión obtenida experimentalmente es un 140,7 % superior a la indicada por la norma, por lo que se destaca el lado de la seguridad en el cual se encuentra la normativa en este apartado, quedándose muy por debajo de la resistencia real de la madera utilizada. Este hecho debe ser considerado ya que, aun con la variabilidad de resultados obtenidos en resistencia, la viga B206, que obtuvo los valores más bajos de resistencia a flexión, alcanzó un resultado por encima del doble del indicado para la clase C27.

La resistencia a cortante se acercó más a lo marcado, quedándose un 21,9% por encima de los 4,0 MPa indicados. Aun así fue un valor superior, quedando del lado de la seguridad. En este caso, se remarca la poca especificación de la norma, ya que marca el mismo valor de

resistencia a cortante (4,0 MPa) desde la clase resistente C24, hasta la clase C50. Paralelamente, la norma UNE-EN 384: “Madera Estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad”, según la cual “los valores de las propiedades mecánicas y la densidad determinados conforme a esta norma, son adecuados para asignar calidades y especies a las clases resistentes de la Norma EN 338”, determina que el valor característico de resistencia a cortante “ f_{vk} debe extraerse de la Norma EN 338 para el valor más adecuado de resistencia a flexión” el cual, como ya hemos visto, es el mismo para un amplio número de clases resistente. Según todo lo anterior, el valor de resistencia que le correspondería a la madera ensayada sería el de la clase C50 (o superior), siendo el mismo valor que el de la clase C24, con unos valores característicos muy diferentes a los de la clase C50, destacando la poca concreción de la normativa.

El módulo de elasticidad a flexión obtenido no puede ser comparado ya que la norma no marca de valores de módulo de elasticidad a flexión como se ha explicado en el Capítulo III de la tesis.

Comparativa de comportamiento a compresión

Las 5 probetas de 40x40x240 mm, mecanizadas según las indicaciones de la norma UNE-EN 408: 2011, se ensayaron a compresión simple y los resultados obtenidos en resistencia fueron muy superiores a los marcados en la norma UNE-EN 338 para la clase resistente C27.

Para comparación de resultados se contrastaron los valores aportados por la normativa de caracterización UNE-EN 338 para la clase resistente C27 y los valores obtenidos experimentalmente. Una vez se obtuvieron estos, a la resistencia media se le aplicó el coeficiente de reducción marcado por la norma UNE-EN 384: “Madera Estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad” a través de la expresión [11].

$$f_{c,0,k} = 5 (f_{m,k})^{0,45} \quad [11]$$

La comparación de los resultados de resistencia y módulo de elasticidad se puede ver en la *Tabla 4.19*, donde la primera fila muestra los valores marcados por la norma UNE-338 (UNE-EN 338: 2010) para la clase resistente C27, la segunda fila muestra los valores medios obtenidos experimentalmente, la tercera fila muestra los valores experimentales una vez se aplica la metodología marcada por la norma UNE-EN 384, la cuarta fila muestra la comparativa en porcentaje entre los valores marcado por la clase resistente C27 y los resultados experimentales, la quinta fila muestra la comparación entre la clase C27 y los valores experimentales una vez se le aplican los coeficientes de reducción de la UNE-EN 384, y por último, la sexta fila muestra la clase resistente a la cual se le asignan los valores obtenidos experimentalmente.

	Comp paralela a la fibra. (MPa)	E paralelo a la fibra. (MPa)
C27	22,0	11000,0
MEDIA EXP.	55,0	7719,2
UNE-EN 384	30,3	
% MEDIA EXP. - C27	149,8	-29,8
% UNE 384 - C27	37,9	
CLASE RES. EQUIVALENTE EXPERIMENTAL	> C50	C16
CLASE RES. EQUIVALENTE UNE-EN 384	> C50	

Tabla 4.19. Comparativa entre resultados experimentales, clase resistente C27 y otras clases resistentes de la norma UNE-EN 338 de la caracterización a compresión realizada.

Como se observa en la *Tabla 4.19* los resultados experimentales están un 149,8 % por encima de los marcados por la norma en resistencia. Incluso, aplicándole el factor de reducción de la norma UNE-EN 384, el cual es muy restrictivo, los resultados son muy superiores, por lo tanto, se destaca el lado de la seguridad de la norma en cuanto a resistencia a compresión. Si se compara con los valores de las diferentes clases resistentes aportadas, en ambos casos estaríamos por encima de los valores marcados por la clase C50, que es la mayor de las indicadas por la UNE-EN 338.

Sin embargo, el módulo de elasticidad se encuentra un 29,8 % por debajo del indicado para la clase C-27, siendo equivalente al indicado para la clase resistente C16. En este caso, se destaca que la norma se encuentra del lado de la inseguridad.

4.5.2 Análisis de caracterización mecánica de vigas reforzadas con FRP

En este apartado se analiza el comportamiento mecánico de las vigas reforzadas con diferentes FRP. Para ello se ha realizado una comparativa en la cual se analiza cada refuerzo de FRP por separado, comparando la disposición de dicho tipo de FRP como refuerzo (cara inferior en 1 y 2 capas y refuerzo en las caras laterales).

En cada apartado se dispone un gráfico en el cual se muestran el refuerzo en 1 capa de material en la cara inferior, el refuerzo con 2 capas en la cara inferior y el refuerzo en los laterales de la viga de cada tipo de FRP por separado. A su vez se dispone una tabla de comparación en la cual se incluyen los valores medios de caracterización mecánica obtenidos por ese FRP en cada una de sus disposiciones, el valor medio de caracterización mecánica obtenido por la madera sin reforzar, y la diferencia en porcentaje de cada tipo de refuerzo con la madera sin reforzar.

4.5.2.1 Vigas reforzadas con fibra de basalto

Los resultados obtenidos por las vigas reforzadas con fibra de basalto se pueden observar en la *Tabla 4.20* y en la *Figura 4.68*. En este caso el refuerzo en las caras laterales es el que obtiene los valores más altos de resistencia, aumentando la resistencia de las vigas sin reforzar en un 31,3 %. En capacidad de desplazamiento es el refuerzo con 2 capas en la cara inferior el que obtiene mejores resultados, aumentando el desplazamiento máximo en el centro del vano un 61,5 % respecto a las vigas sin reforzar, y un 41,2 % respecto de las vigas reforzadas en las caras laterales, las cuales cuentan con la misma cantidad de refuerzo.

A pesar de que sean las vigas reforzadas con 2 capas de fibra las que obtengan mejores resultados, estos no distan mucho de los obtenidos por 1 capa de refuerzo, siendo un aumento de la resistencia del 31,3 % en vigas reforzadas con 2 capas de fibra y de un 25,5 % en el caso del refuerzo con 1 capa. Por lo tanto no es representativo el aumento de la cantidad de refuerzo con la resistencia obtenida.

BASALTO	Carga máx. (kN)	Momento máx. (kNm)	Cortánte máx. (kN)	Desp. max. (mm)	Resis. última flexión (MPa)	Resis. Última cort. (MPa)
MEDIA	29,9	5,0	14,9	27,8	65,0	4,9
MEDIA 1IB	37,5	6,3	18,8	30,1	81,5	6,1
MEDIA 2IB	37,9	6,3	18,9	44,9	82,3	6,2
MEDIA 2LB	39,3	6,5	19,6	33,2	85,3	6,4
% 1IB	25,5	25,5	25,5	8,4	25,5	25,5
% 2IB	26,7	26,7	26,7	61,5	26,7	26,7
% 2LB	31,3	31,3	31,3	19,4	31,3	31,3

Tabla 4.20. Comparativa entre vigas sin reforzar y vigas reforzadas con fibra de Basalto en diferentes configuraciones.

Figura 4.68. Diagrama comparativo entre vigas reforzadas con fibra de basalto en diferentes configuraciones.

4.5.2.2 Vigas reforzadas con Fibra de Vidrio

Los resultados obtenidos de las vigas reforzadas con Fibra de Vidrio se pueden observar en la *Tabla 4.21* y en el *Figura 4.69*. El refuerzo lateral obtiene los mejores resultados de resistencia a flexión, aumentando la resistencia media de las vigas en 27,4 %, aunque en este caso los resultados son discrepantes debido a que los especímenes ensayados obtienen el mejor y el peor resultados en términos de resistencia.

Las vigas reforzadas con 2 capas de fibra de vidrio en la cara inferior aumentaron la resistencia un 5,6 % respecto de las reforzadas con 1 sola capa, aunque mermaron su desplazamiento final un 35,5 %. Las vigas con refuerzos laterales, también aumentaron su capacidad de desplazamiento un 47,1 % superior al de las vigas sin reforzar.

Destaca el refuerzo lateral, aunque el refuerzo con una capa en la cara inferior resulta especialmente interesante debido a su gran capacidad de alcanzar mayores deformaciones, aumentando la resistencia de las vigas un 18,2 %.

