



*ugr*

Universidad  
de **Granada**

## **ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN**

**Implantación del CFRP como refuerzo de madera antigua  
estructural de gran escuadría**

Elías Berbel Román

Proyecto Final de Grado

Septiembre 2016



# Implantación del CFRP como refuerzo de madera antigua estructural de gran escuadría

Proyecto Final de Carrera

Realizado por

**Elias Berbel Román**

Tutores

**Francisco José Rescalvo Fernández**

Departamento de Física Aplicada

**Ana María Cruz Valdivieso**

Departamento de Expresión Gráfica Arquitectónica

**Antolino Gallego Molina**

Departamento de Física Aplicada

**Granada, Septiembre 2016**



D. Francisco José Rescalvo Fernández, Investigador del Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Granada, D<sup>a</sup> Ana María Cruz Valdivieso, Profesora Colaboradora del Departamento de Expresión Gráfica Arquitectónica 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 Proyecto de Fin de Grado de D. Elías Berbel Román.

Informan:

Que el presente trabajo titulado:

“Implantación del CFRP como refuerzo de madera antigua estructural de gran escuadría”,

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

Granada, a 4 de Septiembre de 2016

Fdo.

Francisco José Rescalvo Fernández

Ana María Cruz Valdivieso

Antolino Gallego Molina



# **Implantación del CFRP como refuerzo de madera antigua estructural de gran escuadría**

## **Resumen**

En el futuro la rehabilitación del patrimonio histórico y cultural se espera que aumente, ya que el objetivo en la actualidad es preservarlo. Con este tipo de actuaciones se consigue un desarrollo más sostenible en las ciudades. Sin embargo, para realizar esta tarea es necesario investigar nuevas técnicas de rehabilitación que garanticen la calidad de los materiales y la capacidad portante en un periodo largo de tiempo.

Actualmente existe la necesidad de conocer el estado de la madera antigua estructural mediante una clasificación visual para seleccionar el tipo de refuerzo más conveniente en cada actuación. Pero sobre todo es necesario mejorar el conocimiento sobre los refuerzos con polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP) en estructuras de madera, ya que estos pueden evitar la sustitución parcial o total de un elemento estructural. Esto es de extrema relevancia ya que supone un ahorro importante en el coste y tiempo de una actuación.

Para la realización de este estudio se ha contado con la colaboración de las empresas DÁVILA RESTAURACIÓN DE MONUMENTOS S.L., SIKA S.A.U. y DRIZORO S.A.U. El trabajo presenta la aplicación de fibra de carbono para refuerzos de vigas de madera antigua de gran escuadría con el objetivo de mejorar y/o recuperar las capacidades de carga de las vigas, describe la metodología usada durante el proceso de refuerzo y realiza una comparación entre los diferentes tipos de resinas de las casas comerciales.

Los resultados de las vigas ensayadas a flexión muestran las notables mejoras en resistencia que experimentan las vigas que han sido reforzadas con fibras de carbono, así como los principales modos de fallo que se producen en las mismas.



## **Agradecimientos**

En primer lugar, quiero agradecer a mis tutores Francisco Rescalvo por ser paciente conmigo durante la elaboración del proyecto, Ana María Cruz por enseñarme tantas cosas sobre la madera y como elaborar correctamente un documento y Antolino Gallego Molina por darme la oportunidad de realizar este Proyecto Fin de Grado.

A mis compañeros del grupo SNADS: David, Elisabet, Chihab, Jesús, Iván, Samuel y Antonio; a todos gracias por vuestro apoyo, ayuda y compañerismo.

A mis padres quiero agradecerle su apoyo, respeto y confianza. A pesar de la distancia siempre recibí el apoyo y ayuda de mi hermana y mi hermano.

Finalmente, dar las gracias a mi familia y amigos por su apoyo y en especial a mi tío Luis por ayudarme a descubrir esta profesión y su continua ayuda.



