



**UNIVERSIDAD  
DE GRANADA**

**SISTEMA DÚO DE MATERIAL  
COMPUESTO DE FIBRAS Y CHOPO  
PARA LA REHABILITACIÓN Y  
REFUERZO DE VIGAS DE MADERA**

**MÁSTER EN REHABILITACIÓN ARQUITECTÓNICA (MARA)**

Itziar Álvarez Arraibi  
**Trabajo Final de Máster**  
Febrero 2020

Tutores: Antolino Gallego Molina y Elisabet Suárez Vargas



D<sup>a</sup> Elisabet Suárez Vargas, Investigadora del Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Granada y D. Antolino Gallego Molina, Profesor Titular del Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Granada, como tutores del Trabajo Fin de Máster de D<sup>a</sup> Itziar Álvarez Arraibi.

Informan:

Que el presente trabajo titulado:

“Sistema dúo de material compuesto de fibras y chopo para la rehabilitación y refuerzo de vigas de madera”,

ha sido realizado y redactado por la mencionada alumna bajo nuestra dirección, y con esta fecha autorizamos a su presentación.

Granada, a 14 de febrero de 2020

Fdo.

Elisabet Suárez Vargas

Antolino Gallego Molina



## AGRADECIMIENTOS

A mis tutores D<sup>a</sup> Elisabet Suárez Vargas y Antolino Gallego Molina, sin ellos la elaboración de este trabajo no habría sido posible, por sus consejos, paciencia y apoyo durante el proceso.

A Francisco Rescalvo por su labor en la elaboración de las probetas y su ayuda en la preparación y el desarrollo de los ensayos. A Francesco, Javier y Alfonso por su colaboración práctica. Sin ellos esto no habría sido posible. A la empresa Maderas Pinosoria S.L. (Casarejos, Soria, España) por su contribución con todo el material de pino utilizado en los ensayos. Al resto de compañeros de ADIME por su colaboración y ayuda durante el proceso.

A mis padres por su apoyo incondicional, paciencia y cariño. A mis hermanos y amigos por apoyarme y motivarme a seguir. En especial a Antonio y a Víctor, muchas gracias. Sin vosotros esto no habría sido posible.



## RESUMEN

La madera aserrada constituye uno de los materiales más comunes en las edificaciones antiguas. En rehabilitación son numerosas las ocasiones que nos encontramos estructuras de madera que por su estado de conservación necesitan ser reforzadas. En la mayoría de los casos existe una tendencia a su sustitución. En los casos en los que se decide mantener la estructura, las soluciones frecuentes son reforzarlas mediante elementos metálicos.

En este contexto, este trabajo propone avanzar en los conocimientos del comportamiento estructural de los refuerzos con materiales compuestos de fibras (FRP) para elementos de madera, como una solución para el reaprovechamiento y posible reutilización de la madera procedente de estructuras antiguas en el contexto de un modelo de economía circular.

### **PALABRAS CLAVE:**

Pino silvestre, caracterización mecánica, FRP, rehabilitación, vigas reforzadas, forjado de madera.

## SUMMARY

Timber is one of the most common materials used in construction, especially in old buildings. In rehabilitation works there are many occasions when these structures need to be reinforced. In the majority of cases there is a tendency to substitute those structures for others: metallic, concrete... In the cases that the structures are reinforced, the common reinforcement solutions are steel reinforcement systems.

In this context, the object of this Project is to improve knowledge of the structural behaviour of fiber reinforced polymer (FRP) as a solution for wood reinforcement. This system would allow the reutilisation of old beams from old buildings structures therefore supporting the circular economy.

### **KEY WORDS:**

Sylvester pine, mechanical behaviour, FRP, building rehabilitation, reinforced beams, timber structures.



## INDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Motivación .....	1
1.2	Objetivos de este TFM .....	2
1.3	Estructura y alcance del TFM .....	3
2	ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN DE LA MADERA DE PINO .....	5
2.1	Materiales y métodos .....	5
2.1.1	Descripción del material .....	5
2.1.2	Clasificación visual y asignación de clases resistentes.....	5
2.1.3	Ensayo de flexión a cuatro puntos.....	8
2.1.4	Asignación de clases resistentes según el ensayo a flexión.....	9
2.2	Resultados.....	12
2.2.1	Propiedades mecánicas.....	12
2.2.2	Asignación de clases resistentes .....	16
2.2.3	Clasificación de las roturas.....	17
3	VIGAS DE PINO REFORZADAS CON FRP E INJERTOS DE CHOPO .....	22
3.1	Materiales y métodos .....	22
3.1.1	Descripción de los materiales y probetas de ensayo.....	22
3.1.2	Madera de vigas base de pino .....	23
3.1.3	Madera de chocho.....	24
3.1.4	Materiales de refuerzo: resinas + fibras .....	24
3.1.5	Método de elaboración de las probetas .....	26
3.2	Métodos de ensayo.....	33
3.2.1	Modelo analítico .....	33
3.2.2	Ensayo de flexión a cuatro puntos.....	33
3.2.3	Determinación de la densidad .....	35
3.3	Resultados.....	36
3.3.1	Caracterización mecánica de las vigas reforzadas con FRP .....	36
3.3.2	Clasificación de las roturas.....	41
4	PROPUESTA DE APLICACIÓN EN OBRA .....	47
4.1	Antecedentes e información previa.....	47
4.2	Descripción del estado actual del edificio .....	53
4.3	Descripción de la estructura de madera.....	55

4.3.1	Patologías encontradas en los elementos de madera .....	55
4.3.2	Ensayos realizados en la madera .....	59
4.3.3	Resultados obtenidos de los ensayos realizados en forjado de planta 1ª.....	60
4.4	Caso práctico de recuperación y refuerzo de vigas de madera .....	64
4.4.1	Diseño del refuerzo y ejecución.....	67
5	CONCLUSIONES .....	73
5.1	Conclusiones del estudio de caracterización de la madera de pino .....	73
5.2	Conclusiones del estudio de caracterización de las vigas reforzadas.....	73
5.3	Conclusiones del caso práctico de aplicación en obra.....	73
6	BIBLIOGRAFÍA.....	74
	ANEXO 1 .....	75

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Diagrama de flujo. Propuesta de intervención en la reutilización de vigas.....	2
<b>Figura 2.</b> Imagen de las vigas antes del ensayo. ....	5
<b>Figura 3.</b> Sistema de ejes de coordenadas. ....	6
<b>Figura 4.</b> Esquema del ensayo de flexión a 4 puntos. Distancias en mm. ....	8
<b>Figura 5.</b> Imagen de ensayo de flexión .....	9
<b>Figura 6.</b> Esquema de la posición de las galgas en la sección central de la viga. ....	9
<b>Figura 7.</b> Denominación de las dimensiones de las vigas. ....	10
<b>Figura 8.</b> Curvas de deformación-tiempo registradas por las galgas extensométricas de cada viga ...	13
<b>Figura 9.</b> Efecto de torsión en la distribución de la fuerza aplicada en una sección .....	13
<b>Figura 10.</b> Curvas tensión-tiempo de las 10 vigas ensayadas.....	14
<b>Figura 11.</b> Curvas tensión-tiempo de las 8 vigas que se consideran en el análisis.....	14
<b>Figura 12.</b> Curvas tensión-deformación de las 10 vigas ensayadas.....	15
<b>Figura 13.</b> Curvas tensión-deformación de las 8 vigas que se consideran en el análisis.....	15
<b>Figura 14.</b> Clasificación de los distintos tipos de fallo en una viga de madera sometida a flexión. [6]	17
<b>Figura 15.</b> Esquema de viga (RB-P). Cotas en mm. ....	27
<b>Figura 16.</b> Imágenes del proceso de fabricación de las vigas (RB_P). Cotas en mm. ....	27
<b>Figura 17.</b> Esquema vigas reforzadas con FRP + injerto de chopo. ....	28
<b>Figura 18.</b> Imágenes del proceso de elaboración de la resina bicomponente. ....	29
<b>Figura 19.</b> Imágenes del proceso de elaboración de las vigas con refuerzo de laminado + injerto de chopo (RB_LC_P).....	30
<b>Figura 20.</b> Imágenes del proceso de elaboración de las vigas reforzadas con tejido + injerto de chopo (RB_FC_P y RB_FB_P).....	30
<b>Figura 21.</b> Imágenes del proceso de prensado. ....	31
<b>Figura 22.</b> Imagen de las probetas después del prensado. ....	32
<b>Figura 23.</b> Esquema del ensayo a flexión a 4 puntos. Cotas en mm. ....	34
<b>Figura 24.</b> Esquema de la posición de las galgas. ....	34
<b>Figura 25.</b> Imagen general del ensayo. ....	35
<b>Figura 26.</b> Curvas deformación-tiempo medidas por las 6 galgas extensométricas colocadas en cada viga. ....	37
<b>Figura 27.</b> Izq.: Curvas de tensión-tiempo. Dcha.: Curvas tensión-deformación. ....	38
<b>Figura 28.</b> Comparación de los valores medios de MOR para cada tipología de viga.....	40
<b>Figura 29.</b> Izq. Vista general de la localización del edificio. Fuente: Google Maps. Dcha. Situación parcelaria de los inmuebles 7 y 9 de la calle Mosquera. Fuente: Sede electrónica del catastro. ....	47
<b>Figura 30.</b> Fotografía del interior del edificio. ....	48
<b>Figura 31.</b> Alzado Sur. ....	49
<b>Figura 32.</b> Alzado Oeste. ....	49
<b>Figura 33.</b> Planta baja. ....	50
<b>Figura 34.</b> Planta primera. ....	50
<b>Figura 35.</b> Planta segunda.....	51
<b>Figura 36.</b> Planta tercera.....	51
<b>Figura 37.</b> Planta casetón.....	52
<b>Figura 38.</b> Plano cubierta. ....	52
<b>Figura 39.</b> Fachada principal del edificio. ....	53
<b>Figura 40.</b> Fisuras y grietas en muros de carga por asientos en cimentación. ....	54

<b>Figura 41.</b> Rotura y fisuración de los muros de carga debido a la intervención en edificio medianero. ....	54
<b>Figura 42.</b> Rotura de muros de carga y pilastra de ladrillo provocada por la rehabilitación del edificio colindante. ....	54
<b>Figura 43.</b> Pudrición y ataque por hongos. ....	56
<b>Figura 44.</b> Forjado muy dañado por pudrición: pérdida total de la capacidad portante de las vigas. .	56
<b>Figura 45.</b> Estado general de los cargaderos. Ataque por insectos y pudrición en los apoyos. ....	57
<b>Figura 46.</b> Pudrición y ataque por insectos en pilares y forjados de madera.....	57
<b>Figura 47.</b> Estado de la cubierta de madera. ....	58
<b>Figura 48.</b> Plano de forjado de planta 1ª indicando las zonas de realización de la inspección visual. .	61
<b>Figura 49.</b> Plano de forjado de planta 1ª indicando zonas inspeccionadas. ....	63
<b>Figura 50.</b> Imágenes de la zona 2 del forjado de planta 1ª. ....	65
<b>Figura 51.</b> Imagen de la rotura del muro medianero. forjado zona 2. ....	65
<b>Figura 52.</b> Estado reformado planta baja. ....	66
<b>Figura 53.</b> Dimensiones de zona 3 de forjado de planta 1ª.....	68
<b>Figura 54.</b> Plano de vigas de zona 2. Forjado de planta 1ª.....	68
<b>Figura 55.</b> Detalle de ubicación de vigas en zona 3. Forjado de planta 1ª. ....	70
<b>Figura 56.</b> Detalle de viga reforzada RRB_P_FC.....	71

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Especificaciones para la clasificación de piezas de sección rectangular con anchura $b \leq 70$ mm. (Norma UNE-EN 56544:2011).....	7
<b>Tabla 2.</b> Valores característicos para clases resistentes de madera de coníferas. Según norma UNE – EN 338:2016.....	10
<b>Tabla 3.</b> Dimensiones, peso y densidad de las vigas del ensayo de caracterización.....	11
<b>Tabla 4.</b> Resultados de la caracterización de las 10 vigas.....	16
<b>Tabla 5.</b> Clases resistentes asignadas a las 10 vigas por las distintas metodologías.....	16
<b>Tabla 6.</b> Matriz de confusión/acierto entre la clase resistente asignada por ensayo a flexión ( $MOE_{est}$ ) y por clasificación visual. CR significa Clase Resistente. ....	17
<b>Tabla 7.</b> Clasificación de los tipos de fallo de las 10 vigas ensayadas. ....	18
<b>Tabla 8.</b> Nomenclatura vigas reforzadas. ....	23
<b>Tabla 9.</b> Características mecánicas de las 12 vigas de base de pino, incluyendo la clase resistente. ...	23
<b>Tabla 10.</b> Características mecánicas de los injertos de chopo usados en cada tipología de viga. ....	24
<b>Tabla 11.</b> Características de los tejidos de FRP usados como refuerzo.....	25
<b>Tabla 12.</b> Características del laminado de carbono usado como refuerzo. ....	25
<b>Tabla 13.</b> Características y propiedades de los adhesivos utilizados. ....	26
<b>Tabla 14.</b> Resumen del estado de las probetas después del prensado.....	32
<b>Tabla 15.</b> Dimensiones, peso y densidad de las vigas reforzadas. ....	35
<b>Tabla 16.</b> Resultados mecánicos de las 12 vigas ensayadas.....	40
<b>Tabla 17.</b> Clasificación de los tipos de fallo de las vigas ensayadas. ....	42
<b>Tabla 18.</b> Resultados ensayo de determinación de la humedad.....	62
<b>Tabla 19.</b> Resultado ensayo de ultrasonidos.....	62
<b>Tabla 20.</b> Resultados ensayo de penetración.....	63
<b>Tabla 21.</b> Dimensiones de las vigas de la zona 2. Forjado de plana 1ª.....	69
<b>Tabla 22.</b> Longitud necesaria de las vigas reforzadas RRB_S_FC.....	71

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Motivación

La madera constituye uno de los materiales de construcción más utilizados en las edificaciones. Hasta finales del siglo XIX, la madera ha sido el material por excelencia utilizado para resistir los tres esfuerzos básicos (compresión, tracción y flexión). A partir de finales del siglo XIX la madera fue siendo desplazada por otros materiales estructurales como el acero y el hormigón [1].

Uno de los principales problemas que se encuentran en las estructuras de madera es que debido a su naturaleza orgánica algunos procesos ambientales promueven su deterioro. Generalmente, los fallos ocurridos en las estructuras de madera suelen estar relacionados con la presencia de humedad. Es por ello que, en la rehabilitación de edificios con estructura de madera, son numerosas las ocasiones en las que aparece la necesidad de sustituir o reforzar gran parte de la estructura.

Existe una cierta desconfianza a la utilización de estructuras de madera en gran medida promovida por tres factores [1]:

- Menor capacidad mecánica
- Aparente falta de durabilidad
- Falta de homogeneidad, dificultad de control de calidad.

En la actualidad se tiende a la realización de estructuras de acero u hormigón. Hay que tener en cuenta que las estructuras de hormigón y acero también pueden sufrir graves deterioros, como la corrosión o la carbonatación en el caso del hormigón. Como dice Matauco [2], hace unos años las reparaciones de elementos estructurales de madera se realizaban directamente mediante la sustitución por elementos de acero u hormigón, fundamentalmente por desconfianza en la capacidad resistente de la madera. En la actualidad sabemos que la sustitución de elementos estructurales de madera por acero u hormigón no es la mejor alternativa, ya que directa o indirectamente esos materiales pueden causar problemas tras la intervención o, simplemente, no ser tan duraderos como lo pudo haber sido la madera. [2]

Modificar la tipología de la estructura puede suponer un cambio en el comportamiento estructural del conjunto. El nuevo diseño estructural puede provocar una redistribución de las cargas en zonas donde la edificación no estaba preparada para soportarlas. También las nuevas soluciones suelen llevar un añadido del peso total de la estructura, lo que puede conducir a asentamientos estructurales. [2].

Existen ejemplos que confirman la anterior afirmación como es el caso de las cubiertas de la catedral de Burgos que tras la guerra civil comenzaron a ser sustituidas por estructuras de acero. La intervención, debido a la falta de dinero, fue solo parcial. 40 años después de la intervención, fue necesario reparar las estructuras metálicas mientras que la dañada estructura de madera seguía cumpliendo su función. [2]

Desde la antigüedad *“las ruinas de las civilizaciones anteriores han servido de gran cantera suministradora de materia prima para los nuevos ocupantes”* [3]. En la actualidad la reutilización y aprovechamiento de los materiales de la obra es muy limitado. España es uno de los países con mayor índice de generación de residuos de construcción y demolición (RCDs) de la Unión Europea, sin embargo, presenta un nivel de recuperación reducido (en torno al 17%). [4]

Con estos precedentes, este trabajo plantea la reutilización de parte de las vigas de madera de un edificio con patologías. Para ello se plantea el desmontaje selectivo y posterior refuerzo con materiales compuestos FRP e injertos de madera, de esta forma se pretende el aprovechamiento de las piezas que estén en buen estado para utilizar las vigas reforzadas resultantes en obra, reduciendo la generación de residuos y promoviendo la sostenibilidad y aprovechamiento de los recursos naturales, en lo que genéricamente se conoce como **economía circular** y se muestra en la **Figura 1**.



*Figura 1. Diagrama de flujo. Propuesta de intervención en la reutilización de vigas.*

## 1.2 Objetivos de este TFM

En este contexto, este trabajo plantea realizar un estudio (con datos experimentales derivados de ensayos a flexión) del comportamiento mecánico para distintos sistemas de refuerzo estructural con materiales polímeros reforzados con fibras de carbono (CFRP) colocados en vigas de madera sometidas a flexión. En concreto, se plantean 5 objetivos:

1. Establecer procedimientos y métodos de aplicación para la colocación de refuerzos FRP en vigas de madera.
2. Contribuir al conocimiento del comportamiento estructural de la madera del pino silvestre (*pinus sylvestris L.*).
3. Realizar un análisis comparativo del comportamiento mecánico que ofrecen distintos refuerzos FRP en vigas de madera de pino.
4. Evaluar la mejora en las propiedades mecánicas aportada por los injertos de chopo.
5. Valorar la aplicación de estos sistemas para el refuerzo en vigas de madera procedentes de un edificio con patologías y así promover su aprovechamiento y reutilización.

### 1.3 Estructura y alcance del TFM

En este trabajo se realiza un estudio del comportamiento mecánico de vigas de madera de pino silvestre, reforzadas mediante FRP para valorar este sistema de aplicación como una posible alternativa de refuerzo para la reutilización de elementos de madera. Los refuerzos FRP ofrecen numerosas ventajas como, por ejemplo: bajo peso, facilidad de aplicación, alta resistencia, gran resistencia a la corrosión y facilidad de adaptarse a la forma del elemento.

Como alternativa al impacto visual producido por estos refuerzos, en este trabajo se propone el uso de láminas de chopo para cubrir el refuerzo y así disminuir el impacto visual del mismo. Se ha elegido el chopo para poner en valor el uso de una madera local de bajo coste, gran homogeneidad, baja densidad y moderado/bajo comportamiento estructural con escaso número de nudos, procedente de bosques plantados, y muy abundante en la provincia de Granada.

Como parte de este trabajo, se ha realizado un “estudio de caracterización” perteneciente al mismo lote de madera de pino utilizada como base en las vigas reforzadas ensayadas.

En este estudio se han elaborado cuatro configuraciones de probeta. Cada una de ellas viene descrita por una nomenclatura seguida de un número, 1, 2 y 3, que indica el número de viga. La nomenclatura elegida viene de su descripción en inglés:

**RB-P-FB:** Vigas reforzadas con tejido de basalto con injerto de chopo (*Beam-Poplar- Fabric of Basalt*)

**RB-P-FC:** Vigas reforzadas con tejido de carbono con injerto de chopo (*Reinforced Beam-Poplar- Fabric of Carbon*)

**RB-P-LC:** Vigas reforzadas con laminado de carbono con injerto de chopo (*Reinforced Beam-Poplar- Laminade of Carbon*)

**RB-P:** Vigas reforzadas solo con injerto de chopo para utilizarlas de probetas de control para comparar la mejora que producían los FRP (*Reinforced Beam –Poplar*)

Aunque existen muchos autores que han estudiado el uso de FRP para reforzar estructuras de madera, su puesta en práctica es muy escasa debido principalmente a 3 razones:

- Su impacto visual
- Su alto precio, sobre todo en el caso del carbono
- Su elevado impacto ambiental comparado con la madera
- La falta de datos técnicos que avalen su utilización.

Además del presente Capítulo de Introducción, este trabajo se estructura en otros cuatro capítulos.

En el Capítulo 2 se recogen las características principales de la madera de pino utilizada en el ensayo, así como los resultados obtenidos de la caracterización de las vigas ensayadas.

En el Capítulo 3 se describen los materiales utilizados y proceso de elaboración de las distintas disposiciones de vigas reforzadas con materiales compuestos FRP. También se incluyen los resultados obtenidos de los ensayos realizados.

En el Capítulo 4 se expone una propuesta de utilización de estos sistemas de refuerzo para un caso particular de rehabilitación de un edificio.

En el Capítulo 5 se presentan las conclusiones obtenidas de este trabajo fin de Máster.

## 2 ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN DE LA MADERA DE PINO

En este capítulo se exponen los resultados del estudio de caracterización mecánica realizado a 10 vigas procedentes del mismo lote de madera que las bases utilizadas en las vigas reforzadas objeto de este estudio. Para esta caracterización se han realizado ensayos destructivos (ensayos de flexión a cuatro puntos) y no destructivos (clasificación visual). En este capítulo también se incluye una clasificación de los modos de fallo de las probetas tras el ensayo.

### 2.1 Materiales y métodos

#### 2.1.1 Descripción del material

La madera de pino utilizada en los ensayos pertenece a la especie pino silvestre, marca Pino Soria. Toda la madera de pino utilizada en estos ensayos ha sido donada por la compañía Maderas Pinosoria S.L. (Casarejos, Soria, España). Las vigas se numeraron marcando en cada una de ellas CH\_S seguido de un numeral del uno al diez. Esta denominación proviene del inglés (*CH-characterization S-Sylvestris*).



*Figura 2. Imagen de las vigas antes del ensayo.*

La madera fue suministrada en piezas de dimensiones  $140 \times 80 \times 1260 \text{ mm}^3$ . Una vez en el laboratorio se cepilló hasta darle las dimensiones requeridas para los ensayos. En el estudio de caracterización se utilizaron 10 vigas seleccionadas de manera aleatoria con dimensiones:  $120 \times 60 \times 1240 \text{ mm}^3$  (**Figura 2**).

#### 2.1.2 Clasificación visual y asignación de clases resistentes

Se ha llevado a cabo una clasificación visual de la madera de pino para conocer las características y singularidades de las piezas antes de someterlas a los ensayos de caracterización. Para dicha clasificación se siguieron los procedimientos indicados en la norma UNE-EN 56544:2011. *Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural para madera de coníferas*. Dentro del campo de aplicación de esta norma se encuentra el pino silvestre, especie utilizada en este estudio.

La norma establece dos calidades admisibles para piezas con grosor menor o igual a 70 mm, que es el caso de nuestras piezas; por lo tanto, las calidades serán ME-1, ME-2 o rechazo. En el Anexo 1 de este trabajo se encuentran las fichas de clasificación visual de las 10 vigas.

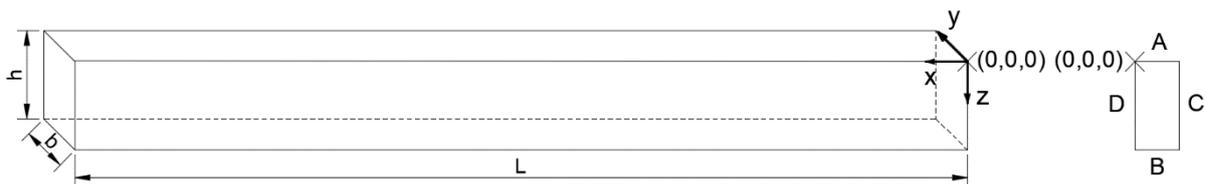
Para la clasificación de la madera se seguirán los procedimientos marcados por la norma UNE-EN 56544:2011 y que se especifican a continuación.

### 2.1.2.1 Criterios de medición de los defectos más significativos encontrados en las vigas

Se estableció un sistema de ejes cartesianos ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) a partir del cual se pudo referenciar la posición de los defectos más significativos de la viga. En la **Figura 3** se detalla la colocación del eje de coordenadas, así como, la situación de cada dimensión de la viga.

Para la asignación del sistema de coordenadas se siguieron los siguientes criterios:

- Se eligió como el centro del eje de coordenadas el vértice más regular.
- Se eligió intentando evitar o minimizar el número de nudos en la cara B, principalmente en el centro del vano.
- Se eligió la posición de las piezas evitando la existencia de nudos en puntos que coincidiesen con los lugares de apoyo del ensayo a flexión a 4 puntos.