VIDRIO	Carga máx. (kN)	Momento máx. (kNm)	Cortante max. (kN)	Desp. max. (mm)	Resis. última flexión (MPa)	Resis. Última cort. (MPa)
MEDIA	29,9	5,0	14,9	27,8	65,0	4,9
MEDIA 1IG	35,3	5,9	17,7	44,2	76,8	5,8
MEDIA 2IG	37,0	6,2	18,5	34,3	80,5	6,0
MEDIA 2LG	38,1	6,3	19,0	40,9	82,8	6,2
% 1IG	18,2	18,2	18,2	58,9	18,2	18,2
% 2IG	23,8	23,8	23,8	23,4	23,8	23,8
% 2LG	27,4	27,4	27,4	47,1	27,4	27,4

Tabla 4.21. Comparativa entre vigas sin reforzar y vigas reforzadas con fibra de Vidrio en diferentes configuraciones.

Figura 4.69. Diagrama comparativo entre vigas reforzadas con fibra de vidrio en diferentes configuraciones.

4.5.2.3 Vigas reforzadas con Fibra de Carbono de Alto Módulo Elástico

Los resultados pueden observarse en la *Tabla 4.22* y en la *Figura 4.70*. El refuerzo con Fibra de carbono de alto módulo elástico obtuvo unos resultados muy poco interesantes. Solo el refuerzo lateral consiguió aumentar la resistencia un 15,1 % y el desplazamiento máximo un 12,3 %. Los refuerzos realizados en la cara inferior, apenas consiguieron mejorar los resultados de las vigas ensayadas a flexión sin refuerzo, incluso el refuerzo con 2 capas en la cara inferior consiguió peores resultados que el refuerzo con 1 capa, quedándose por debajo de los resultados obtenidos por las vigas sin reforzar. La capacidad de desplazamiento de las vigas también se vio mermada debido a la rigidez del refuerzo a causa del alto módulo elástico de la fibra.

Este comportamiento ha sido generalizado en el refuerzo con fibras de alto módulo elástico, las cuales no han alcanzado buenos resultados de resistencia y desplazamiento, llegando en algunos casos a quedarse por debajo de los obtenidos por las vigas sin refuerzo.

CARBONO ALTO MÓDULO E.	Carga máx. (kN)	Momento máx. (kNm)	Cortánte max. (kN)	Desp. max. (mm)	Resis. última flexión (MPa)	Resis. Última cort. (MPa)
MEDIA	29,9	5,0	14,9	27,8	65,0	4,9
MEDIA 1ICHM	30,0	5,0	15,0	26,5	65,2	4,9
MEDIA 2ICHM	29,6	4,9	14,8	27,2	64,3	4,8
MEDIA 2LCHM	34,4	5,7	17,2	31,2	74,8	5,6
% 1ICHM	0,3	0,3	0,3	-4,6	0,3	0,3
% 2ICHM	-1,1	-1,1	-1,1	-2,2	-1,1	-1,1
% 2LCHM	15,1	15,1	15,1	12,3	15,1	15,1

Tabla 4.22. Comparativa entre vigas sin reforzar y vigas reforzadas con fibra de Carbono de Alto Módulo Elástico en diferentes configuraciones.

Figura 4.70. Diagrama comparativo entre vigas reforzadas con fibra de carbono de alto módulo elástico en diferentes configuraciones.

4.5.2.4 Vigas reforzadas con Fibra de Metálica

Los resultados obtenidos de las vigas reforzadas con fibra metálica se pueden observar en el *Figura 4.71* y en el *Tabla 4.23*. No se realizó ensayo con refuerzo de 2 capas en la cara inferior de la viga ante la imposibilidad de su ejecución debido al porte de la fibra, el cual impedía que al colocar las dos capas el epoxi pudiese garantizar la correcta unión entre la viga y la fibra.

En este caso, al igual que las vigas reforzadas con carbono de alto módulo elástico, las vigas reforzadas con una capa de material en su cara inferior no obtienen mejoras de resistencia e incluso ven mermada su capacidad de desplazamiento. Sin embargo, las vigas reforzadas con 2 capas de fibra en los laterales de la viga, aumentaron su resistencia en un 40,3 % y su desplazamiento máximo un 31,7 %.

METAL	Carga máx. (kN)	Momento máx. (kNm)	Cortánte max. (kN)	Desp. max. (mm)	Resis. última flexión (MPa)	Resis. Última cort. (MPa)
MEDIA	29,9	5,0	14,9	27,8	65,0	4,9
MEDIA 1IS	29,9	5,0	14,9	26,4	65,0	4,9
MEDIA 2LS	42,0	7,0	21,0	36,6	91,2	6,8
% 1IS	0,0	0,0	0,0	-5,1	0,0	0,0
% 2LS	40,3	40,3	40,3	31,7	40,3	40,3

Tabla 4.23. Comparativa entre vigas sin reforzar y vigas reforzadas con fibra Metálica en diferentes configuraciones.

Figura 4.71. Diagrama comparativo entre vigas reforzadas con fibra metálica en diferentes configuraciones.

4.5.2.5 Vigas reforzadas con Fibra de Carbono

Los resultados obtenidos se pueden observar en la *Tabla 4.24* y en la *Figura 4.72*. Al contrario que en el resto de casos, el refuerzo con fibra en los laterales de la viga fue el que peor resultado obtuvo, aunque si se observa el gráfico, esto es debido a que la viga B233-2LC, desvió mucho su comportamiento respecto de la viga B223-2LC, la cual sigue la línea marcada por el resto de ensayos realizados en los cuales las vigas reforzadas con 2 capas en las caras laterales obtienen los mejores resultados.

El refuerzo realizado con 2 capas de fibra en la cara inferior obtiene los mejores resultados de resistencia con un aumento del 22,6 % respecto de las vigas sin reforzar y un aumento del desplazamiento máximo un 27,6 %. Destacar que las vigas reforzadas con 1 capa de fibra en la cara inferior mermaron su capacidad de desplazamiento un 21,7 %.

CARBONO	Carga máx. (kN)	Momento máx. (kNm)	Cortante máx. (kN)	Desp. max. (mm)	Resis. última flexión (MPa)	Resis. Última cort. (MPa)
MEDIA SR	29,9	5,0	14,9	27,8	65,0	4,9
MEDIA 1IC	34,9	5,8	17,5	21,8	75,9	5,7
MEDIA 2IC	36,7	6,1	18,3	35,5	79,7	6,0
MEDIA 2LC	32,8	5,5	16,4	37,7	71,2	5,3
% 1IC	16,7	16,7	16,7	-21,7	16,7	16,7
%2IC	22,6	22,6	22,6	27,6	22,6	22,6
%2LC	9,6	9,6	9,6	35,5	9,6	9,6

Tabla 4.24. Comparativa entre vigas sin reforzar y vigas reforzadas con fibra de Carbono en diferentes configuraciones.

Figura 4.72. Diagrama comparativo entre vigas reforzadas con fibra de carbono en diferentes configuraciones.

4.5.2.6 Resumen de caracterización mecánica de vigas reforzadas con FRP

El refuerzo mediante fibras de FRP a vigas de madera, puede llegar a aumentar la resistencia de la viga considerablemente, por lo que resulta muy interesante su aplicación. Se ha observado que los refuerzos no responden exclusivamente a la cantidad de fibra que se adhiere, sino que resulta muy influyente el módulo de elasticidad de la fibra de refuerzo, así como la rigidez del conjunto. Este comportamiento puede ser analizado en las gráficas en las que se encuentra el refuerzo de 1 capa en la cara inferior, 2 capas o refuerzo en los laterales.

El refuerzo con 1 capa en la cara inferior de la viga muestra un diagrama donde destaca claramente la influencia de cada uno de los FRP empleados. Las fibras con menor módulo elástico obtienen mejores resultados respecto de las fibras con mayor módulo elástico. Los resultados más favorables en resistencia los alcanza la Fibra de Basalto que aumenta la resistencia de las vigas un 25,5 % llegando hasta los 81,5 MPa y los 37,5 kN de carga. La Fibra de vidrio destaca como refuerzo aumentando la capacidad de carga un 18,2 % y el desplazamiento en el centro del vano un 58,9 % por encima de las vigas sin refuerzo. Los refuerzos realizados con Fibra de Carbono de Alto Módulo Elástico y Fibra Metálica, no consiguen aumentar la resistencia de las vigas, incluso disminuyen su capacidad de desplazamiento, por lo que van en detrimento de la calidad de la madera reduciendo sus cualidades mecánicas. Únicamente la Fibra de Carbono consigue aumentar la resistencia de las vigas un 16,7%, aunque reduce el desplazamiento máximo obtenido un 21,7%, factor que debe ser muy tenido en cuenta a la hora de realizar una intervención. En este caso, solamente resultan beneficiosas y aconsejables en su totalidad las fibras de Vidrio y Basalto, obteniendo resultados interesantes y positivos en resistencia y desplazamiento.