# Índice

<b>Resumen .....</b>	<b>i</b>
Índice i	
Índice de Figuras .....	v
Índice de Tablas .....	ix
<b>Capítulo 1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación y contexto.....	1
1.2. Justificación del estudio .....	2
1.3. Objetivos.....	2
1.3.1. Objetivos generales del proyecto de investigación.....	2
1.3.2. Objetivos específicos del proyecto fin de grado .....	3
1.4. Estructura y alcance del estudio.....	3
1.5. Hipótesis de partida.....	4
<b>Capítulo 2. Actuaciones en patrimonio .....</b>	<b>7</b>
2.1. Interés por conservar el patrimonio.....	7
2.2. Actuaciones sobre el patrimonio.....	7
2.3. Problemas patológicos que afectan a la madera .....	9
2.4. Soluciones Constructivas Contra Agentes Patológicos: Tratamientos Preventivos y Curativos de la Madera .....	14
2.5. Defectos constructivos en los entramados de madera.....	18
2.6. Intervenciones en Estructuras de Madera .....	19
<b>Capítulo 3. Catalogación y caracterización de la madera.....</b>	<b>27</b>
3.1. Introducción .....	27
3.1.1. Estructura de la madera .....	27
3.1.2. Propiedades físicas y mecánicas de la madera .....	28
3.2. Caracterización y catalogación de vigas de madera de gran escuadría .....	30
3.2.1. Inspección básica .....	30
3.2.2. Caracterización en laboratorio de las vigas grandes de madera .....	31
3.3. Clasificación visual .....	33
3.3.1. Clasificación de las Singularidades y Defectos de la Madera .....	37

3.3.2.	Resultados de la clasificación visual .....	41
3.4.	Técnicas instrumentales básicas de caracterización .....	42
3.4.1.	Medida de densidad .....	42
3.4.2.	Contenido de Humedad .....	42
<b>Capítulo 4.</b>	<b>Materiales compuestos .....</b>	<b>47</b>
4.1.	Materiales compuestos: FRP .....	47
4.1.1.	Características de los distintos tipos de fibras .....	49
4.1.2.	Características de la matriz .....	50
4.1.3.	Cargas y aditivos usados en los polímeros compuestos .....	51
4.2.	Materiales Compuestos: CFRP.....	53
4.2.1.	Características de las fibras de carbono.....	53
4.2.2.	Factores que dificultan los refuerzos con fibras de carbono .....	54
4.2.3.	Tipos de fibra de carbono.....	54
4.2.4.	Fabricación de las fibras de carbono .....	55
4.3.	Caracterización de materiales de refuerzo utilizados para los ensayos de las vigas de madera.....	55
4.3.1.	Fibra de carbono.....	55
4.3.2.	Resinas.....	57
4.3.3.	Imprimación.....	58
<b>Capítulo 5.</b>	<b>Refuerzo de vigas de gran escuadría (4,5 m) .....</b>	<b>61</b>
5.1.	Método de elaboración del refuerzo de vigas de 4,5 m .....	61
5.1.1.	Inspección y preparación de la viga .....	62
5.1.2.	Marcado de los apoyos del ensayo y del laminado en la viga .....	62
5.1.3.	Preparación de las herramientas y el material.....	62
5.1.4.	Aplicación de la imprimación sobre el soporte.....	62
5.1.5.	Aplicación de la resina sobre el soporte.....	63
5.1.6.	Colocación del laminado sobre el soporte. ....	64
5.2.	Puesta en obra del sistema de refuerzo.....	64
5.3.	Comparativa entre el refuerzo de las vigas de 1,3 y 4,5 m. ....	65
<b>Capítulo 6.</b>	<b>Ensayo a flexión de las vigas .....</b>	<b>67</b>
6.1.	Comportamiento mecánico.....	67
6.1.1.	Definición de conceptos .....	67

6.1.2.	Modelos de comportamiento mecánico de la madera.....	75
6.2.	Instrumentación y descripción de ensayo.....	78
6.3.	Resultados de los ensayos a flexión de las vigas .....	82
6.3.1.	Vigas sin refuerzo (SR) .....	82
6.3.2.	Vigas con refuerzo de laminado inferior de SIKa (LRS) .....	87
6.3.3.	Vigas con refuerzo de laminado inferior de DRIZORO (LRD).....	92
<b>Capítulo 7. Conclusiones.....</b>		<b>99</b>
<b>Bibliografía.....</b>		<b>101</b>
<b>Anexo 1 .....</b>		<b>105</b>