**Figura 3.** Sistema de ejes de coordenadas.

Una vez asignado el sistema de ejes de coordenadas según la posición de la pieza, se denominan las caras A, B, C y D. La cara que contiene al lado A se denominó cara frontal, la opuesta que contiene al lado B cara posterior, la cara que contiene al lado C se denominó cara superior y la opuesta conteniendo al lado D cara inferior.

Para la clasificación visual se han tenido en cuenta los criterios de calidad recogidos en la **Tabla 1**, extraída de la norma UNE-EN 56544:2011, que indica los criterios para las vigas con un ancho inferior a 70 mm.

**Tabla 1. Especificaciones para la clasificación de piezas de sección rectangular con anchura  $b \leq 70$  mm. (Norma UNE-EN 56544:2011)**

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

De esta clasificación visual se obtiene una calidad de la madera (ME-1, ME-2 y rechazo). Una vez conocida la calidad de la madera, se recurre a la norma UNE-EN 1912:2012/AC: 2013 *Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de calidades visuales y especies* [5] donde se asigna una clase resistente a la madera según el país de procedencia. A las vigas de pino silvestre de origen español se le asignan las clases:

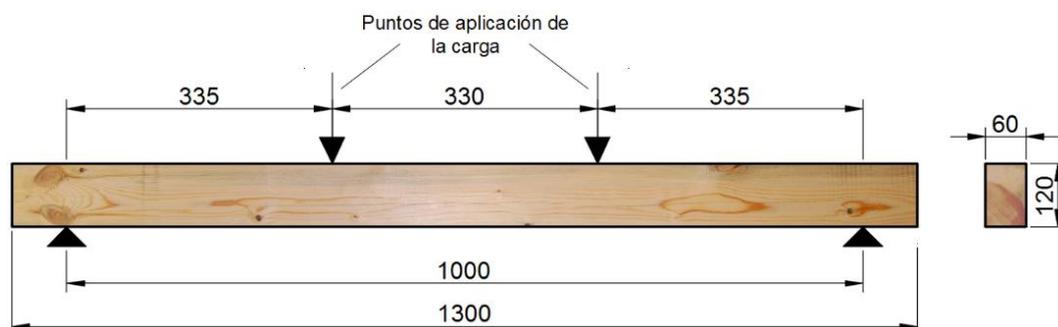
- C27 a las vigas de calidad ME-1.
- C18 a las vigas de calidad ME-2.

### 2.1.3 Ensayo de flexión a cuatro puntos

Las 10 probetas se ensayaron siguiendo la misma metodología. Se realizaron ensayos de flexión a cuatro puntos, siguiendo una metodología análoga a la que se propone en la norma UNE-EN 408:2011+A1:201 *Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas*. La **Figura 4** representa un esquema del ensayo realizado. Entre la probeta y los apoyos se colocaron piezas de acero recubiertas con protectores de caucho con objeto de reducir el aplastamiento de la madera en esas zonas. La relación entre canto y luz entre apoyos se estableció en 1000 mm por tres motivos:

- Limitaciones en la luz máxima de la máquina de ensayo durante el diseño del mismo;
- Interés por la influencia de los defectos en la resistencia mecánica de la pieza, estableciendo por lo tanto un canto adecuado para ello;
- Interés por el aporte real de madera con presencia de defectos reforzada. Con la reducción de sección en madera aserrada, se eliminan defectos, lo que conlleva una resistencia mecánica mayor.

Para la realización de los ensayos se utilizó una prensa eléctrica modelo S-110 de la empresa CONTROLS S.A. que tiene una capacidad de carga máxima de 110 kN y un límite de desplazamiento de 650 mm. La prensa estaba conectada a un ordenador que registraba los datos de fuerza y desplazamiento con una frecuencia de 1 Hz a través del software PA/MPC-2, de ICC S.A. Para el ensayo se estableció la velocidad de desplazamiento en 3.8 mm/min. La **Figura 5** muestra la imagen de una de las vigas durante el ensayo a flexión.

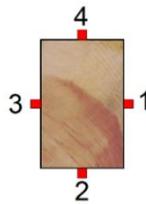


**Figura 4.** Esquema del ensayo de flexión a 4 puntos. Distancias en mm.



*Figura 5. Imagen de ensayo de flexión*

Para obtener los datos de las deformaciones sufridas por las vigas durante los ensayos se colocaron 4 galgas extensiométricas modelo K-CLY4-10/120 sobre la sección central de la viga, como se muestra en la **Figura 6**. Los valores obtenidos de la galga 2, situada en la cara inferior, permiten obtener el módulo elástico a tracción de la probeta, la galga 4, situada en la cara superior, el módulo elástico a compresión y las galgas laterales 1 y 3 permiten obtener la posición de la fibra neutra durante el ensayo.



*Figura 6. Esquema de la posición de las galgas en la sección central de la viga.*

Con los datos obtenidos de los ensayos se calcularon:

- El MOR (tensión máxima a flexión).
- El  $MOE_{est}$  (módulo de elasticidad a flexión) estático obtenido como la pendiente de la curva tensión-deformación entre el 20% y el 50% del MOR. Para ello, se ha considerado la deformación a tracción (galga 2, es decir, la colocada en la cara de tracciones).

#### 2.1.4 Asignación de clases resistentes según el ensayo a flexión

Para la asignación de clases resistentes se han seguido los criterios indicados en la norma UNE-EN 338:2016 *Madera estructural, Clases resistentes*. La norma establece un sistema de clases resistentes según los distintos valores característicos de las propiedades de las vigas. La norma recoge una clasificación cuando se disponen de datos de resistencia a flexión de canto. En la **Tabla 2** de este trabajo, se indican los valores recogidos en la Tabla 1 de la norma UNE EN 338:2016 *Clases resistentes para maderas coníferas basadas en ensayos de flexión de canto: valores de resistencia, rigidez y densidad*. Esta tabla indica los valores característicos de resistencia, rigidez y densidad para las distintas clases resistentes Cxx, donde xx hace referencia al valor característico de 5% percentil de la resistencia a flexión.

Se asigna una clase resistente a las distintas probetas en función de sus propiedades:

- Densidad
- MOR a flexión
- MOE a flexión

Se asigna como clase resistente global para cada viga la más restrictiva de las tres.

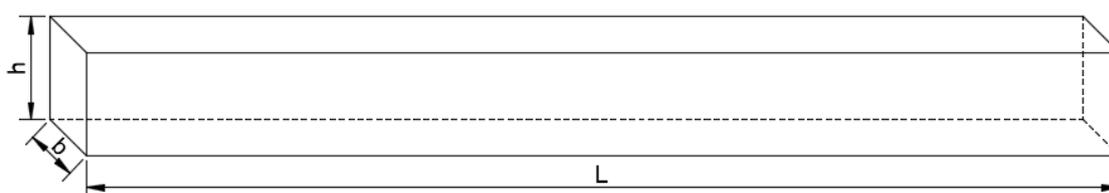
**Tabla 2.** Valores característicos para clases resistentes de madera de coníferas. Según norma UNE –EN 338:2016.

PROPIEDADES RESISTENTES (en $N/mm^2$ )		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Flexión	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
Tracción paralela	$f_{t,0,k}$	7,2	8,5	10	12	13	14	16	18	21	24	27	30
Tracción perpendicular	$f_{t,90,k}$	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	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29
Compresión perpendicular	$f_{c,90,k}$	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 ( $kN/mm^2$ )													
Módulo de elasticidad paralelo medio	$f_{0,medio}$	7	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13	14	15	16
Módulo de elasticidad paralelo (5% percentil)	$f_{0,k}$	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 perpendicular medio	$f_{90,medio}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53
Módulo de cortante medio	$G_{medio}$	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 ( $kg/m^3$ )													
Densidad característica	$\rho_k$	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460
Densidad media	$\rho_{media}$	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550

#### 2.1.4.1 Determinación de la densidad

La densidad,  $\rho$ , es una de las características más importantes que afectan a las propiedades de la madera. La densidad es la relación entre la masa y el volumen de la pieza. Las dimensiones se obtuvieron midiendo las piezas con una regla rígida milimétrica y un escalímetro, mientras que el peso se obtuvo con una balanza analógica con precisión 0.1 g.

Para realizar la medición del volumen de las vigas, se clasificaron las distintas superficies de las vigas en caras, cantos y testas. La anchura ( $h$ ) y el espesor ( $b$ ) de la pieza se definen como la dimensión mayor y menor, respectivamente, de la sección transversal. Las caras son las superficies de la pieza correspondientes a la mayor dimensión de la sección transversal ( $L \times h$ ), los cantos son las superficies de la pieza correspondientes a la menor dimensión de la sección transversal ( $L \times b$ ) y las testas son la superficie delimitada por la sección transversal ( $h \times b$ ). Detalle en **Figura 7**.



**Figura 7.** Denominación de las dimensiones de las vigas.

La **Tabla 3** recoge los datos obtenidos de la medición de las vigas. Se hicieron cuatro mediciones de cada dimensión. El valor marcado es la media aritmética de los cuatro valores. Igualmente se indica el peso de cada viga y su densidad.

*Tabla 3. Dimensiones, peso y densidad de las vigas del ensayo de caracterización.*

Viga	Dimensiones (mm)			Peso (g)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
	h	b	L		
CH_S_1	120	60	1240	4.803,7	538
CH_S_2	120	60	1239	4.307,0	483
CH_S_3	120	61	1239	5.460,4	602
CH_S_4	120	60	1238	4.887,2	548
CH_S_5	120	60	1240	4.295,3	481
CH_S_6	120	60	1240	5.270,8	590
CH_S_7	120	60	1240	5.170,5	579
CH_S_8	120	60	1237	4.479,2	503
CH_S_9	120	60	1240	5.233,5	586
CH_S_10	120	60	1238	4.738,2	532

#### 2.1.4.2 Determinación del MOR a flexión

El MOR (*Modulus of Rupture*) también denominado tensión máxima o módulo de rotura a flexión es la capacidad máxima que soporta la probeta sometida a flexión y se suele expresar en  $N/mm^2$  o  $MPa$ .

Dado que las probetas son de sección rectangular de base  $b$  y altura  $h$ , la expresión de cálculo utilizada para obtener la tensión de máxima (MOR) ha sido:

$$MOR = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

donde  $P$  es el valor de la carga máxima obtenido en el ensayo a flexión a cuatro puntos y  $L$  la luz entre apoyos.

#### 2.1.4.3 Determinación del MOE a flexión

El MOE (*Modulus of Elasticity*) también denominado módulo de Young o módulo de elasticidad es una constante elástica que indica la relación entre la tensión y la deformación de un material dentro de su rango elástico.

Para obtener el módulo de elasticidad o MOE se han tomado los valores comprendidos entre el 20% y el 50% del valor de la tensión máxima. En este rango se considera que la gráfica deformación-tensión tiene una pendiente constante, siendo la fórmula aplicada para el cálculo:

$$MOE = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{20\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{20\%}}$$

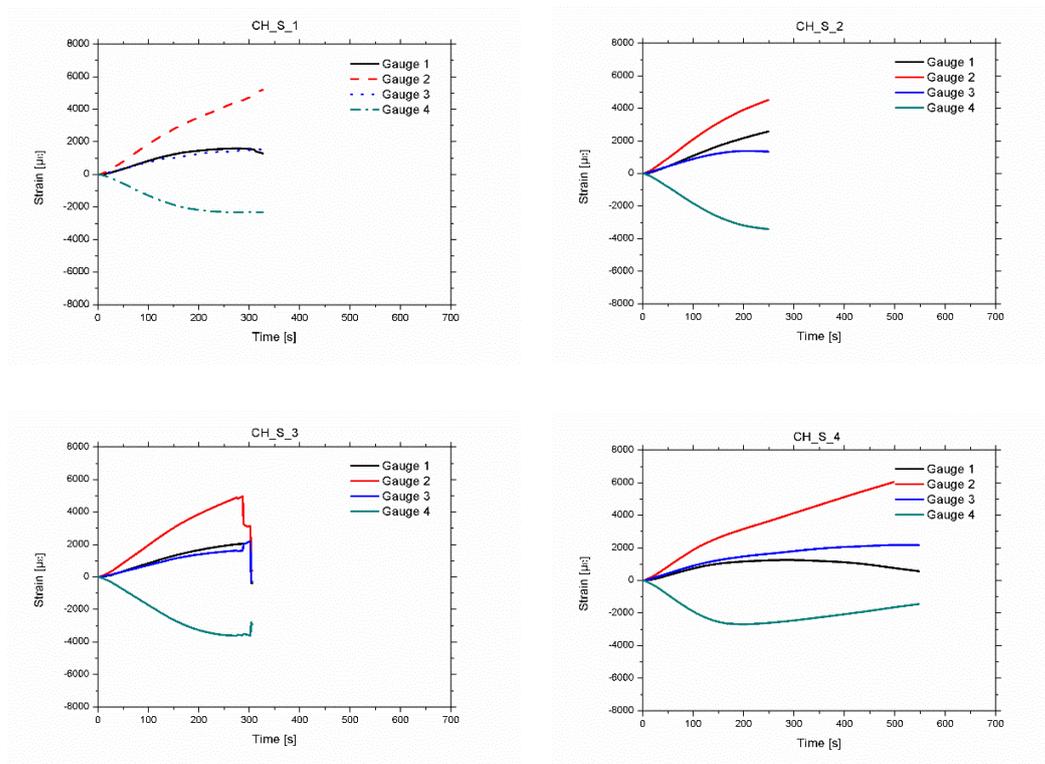
donde  $\sigma$  es la tensión y  $\varepsilon$  la deformación. Para los datos de la deformación se utilizaron los datos correspondientes a la galga número 2 situada en la cara de mayor tracción.

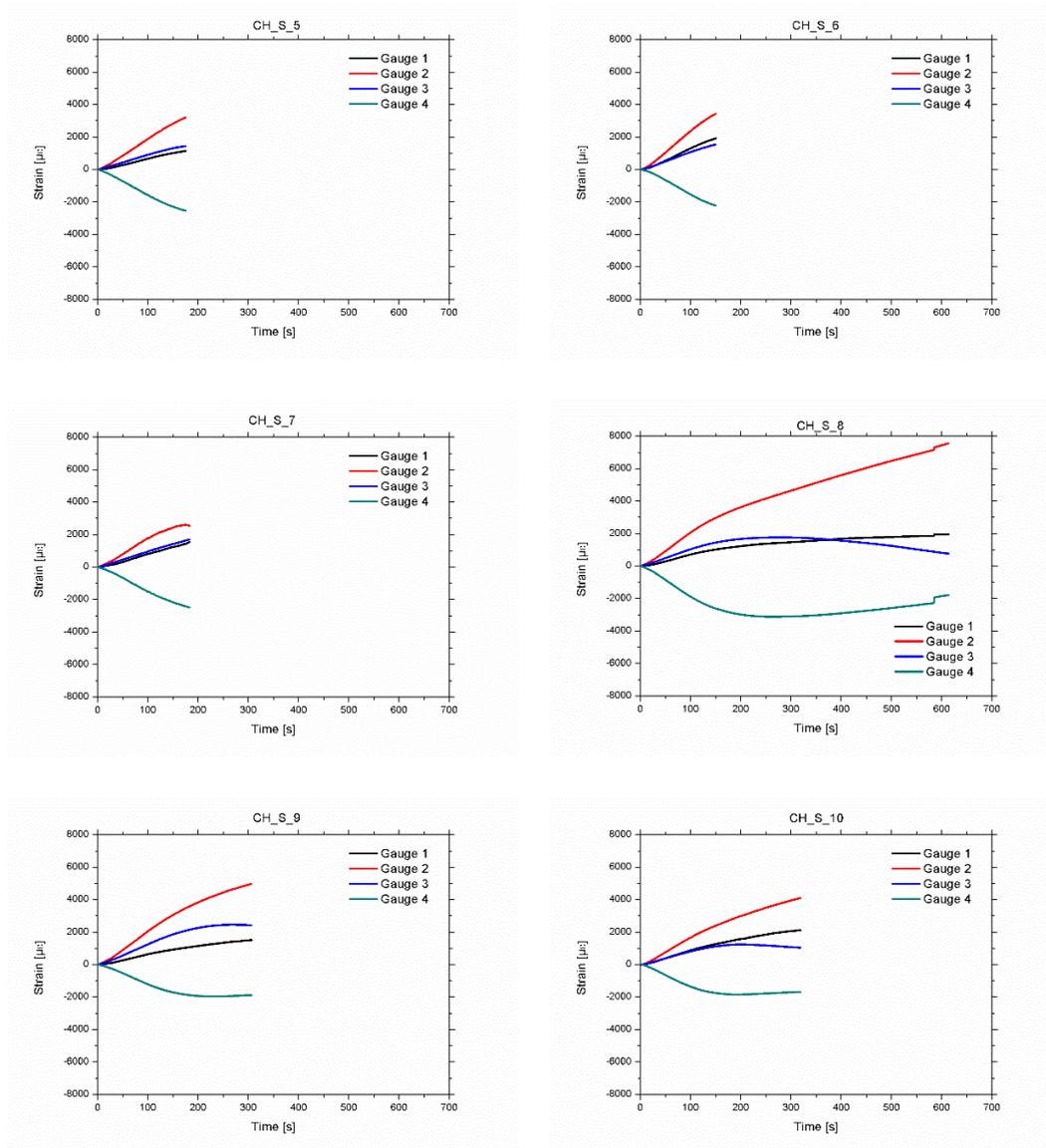
## 2.2 Resultados

En este apartado se resumen los resultados obtenidos de los ensayos realizados a las diez probetas utilizadas para la caracterización del pino. Estos datos nos permiten estimar las propiedades mecánicas de la madera de pino utilizada en las vigas reforzadas, al ser procedentes del mismo lote.

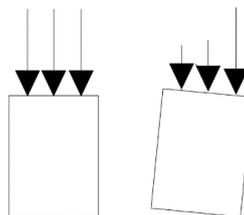
### 2.2.1 Propiedades mecánicas

La **Figura 8** muestra las curvas deformación-tiempo de las 10 vigas ensayadas. Las galgas 1 y 3 se encuentran centradas en ambas caras laterales de la viga por lo que los valores de las deformaciones deberían ser relativamente similares. Cuando en alguna de estas galgas se observa un cambio de tendencia, o sea, cuando a partir de cierto valor de deformación a tracción la curva comienza a decrecer, esto indica que en ese punto se están produciendo compresiones. Esto puede deberse a que la viga está sufriendo torsión (**Figura 9**). En caso de producirse este efecto de torsión, como la sección no deja de rotar, los valores de carga y deformación pueden dar valores superiores a los que se darían en flexión. En las vigas 4 y 8 (valores marcados con \* en la **Tabla 4**) se produjo este fenómeno. Por ello los valores alcanzados de MOR y deformación máxima son considerablemente superiores que para el resto de vigas (7750  $\mu\epsilon$  de la viga CH\_S\_8 frente a las 4000  $\mu\epsilon$  de la viga CH\_S\_5, la cual se considera con un comportamiento mecánico dentro de la media). Este efecto no afecta al cálculo de MOE, ya que para su cálculo se utilizan los datos registrados durante el comportamiento elástico de la viga antes de que se produzca la torsión. Es importante señalar que este cambio de tendencia en las galgas laterales también puede ser debido a la distribución de las fibras de la madera, ya que la galga es un sensor de medición local de deformaciones.





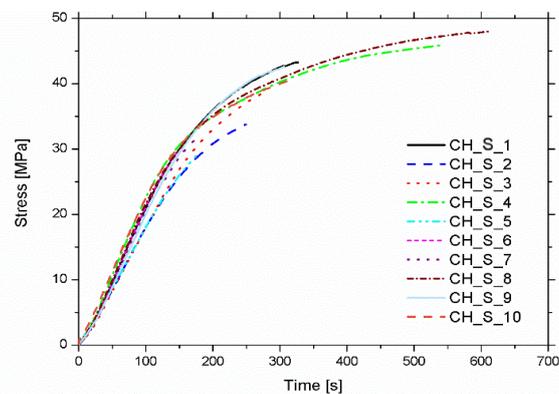
*Figura 8. Curvas de deformación-tiempo registradas por las galgas extensométricas de cada viga*



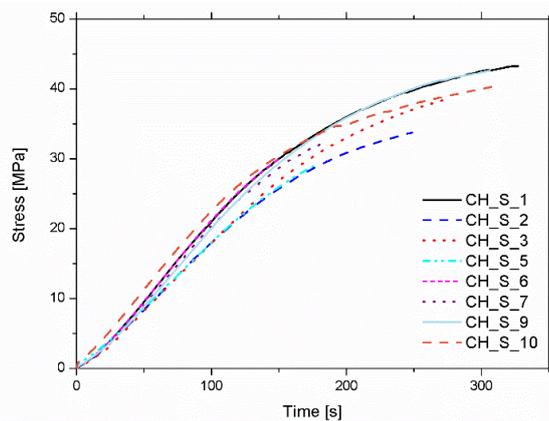
*Figura 9. Efecto de torsión en la distribución de la fuerza aplicada en una sección*

La **Figura 10** representa las curvas de la tensión respecto del tiempo, de las 10 vigas ensayadas. Se puede apreciar que las 4 y 8 muestran un comportamiento distinto al resto, lo que avala la hipótesis comentada anteriormente. La **Figura 11** muestra los mismos resultados obviando las vigas 4 y 8. En este caso, las gráficas muestran un comportamiento bastante similar donde la relación tensión-tiempo se mantiene lineal hasta alcanzar valores aproximados de 25 MPa. A partir de este punto, se produce un cambio de tendencia, disminuyendo la pendiente de la curva hasta que se produce la rotura final de forma frágil y súbita.

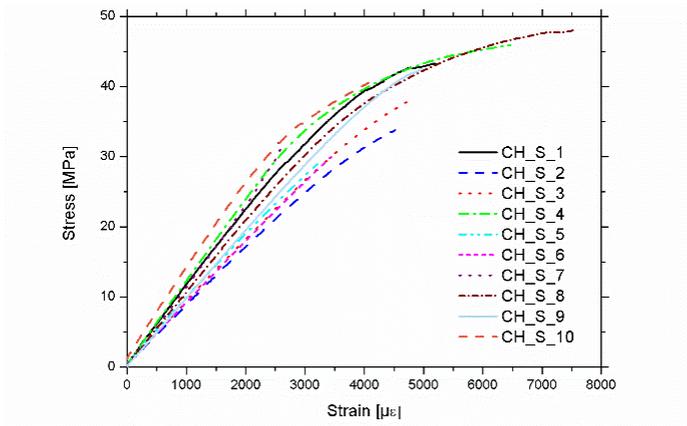
La **Figura 12** muestra las curvas tensión-deformación de las 10 vigas ensayadas. También se aprecia que las vigas 4 y 8 manifiestan un comportamiento diferente. La **Figura 13** muestra las mismas gráficas, eliminando los resultados pertenecientes a estas vigas. Como se observa en la gráfica, las vigas muestran un comportamiento lineal observándose en algunos casos cierta plastificación en el último tramo cercano a la rotura final.



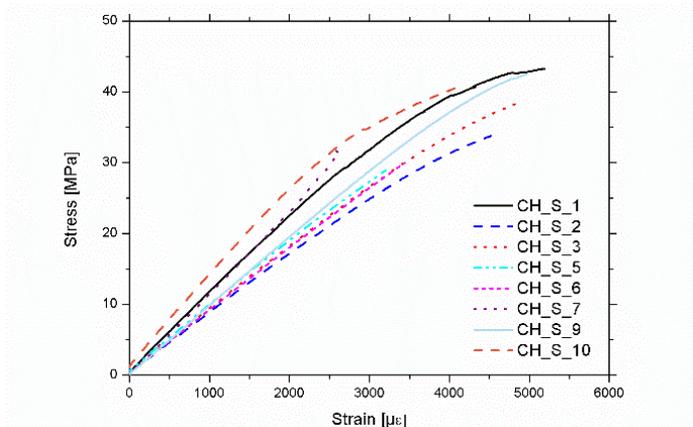
**Figura 10.** Curvas tensión-tiempo de las 10 vigas ensayadas.



**Figura 11.** Curvas tensión-tiempo de las 8 vigas que se consideran en el análisis.



**Figura 12.** Curvas tensión-deformación de las 10 vigas ensayadas.



**Figura 13.** Curvas tensión-deformación de las 8 vigas que se consideran en el análisis.

Los resultados obtenidos de los ensayos de caracterización de las 10 vigas se resumen en la **Tabla 4**. La densidad media obtenida es de  $544 \text{ kg/m}^3$  con una desviación estándar de  $45 \text{ kg/m}^3$ . Para calcular el valor medio del MOR se deben despreciar los valores de las vigas 4 y 8 por el efecto de la torsión anteriormente mencionado, aunque sí que se tienen en cuenta para el cálculo del MOE. El MOR tiene un valor medio de  $36.2 \text{ MPa}$  con una relativamente baja desviación estándar de  $(5.7 \text{ MPa})$ . El MOE tiene un valor medio de  $10167 \text{ MPa}$  con una desviación estándar de  $1420 \text{ MPa}$ .