El refuerzo con 2 capas en la cara inferior aumentó la resistencia generalizada de las vigas, aunque este aumento no fue del doble del aumento de resistencia que se acrecentó con el refuerzo de 1 capa en la cara inferior de la viga. En términos absolutos, la resistencia aumentada estuvo entre un 1,2% en el caso de la Fibra de Basalto y un 5,9% en el caso del carbono, lo cual supuso en el mejor de los casos un aumento de la resistencia suplementada en un 35%. Estos datos confirman que el refuerzo realizado con 2 capas de fibra en la cara inferior no es efectivo, ya que empleándose el doble de material solo se consigue aumentar la resistencia de la viga un 5,9% respecto del refuerzo con 1 capa en el mejor de los casos. El comportamiento mecánico de las vigas reforzadas siguió los mismos patrones de comportamiento que las vigas reforzadas con 1 capa de fibra, siendo los refuerzos de fibras con menor módulo de elasticidad los que alcanzan mejores resultados. El refuerzo con Fibra de Basalto vuelve a ser el que alcanza mejores resultados, en este caso tanto en resistencia, aumentándola un 26,7%, como en desplazamiento, aumentándolo un 61,5%. La fibra de vidrio también obtiene resultados muy positivos aumentando la resistencia un 23,8% y el desplazamiento máximo en el centro del vano un 23,4%. La Fibra de Carbono de Alto módulo elástico obtiene los peores resultados, marcando valores de resistencia y capacidad de desplazamiento por debajo de los obtenidos por las vigas sin reforzar.

El refuerzo llevado a cabo con 2 capas de material en los laterales de la viga fue el que obtuvo los mejores resultados absolutos en todos los casos menos en las vigas reforzadas con Fibra de Carbono. Se destaca que con este tipo de refuerzo los resultados fueron más

variables ya que, como se observa en el *Figura 4.51*, correspondiente al diagrama de vigas reforzadas lateralmente, las vigas reforzadas con Fibra de Vidrio y las vigas reforzadas con Fibra de Carbono obtienen resultados diferentes en resistencia, y las vigas reforzadas con Fibra Metálica diferente capacidad de desplazamiento. Esto se debe a que la rotura en todos casos fue por tracción de las fibras inferiores (flexión) que, al no estar reforzadas, rompieron libremente. Si la madera ensayada contó con algún pequeño defecto en dichas fibras debido a su heterogeneidad a nivel microestructural o la diferencia de composición entre duramen y albura, esta pudo provocar el comienzo de la rotura. Como ya se ha visto en el Capítulo III, los FRP actúan como regularizador de la heterogeneidad de la madera, hecho que se constata en las vigas reforzadas en su cara inferior con 1 capa de FRP, ya que el comportamiento mecánico de dichas vigas fue muy similar en cada uno de los tipos de ensayo, haciendo que las vigas redujesen la variabilidad mostrada en los ensayos de flexión sin refuerzo. En este caso, las fibras más solicitadas se encontraban sin refuerzo, lo que ha provocado que la rotura comience y se produzca el fallo de la sección.

Resulta más interesante reforzar las vigas de madera con fibras con mayor capacidad de deformación y bajo módulo elástico que con fibras más rígidas, como así ha sido confirmado por los resultados obtenidos por la Fibra de Vidrio y la Fibra de Basalto. De estas dos fibras, resultó más interesante para el refuerzo el uso de la Fibra de Basalto que, con un peso menor que la Fibra de Vidrio (900 gr/m^2 frente a 400 gr/m^2) y una capacidad de carga por unidad de ancho menor (1.228 kN/m frente a 680 kN/m), alcanzó mayores valores de resistencia en todos los casos y una de las capacidades de desplazamiento de las más altas.

El uso de la Fibra de Carbono de Alto Módulo Elástico no resultó beneficioso debido a los resultados negativos que obtuvo durante los ensayos, donde apenas superó la resistencia media de las vigas sin refuerzo y mermó la capacidad de desplazamiento de las vigas. La Fibra Metálica obtuvo resultados muy dispares. Esto, unido a la dificultad de ejecución de su adhesión en vigas de dimensiones reducidas como las del ensayo, que imposibilitó su ejecución en 2 capas en la misma cara de la viga, hacen que se deba tener un cuidado especial a la hora de su aplicación como refuerzo.

4.5.3 Análisis comparativo entre módulo de elasticidad con y sin refuerzo y resistencia final alcanzada por las vigas

La madera estudiada en los ensayos a flexión sin refuerzo tiene un comportamiento según el cual a medida que aumenta el módulo de la elasticidad, aumenta la resistencia de la madera, exceptuando la viga B206, que obtiene el tercer módulo de elasticidad más alto y la resistencia más baja. Este comportamiento no se observa en las vigas reforzadas ya que no necesariamente las que alcanzan un módulo de elasticidad global mayor, obtienen los resultados de resistencia más altos, por lo que no hay relación entre la alta rigidez de la viga y su resistencia.

La comparativa realizada entre los módulos de elasticidad de las vigas reforzadas y sin refuerzo en el tramo entre los 4 y 6 kN, no muestra una clara relación entre el aumento del módulo de elasticidad de la viga y el aumento de resistencia. Dicha comparativa sería

interesante realizarla sometiendo a las vigas sin refuerzo a una mayor carga de ensayo para obtener un módulo elasticidad global representativo de un tramo más amplio, pero se podría correr el riesgo de producir daños en las vigas y que se variase su comportamiento a la hora de ser reforzadas y ensayadas de nuevo. A pesar de no percibirse esta clara relación sí que se puede observar la tendencia general de que, a medida que se aumenta la cantidad de refuerzo, la respuesta final de la viga no es tan predecible, siendo más dispar en las vigas reforzadas en los laterales. También se observa que a medida que aumenta el módulo de elasticidad del refuerzo, disminuye la resistencia de la viga, siendo las fibras con menor módulo (basalto y vidrio) las que mejor responden en términos de resistencia y capacidad de desplazamiento. Este comportamiento puede ser observado en la *Tabla 4.25*.

Viga sin refuerzo	MOEG (MPa)	Viga reforzada	MOEG (MPa)	AUMENTO %	E FIBRA (MPa)	RESIS. (MPa)	AUMENTO RESIS. (MPa)
B207	7742	B207-1IB	8848	14,3	89000	83,9	29,1
B213	8431	B213-1IB	8733	3,6	89000	79,2	21,8
B208	8301	B208-1IC	9585	15,5	230000	77,6	19,4
B211	8593	B211-1IC	9212	7,2	230000	74,1	14,0
B214	6660	B214-1ICHM	7589	13,9	390000	64,2	-1,2
B220	7007	B220-1ICHM	9341	33,3	390000	66,1	1,7
B217	7639	B217-1IG	8258	8,1	80700	76,5	17,7
B221	7320	B221-1IG	9419	28,7	80700	77,1	18,6
B218	7546	B218-1IS	8084	7,1	210000	64,3	-1,1
B222	6100	B222-1IS	8545	40,1	210000	65,7	1,1
B223	8475	B223-2LC	8887	4,9	230000	82,6	27,1
B233	6882	B233-2LC	7125	3,5	230000	59,9	-7,8
B225	7001	B225-2LCHM	8646	23,5	390000	76,7	18,0
B226	7063	B226-2LCHM	9183	30,0	390000	72,9	12,2
B227	8475	B227-2LG	10837	27,9	80700	93,3	43,5
B234	7525	B234-2LG	7387	-1,8	80700	72,4	11,4
B229	8133	B229-2LB	9516	17,0	89000	88,5	36,2
B230	7817	B230-2LB	9670	23,7	89000	82,2	26,5
B231	8216	B231-2LS	12528	52,5	210000	91,9	41,4
B232	8848	B232-2LS	12483	41,1	210000	90,5	39,2
B236	7455	B236-2IC	8658	16,1	230000	76,5	17,7
B244	7063	B244-2IC	8475	20,0	230000	82,9	27,5
B238	7525	B238-2IB	7894	4,9	89000	78,0	20,0
B248	7596	B248-2IB	7972	5,0	89000	86,7	33,4
B239	8052	B239-2IG	8848	9,9	80700	77,0	18,5
B247	8475	B247-2IG	9255	9,2	80700	83,9	29,1
B241	7525	B241-2ICHM	8658	15,1	390000	52,2	-8,9
B242	7817	B242-2ICHM	9819	25,6	390000	69,4	6,8

Tabla 4.25. Comparativa entre aumento del módulo de elasticidad y el aumento de la resistencia de las vigas reforzadas y sin reforzar.

4.6 Conclusiones del Capítulo IV

4.6.1 Conclusiones sobre la madera estudiada y su comparación con la normativa de caracterización

La madera ensayada es una madera de alta calidad con ausencia de defectos significativos, aun así, los ensayos de caracterización muestran que la variabilidad en resistencia y módulo de elasticidad debe ser tenida en cuenta. Si bien es cierto, que esta no es tan grande como la mostrada por la madera con defectos, los cuales merman significativamente la resistencia de las fibras a tracción. En este caso la variación de resistencia no es superior del $\pm 17\%$ respecto de la media obtenida. Este resultado es lo suficientemente significativo como para demostrar que, aunque la normativa de caracterización acote estrictamente los defectos de la madera, la disposición de las fibras, así como la diferencia de densidades dependiendo de su composición estructural y microestructural, marca significativamente la anisotropía de esta, imposibilitando la predicción exacta de respuesta mecánica a flexión.