## Índice de Figuras

Figura 1. Degradación del recubrimiento por agentes climáticos. [3] .....	13
Figura 2. Refuerzo del apoyo una viga mediante perfiles metálicos. [5] .....	20
Figura 3. Sistema Beta. [3] .....	21
Figura 4. Reparación de la cabeza de una viga mediante prótesis de madera. [5].....	22
Figura 5. Consolidación mediante placas internas con formulación epoxi. [5] .....	22
Figura 6. Refuerzo con hormigón de un forjado de madera. [5].....	24
Figura 7. Sustitución del extremo dañado de un pie derecho. [5] .....	25
Figura 8 Partes de la estructura de la madera. ....	28
Figura 9. Nomenclatura de las vigas.....	31
Figura 10. Deformaciones de las piezas de madera según la UNE EN 1310. [17].....	41
Figura 11. Higrómetro de resistencia eléctrica y sonda .....	43
Figura 12. Temperatura durante la catalogación y refuerzo de las vigas. ....	44
Figura 13. Porcentaje de humedad durante la catalogación y refuerzo de las vigas.....	45
Figura 14. Comparación entre compuestos de matriz polimérica y metales. [25].....	48
Figura 15. Laminado SIKA izq. y laminado DRIZORO derecha. ....	56
Figura 16. Izq. Componentes resina de SIKA y a la derecha componentes de DRIZORO. .....	58
Figura 17. Componentes de la imprimación. ....	59
Figura 18. Esquema de las distintas capas de un refuerzo con laminado de fibra de carbono.....	61
Figura 19. Diagrama del proceso de refuerzo de laminado de CFRP. ....	61
Figura 20. Cepillado de la viga para su regularización. ....	62
Figura 21. Imprimación aplicada sobre la viga. ....	63
Figura 22. Aplicación de la resina sobre la viga.....	63
Figura 23. Dosificador de resina para el laminado. ....	64
Figura 24. Esquemas de esfuerzos a tracción y compresión. Izq.: Esfuerzo a tracción. Dcha.: Esfuerzo a compresión. ....	67
Figura 25. Esquemas de esfuerzo cortante. Izq.: Cortante de cortadura. Dcha.: Cortante de deslizamiento. ....	67
Figura 26. Esfuerzos de tracción y compresión en una viga a flexión.....	68
Figura 27. Deformación a lo largo de un eje. ....	68

Figura 28. Estructura de una galga extensiométrica.....	69
Figura 29. Esquema del puente de Wheatstone. ....	69
Figura 30. Galga extensiométrica utilizada. Cotas en mm. ....	70
Figura 31. Esquema de funcionamiento de un LVDT. ....	70
Figura 32. LVDT's empleados en los ensayos a flexión. Izq.: LVDT de 100 mm. Dcha.: LVDT de 200 mm.....	71
Figura 33. Esquema de la Ley de Hooke.....	71
Figura 34. Tipos de flechas [34].....	72
Figura 35. Relación de una carga constante frente al tiempo. ....	74
Figura 36. Relación entre la tensión frente a la deformación según la Ley de Hooke... 74	
Figura 37. Relación esfuerzo frente a la deformación para un material dúctil. [34] ....	75
Figura 38. Modelo elástico-plástico simplificado. [36].....	75
Figura 39. Modelo elástico-plástico propuesto por Bazan. [36] .....	76
Figura 40. Modelo elástico-plástico propuesto por O'Halloran. [36].....	76
Figura 41. Máquina de ensayos modelo CH4-ST-100 de SERVOSIS S.L. con un actuador de 100 t y estructura auxiliar para los LVDT's. ....	78
Figura 42. Esquema de ensayo a flexión a 3 puntos. Cotas en mm. ....	79
Figura 43. Equipo de registro de las galgas extensométricas y LVDT's.....	80
Figura 44. Distribución de galgas extensométricas en cada viga. Izq.: Nomenclatura de galgas extensométricas dentro de cada grupo. Dcha.: Grupos de galgas. Cotas en mm. ....	80
Figura 45. Componentes del adhesivo de fijación de las galgas extensométricas. ....	81
Figura 46. Disposición de LVDT's y galgas extensométricas durante el ensayo.....	81
Figura 47. Historia de carga de las vigas sin refuerzo. SR1: En línea continua. SR2: En línea discontinua. ....	82
Figura 48. Nudo 5 que provocó el fallo en la cara B de la viga SR1. Izquierda arriba: Nudo antes del ensayo. Derecha arriba: Nudo después del ensayo. Abajo: Viga SR1 cara B. Cotas en mm.....	82
Figura 49. Rotura en la cara C de la viga SR1. Cotas en mm. ....	83
Figura 50. Nudos que provocaron el fallo en la cara B de la viga SR2. Izquierda arriba: Nudo antes del ensayo. Derecha arriba: Nudo después del ensayo. Abajo: Viga SR2 cara B. Cotas en mm.....	83
Figura 51. Rotura en la cara D de la viga SR2. Cotas en mm. ....	84
Figura 52. Desplazamiento de los distintos grupos de LVDT's. Izq.: Viga SR1. Dcha.: Viga SR2. ....	84