**Tabla 4. Resultados de la caracterización de las 10 vigas**

Viga	MOR (MPa)	MOE <sub>est</sub> (MPa)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Tipo de rotura
CH_S_1	43,3	10810	538	4
CH_S_2	33,8	8360	483	6
CH_S_3	38,5	8800	602	3
CH_S_4	45,9*	11760	548	5
CH_S_5	28,9	9250	481	3
CH_S_6	30,0	8810	590	3
CH_S_7	32,0	11560	579	6
CH_S_8	48,0*	10190	503	4
CH_S_9	42,6	9680	586	6
CH_S_10	40,5	12450	532	4
<b>Valor medio</b>	<b>36,2</b>	<b>10167</b>	<b>544</b>	
<b>Desviación estándar</b>	<b>5,7</b>	<b>1420</b>	<b>45</b>	

### 2.2.2 Asignación de clases resistentes

En este apartado se analizan los resultados de asignación de clases resistentes en función de las distintas metodologías (clasificación visual y ensayo a flexión). La **Tabla 5** muestra los distintos valores obtenidos. Para asignar una clase resistente se debe considerar la más desfavorable. En el caso de la asignación obtenida por el ensayo a flexión, los valores del MOE son los que nos indican la clase resistente, ya que la densidad y el MOR muestran resistencias mayores en todos los casos.

En el caso de la asignación debido a la clasificación visual, todas las vigas fueron clasificadas con calidad de la madera ME-2, por lo que tienen asignada una clase resistente C18.

**Tabla 5. Clases resistentes asignadas a las 10 vigas por las distintas metodologías.**

Viga	Densidad	MOR	MOE <sub>est</sub>	FLEXIÓN	VISUAL
CH_S_1	C50	C40	C22	C22	C18
CH_S_2	C35	C30	C16	C16	C18
CH_S_3	C50	C35	C16	C16	C18
CH_S_4	C50	-	C27	C27	C18
CH_S_5	C35	C27	C18	C18	C18
CH_S_6	C50	C27	C16	C16	C18
CH_S_7	C50	C30	C27	C27	C18
CH_S_8	C45	-	C22	C22	C18
CH_S_9	C50	C40	C20	C20	C18
CH_S_10	C50	C40	C30	C30	C18

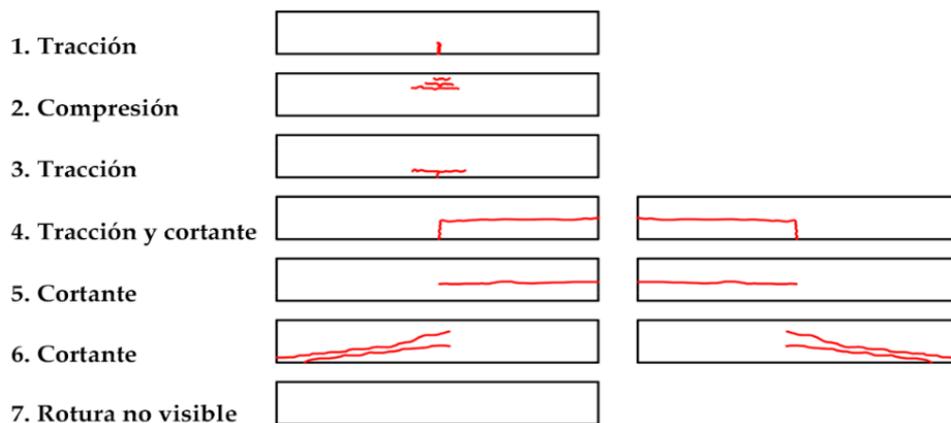
La **Tabla 6** muestra un análisis de los resultados de clases resistentes obtenidos por los dos métodos: ensayo a flexión y clasificación visual. Se indica el porcentaje de casos en los que se ha obtenido la misma clasificación (Acierto), el porcentaje de casos donde la asignación por el ensayo a flexión es inferior a la obtenida de la clasificación visual (Defecto) y el porcentaje de casos donde la asignación por el ensayo a flexión es superior a la obtenida de la clasificación visual (Exceso), este porcentaje constituye el doble de los casos de fallo por defecto, con esto podemos concluir, que la resistencia real de las vigas obtenida del ensayo a flexión es superior a la esperada según la clasificación visual.

*Tabla 6. Matriz de confusión/acierto entre la clase resistente asignada por ensayo a flexión ( $MOE_{est}$ ) y por clasificación visual. CR significa Clase Resistente.*

	Visual		
	Acierto	Fallo	
		Defecto (< CR)	Exceso (> CR)
Flexión	10%	33%	67%

### 2.2.3 Clasificación de las roturas

En este apartado se analiza el tipo de fallo ocurrido. La **Figura 14** resume los tipos de fallo que se producen en una viga de madera cuando se somete a un esfuerzo de flexión. En la **Tabla 7** se recogen tres fotografías de cada una de las vigas después de la realización del ensayo, mostrando: cara frontal, cara posterior y cara inferior. También se incluye una descripción de las roturas ocurridas indicando el tipo de fallo.



*Figura 14. Clasificación de los distintos tipos de fallo en una viga de madera sometida a flexión. [6]*

**Tabla 7.** Clasificación de los tipos de fallo de las 10 vigas ensayadas.

Viga	Fotografías	Descripción
CH_S_1		<p>Rotura a tracción y cortante, con inicio en zona del nudo en la cara inferior.</p>
CH_S_2		<p>Rotura completa a cortante, desde el nudo situado en la cara inferior cerca del apoyo derecho.</p>
CH_S_3		<p>Rotura a tracción cercana a los nudos situados en el centro de la viga.</p>

<p>CH_S_4</p>		<p>Rotura a cortante</p>
<p>CH_S_5</p>		<p>Rotura a tracción y cortante desde los nudos de la cara inferior y cara frontal hasta el nudo situado en la parte superior de la cara posterior.</p>
<p>CH_S_6</p>		<p>Rotura a tracción, desde el nudo de la cara inferior, centrado en la luz de la viga.</p>

<p>CH_S_7</p>		<p>Rotura a cortante, comenzando por el nudo de la cara inferior.</p>
<p>CH_S_8</p>		<p>Rotura a tracción y cortante iniciándose en la cara inferior, rotura recta en la línea de aplicación de la carga.</p>
<p>CH_S_9</p>		<p>Rotura a cortante causada por el nudo situado en la cara inferior.</p>

CH\_S\_10



Rotura a tracción y cortante, siguiendo la rotura la diferencia entre duramen y albura.

### 3 VIGAS DE PINO REFORZADAS CON FRP E INJERTOS DE CHOPO

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la caracterización mecánica de vigas de pino reforzadas con FRP e injertos de chopo, sometidas a ensayos de flexión a cuatro puntos. El estudio se completa con un cálculo analítico y un análisis de los modos de fallo.

Para el análisis se han elaborado cuatro tipologías diferentes de probetas, tres de ellas utilizando un refuerzo FRP y una lámina de chopo como cobertura y, una cuarta utilizando solo la lámina de chopo para utilizarla como probeta de control y poder comparar la mejora producida por los refuerzos FRP. Se elaboraron tres unidades de cada tipología obteniendo un total de doce probetas. En este apartado se incluye el procedimiento de elaboración indicando las dificultades encontradas.

#### 3.1 Materiales y métodos

##### 3.1.1 Descripción de los materiales y probetas de ensayo

En este apartado se describen los materiales utilizados para la ejecución de las vigas reforzadas, así como el proceso de ejecución seguido. Se realizaron 12 probetas de vigas reforzadas utilizando 3 tipologías distintas de FRP colocado en la cara de tracciones (3 vigas por cada tipología). Las 3 vigas restantes se utilizaron como especímenes de control. A todas ellas (las 9 vigas reforzadas y las 3 de control) se les colocó un injerto de madera de chopo en la cara inferior. La nomenclatura utilizada para denominar las vigas, así como los materiales utilizados en cada una de ellas, se indican a continuación y se resumen en la **Tabla 8**:

- **RB-P** (*Reinforced Beam – Poplar*): Vigas de pino con injerto de chopo. Se aplicó el adhesivo de poliuretano estructural PUR-20 de Bakar para la unión pino-chopo.
- **RB-P-FB** (*Reinforced Beam – Poplar – Fabric of Basalt*): Vigas reforzadas con FB (plástico reforzado con tejido de basalto) e injerto de chopo. Se usó el refuerzo MAPEWRAP B UNI-AX de MAPEI y se aplicó la resina epoxídica MAPEWRAP 21 para las uniones pino-FRP-chopo.
- **RB-P-FC** (*Reinforced Beam – Poplar – Fabric of Carbon*): Vigas reforzadas con FC (plástico reforzado con tejido de carbono) e injerto de chopo. Se usó el refuerzo MAPEWRAP C UNI-AX de MAPEI y se aplicó la resina epoxídica MAPEWRAP 21 para las uniones pino-FRP-chopo.
- **RB-P-LC** (*Reinforced Beam – Poplar – Laminade of Carbon*): Vigas reforzadas con LC (plástico reforzado con laminado de carbono) e injerto de chopo. Se usó refuerzo DRIZORO COMPOSITE 1405 de DRIZORO y se aplicó la resina epoxídica MAXEPOX CS para las uniones pino-FRP-chopo.

**Tabla 8. Nomenclatura vigas reforzadas.**

Viga	Tipo de refuerzo	FRP	Resina
RB_P_1	Chopo	-	PUR-20
RB_P_2	Chopo	-	PUR-20
RB_P_3	Chopo	-	PUR-20
RB_P_FB_1	FB/Chopo	Tejido de Basalto	MAPEWRAP 21
RB_P_FB_2	FB/Chopo	Tejido de Basalto	MAPEWRAP 21
RB_P_FB_3	FB/Chopo	Tejido de Basalto	MAPEWRAP 21
RB_P_FC_1	FC/Chopo	Tejido de Carbono	MAPEWRAP 21
RB_P_FC_2	FC/Chopo	Tejido de Carbono	MAPEWRAP 21
RB_P_FC_3	FC/Chopo	Tejido de Carbono	MAPEWRAP 21
RB_P_LC_1	LC/Chopo	Laminado de Carbono	MAXEPOX CS
RB_P_LC_2	LC/Chopo	Laminado de Carbono	MAXEPOX CS
RB_P_LC_3	LC/Chopo	Laminado de Carbono	MAXEPOX CS

### 3.1.2 Madera de vigas base de pino

Como se describe en el apartado 2.1.1 la madera utilizada como viga base para este ensayo es de la clase pino silvestre. Para este ensayo se seleccionaron aleatoriamente 12 piezas de dimensiones  $110 \times 80 \times 1260 \text{ mm}^3$ . Una vez en el laboratorio, se cepillaron hasta darle las dimensiones finales de  $90 \times 60 \times 1240 \text{ mm}^3$ . Para su caracterización se midió su densidad ( $\rho_p$ ) y el módulo de rigidez dinámico ( $MOE_{din,p}$ ) mediante un ensayo acústico de vibración libre longitudinal en la dirección de la fibra. Esta caracterización se hizo al 12% de HR, aproximadamente. Usando el  $MOE_{din,p}$  se hizo una asignación de clases resistentes siguiendo la norma UNE EN 338:2016: *Madera estructural. Clases resistentes*. Estos resultados aparecen resumidos en la **Tabla 9**.

**Tabla 9. Características mecánicas de las 12 vigas de base de pino, incluyendo la clase resistente.**

Viga	$MOE_{din,p}$ (MPa)	Clase resistente	$\rho_p$ ( $\text{kg/m}^3$ )
RB_P_1	5616	R	544
RB_P_2	6465	R	538
RB_P_3	8108	C16	528
RB_P_FB_1	7989	C14	485
RB_P_FB_2	7709	C14	544
RB_P_FB_3	7239	C14	553
RB_P_FC_1	8411	C16	523
RB_P_FC_2	7186	C14	481
RB_P_FC_3	11000	C24	591
RB_P_LC_1	11773	C27	610
RB_P_LC_2	9203	C18	571
RB_P_LC_3	8775	C16	544
<b>Valor medio</b>	<b>8290</b>		<b>543</b>
<b>Desviación estándar</b>	<b>1754</b>		<b>38</b>
*R significa rechazo			

### 3.1.3 Madera de chopo

El chopo utilizado en el injerto procede del clon I-214 (*Populus x euroamericana (Dode) Guinier "I-214"*). Este cultivo del que se extrajo la madera se encuentra localizado en Yunquera de Henares (Guadalajara, España). Las dimensiones de la sección transversal de los injertos de chopo son 30x60 mm<sup>2</sup> y 960 mm de longitud y proceden de 3 árboles diferentes. Previamente se realizaron, con madera de dichos árboles, ensayos de flexión a 4 puntos. Se midió la densidad y contenido en humedad. El contenido en humedad fue del 12%, aproximadamente. Mediante estos ensayos, se obtuvo el módulo de elasticidad ( $MOE_{est,po}$ ), el módulo de rotura ( $MOR_{po}$ ) y la densidad ( $\rho_{po}$ ). Estos datos están recogidos en la **Tabla 10**.

*Tabla 10. Características mecánicas de los injertos de chopo usados en cada tipología de viga.*

Viga	Árbol	$MOR_{po}$ (MPa)	$MOE_{est,po}$ (MPa)	$\rho_{po}$ (kg/m <sup>3</sup> )
RB_P_1	6	38	10261	374
RB_P_2				
RB_P_3				
RB_P_FB_1	8	42	9441	357
RB_P_FB_2				
RB_P_FB_3				
RB_P_FC_1				
RB_P_FC_2				
RB_P_FC_3				
RB_P_LC_1	12	48	10142	400
RB_P_LC_2				
RB_P_LC_3				
<b>Valor medio</b>		<b>43</b>	<b>9821</b>	<b>372</b>
<b>Desviación estándar</b>		<b>4</b>	<b>400</b>	<b>18</b>

### 3.1.4 Materiales de refuerzo: resinas + fibras

#### 3.1.4.1 FRP

Los FRP son materiales compuestos formados por 2 componentes principales: fibras y una matriz polimérica. Las fibras aportan rigidez y resistencia y la matriz polimérica que generalmente está compuesta por resina, tiene la función de dar flexibilidad y adherencia y transmitir los esfuerzos de unas fibras a otras. Sus principales ventajas son su bajo peso, buen comportamiento mecánico y resistencia a la corrosión. [7]

Para el refuerzo estructural existen distintas disposiciones geométricas de FRP, en este trabajo se han utilizado: un laminado de carbono y dos tejidos unidireccionales.

**Tejidos unidireccionales:** Son tejidos en los que el número de hilos de fibra en un sentido es más elevado que en el otro. Los hilos están colocados en paralelo y simplemente sujetos entre ellos [7]. En este trabajo se utilizaron dos tipologías diferentes de tejidos: uno de carbono y otro de basalto, ambos de la marca comercial MAPEI®, cuyas características técnicas se indican en la **Tabla 11**.

**Laminados:** Son perfiles obtenidos en un proceso de fabricación que combina los refuerzos de fibra y resina, denominado pultrusión. En este trabajo se utilizó el laminado de carbono de la marca comercial DRIZORO®. Este laminado está compuesto por fibra de carbono en una matriz epoxi y sus características se recogen en la **Tabla 12**.

*Tabla 11. Características de los tejidos de FRP usados como refuerzo.*

	MAPEWRAP C UNI-AX	MAPEWRAP B UNI-AX
Tipo de fibra	Carbono	Basalto
Orientación de la fibra	Unidireccional	Unidireccional
Gramaje ( $g/m^2$ )	300	400
Espesor ( $mm$ )	0.166	0.14
Ancho comercial ( $mm$ )	200	400
Área resistente por unidad de ancho ( $mm^2/mm$ )	166.6	142.5
Tensión máxima a tracción ( $MPa$ )	4830	4840
Modulo elástico a tracción ( $MPa$ )	230000	89000
Alargamiento a rotura (%)	2.0	3.15

*Tabla 12. Características del laminado de carbono usado como refuerzo.*

	DRIZORO COMPOSITE 1405
Tipo de fibra	Carbono
Ancho ( $mm$ )	50
Espesor ( $mm$ )	1.4
Sección ( $mm^2$ )	70
Contenido volum. de fibra (%)	68
Tensión máxima a tracción ( $MPa$ )	2600
Modulo elástico a tracción ( $MPa$ )	165000
Alargamiento a rotura (%)	1.6

#### 3.1.4.2 Resinas utilizadas

Se han utilizado dos tipologías de resinas diferentes. Para las uniones pino-FRP-chopo se han utilizado las resinas epoxi recomendadas por el fabricante. En el caso de los tejidos se ha utilizado la resina epoxi bicomponente MAPEWRAP 21 de MAPEI S.A.® y para el laminado de carbono, resina epoxi MAXEPOX CS de DRIZORO®. En las vigas sin refuerzo, es decir, para las uniones madera-madera se eligió una resina monocomponente de poliuretano PUR-20 de Bakar®. Se ha elegido esta resina ya que es la utilizada regularmente para las uniones de vigas laminadas. Véase resumen en **Tabla 13**.

**Tabla 13. Características y propiedades de los adhesivos utilizados.**

	<b>PUR-20</b>	<b>MAPEWRAP 21</b>	<b>MAXEPOX CS</b>
<b>Empresa</b>	Bakar	Mapei	Drizoro
<b>Tipo de adhesivo</b>	Resina poliuretano	Resina epoxi	Resina epoxi
<b>Número de componentes</b>	1	2	2
<b>Consistencia/ Apariencia</b>	<b>Comp. A</b>	Líquido/ amarillo transparente	Líquido/ verde
	<b>Comp. B</b>	Reología tixotrópica/ blanco amarillento	Líquido/ amarillo transparente
<b>Proporción Componente A: Componente B (A:B) en peso</b>	-	4(A) : 1(B)	4(A) : 1(B)
<b>Densidad (A+B) (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1.12	1.1	0.97
<b>Viscosidad Brookfield (mPa·s)</b>	7000 (a 20 °C)	300 (rotor 1 – giros 10)	8200 (a 23 °C)
<b>Temperatura de aplicación (°C)</b>	20	de +10 a +30	de +15 a +35
<b>Tiempo de trabajabilidad (minutos)</b>	60 (a 20 °C)	40 (a 23 °C)	60 (a 23 °C)
<b>Tiempo de fraguado (minutos)</b>	60 (a 20 °C)	50 (a 23 °C)	130 (a 23 °C)
<b>Tiempo de prensado</b>	4 horas (a 20 °C)	-	-
<b>Tiempo de consolidación (después del prensado)</b>	1-2 días (a 20 °C)	7 días (a 23 °C)	-
<b>Propiedades mecánicas</b>			
<b>Resistencia del encolado* (MPa)</b>	6.8	-	-
<b>Resistencia a tracción (MPa)</b>		30	>29
<b>Resistencia a flexión (MPa)</b>		55	>39
<b>Módulo elástico a flexión (MPa)</b>		2500	-

\*Resistencia del encolado no hay ensayos para valores diferenciados de resistencia.

### 3.1.5 Método de elaboración de las probetas

En este apartado se describen los procedimientos de preparación de los materiales, el proceso de elaboración de las distintas tipologías de vigas y el proceso de prensado realizado con una prensa hidráulica. Por último, se analizarán los problemas encontrados y las lecciones aprendidas.

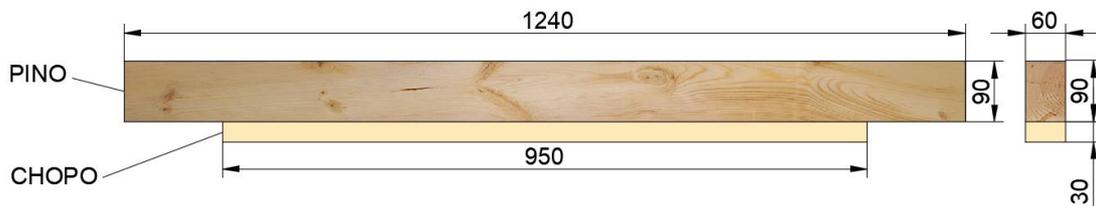
Se elaboraron tres unidades de cada tipología obteniendo un total de doce probetas, la elaboración se realizó en el laboratorio de madera del grupo de investigación ADIME, situado en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación de la Universidad de Granada.

Antes de comenzar la ejecución de los refuerzos se realizaron los siguientes trabajos de preparación:

1. Se cepillaron y cortaron las vigas hasta obtener las dimensiones requeridas para el ensayo.
2. Se agruparon las bases de viga separadas por tipologías. Se realizó una inspección visual para elegir la zona de ubicación del refuerzo, evitando en la medida de lo posible la presencia de defectos en los puntos de aplicación de la carga.
3. Se marcaron tanto las vigas como los injertos de chopo con la nomenclatura de cada viga, también se señalaron las caras de aplicación de las resinas con una marca X.
4. Se lijaron con lija de grano fino las superficies de adhesión de las vigas y del laminado de carbono.
5. Se limpiaron bien las superficies de aplicación con disolvente tanto de las láminas como de los tejidos FRP.
6. Se colocaron los FRP en un lugar limpio, cubriéndolo con papel para evitar que se ensucie durante el proceso de elaboración.
7. Se colocó cinta de carroceros alrededor del área de aplicación de la resina tanto en la base de pino como en el refuerzo de chopo.

### 3.1.5.1 Vigas reforzadas con injerto de chopo (RB\_P)

Se elaboraron tres unidades de vigas reforzadas con una lámina de chopo según indica en la **Figura 15**. A continuación, se indica el proceso de ejecución de esta tipología de vigas, en la **Figura 16** se pueden observar imágenes del proceso.



**Figura 15.** Esquema de viga (RB-P). Cotas en mm.

#### Proceso de elaboración de viga reforzada con injerto de chopo:

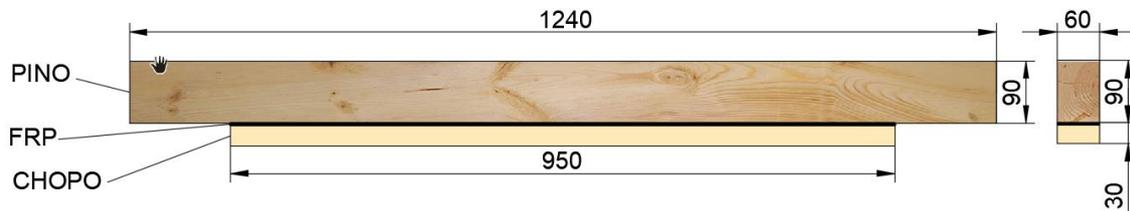
1. Se colocaron las vigas base y el injerto de chopo con las caras con una marca X hacia arriba.
2. Se procedió a la aplicación de resina monocomponente de poliuretano Bakar PUR-20 sobre las caras a unir, tanto en la viga como en el injerto.
3. Se extendió la resina con la ayuda de una espátula.
4. Se colocó el injerto de chopo y se ejerció presión suficiente para que la resina rebose por los bordes.
5. Se eliminó la resina sobrante con una espátula y se colocó la viga en la prensa.



**Figura 16.** Imágenes del proceso de fabricación de las vigas (RB\_P). Cotas en mm.

### 3.1.5.1.1 Vigas reforzadas con FRP + injerto de chopo (RB\_P\_LC, RB\_P\_FC, RB\_P\_FB)

Se elaboraron tres vigas de cada tipología, se elaboró cada tipología por separado. La disposición y dimensiones de este tipo de vigas se muestran en la **Figura 17**.