Las piezas ensayadas a compresión obtienen una variabilidad mucho menor, exceptuando uno de los casos (C-03). La respuesta de todas ellas es más homogénea, lo que demuestra que la influencia de la estructura interna de la madera no afecta en igual medida al comportamiento a compresión que a tracción (flexión). Este hecho ya se probó en el Capítulo III de esta tesis, donde la localización de los defectos en la cara comprimida de una viga sometida a flexión, hizo que la respuesta de esta fuese más cercana a la de las vigas ensayadas sin defectos significativos, que a la de las vigas con características similares y nudos localizados en la cara traccionada de la viga.

Por todo lo citado, se considera acertado que la norma de caracterización UNE-EN 384 aplique coeficientes de reducción de los valores característicos. Si bien es cierto que aun aplicándolos, los cuales merman la resistencia obtenida experimentalmente un 44,91%, los valores de resistencia están muy por encima de los marcados por la norma de caracterización UNE-EN 338, siendo similares a los de la clase resistente C50.

Los criterios marcados por la normativa de caracterización son acertados, aunque deberían ser menos restrictivos en elementos sometidos a compresión y tener en cuenta el modo de trabajo de los elementos de madera, no pudiendo tener los mismos requerimientos una sección sometida a flexión que a compresión. Se encuentra por lo tanto en todos los casos del lado de la seguridad.

4.6.2 Conclusiones sobre la disposición del refuerzo en las vigas

La disposición del refuerzo de la viga influye tanto en la resistencia, como en el módulo de elasticidad y en la variabilidad de la respuesta mecánica. Las vigas que disponen el refuerzo en las caras laterales obtienen los valores medios más altos de resistencia y aumento del módulo de elasticidad generalizadamente, pero, como se comprueba en los gráficos de Tensión – Desplazamiento realizados (*Figura 4.51*), el modo de respuesta resulta menos

predecible que en el caso del refuerzo en la cara inferior, variando en resistencia y en rigidez.

La disposición del refuerzo en la cara inferior de la viga hace que la respuesta mecánica sea más homogénea, como así se ve en los gráficos de caracterización realizados (*Figura 4.34 y Figura 4.64*). En el caso de las vigas reforzadas con 1 capa de FRP en la cara inferior, el refuerzo ha provocado un aumento de la rigidez de las vigas y de la resistencia, haciendo que la variabilidad obtenida en los ensayos de flexión sin refuerzo se reduzca, regularizando la respuesta de las vigas en función del tipo de fibra que se disponga. Este comportamiento también se puede observar en las vigas reforzadas con 2 capas de FRP en la cara inferior, aunque los resultados no son tan precisos como el caso del refuerzo con 1 capa en cuanto a variabilidad.

Las vigas reforzadas con 2 capas de FRP en la cara inferior aumentan la resistencia respecto de las reforzadas con 1 capa (excepto con el refuerzo CHM que se queda por debajo), aunque dicho aumento no es de la misma magnitud que el que se obtiene con el refuerzo con 1 capa en la cara inferior respecto a las vigas sin reforzar. La primera capa de refuerzo de la viga es la que mayor influencia tiene en la resistencia mecánica.

Por lo tanto, resulta de mayor interés el refuerzo con 1 capa en la cara inferior, ya que se consiguen importantes aumentos de resistencia con una cantidad pequeña de material, controlando mayoritariamente la resistencia y el desplazamiento máximo.

4.6.3 Conclusiones sobre la influencia del Módulo de Elasticidad del refuerzo sobre la resistencia de las vigas reforzadas

El uso de fibras muy rígidas para el refuerzo de vigas de madera no resulta efectivo. Durante la realización de los ensayos se ha demostrado que las vigas reforzadas con fibras con altos módulos elásticos, han obtenido los resultados más bajos de resistencia y capacidad de desplazamiento, en líneas generales. Este comportamiento se observa claramente en la comparación entre la Fibra de Vidrio y la Fibra de Carbono de alto módulo elástico, obteniendo las vigas reforzadas con Fibra de Vidrio una resistencia y una capacidad de desplazamiento mayor en todos los casos, partiendo de un módulo de elasticidad y una resistencia a la tracción mucho menores (*Tabla 4.1*).

Si a su vez se aumenta la cantidad de refuerzo (mayor rigidez) se observa un comportamiento similar, donde la respuesta de la viga se hace más impredecible y no se produce un aumento de la resistencia considerable. Por esto se destaca la importancia de que las fibras, a la hora de realizar un refuerzo, tengan un módulo de elasticidad lo más cercano al de la madera posible, y que dispongan de la mayor capacidad de deformación antes de la rotura posible. Realizando en todos los casos un refuerzo efectivo, con la cantidad de fibra necesaria para no aumentar la rigidez del conjunto y perder la eficiencia del mismo, siendo más importante la ubicación y modo de colocación, por encima de la cantidad de fibra ejecutada.

4.6.4 Conclusiones sobre los tipos de FRP empleados en los refuerzos

Los resultados obtenidos se han diferenciado en función de la fibra empleada. Las más rígidas como puede ser la Fibra de Carbono de Alto Módulo Elástico, o la Fibra Metálica, obtienen los peores resultados de resistencia y desplazamiento, exceptuando el caso del refuerzo lateral con fibra metálica, que aumentó considerablemente la resistencia de las vigas. En los demás casos, estas fibras apenas aumentaron resistencia de las vigas, llegando a mermar la capacidad de desplazamiento en algunos casos. La fibra de carbono, a pesar de tener un módulo de elasticidad superior al de la fibra metálica, obtuvo unos resultados más altos, consiguiendo aumentar la resistencia entre el 9,6% y el 22,6%, aunque a diferencia de las demás fibras, el mejor resultado no lo obtuvieron las vigas reforzadas en las caras laterales. Por lo tanto, las fibras con un alto módulo elástico solo consiguieron aumentar la resistencia de las vigas con grandes cantidades de material de refuerzo, siendo la respuesta de estas más impredecible.

Las fibras con un módulo de elasticidad más bajo (Fibra de Basalto y Fibra de Vidrio) fueron las que obtuvieron los resultados más altos, aumentando la resistencia de las vigas entre un 18,2% y un 31,3%. Estas fibras también provocaron un gran aumento de la capacidad de deformación de las vigas, por lo que se presentan como las más interesantes a la hora de realizar un refuerzo en madera. De entre estas dos fibras destacó el comportamiento de la Fibra de Basalto, que con menos de la mitad de peso que la fibra de vidrio, obtuvo un aumento de la resistencia entre el 25,5% con una capa de refuerzo en la cara inferior de la viga y un 31,3% en el refuerzo en las caras laterales.

CAPÍTULO V:

CONCLUSIONES FINALES

5.1 Conclusiones finales de vigas reparadas y reforzadas con Fibra de Carbono Bidireccional

En este subcapítulo se recogen las conclusiones finales obtenidas a través de los diferentes procesos analíticos y experimentales, realizados durante el análisis del comportamiento mecánico de vigas de madera aserrada, reforzadas y reparadas con Fibra de Carbono Bidireccional, y la comparativa entre la madera utilizada y la normativa de caracterización:

- Los criterios de aceptación de la norma UNE-EN 56.544:2011 están correctamente trazados en base a la morfología de los defectos, pero no hacen diferenciación en la localización de los mismos, quedando demostrado por los resultados obtenidos que la disposición de los defectos condiciona el comportamiento estructural de la madera. La consideración de la localización de los defectos, aceptaría un mayor número de piezas de madera que actualmente se rechazan y podrían tener buena respuesta a ciertos esfuerzos mecánicos.
- Los valores de resistencia a flexión obtenidos experimentalmente de los especímenes aceptados por la norma UNE-EN 56.544, son de media entre un 47% y un 86% superiores a los marcados por la norma UNE-EN 338:2010, lo que remarca el carácter del lado de la seguridad en la cual se encuentra dicha norma. El mismo caso pasa con la definición de la densidad media, siendo muy superior en las piezas estudiadas.
- La asignación de clase resistente C-22 por parte de la norma UNE-EN 1912:2012, para todas piezas de madera cuyo canto supere los 7 cm, no es representativa del entero de escuadrías estructurales que representa, siendo, en muchos casos, muy inferior a los valores de caracterización reales.
- La norma UNE-EN 338:2010, carece de un Módulo de Elasticidad representativo de la resistencia a flexión de la madera.
- Queda demostrada que la presencia de defectos merma y condiciona en gran medida la resistencia a flexión de la madera, provocando en el caso de los especímenes ensayados dos modos de rotura:
 - Flexión: en aquellas vigas que presentan defectos en su cara traccionada.
 - Cortante: en aquellas vigas que no presentan defectos significativos, seccionado las piezas mediante un modo de rotura rasante.
- Las piezas disponen de una gran capacidad de carga a tracción en sus fibras inferiores, lo que ha provocado que la sección no haya sido capaz de absorber los esfuerzos de cortante producidos en la dirección de las fibras, cuya resistencia es mucho menor.
- Con la suficiente cantidad de material de refuerzo (CFRP) es posible devolver e incluso incrementar la capacidad mecánica a vigas previamente ensayadas hasta la

rotura. Estos resultados obtenidos deberán ser confirmados con un programa experimental más extenso.