Figura 53. Tensión frente a la deformación de los grupos de galgas de la viga SR1. Izquierda arriba: Grupo 1 de galgas (Azul). Derecha arriba: Grupo 2 de galgas (Rojo). Abajo: Grupo 3 de galgas (Verde). Galga A: Línea discontinua. Galga B: Línea de puntos. Galga C: Línea discontinua con punto. Galga D: Línea continua. ....	85
Figura 54. Tensión frente a la deformación del grupo 2 de la viga SR2. Galga A: Línea discontinua. Galga B: Línea de puntos. Galga C: Línea discontinua con punto. Galga D: Línea continua. ....	86
Figura 55. Historia de carga de las vigas con refuerzo de laminado inferior de SIKA. LRS1: En línea continua. LRS2: En línea discontinua. ....	87
Figura 56. Nudos 11 y 41 de la viga LRS1 después del ensayo. ....	87
Figura 57. Rotura en la cara D de la viga LRS1. ....	88
Figura 58. Delaminación del CFRP en la viga LRS1. ....	88
Figura 59. Rotura en la cara C de la viga LRS2. Cotas en mm. ....	88
Figura 60. Delaminación del CFRP de la viga LRS2. ....	89
Figura 61. Izq.: Desplazamiento de los distintos grupos de LVDT's. Izq.: Viga LRS1. Dcha.: Viga LRS2. ....	89
Figura 62. Hincado del pistón semicircular de la máquina de ensayos en la madera de la viga LRS2. ....	90
Figura 63. Tensión frente a la deformación de los grupos de galgas de la viga LRS1. Izquierda arriba: Grupo 1 de galgas (Azul). Derecha arriba: Grupo 2 de galgas (Rojo). Abajo: Grupo 3 de galgas (Verde). Galga A: Línea discontinua. Galga B: Línea de puntos. Galga C: Línea discontinua con punto. Galga D: Línea continua. ....	90
Figura 64. Tensión frente a la deformación del grupo 2 de la viga LRS2. Galga A: Línea discontinua. Galga B: Línea de puntos. Galga C: Línea discontinua con punto. Galga D: Línea continua. ....	91
Figura 65. Historia de carga de las vigas con refuerzo de laminado inferior de DRIZORO. LRD1: En línea continua. LRD2: En línea discontinua. ....	92
Figura 66. Rotura en la cara D de la viga LRD1. Cotas en mm. ....	93
Figura 67. Delaminación del CFRP de la resina en la viga LRD1. Cotas en mm. ....	93
Figura 68. Nudo que provocó el fallo en la cara B de la viga LRD2. Izquierda arriba: Nudo antes del ensayo. Derecha arriba: Nudo después del ensayo. Abajo: Viga LRD2 cara B. Cotas en mm. ....	93
Figura 69. Rotura en la cara C de la viga LRD2. Cotas en mm. ....	94
Figura 70. Delaminación del CFRP de la viga LRD2. ....	94
Figura 71. Desplazamiento de los distintos grupos de LVDT's. Izq.: Viga LRD1. Dcha.: Viga LRD2. ....	95

Figura 72. Tensión frente a la deformación de los grupos de galgas de la viga LRD2. Izquierda arriba: Grupo 1 de galgas (Azul). Derecha arriba: Grupo 2 de galgas (Rojo). Abajo: Grupo 3 de galgas (Verde). Galga A: Línea discontinua. Galga B: Línea de puntos. Galga C: Línea discontinua con punto. Galga D: Línea continua ..... 96

Figura 73. Tensión frente a la deformación del grupo 2 de la viga LRD1. Galga A: Línea discontinua. Galga B: Línea de puntos. Galga C: Línea discontinua con punto. Galga D: Línea continua. .... 97