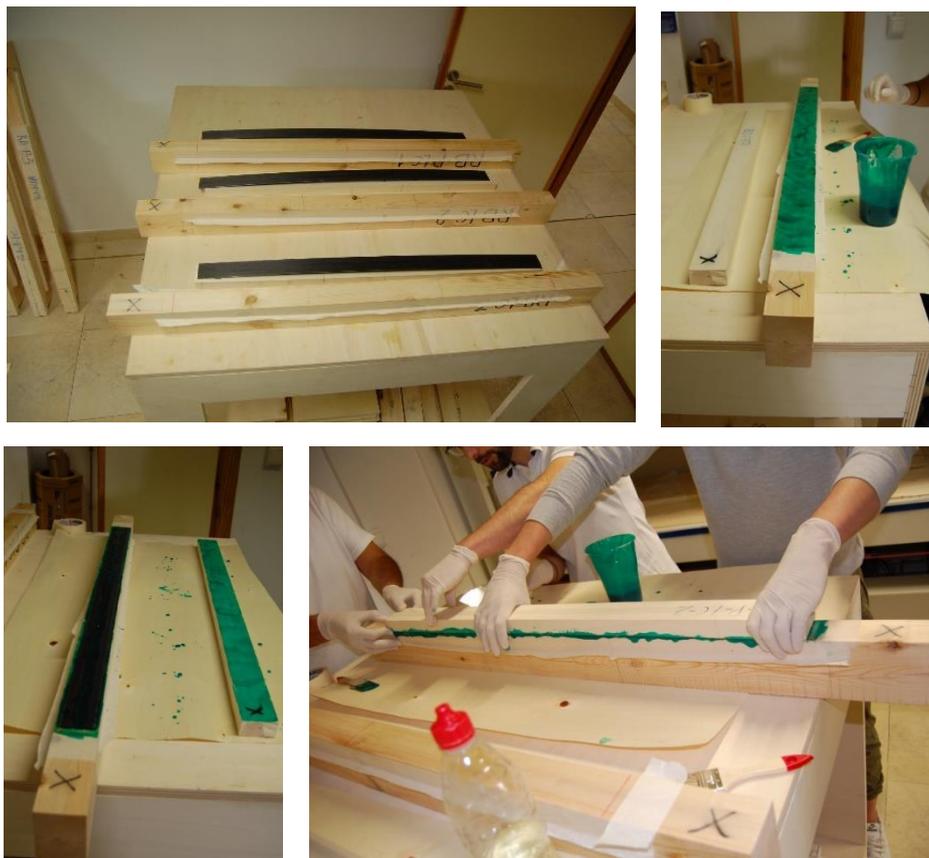
*Figura 17. Esquema vigas reforzadas con FRP + injerto de chopo.*

#### Proceso de elaboración de viga reforzada con FRP e injerto de chopo:

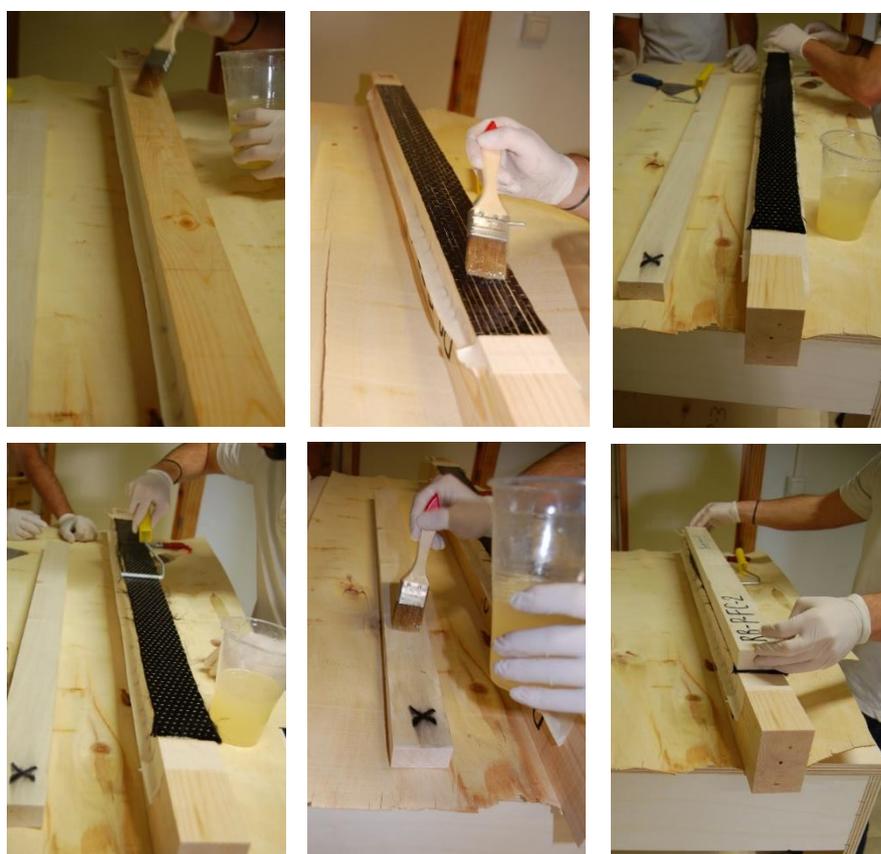
1. Se situaron encima de la mesa los materiales necesarios para la elaboración de cada tipología.
2. Se colocaron las vigas base y el injerto de chopo con las caras con una marca X hacia arriba.
3. Se mezclaron los dos componentes de la resina con una batidora de taladro. (**Figura 18**)
4. Se pesó el recipiente con la resina para conocer la cantidad aplicada.
5. Se procedió a la aplicación de resina con una brocha sobre la cara de viga base de pino según:
  - Laminado de carbono: Maxepox – CS (resina verde). Detalles de la ejecución se pueden observar en la **Figura 19**.
  - Tejidos de basalto y carbono: Mapewood – 21 (resina transparente). Detalles de la ejecución se pueden observar en la **Figura 20**
6. Se colocó la lámina de refuerzo de FRP y se aplicó presión con el rodillo metálico para asegurar un empapado total de la fibra/laminado.
7. Se aplicó una segunda capa de resina sobre el FRP y se volvió a aplicar presión con el rodillo metálico.
8. Se aplicó una capa de resina sobre el injerto de chopo.
9. Se volvió a pesar el recipiente de resina para conocer el consumo por viga.
10. Se colocó el injerto de chopo y se ejerció presión suficiente para que la resina rebosase por los bordes.
11. Se eliminó la resina sobrante con una espátula y se colocó la viga en la prensa.



*Figura 18. Imágenes del proceso de elaboración de la resina bicomponente.*



*Figura 19. Imágenes del proceso de elaboración de las vigas con refuerzo de laminado + injerto de chopo (RB\_LC\_P).*



*Figura 20. Imágenes del proceso de elaboración de las vigas reforzadas con tejido + injerto de chopo (RB\_FC\_P y RB\_FB\_P).*

### 3.1.5.2 Prensado de las vigas

El prensado se llevó a cabo en una prensa hidráulica. Se realizó un prensado conjunto para las cuatro tipologías de vigas. Para el prensado se tuvieron en cuenta las consideraciones referentes a los tiempos de prensado y tiempos de curado de las distintas resinas.

#### Proceso de prensado:

1. Se realizó el encendido de la prensa.
2. Se colocó una placa de 1 mm de chopo a lo largo de toda la superficie de la prensa para evitar que la prensa se manchase con las resinas. Se colocó una segunda placa a excepción de la zona de las vigas de tipología RB\_LC\_P para compensar la diferencia de dimensión, ya que el refuerzo de laminado de carbono tiene un espesor de 1.4 mm.
3. Se colocaron las vigas distribuidas homogéneamente a lo largo de la longitud de la prensa de dimensiones (1.3 m de ancho y 2 m de largo) teniendo en cuenta el punto anterior para la colocación de las vigas RB\_LC\_P.
4. Se inició el prensado a una presión de 30 bar durante 24 horas. Imágenes del proceso se pueden observar en la **Figura 21**.



*Figura 21. Imágenes del proceso de prensado.*

#### Problemas ocurridos durante el prensado:

En el momento de realizar el prensado se produjo el desplazamiento de las láminas de chopo y laminado de carbono respecto de su alineación, se consideraron las siguientes hipótesis como posibles causas:

- Falta de planicidad las caras.
- Exceso de resina aplicada.
- Distinto espesor de las probetas debido a los distintos espesores del refuerzo.
- Colocación de las probetas sobre planchas de chopo que tenían ciertos alabeos y producía que la superficie fuese irregular.

Este movimiento de las piezas se produjo repetidas veces, se levantó la prensa y se volvieron a colocar las piezas en cuatro ocasiones. Se produjeron desviaciones en los refuerzos y la rebaba del exceso de resina como puede observarse en la **Figura 22**. El estado de las probetas después de su prensado se resume en la **Tabla 14**. Esto puede haber reducido la efectividad de los refuerzos, es difícil de asegurar esta afirmación, por ello en el futuro se debería de tener en cuenta estos errores a la hora de ejecutar el prensado.

*Tabla 14. Resumen del estado de las probetas después del prensado.*

PROBETAS	ADHESIVO		REFUERZO	OTRAS OBSERVACIONES	
	CONTINUIDAD	REBABA <sup>*(1)</sup>	DESVIACIÓN DEL REFUERZO (en mm)	RESTOS DE CHAPA DE CHOPO PEGADOS EN EL CANTO	ALABEO <sup>*(2)</sup>
RB-P-1	Buena	1	no	No	1
RB-P-2	Buena	1	no	No	2
RB-P-3	Buena	3	3	No	3
RB-P-LC-1	Buena	5	2	No	0
RB-P-LC-2	Buena	5	0-3	No	2
RB-P-LC-3	Buena	4	0-1	No	0
RB-P-FC-1	Buena	1	1	No	3
RB-P-FC-2	Buena	1	1	Sí	n/a
RB-P-FC-3	Buena	2	2-4	Sí	n/a
RB-P-FB-1	Buena	1	0-3	Sí	n/a
RB-P-FB-2	Buena	1	2	Sí	n/a
RB-P-FB-3	Buena	1	2-4	Sí	n/a

<sup>\*(1)</sup> Rebaba clasificación de 0 al 5, siendo 0 prácticamente sin rebaba y 5 con mucha cantidad de rebaba (> 5 mm de espesor)

<sup>\*(2)</sup> Alabeo clasificación de 0 al 3, siendo 0 sin alabeo y 3 con cierto alabeo.



*Figura 22. Imagen de las probetas después del prensado.*

Se consideró como tiempo de curado el de la resina epoxi (7-10 días) por ser el más desfavorable. Después del proceso de refuerzo, se eliminó la cinta de carroceros y se eliminaron las rebabas con un martillo y cincel. Posteriormente, las vigas fueron cepilladas para homogeneizar las caras y eliminar los restos de resina generados durante el proceso de aplicación de los refuerzos.

## 3.2 Métodos de ensayo

### 3.2.1 Modelo analítico

Como las dos especies de madera (pino y chopo) tienen propiedades elásticas similares, el módulo elástico combinado ( $MOE_{est,c}$ ) del conjunto se puede obtener mediante el Teorema de ejes paralelos de Huygens-Steiner, usando la expresión:

$$MOE_{est,c} = \frac{\sum_{i=1}^N E_i \cdot I_i + A_i \cdot E_i \cdot y_i^2}{I_c}$$

donde  $E_i$  es el módulo elástico,  $I_i$  es el segundo momento de inercia respecto de la fibra neutra,  $A_i$  es la sección y  $y_i$  es la distancia desde la fibra neutra de cada elemento a la fibra neutra del elemento combinado, para cada especie de madera  $i$ . Para este cálculo no se ha incluido el FRP, además se considera una perfecta unión pino/chopo, es decir, sin tener en cuenta el adhesivo.

Cabe indicar, que los valores  $E_i$  de módulo elástico utilizado en la fórmula para la madera de pino han sido los valores de  $MOE_{din,p}$  recogidos en la **Tabla 9** que se obtuvieron mediante un ensayo acústico de vibración. En el caso del chopo se han utilizado los valores de  $MOE_{est,po}$  recogidos en la **Tabla 10** que fueron obtenidos mediante un ensayo a flexión.

### 3.2.2 Ensayo de flexión a cuatro puntos

Las doce vigas fueron sometidas a un ensayo de flexión a cuatro puntos, como muestra la **Figura 23**. El ensayo se realizó siguiendo la metodología análoga a la recogida en la UNE-EN 408:2011+A1:2011. *Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas*. La relación entre el canto y la luz se estableció en 1000 mm por tres motivos:

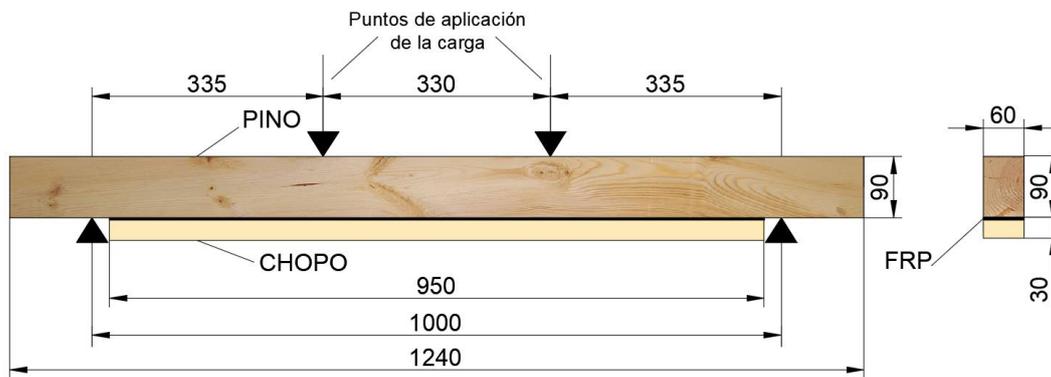
- Limitaciones en la luz máxima de la máquina de ensayo durante diseño del mismo;
- Interés por la influencia de los defectos en la resistencia mecánica de la pieza, estableciendo por lo tanto un canto adecuado para ello;
- Interés por el aporte real de madera con presencia de defectos reforzada. Con la reducción de sección en madera aserrada, se eliminan defectos, conllevando a una resistencia mecánica mayor.

Para la realización de los ensayos se utilizó una prensa eléctrica modelo S-110 de la empresa CONTROLS S.A. que tiene una capacidad de carga máxima de 110 kN y un límite de desplazamiento de 650 mm. La prensa se encuentra conectada a un ordenador que registra los datos de fuerza y desplazamiento con una frecuencia de 1 Hz a través del software PA/MPC-2, de ICC S.A. Para el ensayo se estableció la velocidad de desplazamiento en 3.8 mm/min. La **Figura 25** muestra la imagen de una de las vigas durante el ensayo a flexión.

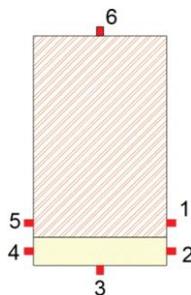
Para obtener los datos de las deformaciones sufridas por las vigas durante los ensayos se colocaron 6 galgas extensiométricas modelo K-CLY4-10/120 sobre la viga, como se muestra en la **Figura 24**. Los valores obtenidos de la galga 3, situada en la cara inferior, permiten obtener el módulo elástico a tracción de la probeta y la galga 6, situada en la cara superior, el módulo elástico a compresión. Las galgas 1 y 5 permiten comparar la deformación a tracción sufrida por ambas caras de la madera de pino. Las galgas 2 y 4 permiten comparar las deformaciones a tracción de las caras del chopo. La comparación de las galgas 1-2 y las galgas 4-5 permite conocer si los dos tipos de madera se deforman solidariamente y de forma coherente.

Con los datos obtenidos de los ensayos se calcularon:

- El MOR (tensión máxima a flexión).
- El  $MOE_{est}$  (módulo de elasticidad a flexión) estático obtenido como la pendiente de la curva tensión-deformación entre el 20% y el 50% del MOR. Para ello, se ha considerado la deformación a tracción (galga 3, es decir, la colocada en la cara de tracciones).



*Figura 23. Esquema del ensayo a flexión a 4 puntos. Cotas en mm.*



*Figura 24. Esquema de la posición de las galgas.*



*Figura 25. Imagen general del ensayo.*

### 3.2.3 Determinación de la densidad

Se calculó la densidad de las vigas reforzadas para poder identificar la variación que experimentan las vigas al ser reforzada. Para la medición se utilizó una regla rígida milimétrica y un escalímetro, mientras que el peso se obtuvo en una balanza analógica con precisión 0.1 g. Como se ha explicado en el apartado de elaboración: las probetas, se cepillaron después de su elaboración para eliminar los restos de resina. Las medidas consideradas para la determinación de la densidad se tomaron una vez realizado este cepillado. Los datos obtenidos se recogen en la **Tabla 15**.

*Tabla 15. Dimensiones, peso y densidad de las vigas reforzadas.*

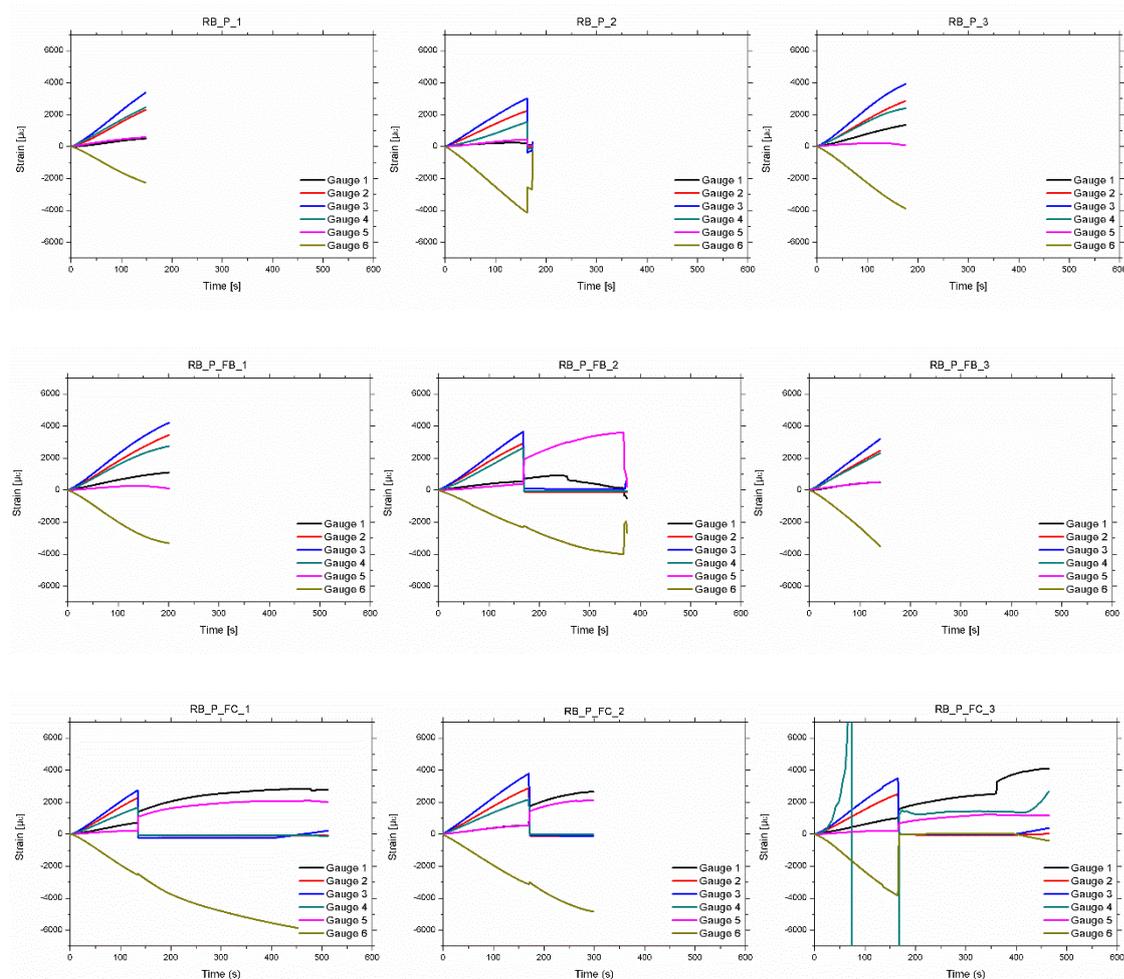
Nomenclatura		Dimensiones (mm)			Peso (g)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
		h	b	L		
RB-P-1	Viga	89,0	60,0	1236,0	4217,8	507,4
	Injerto	30,2	59,8	950,0		
RB-P-2	Viga	89,5	59,6	1238,0	4115,4	494,3
	Injerto	30,1	59,6	960,0		
RB-P-3	Viga	89,3	59,5	1240,0	4063,8	601,1
	Injerto	30,4	60,0	94,5		
RB-P-LC-1	Viga	90,5	59,3	1239,0	4623,3	559,4
	Injerto	29,4	57,8	951,0		
RB-P-LC-2	Viga	89,4	60,0	1239,0	4408,3	522,6
	Injerto	32,1	58,7	950,0		
RB-P-LC-3	Viga	90,0	59,7	1240,0	4217,8	495,9
	Injerto	32,3	60,0	951,0		
RB-P-FC-1	Viga	89,0	60,3	1238,0	4040,1	479,4
	Injerto	30,9	60,7	951,0		
RB-P-FC-2	Viga	89,3	59,4	1239,0	3743,4	452,3
	Injerto	30,1	59,6	950,0		
RB-P-FC-3	Viga	89,5	60,0	1240,0	4479,8	532,3
	Injerto	30,5	60,0	960,0		
RB-P-FB-1	Viga	90,0	60,0	1238,0	3813	454,5
	Injerto	30,0	59,8	950,0		
RB-P-FB-2	Viga	90,0	60,0	1239,0	4203,7	495,3
	Injerto	31,0	61,0	950,0		
RB-P-FB-3	Viga	90,0	60,0	1239,0	4250,4	504,1
	Injerto	30,5	60,1	950,0		

### 3.3 Resultados

En este apartado se recogen los resultados obtenidos de la caracterización mecánica de las 4 tipologías de vigas reforzadas. Estos datos se utilizan para realizar un análisis del comportamiento mecánico, comparando las distintas tipologías de refuerzo.

#### 3.3.1 Caracterización mecánica de las vigas reforzadas con FRP

En la **Figura 26** se muestran los diagramas deformación-tiempo registrados por cada una de las galgas extensométricas. Se aprecia que la distribución relativa de deformaciones es coherente en todos los casos. Se observa que las deformaciones de las galgas 1 y 5 situadas sobre la viga de pino son similares entre sí, al igual que ocurre con las deformaciones de las galgas 2 y 4 situadas sobre el injerto de chopo. También se observa que las deformaciones son mayores a medida que las galgas se encuentran a mayor distancia de la línea neutra, es decir,  $3 > 2 > 4 > 1 = 5$ . También se observa que la galga 6 mide de forma coherente las deformaciones en la zona de máximas compresiones. El valor medio de la deformación máxima a tracción (galga 3) en el que se produce la rotura es de 3444, 3673, 3318 y 3261  $\mu\epsilon$ , para los grupos RB\_P, RB\_P\_FB, RB\_P\_FC y RB\_P\_LC, respectivamente.



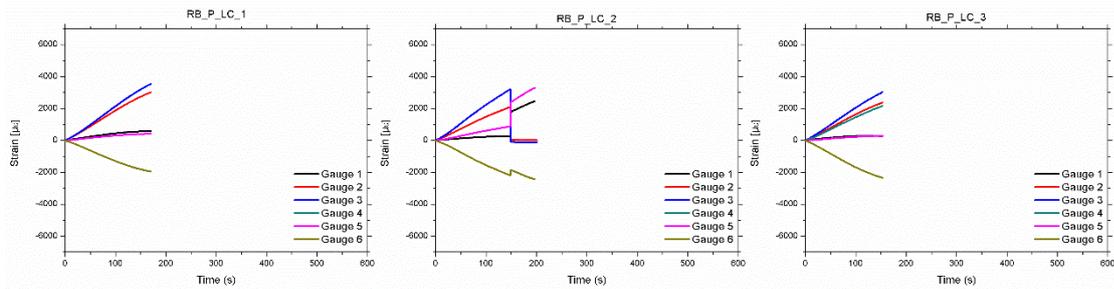
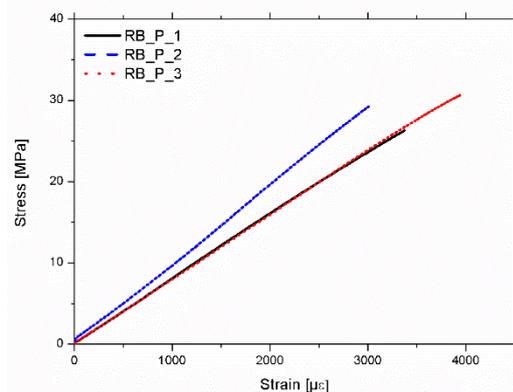
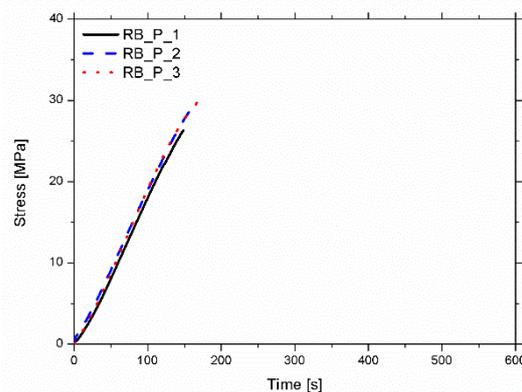


Figura 26. Curvas deformación-tiempo medidas por las 6 galgas extensométricas colocadas en cada viga.