- El refuerzo de 160 gr/m² en una sola capa no ha mostrado buenos resultados. Las vigas reforzadas y reparadas han obtenido valores inferiores entre un 44.0% y un 78.6% de los valores medios de resistencia de las vigas sin reforzar.
- Las vigas reparadas con 2 capas de 160 gr/m² y con 1 capa 210 gr/m², muestran resultados similares de resistencia. Las vigas reforzadas con 2 capas de 160gr/m² aumentaron su resistencia un 14.7% respecto a las vigas sin refuerzo, y las vigas reforzadas con 1 capa de 210 gr/m² aumentaron la resistencia un 32.2%. Resulta de mayor interés el refuerzo con 1 capa de 210 gr/m², ya que los resultados son más elevados con una menor cantidad de material.
- El refuerzo con 2 capas de 210 gr/m² obtiene un aumento de la resistencia del 34.6% en vigas reparadas y un 84.1% en vigas reforzadas respecto de vigas sin reforzar, por lo que resulta especialmente interesante.
- El refuerzo con fibra de carbono bidireccional en forma de U hasta el 75% de la cara de la viga, refuerza las piezas en la dirección de las fibras y provoca un aumento de la rigidez de estas que disminuye el cortante en la dirección de las fibras, causado por la deformación durante el ensayo a flexión. De este modo se disminuye el número de roturas por cortante y aumenta el número de fallos a flexión.
- La fibra de carbono absorbe los esfuerzos críticos puntuales causados por los defectos de la madera. Se consigue así una regularización de su heterogeneidad.

5.2 Conclusiones finales de vigas de madera aserrada reforzadas con diferentes sistemas FRP

En este subcapítulo se recogen las conclusiones finales obtenidas a través de los diferentes procesos analíticos y experimentales realizados en este trabajo.

- La ausencia de defectos reduce la heterogeneidad de la madera, aunque no llega a eliminarla por completo, por lo que debe ser tenida en cuenta en los procesos de cálculo estructural.
- Como también se observa en el Capítulo III del trabajo, la resistencia mecánica de la madera a flexión es muy superior a la marcada por la norma UNE-EN 338, por lo que se destaca el lado de la seguridad de estos valores (C-27).
- La heterogeneidad de la madera afecta en menor escala en los esfuerzos de compresión, como se comprueba en los resultados obtenidos experimentalmente, los cuales fueron muy homogéneos siendo la misma madera que la utilizada en las vigas, con las mismas posibles variaciones a nivel microestructural.

- Los criterios de la norma de caracterización están correctamente trazados, aunque destacan por estar del lado de la seguridad, adjudicando unos coeficientes de reducción muy restrictivos y unos valores de caracterización por debajo de los obtenidos experimentalmente.
- La disposición del refuerzo en la cara inferior de la viga hace que la respuesta sea más predecible, siendo el refuerzo con 1 capa el más interesante, ya que con menos cantidad de material se consiguen importantes aumentos de resistencia y se controla mejor el desplazamiento.
- Las fibras con un alto módulo elástico solo consiguieron aumentar la resistencia de las vigas con una gran cantidad de material de refuerzo, aunque la respuesta que se obtiene es más impredecible.
- Las fibras con un módulo de elasticidad más bajo (basalto y vidrio) obtienen unos resultados más elevados, consiguiendo aumentar la resistencia entre el 18,2% y el 31,3%, y mejorar la capacidad de deformación de las vigas. Destacó la Fibra de Basalto, que con la mitad de peso que la de vidrio aumentó la resistencia de las vigas entre un 25,5% y un 31,3%.

CAPÍTULO VI:
FUTURAS LÍNEAS DE
INVESTIGACIÓN

6.1 Futuras líneas de investigación

A continuación se trazan las futuras líneas de investigación en base a los resultados obtenidos en el trabajo:

- Se ha comprobado que la localización de los defectos, condiciona el modo de rotura de las vigas, por lo que sería interesante comprobar la influencia de la ubicación de los defectos en la resistencia a flexión de vigas de madera.
- Las reparaciones con fibra de Carbono en vigas colapsadas previamente han obtenido unos resultados muy positivos. Sería interesante realizar un estudio en el cual se reparasen vigas de mayor luz de ensayo, aproximándose a luces de vigas de edificios.
- Los resultados obtenidos en el Capítulo IV muestran que las fibras con un módulo elástico más bajo alcanzan valores de resistencia más altos. Sería interesante, plantear un estudio en el cual se realizasen reparaciones de vigas con dichas fibras.

REFERENCIAS

Ahmad, S., Shs, A., & Salimullah, D. (2010). "Refuerzo a cortante de ménsulas con polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP)". *Materiales De Construcción*, 60(299), 79-97.

Argüelles, R., Arriaga, F., & Martínez, J. J. (2000). "Estructuras de madera. Diseño y cálculo" (Segunda edición ed.). Madrid: AITIM.

Arriaga, F., Esteban, M., & Relea, E. (2005). "Evaluation of the load carrying capacity of large cross section coniferous timber in standing structures". *Materiales De Construcción*, Vol. 55(280), pp. 43-52.

Arriaga, F., M. Esteban, M., Argüelles, R., Bobadilla, I., & Íñiguez, G. (2007). "Efecto de las gemas en la resistencia a flexión de piezas enterizas de madera". *Materiales De La Construcción*, Vol. 57(288), 61-76.

Balaras, C. A., & Argiriou, A. A. (2002). "Infrared thermography for building diagnostics". *Energy and Buildings*, 34, pp. 171-183.

Ball, R. D., Simpson, I. G., & Pang, S. (2001). "Measurement, modelling and prediction of equilibrium moisture content in pinus radiata heartwood and sapwood". *Holz Als Roh*, Vol. 59 (pp. 457-462)

Baño, V., Argüelles-Bustillo, R., Regueira, R., & Guaita, M. (2012). "Determinación de la curva tensión-deformación en madera de 'Pinus sylvestris' L. para la simulación numérica de vigas de madera libre de defectos". *Materiales De Construcción*, Vol. 62(306), pp. 269-284.

Baquer, J., Falguera, J., Herrero, J. E., Ortín, G. A., Piñeiro, P., Puigbet, J., et al. (2014). "La fibra de carbono en refuerzo de estructuras de hormigón". Institut d'estudis Estructurals.

Biblis, E. J. (1965) "Analysis of wood-fiberglass composite beams within and beyond the elastic region". *Forest Product Journal*, 15, 75-81.

Blass, H. J. (1991). "Design of columns". In: *Proceedings of the 1991 International Timber Engineering Conference*, Vol. 1, pp. 75-81.

Bootle, J., Burzesi, F., & Fiorini L. (2001). "Desing guidelines". *ASM handbook* (pp. 388-395). Material Park, Ohio: ASM International.

Borri, A., Corradi, M., & Grazini, A. (2003). "FRP reinforcement of wood element under bending loads". In: *Proceedings of Structural Faults and Repair*.

Borri, A., Corradi, M., & Grazini, A. (2005). "A method for flexural reinforcement of old wood beams with CFRP materials". *Composites Part B*, 36, 143-153.

Buchanan, A. (1984). "Combined bending and axial loading in lumber". J Struct Eng, ASCE, Vol. 112(12).

Calderoni, C., De Matteisb, G., Giubileo, C., & Mazzolania, F. M. (2006). Flexural and shear behaviour of ancient wooden beams: Experimental and theoretical evaluation. Engineering Structures, (28), 729-744.

Campilho, R. D. S. G., de Moura, M. F. S. F., Barreto, A. M. J. P., Morais, J. J. L., & Domingues, J. J. M. S. (2010). Experimental and numerical evaluation of composite repairs on wood beams damaged by cross-graining. Construction and Building Materials, (24), 531-537.

Darbhari, V. M., Chin, J. W., Dunston, D., Benmokrane, B., Juska, T., Morgan, R., et al. (2003). "Durability gap analysis for fiber-reinforced polymer composites in civil infrastructure". Journal of Composites for Construction, 7, 238-247.

De la Rosa, P., Cobo, A., & González, M. N. (2013). Bending reinforcement of timber beams with composite carbon fiber and basalt fiber materials. Composites Part B, (55), 528-536.

Dempsey, D. D., & Scott, D. W. (2006). "Wood members strengthened with mechanically fastened FRP strips". Journal of Composites for Construction, 10(5).

Desing and use of fibre reinforced polymer reinforcement (FRP) in reinforced concrete structures. (2007). In FRP reinforcement in RC structures (Ed.). ISBN: 978-2-88394-080-2.

Esteban, M., Arriaga, F., Íñiguez, G., Bobadilla, I., & Mateo, R. (2010). "Influencia de las fendas en la resistencia de la madera estructural". Materiales De La Construcción, Vol. 60(299), 115-132.

Fernández-Golfín, J. I. (2014). "Propiedades eléctricas de la madera: Conductividad, comportamiento dieléctrico y piezoelectricidad".

Fernández-Golfín, J. I., Conde, M., & Hermoso Prieto, E. (2007). "Mejora de la predicción de la resistencia y rigidez de la madera estructural con el método de ultrasonidos combinado con parámetros de clasificación visual". Materiales De Construcción, Vol. 57(288), pp. 49-59.