En la **Figura 27** se recogen los diagramas de esfuerzo-tiempo y esfuerzo-deformación (la deformación medida por la galga 3, siendo la zona lineal la que se emplea para el caculo del  $MOE_{est}$ ). El comportamiento mecánico de las vigas reforzadas se pudo clasificar en dos tipos:

- **Tipo A:** Vigas cuyas deformaciones aumentan constantemente hasta la rotura final. Este fallo fue causado por una deslaminación FRP-madera o pino-chopo, seguido de una súbita y frágil fractura de la viga de pino. La viga RB\_P\_1 es un ejemplo de este tipo de rotura. Además, tras la deslaminación se pudieron observar 3 tipos de fallo: Tipo 1: Cortante; Tipo 2: Tracción; Tipo 3: Mixto tracción-cortante.
- **Tipo B:** Vigas cuyas deformaciones aumentan de forma constante hasta un cierto valor de carga, en el cual se da la deslaminación FRP-madera. Posteriormente, se produce una caída tanto de carga como de deformaciones, sobre todo en la zona de tracción (galga 3). Las deformaciones en el injerto de chopo apenas vuelven a incrementarse ya que el injerto se encuentra parcial o totalmente desligado. Después de la caída, la carga empieza a aumentar progresivamente de nuevo hasta que se produce el fallo frágil final de la viga base de pino. Los modos de fallos producidos en la viga coinciden con los descritos anteriormente: Tipos 1, 2 o 3. La viga RB\_P\_FC\_1 es un ejemplo de viga con un comportamiento de Tipo B. Por último, cabe destacar que, en este tipo de comportamiento, el FRP solía quedarse adherido parcial o totalmente a la viga de pino.



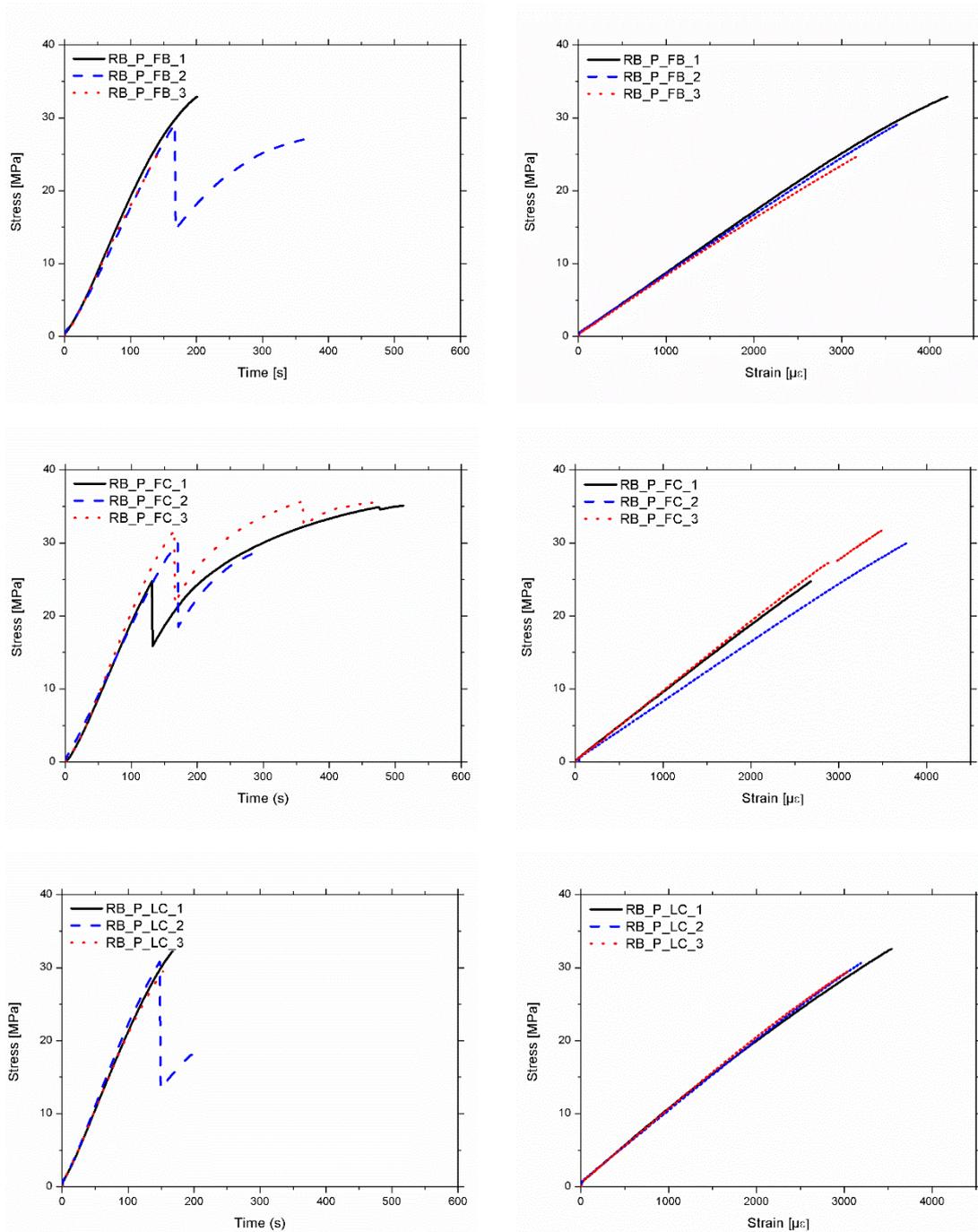


Figura 27. Izq.: Curvas de tensión-tiempo. Dcha.: Curvas tensión-deformación.

En la **Tabla 16** se encuentran los resultados experimentales obtenidos de los diferentes ensayos para las cuatro configuraciones, indicando el módulo elástico y la resistencia obtenida para cada una de las vigas reforzadas, también se incluye el módulo elástico teórico ( $MOE_{est,c}$ ) y el módulo elástico dinámico ( $MOE_{din,p}$ ) obtenido para cada una de las vigas base de pino como referencia para la comparación. En cuanto a la densidad se observa que las vigas reforzadas tienen una menor densidad que las de pino de base (entre un 7% y un 9% menos), esto se debe a la menor densidad del injerto de chopo, a pesar de la masa introducida por el FRP y las resinas.

La resistencia (tensión máxima) en las 12 vigas ensayadas es bastante homogénea, con un valor medio de MOR de 30.6 MPa y una desviación estándar de 3.2 MPa. Como no tenemos un referencia del valor del MOR de las vigas base de pino, es difícil sacar conclusiones en cuanto a la mejora aportada por el refuerzo, una posible opción para obtener resultados sería compararlos con los resultados del MOR medio de la clasificación visual 36.2 MPa valor obtenido de la **Tabla 4**. Esto implicaría que la resistencia media de las vigas reforzadas sería inferior a la de las vigas base, lo cual, no tiene mucho sentido. El MOR de las vigas reforzadas debería ser igual o superior, nunca inferior. Además, como se ha comentado anteriormente, todas las roturas se producen debido a la deslaminación chopo/pino, independientemente del tipo de refuerzo usado.

En la **Figura 28** se representan los valores medios de resistencia para cada uno de los refuerzos, se observa que los refuerzos de carbono (FC y LC) son ligeramente superiores a las probetas sin FRP (17% y 8%, respectivamente) y fibra de basalto, aunque debido al reducido número de vigas de referencia (tres de cada tipología) y la falta de datos concluyentes de la resistencia inicial de las vigas base, es arriesgado sacar conclusiones al respecto.

Los valores de módulo elástico obtenidos teóricamente ( $MOE_{est,c}$ ), se consiguieron considerando una unión perfecta pino/chopo sin tener en cuenta el FRP. Cuando se comparan los valores obtenidos experimentalmente con el ensayo mecánico ( $MOE_{est}$ ) de las vigas reforzadas y los valores obtenidos teóricamente, se obtiene una variación media de tan solo el -4% para las vigas pino/chopo. Es destacable que las vigas pino/FRP/chopo proporcionan valores muy similares entre los MOE teórico y experimental, teniendo en cuenta que en el cálculo teórico no se ha considerado la existencia del FRP (3%, 1%, 1% de variación para los refuerzos FB, FC y LC, respectivamente). En una primera aproximación, estos resultados parecen indicar que:

- Cuando existe un elemento de madera de refuerzo (injerto) con un espesor y masa considerable respecto a la del FRP (30 mm de chopo frente 1 o 2 mm de FRP), y su módulo es superior o comparable al de la viga de base (en torno a 10000 MPa del chopo frente a los 8000-9000 MPa del pino), quien determina la mejora de rigidez es el injerto de madera, haciéndose poco relevante la contribución del FRP.
- El fallo en todas las configuraciones está provocado por una importante deslaminación del injerto o del FRP respecto de la viga de base, lo cual hace que los valores de MOR sean modestos y más bajos a los del injerto, que nunca llega a romperse. Esta deslaminación parece haber sido prematura y motivada por una falta de adherencia o por un cortante excesivo en la zona de apoyos inferiores.

Tabla 16. Resultados mecánicos de las 12 vigas ensayadas.

Viga	MOR (MPa)	MOE <sub>est</sub> (MPa)	MOE <sub>est,c</sub> (MPa)	MOE <sub>din,p</sub> pino (MPa)	Variación MOE <sub>est</sub> (%) respecto MOE <sub>est,c</sub>	ρ (kg/m <sup>3</sup> )	ρ <sub>p</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Variación densidad (%)	Tipo de rotura
RB_P_1	26.3	8120	7648	5616		507	544		A-1
RB_P_2	29.4	9590	8126	6465		494	538		A-3
RB_P_3	30.6	7940	8050	8108		489	528		A-1
<b>Media RB_P</b>	<b>28.8</b>	<b>8550</b>	<b>8275</b>	<b>6730</b>	<b>-4</b>	<b>497</b>	<b>537</b>	<b>-7.5</b>	
<b>Desviación estándar</b>	<b>2.2</b>	<b>905</b>	<b>713</b>	<b>1267</b>	<b>15</b>	<b>9</b>	<b>8</b>	<b>0.7</b>	
RB_P_FB_1	32.9	8450	8624	7989		454	485		A-1
RB_P_FB_2	29.1	8160	8467	7709		495	544		B-2
RB_P_FB_3	24.9	8000	8202	7239		504	553		A-1
<b>Media RB_P_FB</b>	<b>29.0</b>	<b>8203</b>	<b>8431</b>	<b>7646</b>	<b>3</b>	<b>485</b>	<b>527</b>	<b>-8.1</b>	
<b>Desviación estándar</b>	<b>4.0</b>	<b>228</b>	<b>213</b>	<b>379</b>	<b>1</b>	<b>27</b>	<b>37</b>	<b>1.5</b>	
RB_P_FC_1	35.1	9260	8862	8411		479	523		B-3
RB_P_FC_2	30.1	8180	8173	7186		452	481		B-3
RB_P_FC_3	35.7	9590	10318	11000		532	591		B-3
<b>Media RB_P_FC</b>	<b>33.6</b>	<b>9010</b>	<b>9117</b>	<b>8866</b>	<b>1</b>	<b>488</b>	<b>532</b>	<b>-8.1</b>	
<b>Desviación estándar</b>	<b>2.8</b>	<b>709</b>	<b>1095</b>	<b>1947</b>	<b>6</b>	<b>40</b>	<b>56</b>	<b>2.0</b>	
RB_P_LC_1	32.6	9690	11059	11773		559	610		A-3
RB_P_LC_2	30.8	9760	9614	9203		523	571		B-1
RB_P_LC_3	29.5	10009	9373	8775		496	544		A-1
<b>Media RB_P_LC</b>	<b>31.0</b>	<b>9820</b>	<b>10015</b>	<b>9917</b>	<b>1</b>	<b>526</b>	<b>575</b>	<b>-8.5</b>	
<b>Desviación estándar</b>	<b>0.8</b>	<b>130</b>	<b>912</b>	<b>1622</b>	<b>10</b>	<b>17</b>	<b>33</b>	<b>0.3</b>	
<b>Media total</b>	<b>30.6</b>	<b>8896</b>	<b>8960</b>	<b>8290</b>	<b>0</b>	<b>499</b>	<b>543</b>	<b>-8.1</b>	
<b>Desviación estándar</b>	<b>3.2</b>	<b>814</b>	<b>992</b>	<b>1754</b>	<b>9</b>	<b>30</b>	<b>38</b>	<b>0.4</b>	

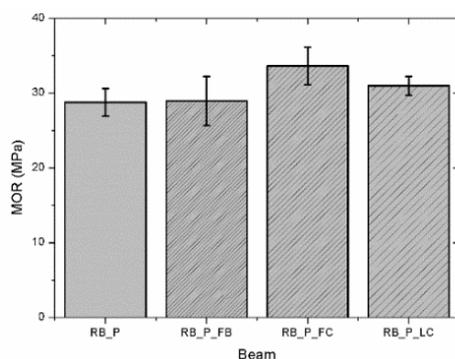


Figura 28. Comparación de los valores medios de MOR para cada tipología de viga.

### 3.3.2 Clasificación de las roturas

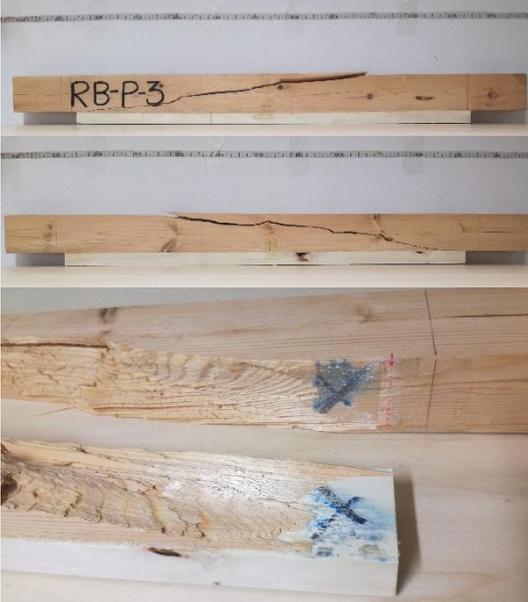
En este apartado analizan los sistemas de fallo de las doce vigas después del ensayo a flexión. La **Tabla 17** recoge tres imágenes de cada una de las vigas ensayadas: cara frontal, cara posterior y cara inferior. La **Figura 14** muestra la clasificación según los tipos de fallo a flexión, según esta clasificación en la tercera columna de la **Tabla 17** se describen los tipos de fallo de cada una de las vigas. Seis de las vigas fallaron a cortante, cinco a tracción y cortante y una de ellas a tracción.

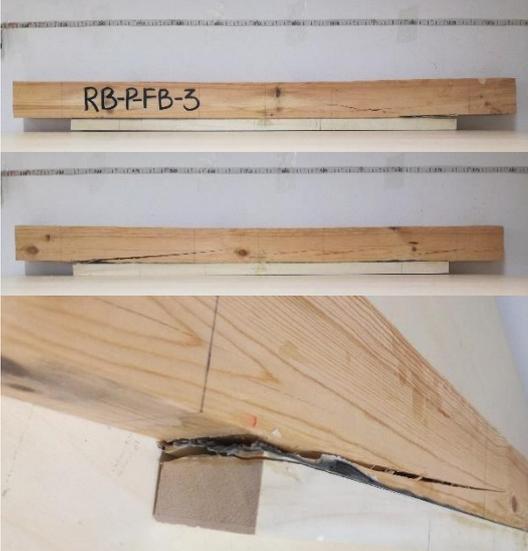
Se puede observar que la rotura en la mayoría de los casos se encuentra precedida de una deslaminación chopo-pino, la cual se produce en valores de tensión similares (30.6 MPa de media). Esta deslaminación puede deberse principalmente a cuatro factores:

- Mala adherencia del adhesivo, esta opción no parece muy probable, ya que este factor se ha producido con tres tipos diferentes de resinas.
- Mala adherencia por fallo en la elaboración.
- Grandes diferencias de deformaciones entre ambos tipos de madera.
- Un esfuerzo cortante que resulta excesivo para el chopo y que el pino si es capaz de absorber. Para comprobar este factor se debería evaluar la unión pino-chopo en vigas con mayor longitud y menor sección.

En las vigas reforzadas con fibras (RB-P-FB, RB-P-FC y RB-P-LC), se observa que se produce también una deslaminación en la unión FRP-madera. En la mayoría de casos, tras la deslaminación, el FRP queda adherido a la lámina de chopo. Esto puede deberse a una mejor adherencia FRP-chopo que FRP-pino. Por consiguiente, no se puede llegar a apreciar el verdadero aporte mecánico que proporciona la fibra, ya que queda totalmente desligada de la viga base cuando la tensión supera valores de 30.6 MPa de media.

**Tabla 17.** Clasificación de los tipos de fallo de las vigas ensayadas.

Viga	Fotografías	Descripción
RB_P_1		<p>Inicio de deslaminación chopo-pino en un extremo que provoca la posterior rotura por cortante progresando por los nudos.</p>
RB_P_2		<p>Inicio de deslaminación chopo-pino en un extremo hasta casi el centro de la viga, provocando un fallo final por tracción-cortante.</p>
RB_P_3		<p>Inicio de deslaminación chopo-pino en un extremo que provoca la rotura por cortante.</p>

Viga	Fotografías	Descripción
RB_P_FB_1		<p>Muy poca deslaminación chopo-tejido en el extremo, pero precursora de la rotura por cortante.</p> <p>Rotura por cortante de pino en un extremo.</p>
RB_P_FB_2		<p>Deslaminación total entre chopo y tejido. El tejido se queda parcialmente adherido a la viga de pino.</p> <p>Rotura por tracción.</p>
RB_P_FB_3		<p>Deslaminación parcial en un extremo entre chopo y tejido.</p> <p>Rotura por cortante.</p>

Viga	Fotografías	Descripción
RB_P_FC_1	 <p>The first photograph shows a beam labeled 'RB-P-FC-1' with a visible crack along its length. The second photograph shows a close-up of the beam's surface with a significant delamination. The third photograph shows the beam in a structural context, with a large section of the FRP-chopo layer missing, exposing the underlying wood.</p>	<p>Deslaminación FRP-chopo a lo largo de casi toda la viga, sin separación total. Rotura por tracción-cortante de pino.</p>
RB_P_FC_2	 <p>The first photograph shows a beam labeled 'RB-P-FC-2' with a crack. The second photograph shows a close-up of the beam's surface with a significant delamination. The third photograph shows the beam in a structural context, with a large section of the FRP-chopo layer missing, exposing the underlying wood.</p>	<p>Deslaminación total entre chopo y tejido. Fallo por tracción-cortante.</p>
RB_P_FC_3	 <p>The first photograph shows a beam labeled 'RB-P-FC-3' with a crack. The second photograph shows a close-up of the beam's surface with a significant delamination. The third photograph shows the beam in a structural context, with a large section of the FRP-chopo layer missing, exposing the underlying wood.</p>	<p>Deslaminación en un extremo entre chopo y tejido. Rotura por tracción-cortante.</p>

Viga	Fotografías	Descripción
RB_P_LC_1		<p>Deslaminación total entre el laminado y el pino. Fallo por tracción-cortante</p>
RB_P_LC_2		<p>Deslaminación total (con separación) entre el laminado y pino. Rotura por cortante.</p>

RB\_P\_LC\_3



Deslaminación pino-laminado en un extremo del refuerzo, precursor de la rotura a cortante

## 4 PROPUESTA DE APLICACIÓN EN OBRA

En este capítulo se propone transferir los conocimientos técnicos obtenidos en este trabajo a un caso práctico de aplicación en una edificación real. Para ello se han seleccionado las obras del inmueble constituido por los edificios situados en la calle Mosquera, 7 y 9 en Málaga capital (**Figura 29**). El proyecto de esta intervención ha sido realizado por el arquitecto D. Antonio Díaz Casado de Amezua, quien ha cedido gran parte de la documentación gráfica incluida en este apartado.

### 4.1 Antecedentes e información previa

El inmueble se sitúa en el entorno de la iglesia de los Mártires y forma parte de una de las últimas tramas medievales reconocibles del casco histórico de Málaga. Los inmuebles se encuentran situados en la esquina sureste de la manzana que los contiene y son de los últimos ejemplos de arquitectura del siglo XVIII y primeros de XIX preexistentes de la manzana.



**Figura 29.** Izq. Vista general de la localización del edificio. Fuente: Google Maps. Dcha. Situación parcelaria de los inmuebles 7 y 9 de la calle Mosquera. Fuente: Sede electrónica del catastro.

El inmueble objeto de este estudio corresponde a dos antiguos edificios unidos por su uso anterior: fue la sede de la imprenta Urania, que ocupaba la totalidad del bajo comercial a excepción de un pequeño portal y gran parte de la planta primera. En las plantas superiores se localizaban las viviendas para los trabajadores de la citada imprenta [8].

Una vez trasladada la imprenta a su actual sede, el edificio mantuvo las viviendas de las plantas superiores y el local del bajo se utilizó como local de restauración, quedándose sin uso el área de primera planta que estuvo unido a la imprenta [8]. Es por ello por lo que el edificio cuenta con un solo portal de acceso y que solo cuenta con una escalera de planta baja a planta primera (**Figura 33**). Desde planta primera se accede a dos cajas de escaleras distintas (**Figura 34**) que salvan las alturas de forjados de ambos inmuebles que a partir de la segunda planta comienzan a diferenciarse, como puede comprobarse en la (**Figura 35**).

Los edificios objeto de estudio conservan las características tipológicas comunes a los edificios residenciales del casco histórico de la ciudad. El situado en el número 7 parece tratarse de un inmueble de finales del siglo XVIII, mientras que el situado en el número 9 es decimonónico. Probablemente ambos fueron edificios plurifamiliares entre medianeras desde sus inicios.

Ambos edificios cuentan con PB+3, aunque el número siete, de menor altura, tiene una planta ático que ocupa la mitad trasera de la parcela (**Figura 37**). La estructura original se resuelve mediante: muros de carga de ladrillo, pilastras de ladrillo macizo y pilares de madera sobre los cuales asienta la estructura de madera, se puede observar parte de la estructura en la **Figura 30**.



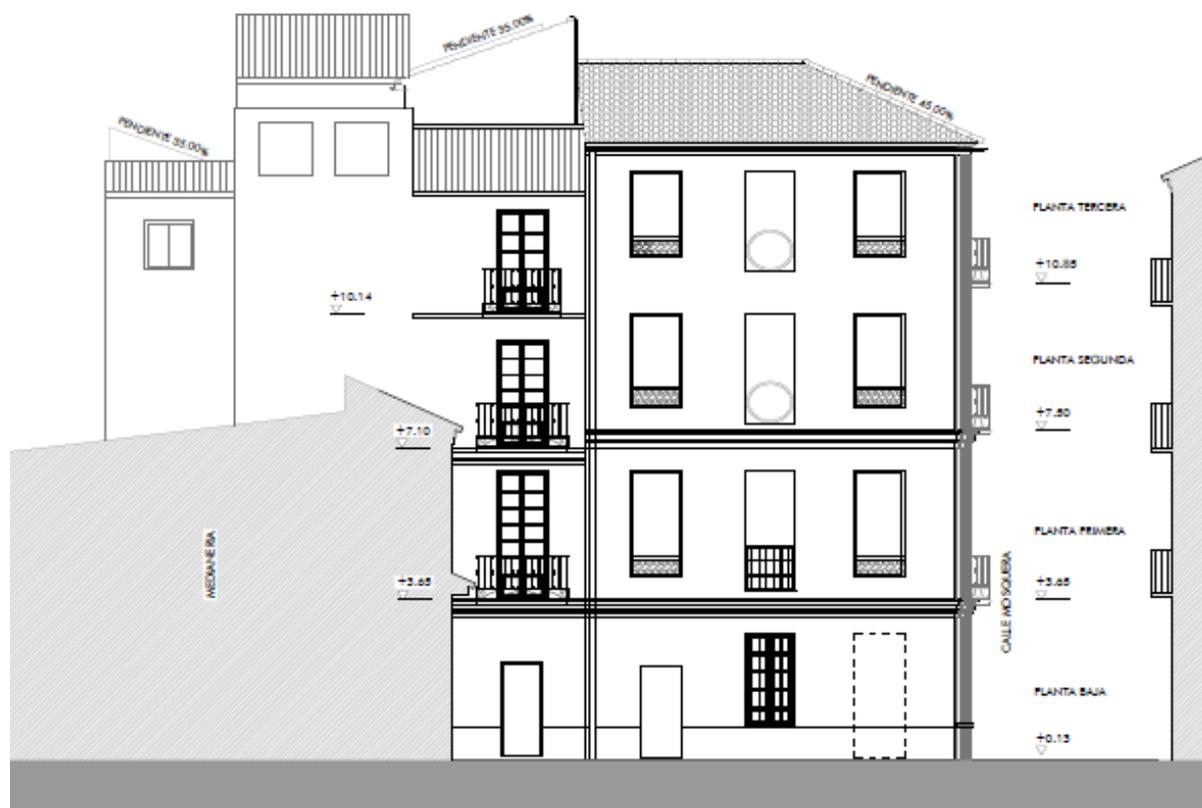
*Figura 30. Fotografía del interior del edificio.*

En los siguientes planos (**Figuras 33-40**), facilitados por D. Antonio Díaz Casado de Amezúa, se pueden observar los alzados y las plantas de distribución del edificio:



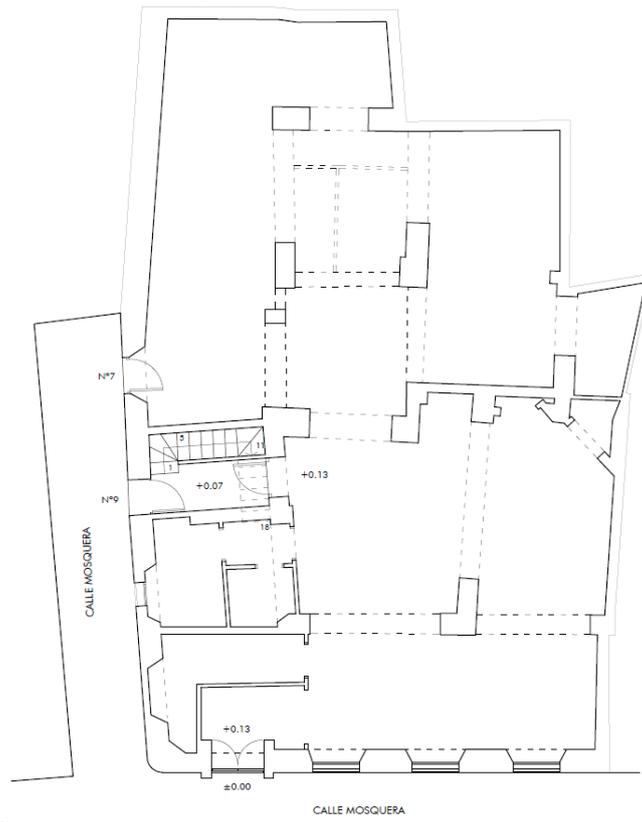
ALZADO OESTE. CALLE MOSQUERA

Figura 32. Alzado Oeste.