Fiorelli, J., & Alves, A. (2002). Analysis of the strength and stiffness of timber beams reinforced with carbon fiber and glass fiber. 2002; 6(2):193–202. Mater Res, 6(2), 193-202.

Forest Products Laboratory (FPL) (Ed.). (2010). Wood handbook - wood as an engineering material (General Technical Report FPL-GTR-190 ed.). Madison, WI: Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

Fragiacomo, M., Fortino, S., Tononi, D., Usardi, I., & Toratti, T. (2011). "Moisture-induced stresses perpendicular to grain in cross-sections of timber members exposed to different climates". *Engineering Structures*, Vol. 33, pp. 3071-3078.

Fujii, Y. (1990). "Using acoustic emission monitoring to detect termite activity in wood". *Forest Prod. Journal*, Vol. 40 (nº1), pp. 34-36.

García, A. (2003). "Ecología forestal: Estructura, funcionamiento y producción de las masas forestales". Retrieved 04/14, 2014, from http://www.ub.edu/ecologia/Carlos.Gracia/PublicacionesPDF/La_madera.pdf

Gentile, C., Svecova, D., & Rizkalla, S. H. (2002). "Timber beams strengthened with GFRP bars: Development and applications". *Journal of Composites for Construction*, 6 (1).

Gilfillan, J. R., Gilbert, S. G., & Russell, D. P. (2001). "Enhancement of the structural performance of home-grown sitka spruce using carbon fiber reinforced polymer". *Struc Eng*, 79, 8-23.

Greenland, A., Crews, K., & Bakoss, S. (1999). "Application of advanced fiber composite reinforcements to structural timber". *Proceedings of Pacific Timber Engineering Conference*, New Zealand. pp. 93.

Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures. (2004). (Materials, RC and PC structures, masonry structures ed.). Rome: National Research Council. CNR-DT 200/2004.

Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. (2008). In American Concrete Institute (Ed.). ACI 440.2R-08.

Guidelines for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures. (2005). In National Research Council (Ed.), Timber structures. CNR-DT 201/2005.

Gutiérrez, A. (2014). "La madera y sus propiedades". Retrieved 04/14, 2014, from http://www.infomadera.net/uploads/articulos/archivo_1111_16991.pdf.

Hermoso, E., Fernández-Golfín, J. I., & Díez, M. R. (2003). "Evaluación de la clasificación resistente de la madera estructural mediante ultrasonidos". 10º Congreso Nacional De Ensayos no Destructivos, Certagena, España. pp. 187-195.

Hoffmeyer, P. (1995). *Holzbauwerke nach dem eurocode 5, step 1: Bemessung und baustoffe*. Fachverlag holz der arbeitgemeinschaft holz. Holz Als Baustoff, Düsseldorf. pp. 1-22.

Íñiguez, G. (2007). "Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural". Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, ETS de Ingenieros de Montes). Tesis Doctoral.

Jorissen, A., & Fragiocomo, M. (2011). "General notes on ductility in timber structures". Engineering Structures, Vol. 33, pp. 2987-2997.

Kim, Y. J., & Harries, K. A. (2010). Modeling of timber beams strengthened with various CFRP composites. Engineering Structures, (32), 3225-3234.

Kollmann, F. P., & Côté Jr, W. A. (1968). Principle of wood science and technology. Part. I - solid wood. Springer-Verlag, New York.

Machado, J. S., Sardinha, R., & Cruz, H. (1998). "Evaluation of lengthwise variation of mechanical properties by ultrasounds". Proceedings of the 5th Conference on Timber Engineering, Montreaux (Switzerland), Vol. 2. pp. pp. 304-311.

Machida A. (1993). "State of the art report on continuous fiber reinforcing materials. Second research commite on CFRM". In Japan Society of Civil Engineers (Ed.), Concrete engineering series 3. Tokio.

Malo, K. A., Siem, J., & Ellingsbø, P. (2011). "Quantifying ductility in timber structures". Engineering Structures, Vol. 33, pp. 2998-3006.

Mårtensson, A. (1992). "Mechanical behaviour of wood exposed to humidity variations". Lund Sweden: Lund Institute of Technology. Report TVBK-1006. Ph.D. thesis.

Medina, E. (2013). "Construcción de estructuras de madera". In Bellisco. Ediciones Técnicas y Científicas (Ed.). ISBN: 978-84-92579-84-2.

Meier, U., & Winistorfer, A. (1995). "Retrofitting of structures through external bonding of CFRP sheets". 2nd International RILEM Symposium, Ghent, Belgium. pp. 25-33.

Morales-Conde, M. J., Rodríguez-Liñan, C., & Rubio-de Hita, P. (2015). "Bending and shear reinforcements for timber beams using GFRP plates". Construction and Building Materials, 96, 461-472.

Nanni, A., Di Tomaso, A., & Arduini, M. (1996). "International research on advanced composites in construction". In National Science Foundation (Ed.). Arlington, Va.

Neale, K. W., & Labousiérre, P. (1992). "Advancen composites materials in bridges and structures". Proc. 1st Int. Conf. On Advanced Composites Materials in Bridges and Structures, CSCE, Sherbroke, Quebec, Canada.

Newlin, J. A., & Trayer, G. W. (1924). "From factor of beams subjected to transverse loading only". Naca, (report N° 181.).

Niemz, P., & Mannes, D. (2012). "Non-destructive testing of wood and wood-based materials". Cultural Heritage.

Ogawa, H. (2000). "Architectural application of carbon fibres: Development of new carbon fibre reinforced glulam". Carbon, 38, 211.

Parra, C., Martínez-Conesa, E., Valcuende, M., & Garrido, A. (2012). "Method of analysis to evaluate the CFRP shear-strengthened in reinforced concrete". Informes De La Construcción, 64, 197-206.

Pavez, A., Ansell, M. P., & Smedley, D. (2009). "Mechanical repair of timber beams fractured in flexure using bonded-in reinforcements". Composites Part B, 40, 95-106.

Pérez-Peña, N., Valenzuela, L., Eduardo Diaz-vaz, J. E., & Ananías, R. A. (2011). "Predicción del contenido de humedad de equilibrio de la madera en función del peso específico de la pared celular y variables ambientales". Madera. Ciencia y Tecnología, Vol. 13(3), pp. 253-266.

Pierce, F. T. (1926). "Tension tests for cotton yarn". Journal of the Textile Institute, pp: T155-T368.

Plavris, N., & Trintafillou, T. C. (1992). "FRP reinforced wood as structural material". Journal of Materials in Civil Engineering, 4, 300.

Radford, D. W., Van Goethem, D., Gutkowski, R. M., & Peterson, M. L. (2002). "Composite repair of timber structures". Construction and Building Materials, 16, 417.

Raftery, G. M., & Whelan, C. (2014). "Low-grade glued laminated timber beams reinforced using improved arrangements of bonded-in GFRP rods". Construction and Building Materials, 52, 209-220.

Ranta-Maunus, A. (2003). "Effects of climate and climate variations on strength". Thelandersson S, Larsen HJ, Editors. Timber Engineering, (Chichester: John Wiley & Sons Incorporated).

Reiterer, A., Stanzl-Tschegg, E., & Tschegg, K. (2000). "Mode I fracture and acoustic emission of softwood and hardwood". Wood Science and Technology, Vol. 34, pp. 417-430.

Rouger, F., & Fewell, A. T. (1994). "Size effects in timber: Novelty never ends". Proceedings Proceedings of the CIB-W18A/27-5-2. Sydney, Australia.

Sandoz, J. L. (1989). "Grading of construction timber by ultrasound". Wood Science and Technology, Vol. 23, pp. 95-108.

Schober, K. U., & Rauntenstrauch, K. (2005). "Experimental investigation on flexural strengthening of timber structures with CFRP". Proceedings of International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures.

Siau, J. (1984). "Transport processes in wood". Springer-Verlag. Berlin Heidelberg, New York, 245.

Simpson, W. T. (1998). "Equilibrium moisture content of wood in outdoor locations in the united states and Worldwide". Madison, USA. USDA. Forest Products Laboratory., Res. Note., FPL-RN-268.

Skaar, C. (1972). "Water in wood". Syracuse University Press, Syracuse, New York. USA, 218.

Skaar, C. (1988). "Wood-water relations". Springer-Verlag. Berlin Heidelberg. New York. USA, 283.

Steffen, A., Johansson, C. J., & Wormuth E. W. (1997). "Study of the relationship between flatwise and edgewise moduli of elasticity of sawn timber as a means to improve mechanical strength grading technology". Holz Als Roh- Und Werkstoff, Vol. 55, pp. 245-253.

Stehn, L., & Björnfot, A. (2002). "Comparison of different ductility measurements for a nailed steel-to-timber connection". Proceedings of the 7Th World Conference on Timber Engineering. WCTE.

Steiger, R., & Fontana, M. (2005). "Bending moments and axial force interacting on solid timber beams". RILEM Materials & Structures, Vol. 38(5), pp. 507.