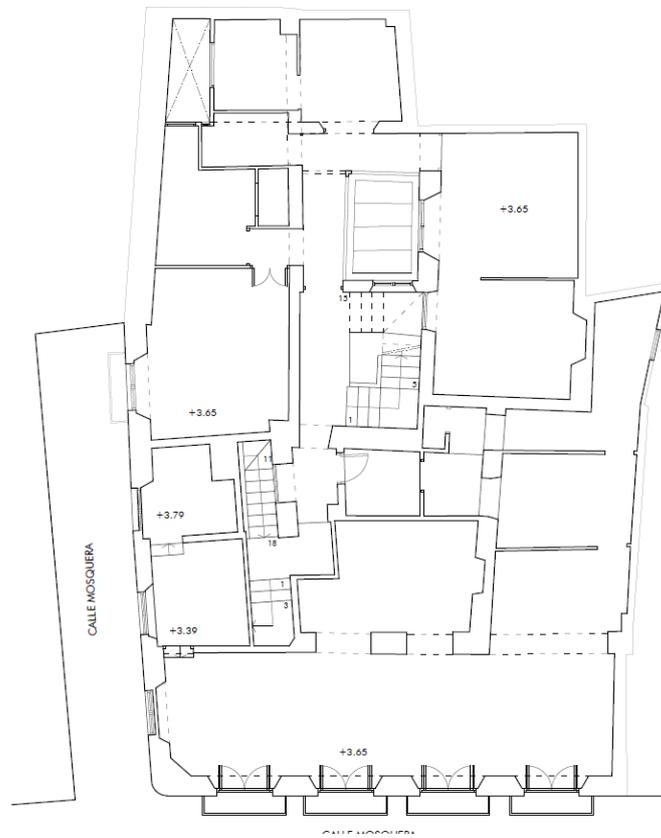


ALZADO SUR. CALLE MOSQUERA Nº 7-9

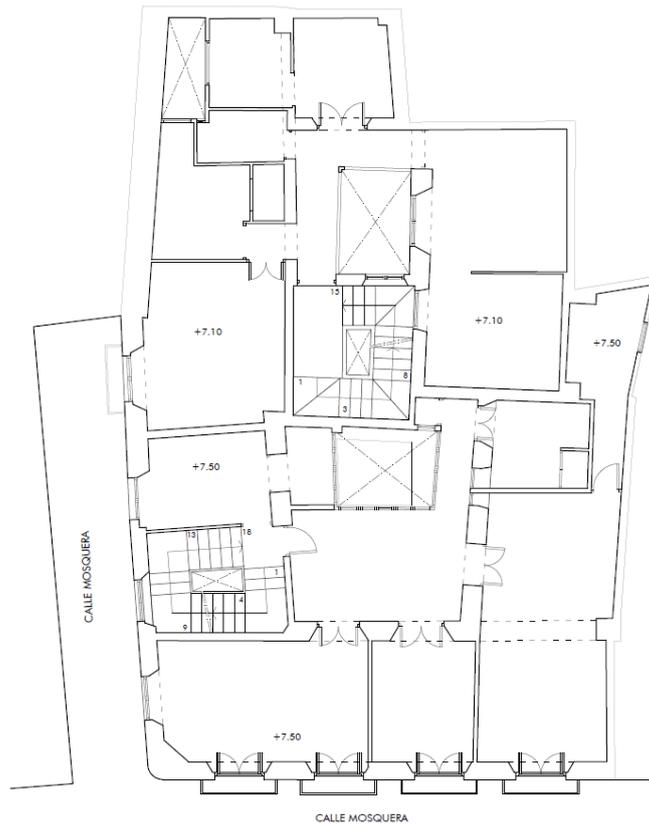
Figura 31. Alzado Sur.



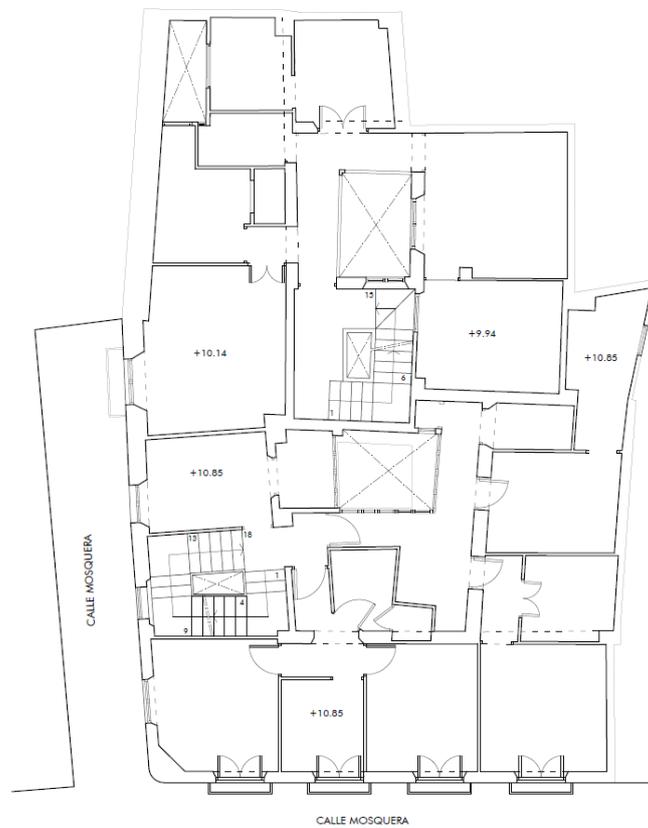
**Figura 33.** Planta baja.



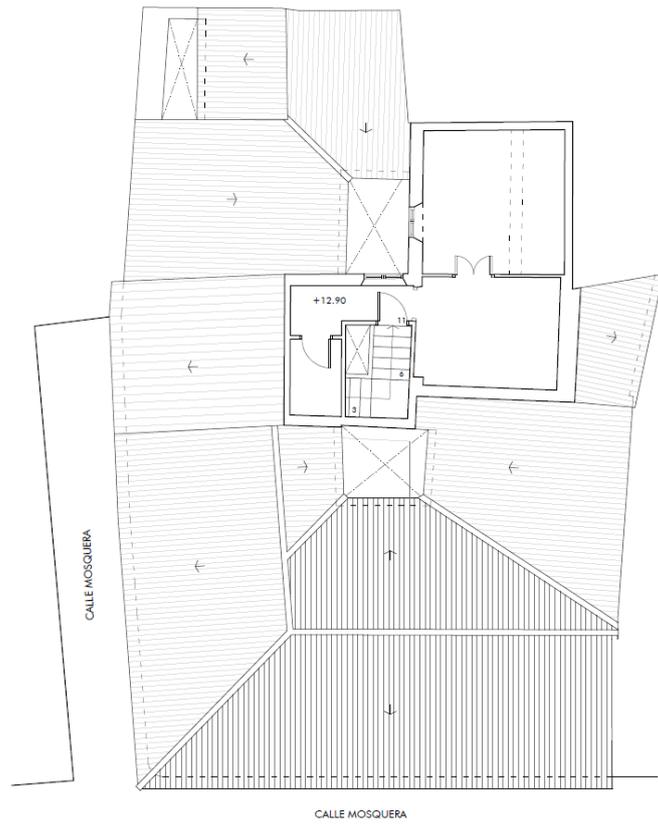
**Figura 34.** Planta primera.



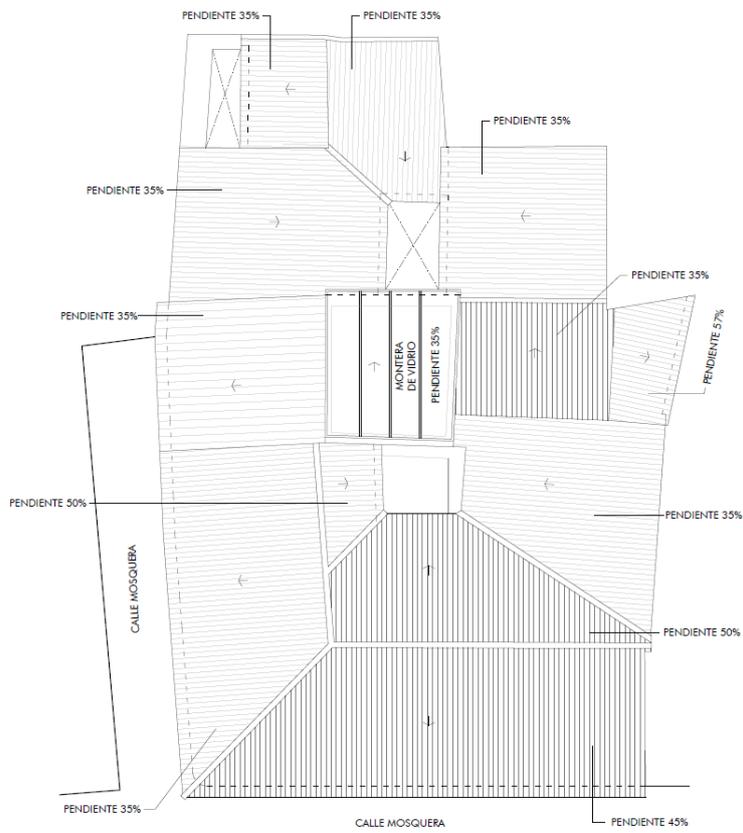
**Figura 35. Planta segunda.**



**Figura 36. Planta tercera.**



**Figura 37. Planta casetón.**



**Figura 38. Plano cubierta.**

## 4.2 Descripción del estado actual del edificio

El edificio se encuentra en alto estado de abandono. Recientemente estuvo frecuentado por personas ocupas, lo que contribuyó en gran medida a su dejadez y degradación. Muestra del estado de abandono del edificio se observa en su fachada principal, donde se pueden observar fisuras y degradación de los muros y, también, los numerosos los grafitis en la parte inferior (**Figura 39**).

Los elementos estructurales presentan síntomas patológicos graves, se realizó un informe técnico por parte de la empresa SIGMAC para Diagnósis del estado de la estructura. [9]. En este informe se resumen los principales problemas encontrados en la estructura del edificio. A continuación, se enumeran los más importantes:

- Deficiencia en la cimentación, lo que ha provocado fisuración de los muros y derivado en deformaciones con rotura de las escalera y grandes deformaciones en los forjados. (**Figura 40**)
- Destrucción parcial de elementos estructurales durante la intervención en los edificios medianeros, estas deficiencias han promovido la deformación de los forjados que apoyan sobre estos muros, imágenes en **Figura 41** y **Figura 42**.
- Presencia de humedad unidad al abandono del edificio, lo que ha provocado graves problemas en la estructura de madera además de favorecer la disgregación de los muros. En el siguiente apartado se analizarán en profundidad las patologías encontradas en los elementos de madera.



*Figura 39. Fachada principal del edificio.*



**Figura 40.** Fisuras y grietas en muros de carga por asentos en cimentación.



**Figura 41.** Rotura y fisuración de los muros de carga debido a la intervención en edificio medianero.



**Figura 42.** Rotura de muros de carga y pilastra de ladrillo provocada por la rehabilitación del edificio colindante.

### 4.3 Descripción de la estructura de madera

La madera presente en la estructura del edificio pertenece a la especie botánica *Pinus sylvestris L.*, la misma especie de madera analizada en los Capítulos 2 y 3 de este Trabajo. Presenta albura y duramen claramente diferenciados siendo éste último resistente a la acción de los coleópteros xilófagos y durable frente a los hongos de pudrición y las termitas. La albura posee una durabilidad muy reducida frente a todos los organismos xilófagos.

#### 4.3.1 Patologías encontradas en los elementos de madera

En el edificio se observan muestras de humedad, se localizan diversos puntos donde la madera muestra una reducción de la sección resistente, coloración parda y rotura en forma prismática, lo cual indica la presencia de hongos xilófagos causantes de la pudrición. También se observan orificios indicativos de la presencia de insectos. Por la tipología de los orificios se puede concluir que se trata de insectos de la familia *Cerambycidae* (carcoma grande). [9]

##### *Hongos Xilófagos:*

Dentro de los hongos xilófagos pueden diferenciarse dos grandes grupos: el primero está formado por los mohos y los hongos cromógenos y el segundo por los hongos de pudrición. Los mohos y hongos cromógenos se alimentan de las sustancias de reserva de la madera y no producen degradaciones en la pared celular, por lo que no afectan a las propiedades mecánicas. Su efecto es el cambio de coloración de la madera. Aunque no resultan peligrosos por su mínima acción degradadora, son indicativos de un mayor riesgo porque crean las condiciones necesarias para el desarrollo de los hongos de pudrición. Los hongos de pudrición son los que producen daños graves en la madera. Se pueden observar ejemplos de estos ataques en las **Figuras 43 y 44**.

##### *Cerambycidos sobre coníferas (carcoma grande):*

Entre los coleópteros de la familia *cerambycidae* que atacan a la madera de coníferas, la especie más representativa y que produce los daños más importantes es el *Hylotrupes Bajulus L.* Sus daños se caracterizan por presentarse en forma de galerías de sección ovalada repletas de un serrín compacto que determina en un orificio, igualmente de sección ovalada y de gran diámetro, alrededor de 7 mm, en comparación con el perforado por otros tipos de carcoma. Se pueden ver ejemplos de estos ataques en las **45 y 46**.



*Figura 43. Pudrición y ataque por hongos.*



*Figura 44. Forjado muy dañado por pudrición: pérdida total de la capacidad portante de las vigas.*



*Figura 45. Estado general de los cargaderos. Ataque por insectos y pudrición en los apoyos.*



*Figura 46. Pudrición y ataque por insectos en pilares y forjados de madera.*

En general los daños que se observan en los forjados y cubiertas se deben principalmente a la humedad y los asentamientos de los muros de carga en varios puntos. Se puede concluir que el estado de conservación, deformación y resistencia estructural es muy heterogéneo, debido principalmente a:

- Reformas mal ejecutadas, que han sobrecargado la estructura, provocando grandes deformaciones, llegando incluso hasta la rotura en algunos puntos.
- Empleo de materiales incorrectos en las reformas realizadas, por ejemplo: vigas metálicas y de hormigón pretensado en planta baja para aumentar los pasos de los muros. Esto ha provocado el incremento de las deformaciones y rotura de los forjados.
- Pudrición de los maderos por exceso de humedad debido a las pérdidas y fugas de las instalaciones de los cuartos húmedos: cocinas y baños, impermeabilización deficiente en cubierta y pérdidas en los bajantes, todo ello ha provocado la deformación y pérdida de sección de los maderos, hasta llegar a pérdidas de sección completa.
- El exceso de humedad ha favorecido el ataque de insectos y hongos, mermando su resistencia mecánica, llegando hasta la rotura en algunos puntos.

En el caso de las cubiertas, el estado de conservación, deformación y resistencia estructural es muy heterogéneo, debido principalmente a una insuficiencia geométrica, exceso de humedad (existen filtraciones). Esto ha provocado la pudrición de los maderos que presentan grandes pérdidas de sección, ataque por insectos, moho y hongos cromógenos. [9]



*Figura 47. Estado de la cubierta de madera.*

#### 4.3.2 Ensayos realizados en la madera

En este apartado se resumen los ensayos realizados por la empresa SIGMAC para la determinación del estado de la estructura de madera, los ensayos realizados se clasifican en tres grupos:

1. Determinación de la humedad
2. Ultrasonidos
3. Profundidad de pudrición

##### *Determinación de la humedad de la madera*

Dado que la madera es un material higroscópico, por lo que cuando se encuentra expuesta a un ambiente de temperatura y humedad relativa determinado, se produce un intercambio de humedad entre madera y el medio. Las moléculas de agua del medio penetran por los espacios existentes en la estructura de la madera quedando en ellas retenidas; este proceso continúa hasta que se establece un estado de equilibrio dinámico entre las moléculas de agua que entran y salen de la madera. La humedad adquirida por la madera en este estado de equilibrio dinámico de intercambio con el medioambiente, para unas condiciones de la humedad y temperatura determinadas. Es lo que se conoce como humedad de equilibrio higroscópico.

Las variaciones de la humedad relativa del aire y de la temperatura a lo largo del año traen consigo unas variaciones en el contenido de humedad de la madera, para que se mantenga el equilibrio entre ambas. La variación anual de la humedad de equilibrio de la madera para Málaga oscila entre el 11 y el 14%. Mediciones superiores indican que la madera está sometida a un aporte no ambiental, esto conlleva la aparición de patologías.

Para la determinación de la humedad se ha utilizado un medidor de humedad por resistencia (xilohigrómetro). También se midió la humedad absoluta de la madera con un termohigrómetro. Por último, se ha realizado la medición de las condiciones ambientales: temperatura y humedad relativa tomada mediante sonda ambiental (termohigrómetro).

##### *Ultrasonidos*

Para comprobar de forma no destructiva la homogeneidad del estado de los maderos, se emplea un equipo de ultrasonidos. El reconocimiento por ultrasonidos es un procedimiento no destructivo, por el cual se determina la velocidad de propagación del sonido a través de los maderos, para posibilitar una estimación de su calidad (ya que dicha velocidad está relacionada con las características de elasticidad y densidad del material) y posibles defectos.

Este método mide el tiempo que tarda en propagarse el sonido entre dos caras paralelas, situadas a una cierta distancia, y sobre las que se sitúan frontalmente los transductores emisor y receptor. La velocidad de propagación viene dada por la siguiente expresión:

$$v = \frac{s}{t}$$

donde;  $s$  es la distancia entre transductores ( $mm$ ),  $t$ : tiempo en microsegundos ( $\mu s$ ) y  $v$ : velocidad de propagación del sonido ( $km/s$ ).

El objetivo de este ensayo es comprobar la homogeneidad y posibles defectos en los maderos (vigas), ya que en la madera la densidad está directamente relacionada con su estado de conservación y con su capacidad mecánica. Cuanta menor sea la densidad, menor será su capacidad resistente. La madera que presenta patologías presenta una densidad inferior, por lo tanto, se obtienen valores de velocidad de propagación inferiores a los de la madera sana.

#### *Índice de penetración*

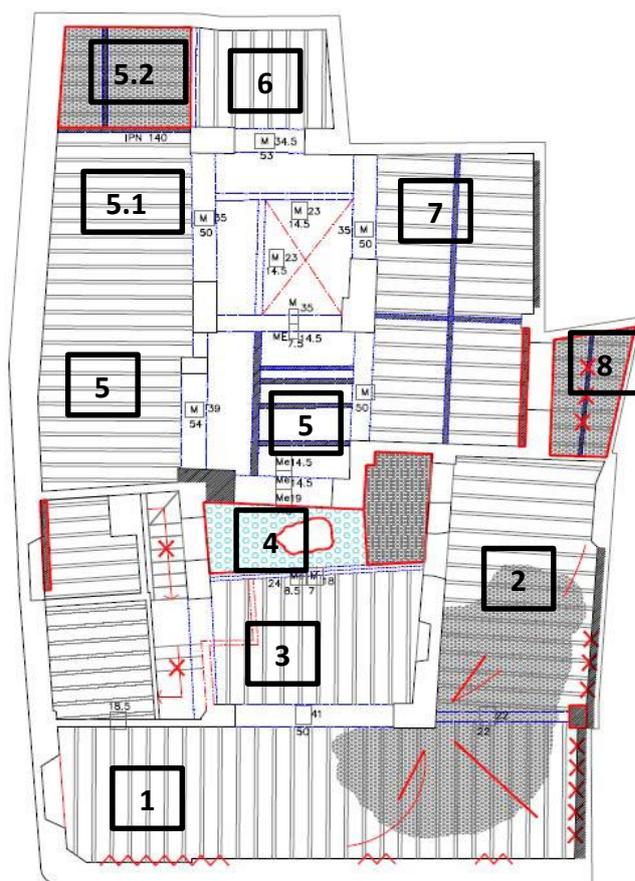
Debido a los daños observados por los efectos de humedad, es necesario comprobar la profundidad de la pudrición detectada, para poder determinar la sección efectiva de los maderos. El ensayo consiste en clavar un punzón de forma manual con una fuerza constante hasta alcanzar la zona sana y medir su profundidad de penetración, con ellos se obtiene un índice de penetración y por tanto la sección efectiva de madero (viga), y permite calcular el índice de pudrición.

#### 4.3.3 Resultados obtenidos de los ensayos realizados en forjado de planta 1ª

En este apartado se muestran los resultados obtenidos del informe técnico realizado por la empresa SIGMAC para el forjado de planta 1ª (techo de planta baja). Se exponen los datos de este forjado porque es donde se va a realizar un caso práctico de aplicación en obra.

Según la clasificación visual de la madera de los forjados se considera que la madera tiene una clasificación mecánica de C-18.

En la **Figura 48** se muestran las zonas donde se ha llevado a cabo la inspección visual para el forjado de planta 1ª. Posteriormente se resumen los resultados obtenidos para cada una de las zonas inspeccionadas. Las conclusiones de este apartado han sido sacadas del informe técnico.



*Figura 48. Plano de forjado de planta 1ª indicando las zonas de realización de la inspección visual.*

- 1-** Vigas en buen estado de conservación: no presentan ataque por insectos ni pudrición por humedad, deformación en la zona sombreada.
- 2-** Vigas que presentan ligera pudrición en las cabezas, equivalente a una pérdida de sección entre el 15-25%, existe deformación en la zona sombreada.
- 3-** Las vigas presentan daños por pudrición con desmoronamiento de la madera debido a un exceso de humedad. La pérdida de sección es superior al 90%. Tramo en ruina.
- 4-** Este tramo se ha recrecido con 20 cm de hormigón, lo que ha provocado un exceso de carga. El forjado está muy deteriorado y degradado por la humedad, el acero está muy corroído y muestra grandes pérdidas de sección, tiene alto riesgo de derrumbe.
- 5-** Vigas en buen estado de conservación: no presentan ataque por insectos ni pudrición por humedad.
- 5.1-** Las vigas visualmente presentan daños por ataque de insectos, se estima una pérdida de sección del 50%.
- 5.2-** La geometría de las vigas es muy irregular, debido al refuerzo que se ha realizado. Visualmente presentan un buen estado. Presentan una ligera deformación.
- 6-** Las vigas presentan daños por pudrición debido a un exceso de humedad, la pérdida de sección es superior al 50%.
- 7-** Zona muy heterogénea, se mezclan vigas sanas y vigas con pudrición y ataque por insectos.
- 8-** Las vigas presentan daños por pudrición con desmoronamiento de la madera debido a un exceso de humedad, la pérdida de sección es superior al 90%. Tramo en ruina.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de los ensayos para el forjado de planta 1ª. Cabe señalar que los ensayos se han realizado de elementos puntuales de cada zona elegidos al azar. En la **Tabla 18** se exponen los resultados de porcentaje de humedad obtenidos para cada una de las zonas estudiadas. La medición se realizó utilizando un termohigrómetro y un xilohigrómetro. La **Tabla 19** recoge los resultados de velocidad obtenidos del ensayo de ultrasonidos. Por último, la **Tabla 20** muestra los datos obtenidos del ensayo de penetración indicando el porcentaje de pérdida de sección que se corresponde para cada uno de los resultados obtenidos.