Subagia, A., Kim, Y., Tijing L. D., Kim, C. S., & Kyong Shon, H. (2014). "Effect of stacking sequence on the flexural properties of hybrid composites reinforced with carbon and basalt fiber". Composites Part B, 58, 251-258.

Tanaka, T., & Divos, F. (2000). "Wood inspection by thermography". 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood.

Theakston, F. H. (1965). "A feasibility study for strengthening timber beams with fiberglass". Canadian Agriculture Engineering, 17-19.

Toratti, T., & Svensson, S. (2000). "Mechano-sorptive experiments perpendicular to grain under tensile and compressive loads". Wood Science Technology, Vol. 34(4), 317.

Toratti, T. (1992). "Creep of timber beams in a variable environment". Helsinki University of Technology, Report no. 31.

Triantafillou, T. (1997). "Shear reinforcement of wood using FRP materials". Journal of Materials in Civil Engineering, 2, 65.

Tucker, J. (1927). "A study of the compressive strength dispersion of material with applications". Journal of the Franklin Institute, Vol. 204, pp. 751-781.

Vignote, S., & Martinez, I. (2006). "Tecnología de la madera". Madrid: Mundi-Prensa.

Wangaard, F., & Granados, L. (1967). "The effect of extractives on water-vapor sorption by wood". Wood Science and Technology, Vol. 1, pp. 253-277.

Weibull, W. (1939). "A statistical theory of the strength of materials". Royal Swedish Institute for Engineering Research, Proceedings, (nº 141), pp. 45.

Wyckhuysen, A., & Maldague, X. (2001). "A study of wood inspection by infrared thermography, part I: Wood pole inspection by infrared thermography". Research in Nondestructive Evaluation, 13.

Yeou-Fong Li, Ming-Jer Tsai, Ting-Fang Wei a, & Wei-Chou Wang. (2014). A study on wood beams strengthened by FRP composite materials. Construction and Building Materials, 62, 118-125.

Yeou-Fong Li, Yao-Ming Xie, & Ming-Jer Tsai. (2009). Enhancement of the flexural performance of retrofitted wood beams using CFRP composite sheets. Construction and Building Materials, (23), 411-422.

Yusof, A., & Saleh, A. (2010). Flexural strengthening of timber beams using glass fiber reinforced polymer. Electronic Journal of Structural Engineering, (10), 45-56.

Zhou, J., & Lucas, J. P. "Hygrothermal effects of epoxy resin. Part II: Variations of glass transition temperature". Polymer, 40, 5513-5522.

NORMATIVA

UNE-EN 338: 2010. Madera estructural. Clases resistentes.

UNE-EN 56.544: 2011. Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas.

UNE-EN 1.912: 2012. Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de calidades visuales y especies.

UNE-EN 1995 -1-1: 2006/A1 (2010). Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación.

UNE-EN 384: 2010. Madera Estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad.

UNE-EN 12.51: 2002. Estructuras de madera. Métodos de ensayo. Ensayo cíclico de uniones realizadas con conectores mecánicos.

UNE-EN 408: 2011+A1. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas.

SIA 265: 2003. Swiss code for timber structures. PO Box. Published by Swiss Society of Engineers and Architects.

ANEXOS

FICHAS DE CARACTERIZACIÓN DE LAS VIGAS OBJETO DEL ESTUDIO

Se adjuntan fichas de definición morfológica y aceptación por la norma UNE EN 56.544 de las vigas objeto del estudio en el Capítulo III, donde se puede analizar las características particulares de cada una de ellas, y una ficha tipo de las vigas utilizadas en el Capítulo IV, donde se pueden observar los valores medios de caracterización. No se considera necesario realizar fichas a todas las vigas del Capítulo IV debido a la poca variación morfológica entre todas ellas, siendo muy homogéneas en cuanto a su caracterización física.

En estas fichas se definen las características físicas de las vigas a través de sus dimensiones, densidad y peso. También se adjunta un croquis con los defectos más significativos que marcará su aceptación o rechazo por la normativa, así como un cuadro de observaciones, en el caso de que deban ser indicadas.

Pieza

B01**Especie:** Pino silvestre

Dimensiones (m)	Largo	1,088	Módulo de Elasticidad Dinámico (Mpa)	Long.	10635,3
	Ancho	0,08		Trans. 1 (ancho)	1811,3
	Alto	0,155		Trans. 2 (canto)	1102,0
Peso (Kg)		6,325	Clase resistente		C-22
Densidad (Kg/m3)		468,824	Clasificación visual según UNE 56.544		Rechazo

Observaciones:

Defectos mas significativos (nudos y fendas)

Nudo	Diam. en mm
1	51
2	26
3	21
4	23
5	25
6	19
7	74
8	31
9	34
10	38

Pieza

B02**Especie:** Pino silvestre

Dimensiones (m)	Largo	1,088	Módulo de Elasticidad Dinámico (Mpa)	Long.	12418,7
	Ancho	0,077		Trans. 1 (ancho)	1823,5
	Alto	0,154		Trans. 2 (canto)	1100,5
Peso (Kg)		6,087	Clase resistente		C-22
Densidad (Kg/m3)		471,805	Clasificación visual según UNE 56.544		Rechazo

Observaciones: Entre los nudos 3 y 5 se puede observar una grieta que une los centros de ambos.

Defectos mas significativos (nudos y fendas)

Nudo	Diam. en mm
1	29
2	34
3	30
4	32
5	80
6	27
7	39
8	27

Pieza

B03**Especie:** Pino silvestre

Dimensiones (m)	Largo	1,089	Módulo de Elasticidad Dinámico (Mpa)	Long.	11089,6
	Ancho	0,079		Trans. 1 (ancho)	1689,3
	Alto	0,155		Trans. 2 (canto)	1252,5
Peso (Kg)		6,367	Clase resistente		C-22
Densidad (Kg/m3)		477,472	Clasificación visual según UNE 56.544		MEG

Observaciones: Presenta alguna bolsa de resina.

Defectos mas significativos (nudos y fendas)

Nudo	Diam. en mm
1	29
2	34
3	30
4	32
5	80
6	27
7	39
8	27

Pieza

B04**Especie:** Pino silvestre

Dimensiones (m)	Largo	1,089	Módulo de Elasticidad Dinámico (Mpa)	Long.	12793,2
	Ancho	0,077		Trans. 1 (ancho)	1636,7
	Alto	0,157		Trans. 2 (canto)	1737,2
Peso (Kg)		6,259	Clase resistente		C-22
Densidad (Kg/m3)		475,430	Clasificación visual según UNE 56.544		MEG

Observaciones: Contiene médula. En la cara derecha tiene una separación de fibras siguiendo la orientación de estas.

Defectos mas significativos (nudos y fendas)

Nudo	Diam. en mm
1	29
2	34
3	30
4	32
5	80
6	27
7	39
8	27

Pieza

B05**Especie:** Pino silvestre

Dimensiones (m)	Largo	1,089	Módulo de Elasticidad Dinámico (Mpa)	Long.	13868,8
	Ancho	0,076		Trans. 1 (ancho)	1908,8
	Alto	0,156		Trans. 2 (canto)	1522,3
Peso (Kg)		6,276	Clase resistente		C-22
Densidad (Kg/m3)		486,090	Clasificación visual según UNE 56.544		MEG

Observaciones: Mucha resina presente en las caras. Contiene médula.

Defectos mas significativos (nudos y fendas)

Pieza

B06**Especie:** Pino silvestre

Dimensiones (m)	Largo	1,089	Módulo de Elasticidad Dinámico (Mpa)	Long.	13318,4
	Ancho	0,080		Trans. 1 (ancho)	1656,6
	Alto	0,156		Trans. 2 (canto)	2378,0
Peso (Kg)		6,821	Clase resistente		C-22
Densidad (Kg/m3)		501,887	Clasificación visual según UNE 56.544		MEG

Observaciones: Contiene médula. **Defectos mas significativos (nudos y fendas)**

Nudo	Diam. en mm
1	23
2	15
3	13
4	14
5	28
6	11
7	22
8	23
9	18
10	31
11	14
12	21
13	18

Pieza

B07**Especie:** Pino silvestre

Dimensiones (m)	Largo	1,089	Módulo de Elasticidad Dinámico (Mpa)	Long.	14106,9
	Ancho	0,080		Trans. 1 (ancho)	1613,4
	Alto	0,156		Trans. 2 (canto)	1726,1
Peso (Kg)		6,658	Clase resistente		C-22
Densidad (Kg/m3)		489,893	Clasificación visual según UNE 56.544		MEG

Observaciones: **Defectos mas significativos (nudos y fendas)**

Pieza

B08**Especie:** Pino silvestre

Dimensiones (m)	Largo	1,088	Módulo de Elasticidad Dinámico (Mpa)	Long.	16697,7
	Ancho	0,079		Trans. 1 (ancho)	2115,6
	Alto	0,155		Trans. 2 (canto)	1838,4
Peso (Kg)		8,593	Clase resistente		C-22
Densidad (Kg/m3)		644,996	Clasificación visual según UNE 56.544		MEG

Observaciones: **Defectos mas significativos (nudos y fendas)**

		Nudo	Diam. en mm
LEFT	UP	1	17
		2	16
		3	15
		4	12
		5	11
		6	12
FRONT (C.I.)			
DOWN			
BACK			
RIGHT			

Pieza

B09**Especie:** Pino silvestre

Dimensiones (m)	Largo	1,089	Módulo de Elasticidad Dinámico (Mpa)	Long.	16372,5
	Ancho	0,078		Trans. 1 (ancho)	1607,6
	Alto	0,155		Trans. 2 (canto)	1850,4
Peso (Kg)		7,143	Clase resistente		C-22
Densidad (Kg/m3)		542,533	Clasificación visual según UNE 56.544		MEG

Observaciones: Contiene médula.