*Tabla 18. Resultados ensayo de determinación de la humedad.*

Localización	Condiciones ambientales	Humedad (%)
Zona 1	Temperatura: 21,7 °C Humedad relativa: 47,8 %	9,5-10,5
Zona 2		11,0-12,0
Zona 3		13,0-14,0
Zona 5		10,0-11,0
Zona 5.1		11,5-19,0
Zona 5.2		14,0
Zona 6		11,0-16,0
Zona 7		10,0-11,0
Zona 7.1		10,0-11,0
Zona 8		>20

*Tabla 19. Resultado ensayo de ultrasonidos.*

Localización	Velocidad (m/s)	Estado estimado
Zona 1	1,71	Bueno
Zona 2	1,42	Medio
Zona 3	< 1,10	Muy malo
Zona 5	1,77	Bueno
Zona 5.1	1,29	Malo
Zona 5.2	< 1,10	Muy malo
Zona 6	1,15	Malo
Zona 7	1,28	Malo
Zona 7.1	1,28	Malo
Zona 8	< 1,10	Muy malo

Tabla 20. Resultados ensayo de penetración.

Localización	Penetración en (mm)	Perdida de sección (%)
Zona 1	< 1< 1< 1	< 1
Zona 2	Entre 2-5	15-25
Zona 3	Entre 10-15	50
Zona 5	< 1< 1< 1	< 1
Zona 5.1	Entre 10-15	50
Zona 5.2	> 20 y rotura madera	> 90
Zona 6	Entre 10-15	50
Zona 7	2-2-2	10
Zona 7.1	2-2-2	10
Zona 8	> 20 y rotura madera	> 90

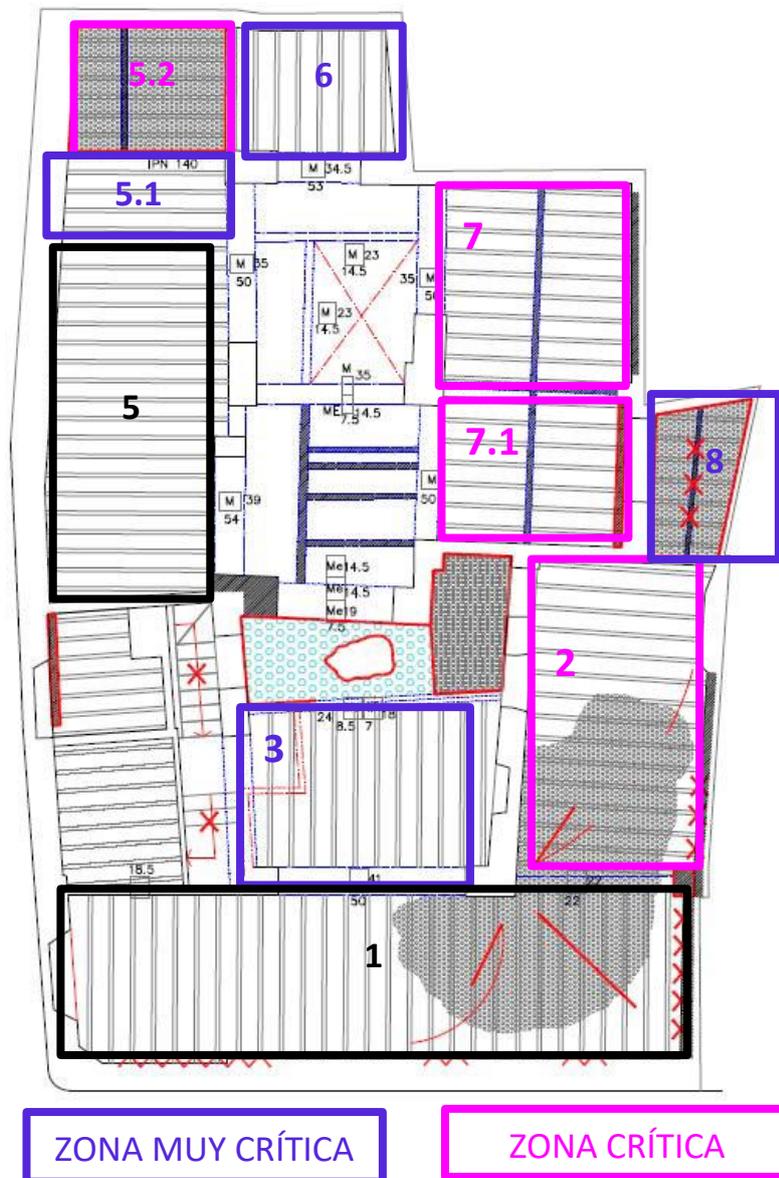


Figura 49. Plano de forjado de planta 1ª indicando zonas inspeccionadas.

Con los datos obtenidos de los ensayos se procede a clasificar las zonas ensayas en: zonas en buen estado, zonas críticas y zonas muy críticas. Se clasifican como **zonas críticas** aquellas zonas que en las cuales no se puede garantizar la resistencia mecánica total de la madera, la madera presenta pérdidas de sección puntuales y la velocidad obtenida en el ensayo de ultrasonidos es inferior a la de la madera en buen estado. Esto es síntoma de una pérdida de densidad que, como se ha explicado anteriormente, está directamente relacionada con su capacidad resistente. **Zonas muy críticas**, zonas en las que los elementos de madera presentan grandes pérdidas de sección y su situación está próxima al colapso, se consideran sin valor residual (**Figura 49**).

#### 4.4 Caso práctico de recuperación y refuerzo de vigas de madera

En este apartado se plantea transferir los datos obtenidos de los ensayos realizados en el laboratorio a un caso práctico de una rehabilitación de un edificio. Para ello se propone el desmontaje de las vigas de la zona marcada como zona 2 en el plano de la **Figura 48**, las vigas en esta zona no presentan daños graves (**Figura 50**). A partir de las vigas obtenidas se elaborarán vigas reforzadas con FRP que se utilizarán en la construcción de un nuevo forjado en la zona 3 del forjado de planta 1ª.

Se ha elegido esta zona por las siguientes razones:

1. De la inspección visual se observa que la pudrición y problemas de los maderos corresponden solo a algunas de las piezas, por lo que existen vigas de madera en aparente buen estado de conservación.
2. Los resultados obtenidos de los ensayos realizados no indican la existencia de grandes daños. Del ensayo de penetración se obtiene que las piezas han perdido un porcentaje entre el 15 al 20 por ciento. De la prueba de ultrasonidos se obtiene que la velocidad es de 1,42 m/s lo cual se considera un estado de conservación medio. El contenido de humedad no supera el 12%, por lo que se considera que no existen problemas de humedad en esa zona.
3. La sección de las vigas en esta zona es bastante homogénea de (120 x 80) mm, dimensiones muy similares a las vigas reforzadas elaboradas y ensayadas en el apartado 3 de este trabajo (120 x 60) mm.
4. Por la necesidad de realización del desmontaje selectivo y debido a la demolición parcial del muro medianero sobre el que apoyaba la estructura (detalle en la **Figura 51**) que ha producido un desplome de unos 20 cm, se considera necesario reforzar esta parte del muro y desmontar la estructura.
5. El desmontaje de esta zona es necesario puesto que en esta zona se plantea la nueva caja de escaleras del edificio, véase plano de estado reformado de esta planta en la **Figura 52**.

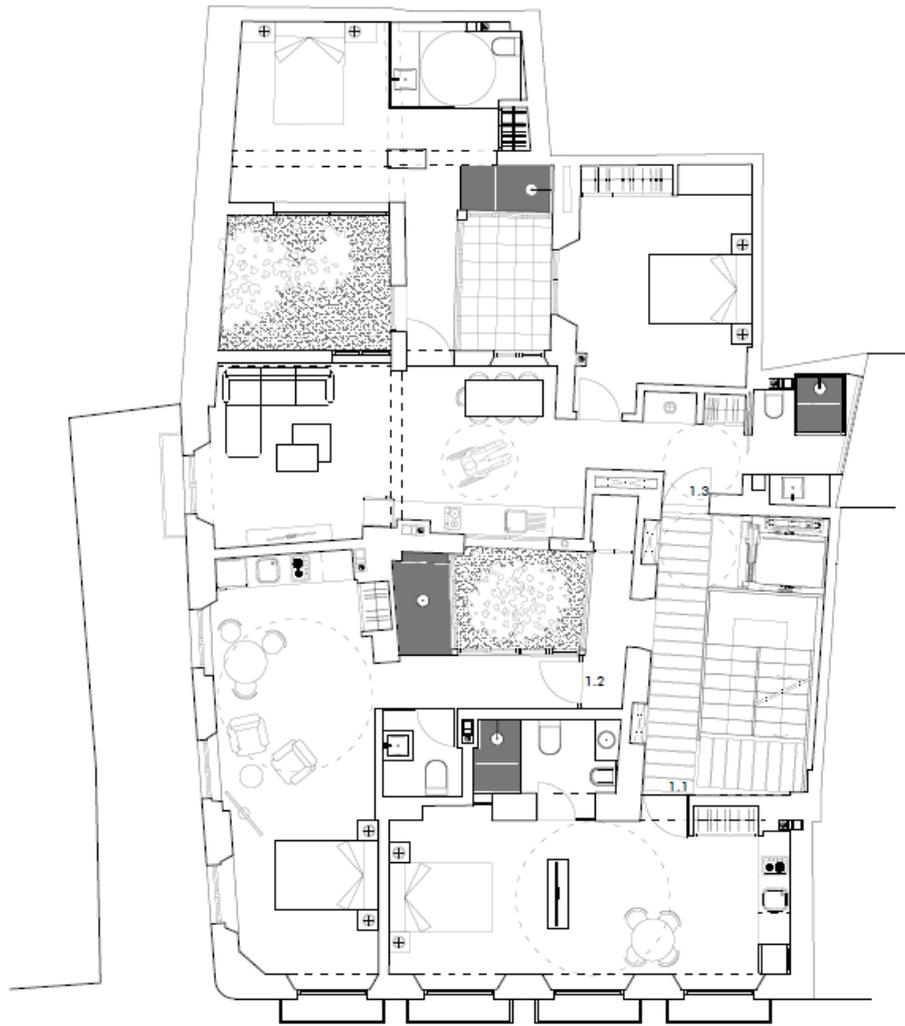
Además, la resistencia obtenida de la clasificación visual realizada por la empresa SIGMAC es de C-18 coincidente con la clasificación visual realizada a la madera de las vigas base utilizadas en los ensayos.



*Figura 50. Imágenes de la zona 2 del forjado de planta 1ª.*



*Figura 51. Imagen de la rotura del muro medianero. forjado zona 2.*



*Figura 52. Estado reformado planta baja.*

#### 4.4.1 Diseño del refuerzo y ejecución

En este apartado se explica el caso práctico de intervención realizada en el forjado de planta primera del edificio sito en calle Mosquera nº 7 y 9. En este apartado se detallan los procedimientos que se llevarán a cabo. La intervención consistirá en el desmontaje de la estructura del sector de forjado marcado como zona 2. Posteriormente se procederá a la elaboración de vigas reforzadas utilizando un refuerzo de plástico reforzado con tejido de carbono (MAPEWRAP C UNI-AX) y un injerto de madera de chopo. Una vez elaboradas las nuevas vigas se reutilizarán para la ejecución del forjado marcado como zona 3, detalles del hueco del nuevo forjado pueden observarse en la **Figura 53**.

De entre las tres tipologías de FRP estudiadas en el apartado 3, se ha seleccionado utilizar para el refuerzo el tejido de carbono. Esta decisión está motivada principalmente debido a que en los ensayos de caracterización mecánica la tipología referente a este refuerzo, es decir la RB\_P\_FC, obtuvo los mejores resultados de resistencia. Además, los tejidos permiten ser ajustados a las dimensiones exactas de las vigas y son más económicos. Las vigas obtenidas se clasificarán atendiendo a la nomenclatura RRB\_P\_FC (*Reinforced Recycled Beam – Sylvester pine – Fabric of Carbon*) seguida de un numeral.

En primer lugar, se procederá al desmontaje del forjado. Para ello se apuntalará el cargadero que se encuentra en el hueco de paso (**Figura 50**). Para el desmontaje se eliminará primero la tablazón. Este trabajo es delicado y se deben tomar todas las medidas de seguridad necesarias puesto que la tablazón se encuentra en mal estado en algunos puntos y esto puede comprometer la seguridad. Una vez eliminada la tablazón se procederá con el desmontaje selectivo de las 15 vigas que tiene este forjado (**Figura 54**).

El desmontaje de las vigas no debería suponer grandes dificultades ya que las vigas se encuentran apoyadas sobre un muro de carga de gran espesor. No obstante, al tratarse de un muro antiguo, el desmontaje de las vigas puede suponer una pérdida de arrostramiento horizontal por lo que el desmontaje se debe realizar tomando todas las medidas de seguridad.

La **Tabla 21** recoge los datos de las dimensiones de las vigas indicando el tramo de longitud entre apoyos, esta parte es la que se encuentra en mejor estado de conservación. A estas medidas de longitud hay que añadirle entre 15 y 20 *cm* a cada lado de apoyo en el muro para obtener la longitud total de la viga. Se evaluarán sus daños y estado de conservación, prestando especial atención a las cabezas de las vigas. Esta zona suele ser la más afectada por pudrición debido a la humedad de capilaridad del muro.

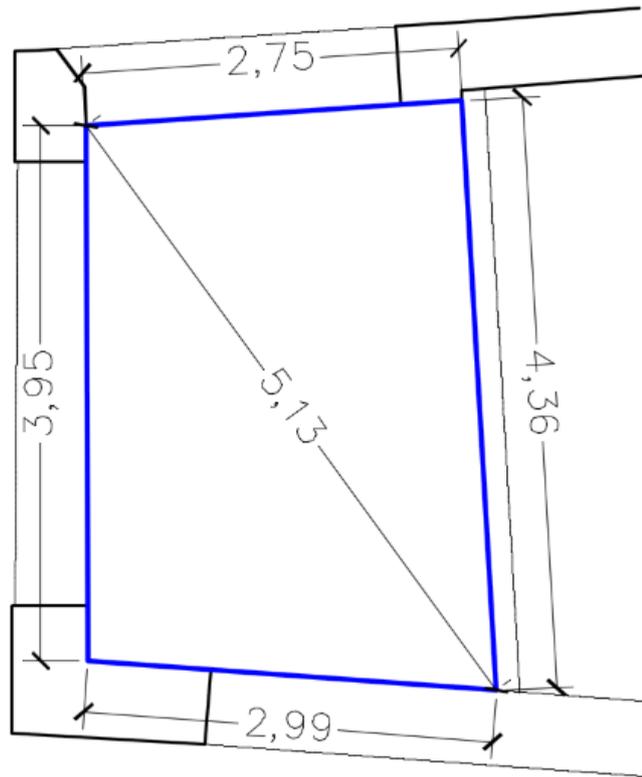


Figura 53. Dimensiones de zona 3 de forjado de planta 1ª.



Figura 54. Plano de vigas de zona 2. Forjado de planta 1ª.

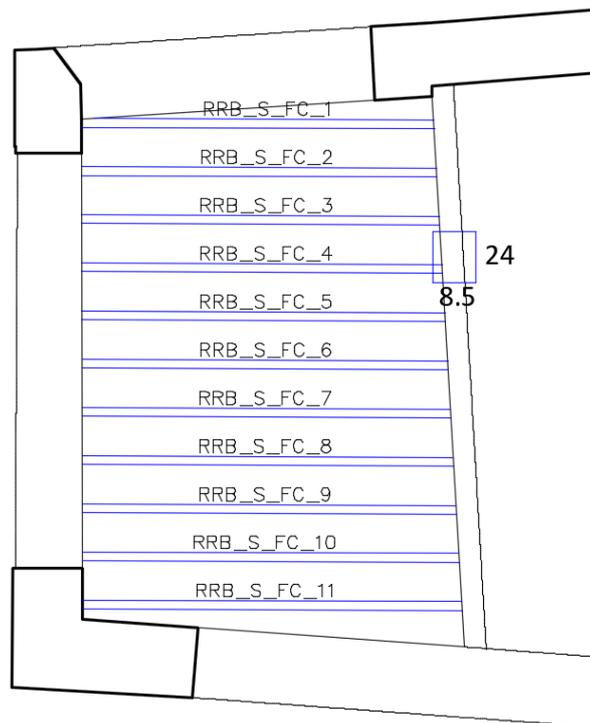
**Tabla 21.** Dimensiones de las vigas de la zona 2. Forjado de plana 1ª.

Viga	Dimensiones (mm)		
	h	b	L entre apoyos
VIGA 1	110	80	3170
VIGA 2	120	85	3110
VIGA 3	110	80	3110
VIGA 4	115	80	3110
VIGA 5	110	90	3110
VIGA 6	120	80	3250
VIGA 7	110	80	3240
VIGA 8	110	80	3240
VIGA 9	105	80	3240
VIGA 10	110	85	3240
VIGA 11	120	80	3240
VIGA 12	110	90	3240
VIGA 13	110	80	3240
VIGA 14	120	80	3240
VIGA 15	115	90	2890

Las vigas serán sometidas a los siguientes ensayos:

- Clasificación visual
- Determinación del contenido de humedad (xilohigrómetro)
- Determinación de su densidad

Para la creación del nuevo forjado se van a necesitar 11 unidades de vigas reforzadas. Estas apoyarán sobre el muro de carga en uno de sus lados y por el otro en una viga de madera de escuadría (240 x 85)  $mm^2$ . De los datos obtenidos de los ensayos, se elegirán los 11 ejemplares que muestren mejor estado de conservación. Estos se utilizarán para la elaboración de las 11 vigas base.



*Figura 55. Detalle de ubicación de vigas en zona 3. Forjado de planta 1ª.*

A partir de las vigas base y los injertos de chopo se elaborarán las vigas reforzadas, teniendo en cuenta las longitudes finales necesarias para las vigas resultantes las cuales se encuentran recogidas en la **Tabla 22**. En el proceso de elaboración se tendrán en cuenta los procedimientos explicados en el apartado 3 de este trabajo para las vigas de tipología RB\_P\_FC. Proceso de elaboración:

1. Se aserrarán y cepillarán las 15 vigas hasta obtener unas dimensiones de  $(100 \times 70) \text{ mm}^2$ , también se eliminará la zona deteriorada en sus extremos, por ejemplo: zona de las cabezas que presente pudrición.
2. Se procederá a la determinación de su densidad y clasificación visual. La prueba de medición de la humedad se debe realizar antes de desmontar el forjado, para que las vigas conserven la humedad a la que estaban sometidas durante su puesta en obra.
3. Se seleccionarán las 11 vigas base atendiendo a las dimensiones y clasificación.
4. Se colocarán 11 injertos de chopo de la longitud de la viga base y de sección  $(30 \times 70) \text{ mm}^2$ .
5. Se continuará con la aplicación del refuerzo MAPEWRAP C UNI-AX de MAPEI y la resina epoxídica MAPEWRAP 21 siguiendo los pasos indicados en el apartado 3 de este trabajo.

**Tabla 22.** Longitud necesaria de las vigas reforzadas RRB\_S\_FC

Viga	Longitud necesaria (mm)
RRB_S_FC_1	3180
RRB_S_FC_2	3170
RRB_S_FC_3	3160
RRB_S_FC_4	3150
RRB_S_FC_5	3140
RRB_S_FC_6	3130
RRB_S_FC_7	3120
RRB_S_FC_8	3110
RRB_S_FC_9	3100
RRB_S_FC_10	3090
RRB_S_FC_11	3080

Las vigas resultantes se ubicarán según el plano recogido en la **Figura 55**. La separación entre ejes será de 380 mm. La sección resultante de las vigas reforzadas será de (131 x 70) mm<sup>2</sup>. Véase detalle en la **Figura 56**.



**Figura 56.** Detalle de viga reforzada RRB\_S\_FC



## 5 CONCLUSIONES

### 5.1 Conclusiones del estudio de caracterización de la madera de pino

Se observa que la clasificación visual no es un método fiable para la obtención de la clase resistente en la madera. Sólo para el 10% de los casos la clase resistente obtenida de la clasificación visual es coincidente con los datos obtenidos del ensayo a flexión.

La propiedad mecánica que determina los valores de clase resistente en el ensayo destructivo a flexión es la rigidez (MOE) por ser la más restrictiva en todos los casos. En el análisis de los resultados del ensayo a flexión hay que comprobar si se produce torsión en el momento del ensayo, esto puede dar valores de resistencia superiores a los reales.

### 5.2 Conclusiones del estudio de caracterización de las vigas reforzadas

Se observa que en todos los casos se produce un fallo promovido por la deslaminación FRP-madera o pino-chopo, existiendo dos tipos de comportamiento: o bien tras producirse la deslaminación se produce la rotura o bien tras producirse la deslaminación el injerto de chopo deja prácticamente de trabajar y la viga de pino continúa trabajando hasta que se produce la rotura.

La resistencia de las vigas reforzadas es bastante homogénea independientemente del tipo de refuerzo utilizado con un valor medio de 30.6 MPa. Aunque los valores son muy similares, se observa que los valores de resistencia para los refuerzos de carbono (FC y LC) son ligeramente superiores a las probetas sin FRP (17% y 8%, respectivamente) y fibra de basalto.

Al comparar los valores de rigidez obtenidos teóricamente con los valores experimentales para las probetas pino/FRP/chopo. Se observa que la variación es mínima, siendo del 3%, 1% y 1% de variación para los refuerzos FB, FC y LC, respectivamente. Si tenemos en cuenta que para el cálculo teórico no se ha tenido en cuenta la existencia de FRP esto parece indicar que cuando se usa para el refuerzo un elemento de madera (injerto) con un espesor y masa considerable y su módulo elástico es superior o comparable al de la viga de base (en torno a 10000 MPa del chopo frente a los 8000-9000 MPa del pino) esto provoca que la contribución del FRP sea prácticamente nula.

### 5.3 Conclusiones del caso práctico de aplicación en obra

Se realiza el caso práctico de aplicación de un sistema de viga reforzada de pino con tejido de carbono y un injerto de chopo como caso de aplicación en un forjado de vigas de madera en un edificio histórico en Málaga capital.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

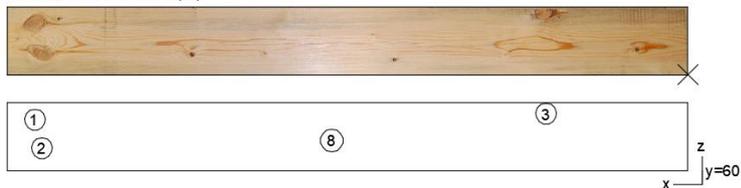
- [1] J. Monjo Carrió y L. Maldonado Ramos, «Patología y técnicas de intervención en estructuras arquitectónicas,» pp. 22-23;162-203.
- [2] E. N. Matauco, «Madera, en restauración y rehabilitación,» *Informes de la construcción ISSN:0020-0883*, pp. Vol.59,506,123-130, 2007.
- [3] A. Cuchí, «Reutilización y reciclaje de residuos del sector de la construcción,» *Ambienta*, vol. 66, pp. 59-68, 2007.
- [4] E. Moliner Santisteve, J. Sanfélix, D. Garraín Cordero, R. Vidal y J. Lloveras Macià, «Nuevas estrategias en la gestión de residuos de construcción y demolición,» de *Congreso de Ingeniería de Proyectos (AEIPRO)*, Madrid, 2010.
- [5] *UNE-EN 1912:2012/AC: 2013. Madera estructural clases resistentes. Asignación de calidades visuales y especies.*, Madrid: (AENOR), Asociación Española de Normalización.
- [6] P. de la Rosa, A. Cobo y M. González García , «Bending reinforcement of timber beams with composite carbon fiber and basalt fiber materials,» *Composites Part B Engineering*, vol. 55, pp. 528-536, 2013.
- [7] A. Miravete, E. Larrodé, L. Castejón, R. Clemente, . M. Á. Jiménez, M. Lizaranzu, J. Cuartero, D. Revuelta, C. Millán , V. Gómez, J. Calvo, N. Tolosana y J. L. Peralta, *Materiales Compuestos I*, Barcelona: Reverté. S.A., 2007.
- [8] A. Díaz Casado de Amezua, «Proyecto ejecución Mosquera 7 y 9,» Málaga, 2019.
- [9] SIGMAC Geotecnia y control de calidad, «Diagnosis edificio en calle Mosquera nº 7-9,» Málaga, 2018.
- [10] P. de la Rosa García, «Análisis de elementos de madera reforzados con materiales compuestos,» Madrid, 2013.
- [11] *UNE EN 56544:2011. Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas*, Asociación Española de Normalización (AENOR), 2011.

## ANEXO 1

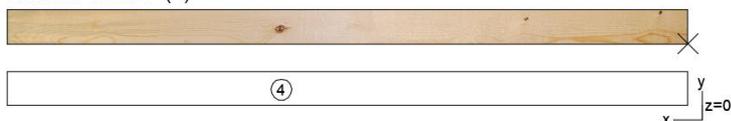
# FICHA 1: VIGA CH-S-1



CARA SUPERIOR (C)



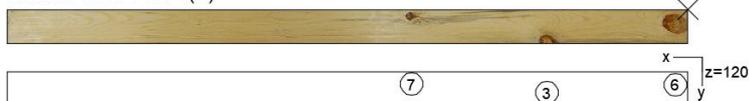
CARA FRONTAL (A)



CARA INFERIOR (D)



CARA POSTERIOR (B)



DATOS GENERALES	
Dimensiones h x b x L (mm)	(120 x 60 x 1240)
Peso (g)	4803.7
Ø NUDOS CARA (h) (mm)	52
Ø NUDOS CANTO (b) (mm)	35
FENDAS (de secado)	Sí
Longitud (mm)	100
Profundidad (mm)	1
ALTERACIONES BIOLÓGICAS	Azulado (20% superficie)
DEFORMACIONES	No
CLASIFICACIÓN VISUAL NORMA UNE 56544:2011	ME 2
CLASE RESISTENTE SEGÚN NORMA UNE-EN 1912:2012/AC: 2013	C-X
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	556

DEFECTOS MÁS SIGNIFICATIVOS (mm)		
Nudos	Ø (mm)	Coordenadas (x,y,z)
1 y 2	(30 + 32) = 52	(1150,60,91)(1140,60,40) Ag
3	21	(250,60,110) Ar
4	13	(715,29,0)
5	24	(1050,0,91)
6	35	(22,23,120)
7	13	(489,13,120)
Fendas	Longitud (mm)	Espesor (mm)
8	100	1
<b>Desviaciones de la fibra</b>		
<b>Gemas</b>		
<b>Médula</b>		
<b>Observaciones</b>		

Ag= Nudo agrupado

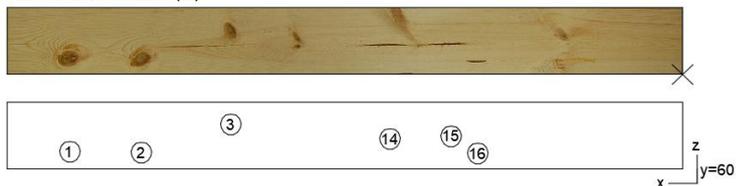
Ar= Nudo de arista

P= Nudo pasante

## FICHA 2: VIGA CH-S-2



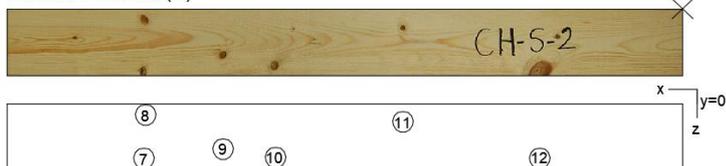
CARA SUPERIOR (C)



CARA FRONTAL (A)



CARA INFERIOR (D)



CARA POSTERIOR (B)



DATOS GENERALES	
Dimensiones h x b x L (mm)	(120 x 60 x 1239)
Peso (g)	4307
Ø NUDOS CARA (h) (mm)	55
Ø NUDOS CANTO (b) (mm)	32
FENDAS (de secado)	No
Longitud (mm)	
Profundidad (mm)	
ALTERACIONES BIOLÓGICAS	No
DEFORMACIONES	No
CLASIFICACIÓN VISUAL NORMA UNE 56544:2011	ME 2
CLASE RESISTENTE SEGÚN NORMA UNE-EN 1912:2012/AC: 2013	C-X
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	482

DEFECTOS MÁS SIGNIFICATIVOS (mm)		
Nudos	Ø (mm)	Coordenadas (x,y,z)
1 y 2	(28+27)=55	((1080,60,32) (960,60,30) Ag
3	28	(800,60,81)
4 y 5	(12+13)=25	(853,18,0) (751,34,0) Ag
6	32	(248,40,0)
7, 8 y 9	(19+19+15)=53	(957,0,112) Ar (954,0,21) (816,0,81) Ag
9 y 10	(15+17)=32	(816,0,81) (723,0,95)
11	11	(497,0,33)
12	30	(250,0,105)
13	12	(1077,11,120)
<b>Fendas</b>	<b>Longitud (mm)</b>	<b>Espesor (mm)</b>
<b>Desviaciones de la fibra</b>		
<b>Gemas</b>		
<b>Médula</b>		
<b>Observaciones</b>	Bolsas de resina (14,15 y 16)	

Ag= Nudo agrupado

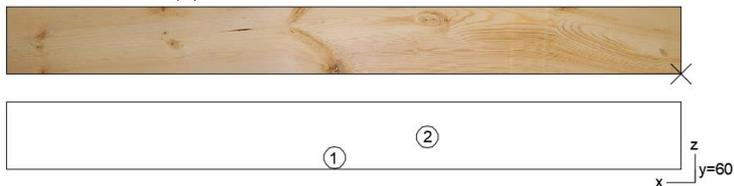
Ar= Nudo de arista

P= Nudo pasante

### FICHA 3: VIGA CH-S-3



CARA SUPERIOR (C)



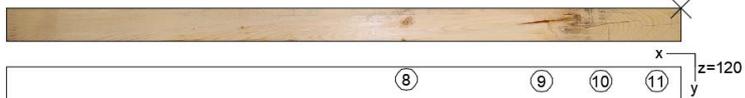
CARA FRONTAL (A)



CARA INFERIOR (D)



CARA POSTERIOR (B)



DATOS GENERALES	
Dimensiones h x b x L (mm)	(120 x 61 x 1239)
Peso (g)	5460.4
Ø NUDOS CARA (h) (mm)	37
Ø NUDOS CANTO (b) (mm)	24
FENDAS (de secado)	Sí
Longitud (mm)	400
Profundidad (mm)	1.5
ALTERACIONES BIOLÓGICAS	No
DEFORMACIONES	No
CLASIFICACIÓN VISUAL NORMA UNE 56544:2011	ME 2
CLASE RESISTENTE SEGÚN NORMA UNE-EN 1912:2012/AC: 2013	C-X
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	602

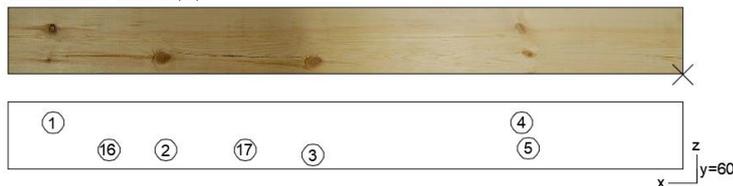
DEFECTOS MÁS SIGNIFICATIVOS (mm)		
Nudos	Ø (mm)	Coordenadas (x,y,z)
2	26	(450,60,58)
3	13	(1105,0,32)
4	23	(859,0,11)
5	25	(650,0,78)
6	30	(442,0,87)
7	37	(186,0,99)
8	24	(488,21,120)
Fendas	Longitud (mm)	Espesor (mm)
9	190	1.8
10	200	1.5
11	180	2
12	400	1.5
<b>Desviaciones de la fibra</b>		
<b>Gemas</b>		
<b>Médula</b>		
<b>Observaciones</b>	Bolsas de resina (1)	

Ag= Nudo agrupado  
Ar= Nudo de arista  
P= Nudo pasante

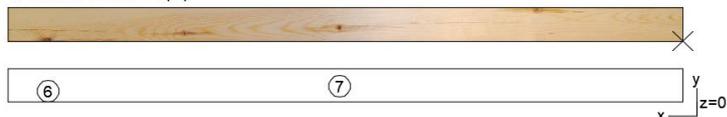
## FICHA 4: VIGA CH-S-4



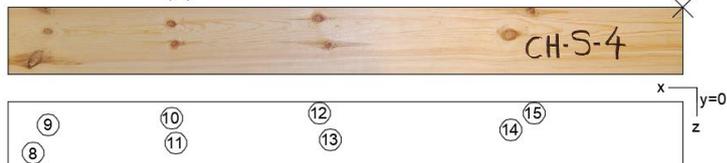
CARA SUPERIOR (C)



CARA FRONTAL (A)



CARA INFERIOR (D)



CARA POSTERIOR (B)



DATOS GENERALES	
Dimensiones h x b x L (mm)	(120 x 60 x 1238)
Peso (g)	4887.2
Ø NUDOS CARA (h) (mm)	46
Ø NUDOS CANTO (b) (mm)	12
FENDAS (de secado)	Sí
Longitud (mm)	520
Profundidad (mm)	1.5
ALTERACIONES BIOLÓGICAS	No
DEFORMACIONES	No
CLASIFICACIÓN VISUAL NORMA UNE 56544:2011	ME 2
CLASE RESISTENTE SEGÚN NORMA UNE-EN 1912:2012/AC: 2013	C-X
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	548

DEFECTOS MÁS SIGNIFICATIVOS (mm)		
Nudos	Ø (mm)	Coordenadas (x,y,z)
1	23	(1120,60,81)
2	28	(920,60,33)
3	22	(658,60,24)
4 y 5	(22+18)=40	(286,60,83) (275,60,37) Ag
6	11	(1129,6,0) Ar
7	12	(610,29,0)
8 y 9	(33+13)=46	(1156,0,92) (1129,0,41) Ag
10 y 11	(16+17)=33	(909,0,29) (902,0,65) Ag
12 y 13	(17+18)=35	(646,0,19) (626,0,68) Ag
14 y 15	(23+13)=33	(304,0,50) (266,0,6) Ag
<b>Fendas</b>	<b>Longitud (mm)</b>	<b>Espesor (mm)</b>
16	167	1.4
17	251	1
18	520	1.5
19	376	1.2
<b>Desviaciones de la fibra</b>		
<b>Gemas</b>		
<b>Médula</b>		
<b>Observaciones</b>		

Ag= Nudo agrupado

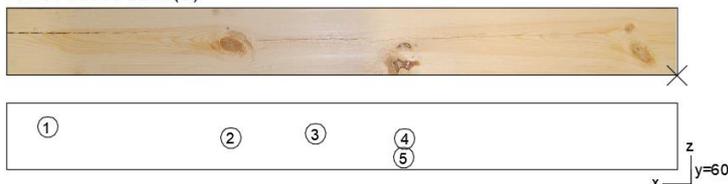
Ar= Nudo de arista

P= Nudo pasante

## FICHA 5: VIGA CH-S-5



CARA SUPERIOR (C)



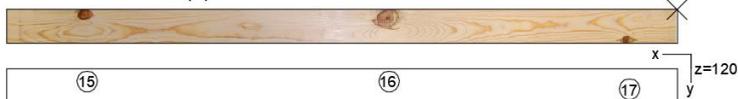
CARA FRONTAL (A)



CARA INFERIOR (D)



CARA POSTERIOR (B)



### DATOS GENERALES

DATOS GENERALES	
Dimensiones h x b x L (mm)	(120 x 60 x 1240)
Peso (g)	4295.3
Ø NUDOS CARA (h) (mm)	41
Ø NUDOS CANTO (b) (mm)	34
FENDAS (de secado)	Sí
Longitud (mm)	300
Profundidad (mm)	1.2
ALTERACIONES BIOLÓGICAS	No
DEFORMACIONES	No
CLASIFICACIÓN VISUAL NORMA UNE 56544:2011	ME 2
CLASE RESISTENTE SEGÚN NORMA UNE-EN 1912:2012/AC: 2013	C-X
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	481

### DEFECTOS MÁS SIGNIFICATIVOS (mm)

Nudos	Ø (mm)	Coordenadas (x,y,z)
2	32	(614,60,56)
6	23	(1084,28,0)
7	19	(832,19,0) Ar
8	22	(74,50,0)
9 y 10	(14+19)=33	(1095,0,97) (1075,0,62) Ag
11 y 12	(14+27)=41	(812,0,60) (779,0,110) Ar Ag
13	27	(477,0,80)
14	24	(61,0,74)
15	19	(1056,9,120) Ar
16	34	(516,14,120) Ar
17	16	(89,50,120)
<b>Fendas</b>	<b>Longitud (mm)</b>	<b>Espesor (mm)</b>
1	300	1.2
3	250	1.1
<b>Desviaciones de la fibra</b>		
<b>Gemas</b>		
<b>Médula</b>		
<b>Observaciones</b>	Bolsas de resina (4 y 5)	

Ag= Nudo agrupado

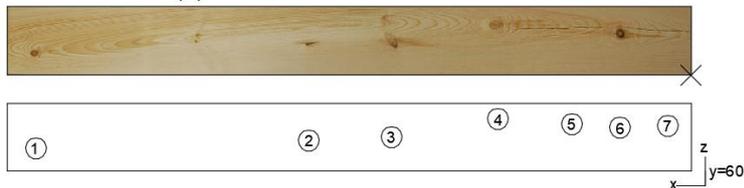
Ar= Nudo de arista

P= Nudo pasante

## FICHA 6: VIGA CH-S-6



CARA SUPERIOR (C)



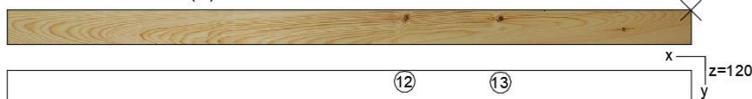
CARA FRONTAL (A)



CARA INFERIOR (D)



CARA POSTERIOR (B)



DATOS GENERALES	
Dimensiones h x b x L (mm)	(120 x 60 x 1240)
Peso (g)	5270.8
Ø NUDOS CARA (h) (mm)	26
Ø NUDOS CANTO (b) (mm)	13
FENDAS (de secado)	Sí
Longitud (mm)	780
Profundidad (mm)	1.5
ALTERACIONES BIOLÓGICAS	No
DEFORMACIONES	No
CLASIFICACIÓN VISUAL NORMA UNE 56544:2011	ME 2
CLASE RESISTENTE SEGÚN NORMA UNE-EN 1912:2012/AC: 2013	C-X
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	590

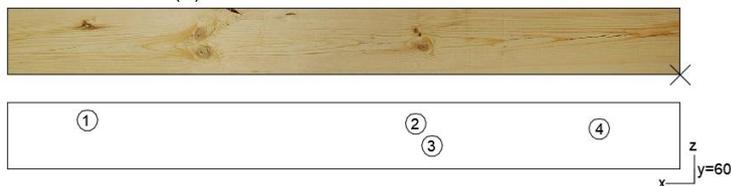
DEFECTOS MÁS SIGNIFICATIVOS (mm)		
Nudos	Ø (mm)	Coordenadas (x,y,z)
1	16	(1149,60,40)
3	26	(526,60,60)
4	18	(339,60,92)
6	16	(124,60,76)
9	12	(1136,0,22)
11	16	(345,0,73)
12	13	(500,14,120)
13	11	(333,15,120)
Fendas	Longitud (mm)	Espesor (mm)
5	140	1.5
7	150	1.6
8	780	1.5
10	250	1.3
<b>Desviaciones de la fibra</b>		
<b>Gemas</b>		
<b>Médula</b>		
<b>Observaciones</b>	Bolsas de resina (2)	

Ag= Nudo agrupado  
Ar= Nudo de arista  
P= Nudo pasante

## FICHA 7: VIGA CH-S-7



CARA SUPERIOR (C)



CARA FRONTAL (A)



CARA INFERIOR (D)



CARA POSTERIOR (B)



DATOS GENERALES	
Dimensiones h x b x L (mm)	(120 x 60 x 1240)
Peso (g)	5170.5
Ø NUDOS CARA (h) (mm)	29
Ø NUDOS CANTO (b) (mm)	36
FENDAS (de secado)	Sí
Longitud (mm)	321
Profundidad (mm)	1.5
ALTERACIONES BIOLÓGICAS	No
DEFORMACIONES	No
CLASIFICACIÓN VISUAL NORMA UNE 56544:2011	ME 2
CLASE RESISTENTE SEGÚN NORMA UNE-EN 1912:2012/AC: 2013	C-X
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	579

DEFECTOS MÁS SIGNIFICATIVOS (mm)		
Nudos	Ø (mm)	Coordenadas (x,y,z)
3	29	(457,60,53)
6	12	(864,41,0)
7	22	(798,10,0) Ar
9	27	(843,0,66)
10	24	(400,0,9) Ar
11	36	(817,26,120)
12	26	(423,14,120) Ar
Fendas	Longitud (mm)	Espesor (mm)
4	321	1.2
8	214	1.5
<b>Desviaciones de la fibra</b>		
<b>Gemas</b>		
<b>Médula</b>		
<b>Observaciones</b>	Bolsas de resina (1 y 4)	

Ag= Nudo agrupado  
Ar= Nudo de arista  
P= Nudo pasante

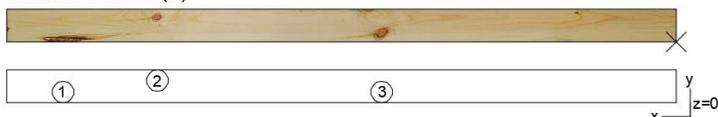
## FICHA 8: VIGA CH-S-8



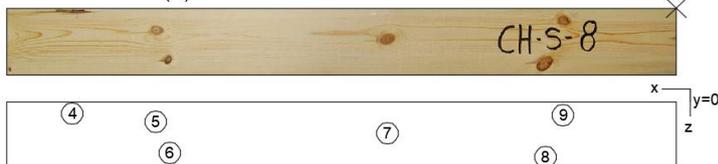
CARA SUPERIOR (C)



CARA FRONTAL (A)



CARA INFERIOR (D)



CARA POSTERIOR (B)



DATOS GENERALES	
Dimensiones h x b x L (mm)	(120 x 60 x 1237)
Peso (g)	4479.2
Ø NUDOS CARA (h) (mm)	48
Ø NUDOS CANTO (b) (mm)	23
FENDAS (de secado)	No
Longitud (mm)	
Profundidad (mm)	
ALTERACIONES BIOLÓGICAS	No
DEFORMACIONES	No
CLASIFICACIÓN VISUAL NORMA UNE 56544:2011	ME 2
CLASE RESISTENTE SEGÚN NORMA UNE-EN 1912:2012/AC: 2013	C-X
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	503

DEFECTOS MÁS SIGNIFICATIVOS (mm)		
Nudos	Ø (mm)	Coordenadas (x,y,z)
2	14	(930,45,0)
3	23	(527,20,0)
5 y 6	(18+17)=35	(933,0,35) (908,0,92) Ag
7	23	(517,0,56)
8 y 9	(28+20)=48	(235,0,98) (202,0,23) Ag
Fendas	Longitud (mm)	Espesor (mm)
Desviaciones de la fibra		
Gemas		
Médula		
Observaciones	Bolsas de resina (1 y 4)	

Ag= Nudo agrupado

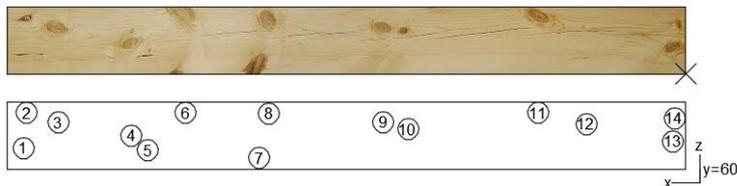
Ar= Nudo de arista

P= Nudo pasante

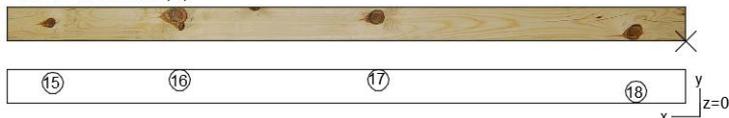
## FICHA 9: VIGA CH-S-9



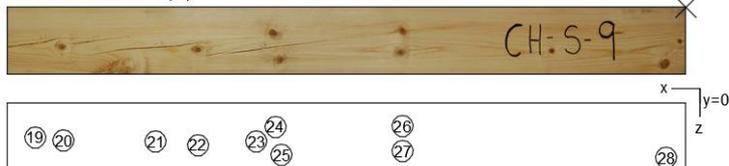
CARA SUPERIOR (C)



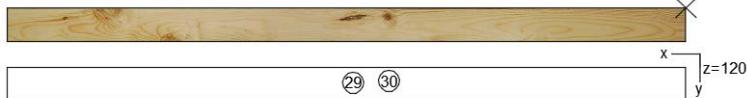
CARA FRONTAL (A)



CARA INFERIOR (D)



CARA POSTERIOR (B)



### DATOS GENERALES

DATOS GENERALES	
Dimensiones h x b x L (mm)	(120 x 60 x 1240)
Peso (g)	5233.5
Ø NUDOS CARA (h) (mm)	73
Ø NUDOS CANTO (b) (mm)	39
FENDAS (de secado)	Sí
Longitud (mm)	258
Profundidad (mm)	1.6
ALTERACIONES BIOLÓGICAS	No
DEFORMACIONES	No
CLASIFICACIÓN VISUAL NORMA UNE 56544:2011	ME 2
CLASE RESISTENTE SEGÚN NORMA UNE-EN 1912:2012/AC: 2013	
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	586

### DEFECTOS MÁS SIGNIFICATIVOS (mm)

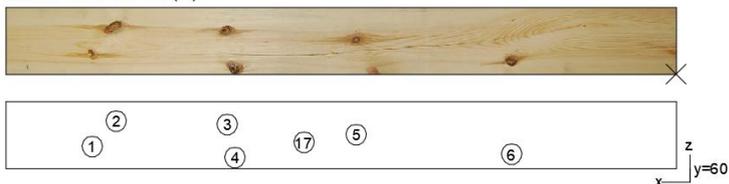
Nudos	Ø (mm)	Coordenadas (x,y,z)
3 y 4	(28+27)=55	((1080,60,32) (960,60,30) Ag
4 y 6	28	(800,60,81)
7 y 8	(12+13)=25	(853,18,0) (751,34,0) Ag
9 y 10	32	(248,40,0)
11	(19+19+15)=53	(957,0,112) Ar (954,0,21) (816,0,81) Ag
13 y 14	(15+17)=32	(816,0,81) (723,0,95)
15	11	(497,0,33)
16	30	(250,0,105)
17	12	(1077,11,120)
18	28	(88,41,0)
20	15	(1099,0,69)
22	12	(862,0,75)
24	16	(726,0,43)
25	16	(715,0,96)
26	16	(501,0,43)
27	15	(500,0,80)
28	19	(35,0,99)
30	13	(526,13,120)
<b>Fendas</b>	<b>Longitud (mm)</b>	<b>Espesor (mm)</b>
12	254	1.2
19	258	1.6
21	246	1.5
23	194	1.3
<b>Desviaciones de la fibra</b>		
<b>Gemas</b>		
<b>Médula</b>		
<b>Observaciones</b>	Bolsas de resina (14,15 y 16)	

Ag= Nudo agrupado  
Ar= Nudo de arista  
P= Nudo pasante

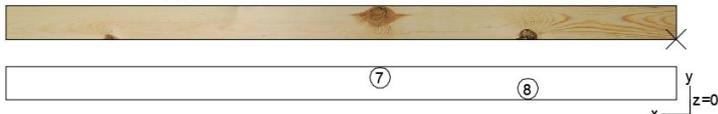
# FICHA 10: VIGA CH-S-10



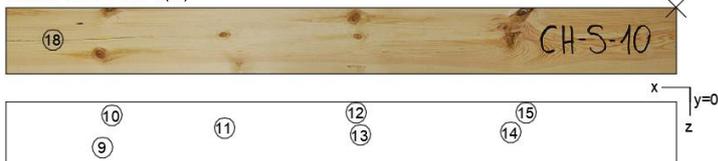
CARA SUPERIOR (C)



CARA FRONTAL (A)



CARA INFERIOR (D)



CARA POSTERIOR (B)



DATOS GENERALES	
Dimensiones h x b x L (mm)	(120 x 60 x 1238)
Peso (g)	4738.2
Ø NUDOS CARA (h) (mm)	44
Ø NUDOS CANTO (b) (mm)	37
FENDAS (de secado)	No
Longitud (mm)	
Profundidad (mm)	
ALTERACIONES BIOLÓGICAS	No
DEFORMACIONES	No
CLASIFICACIÓN VISUAL NORMA UNE 56544:2011	ME 2
CLASE RESISTENTE SEGÚN NORMA UNE-EN 1912:2012/AC: 2013	532
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	(120 x 60 x 1238)

DEFECTOS MÁS SIGNIFICATIVOS (mm)		
Nudos	Ø (mm)	Coordenadas (x,y,z)
1 y 2	(18+26)=44	(1045,60,40) (1003,60,86) Ag
3 y 4	(25+12)=37	(804,60,80) (791,60,12) Ar Ag
5	12	(573,60,61)
6	18	(295,60,25)
7	37	(531,43,0) Ar
8	21	(266,12,0) Ar
9 y 10	(17+11)=28	(1028,0,82) (1011,0,6) Ag
11	11	(809,0,48)
12 y 13	(27+12)=39	(573,0,16) (565,0,54) Ag
16	19	(137,15,120)
Fendas	Longitud (mm)	Espesor (mm)
Desviaciones de la fibra		
Gemas		
Médula		
Observaciones	Bolsas de resina (14 y 15)	

Ag= Nudo agrupado  
Ar= Nudo de arista  
P= Nudo pasante