Defectos mas significativos (nudos y fendas)

Pieza

B10**Especie:** Pino silvestre

Dimensiones (m)	Largo	1,089	Módulo de Elasticidad Dinámico (Mpa)	Long.	11924,0
	Ancho	0,078		Trans. 1 (ancho)	2127,4
	Alto	0,156		Trans. 2 (canto)	2211,4
Peso (Kg)		6,785	Clase resistente		C-22
Densidad (Kg/m3)		512,039	Clasificación visual según UNE 56.544		MEG

Observaciones: Médula en el medio de la pieza. No se diferencia la cara interior.

Defectos mas significativos (nudos y fendas)

Pieza

B11**Especie:** Pino silvestre

Dimensiones (m)	Largo	1,091	Módulo de Elasticidad Dinámico (Mpa)	Long.	14782,9
	Ancho	0,078		Trans. 1 (ancho)	1336,2
	Alto	0,157		Trans. 2 (canto)	1355,4
Peso (Kg)		6,200	Clase resistente		C-22
Densidad (Kg/m3)		464,058	Clasificación visual según UNE 56.544		MEG

Observaciones: Nudos vacíos.

Defectos mas significativos (nudos y fendas)

Nudo	Diam. en mm
1	10
2	20

Pieza

B12**Especie:** Pino silvestre

Dimensiones (m)	Largo	1,09	Módulo de Elasticidad Dinámico (Mpa)	Long.	15264,9
	Ancho	0,079		Trans. 1 (ancho)	2663,2
	Alto	0,155		Trans. 2 (canto)	2355,3
Peso (Kg)		7,505	Clase resistente		C-22
Densidad (Kg/m3)		562,297	Clasificación visual según UNE 56.544		MEG

Observaciones: **Defectos mas significativos (nudos y fendas)**

Nudo	Diam. en mm
1	16
2	18
3	11
4	23
5	15
6	38
7	24
8	21
9	19

Pieza

B13**Especie:** Pino silvestre

Dimensiones (m)	Largo	1,087	Módulo de Elasticidad Dinámico (Mpa)	Long.	14734,9
	Ancho	0,078		Trans. 1 (ancho)	1752,2
	Alto	0,154		Trans. 2 (canto)	1763,0
Peso (Kg)		8,425	Clase resistente		C-22
Densidad (Kg/m3)		645,246	Clasificación visual según UNE 56.544		Rechazo

Observaciones:

Defectos mas significativos (nudos y fendas)

Nudo	Diam. en mm
1	43
2	32
3	15
4	27
5	43
6	12
7	37
8	62

Pieza

B14**Especie:** Pino silvestre

Dimensiones (m)	Largo	1,091	Módulo de Elasticidad Dinámico (Mpa)	Long.	20391,8
	Ancho	0,082		Trans. 1 (ancho)	1979,7
	Alto	0,155		Trans. 2 (canto)	2326,7
Peso (Kg)		7,976	Clase resistente		C-22
Densidad (Kg/m3)		575,195	Clasificación visual según UNE 56.544		MEG

Observaciones:

Defectos mas significativos (nudos y fendas)

Nudo	Diam. en mm
1	23
2	27
3	25
4	30

Pieza

B15**Especie:** Pino silvestre

Dimensiones (m)	Largo	1,089	Módulo de Elasticidad Dinámico (Mpa)	Long.	14228,3
	Ancho	0,079		Trans. 1 (ancho)	2213,6
	Alto	0,155		Trans. 2 (canto)	1911,5
Peso (Kg)		7,492	Clase resistente		C-22
Densidad (Kg/m3)		561,838	Clasificación visual según UNE 56.544		Rechazo

Observaciones:

Defectos mas significativos (nudos y fendas)

Nudo	Diam. en mm
1	44
2	21
3	37
4	20
5	33
6	25
7	54
8	40

Pieza

B17**Especie:** Pino silvestre

Dimensiones (m)	Largo	1,089	Módulo de Elasticidad Dinámico (Mpa)	Long.	11168,4
	Ancho	0,077		Trans. 1 (ancho)	1981,3
	Alto	0,155		Trans. 2 (canto)	1066,8
Peso (Kg)		5,26	Clase resistente		C-22
Densidad (Kg/m3)		404,702	Clasificación visual según UNE 56.544		Rechazo

Observaciones:

Defectos mas significativos (nudos y fendas)

Nudo	Diam. en mm
1	13
2	18
3	55
4	15
5	54

Pieza

B18**Especie:** Pino silvestre

Dimensiones (m)	Largo	1,089	Módulo de Elasticidad Dinámico (Mpa)	Long.	12061,1
	Ancho	0,08		Trans. 1 (ancho)	1789,7
	Alto	0,157		Trans. 2 (canto)	2420,5
Peso (Kg)		6,619	Clase resistente		C-22
Densidad (Kg/m3)		483,921	Clasificación visual según UNE 56.544		MEG

Observaciones: La pieza contiene la medula del tronco.

Defectos mas significativos (nudos y fendas)

Nudo	Diam. en mm
1	16
2	15
3	26
4	33
5	35
6	43
7	32
8	21
9	27
10	22
11	30
12	32
13	22

Pieza

B19**Especie:** Pino silvestre

Dimensiones (m)	Largo	1,09	Módulo de Elasticidad Dinámico (Mpa)	Long.	10338,9
	Ancho	0,078		Trans. 1 (ancho)	2864,1
	Alto	0,153		Trans. 2 (canto)	1940,1
Peso (Kg)		8,248	Clase resistente		C-22
Densidad (Kg/m3)		634,068	Clasificación visual según UNE 56.544		MEG

Observaciones:

Defectos mas significativos (nudos y fendas)

Nudo	Diam. en mm
1	17
2	14
3	24
4	13
5	17
6	18
7	30

Pieza

B20**Especie:** Pino silvestre

Dimensiones (m)	Largo	1,087	Módulo de Elasticidad Dinámico (Mpa)	Long.	13679,0
	Ancho	0,079		Trans. 1 (ancho)	2174,6
	Alto	0,154		Trans. 2 (canto)	1514,8
Peso (Kg)		6,842	Clase resistente		C-22
Densidad (Kg/m3)		517,375	Clasificación visual según UNE 56.544		MEG

Observaciones: La pieza posee una bolsa de resina en la cara posterior y alguna gema de pequeño tamaño.

Defectos mas significativos (nudos y fendas)

Pieza

B21**Especie:** Pino silvestre

Dimensiones (m)	Largo	1,09	Módulo de Elasticidad Dinámico (Mpa)	Long.	12034,0
	Ancho	0,08		Trans. 1 (ancho)	2119,7
	Alto	0,155		Trans. 2 (canto)	1300,1
Peso (Kg)		6,624	Clase resistente		C-22
Densidad (Kg/m3)		490,086	Clasificación visual según UNE 56.544		MEG

Observaciones: **Defectos mas significativos (nudos y fendas)**

Nudo	Diam. en mm
1	46
2	26
3	13
4	21

Pieza

B22**Especie:** Pino silvestre

Dimensiones (m)	Largo	1,090	Módulo de Elasticidad Dinámico (Mpa)	Long.	15644,8
	Ancho	0,080		Trans. 1 (ancho)	1677,4
	Alto	0,154		Trans. 2 (canto)	2332,8
Peso (Kg)		6,087	Clase resistente		C-22
Densidad (Kg/m3)		453,280	Clasificación visual según UNE 56.544		Rechazo

Observaciones: En la pieza se pueden observar galerías de xilófagos en la parte baja de la misma. No se observa presencia de estos ni evolución de su galería durante el proceso experimental

Defectos mas significativos (nudos y fendas)

UP

LEFT

FRONT (C.I.)

RIGHT

DOWN

BACK

Nudo	Diam. en mm
1	21
2	30
3	25
4	13

Piezas

B200

Especie: Pino silvestre

Dimensiones (m)	Largo	1,100	Medición ultrasonido (Mpa)	Long.	13307,65
	Ancho	0,046		Trans. 1 (ancho)	2067,29
	Alto	0,100		Trans. 2 (canto)	1338,91
Peso (Kg)		2,576	Clase resistente		C-27
Densidad (Kg/m3)		509,200	Clasificación visual según UNE 56.545		Aceptada

Observaciones: Se trata de una madera de Pino Silvestre, muy homogénea, de calidad 1ª y libre de defectos, procedente de Soria (España).

Parte superior

Cara Frontal

Cara Inferior

Cara trasera