## Índice de Tablas

Tabla 1. Relación entre el tipo de daño y el nivel de intervención. [35].....	9
Tabla 2. Daño producido según el tipo de agente. [4] .....	10
Tabla 3. Composición de la madera. [4] .....	11
Tabla 4. Clases de permeabilidad de la madera. [4] .....	14
Tabla 5. Clases de riesgo según la UNE EN 335.1/95 y 335.2/95. [9][10] .....	15
Tabla 6. Tipo de protector químico según la normativa UNE 599.1/96. [11] .....	16
Tabla 7. Diferentes sistemas de tratamiento para madera. [4] .....	17
Tabla 8. Dimensiones de las vigas. ....	31
Tabla 9. Dimensiones de los anillos.....	32
Tabla 10. Densidad de las vigas. ....	33
Tabla 11. Clases resistentes respecto a la clase de calidad. [14][35] .....	35
Tabla 12. Criterios de aceptación de calidad MEG. [14] .....	36
Tabla 13. Características mecánicas de la madera de clase C22. [16] .....	37
Tabla 14. Clasificación visual de las vigas. ....	41
Tabla 15. Humedad de las vigas de madera.....	43
Tabla 16. Clasificación de los compuestos de matriz polimérica según la disposición y el tipo de refuerzo. [25].....	47
Tabla 17. Propiedades mecánicas de las fibras más comunes en FRP. (*) Producto comercial de Amoco. (**) Producto comercial de Du Pont. [26].....	49
Tabla 18. Propiedades mecánicas de las matrices más comunes en FRP. (*) Producto comercial de ICL. (**) Producto comercial de Phillips Petroleum. [26] .....	51
Tabla 19. Propiedades de las diferentes fibras de carbono provenientes de PAN. [22] 54	
Tabla 20. Propiedades mecánicas y físicas de los tipos de laminado de fibra de carbono. [30][31] .....	56
Tabla 21. Propiedades mecánicas y físicas de los tipos de laminado de fibra de carbono. [30 y 31] .....	57
Tabla 22. Datos técnicos de la resina de imprimación. [31] .....	58
Tabla 23. Superficie de refuerzo según la dimensión de la viga. Fuente: Elaboración propia.....	65
Tabla 24. Rendimientos de la imprimación y de las resinas.....	65
Tabla 25. Tiempos de aplicación de la imprimación y de las resinas .....	66
Tabla 26. Características de las galgas extensiométricas.....	70

Tabla 27. Limitaciones de flecha relativa. [35] .....	73
Tabla 28. Principales modos de fallo de la madera sometidos a flexión. [36] .....	77
Tabla 29. Vigas ensayadas según el tipo de refuerzo y la casa comercial del CFRP.....	79
Tabla 30. Carga máxima ( $Q_{max}$ ), desplazamiento vertical máximo ( $\delta_{max}$ ), tensión máxima ( $\sigma_{max}$ ) y módulo de elasticidad ( $E$ ) de las vigas sin refuerzo.....	86
Tabla 31. Carga máxima ( $Q_{max}$ ), desplazamiento vertical máximo ( $\delta_{max}$ ), tensión máxima ( $\sigma_{max}$ ) y módulo de elasticidad ( $E$ ) de las vigas con refuerzo de laminado inferior de SIKA (LRS).....	92
Tabla 32. Carga máxima ( $Q_{max}$ ), desplazamiento vertical máximo ( $\delta_{max}$ ), tensión máxima ( $\sigma_{max}$ ) y módulo de elasticidad ( $E$ ) de las vigas con refuerzo de laminado inferior de DRIZORO (LRD).....	97

# Capítulo 1. Introducción

## 1.1. Motivación y contexto

Este proyecto de fin de grado se enmarca dentro de un proyecto de investigación multidisciplinar llamado "REVMAC"[1]. Este proyecto se desarrolla en el ámbito de la rehabilitación de estructuras de madera en edificios históricos mediante el uso de materiales compuestos avanzados. Además, en este trabajo se hace una mención especial a los polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP).

Durante las últimas décadas ha crecido el interés por la valoración, conservación y sostenibilidad del patrimonio arquitectónico [2].

Uno de los grandes desafíos a los que se enfrenta la conservación del patrimonio arquitectónico es la prolongación de la vida útil de las estructuras y la búsqueda de nuevos usos, todo ello sin comprometer su conservación y protección. De este modo, reemplazando la obra nueva por la conservación de edificios ya existentes, se mejoraría la calidad de vida de la comunidad por medio de un desarrollo urbanístico más sostenible [3].

Tradicionalmente, para la construcción con madera, se han empleado piezas de tamaños medianos y grandes. De forma general este tipo de piezas son difíciles de obtener debido a la heterogeneidad de la madera y a la dificultad que presenta encontrar bloques macizos y resistentes de grandes dimensiones [4].

Hoy en día es imprescindible conocer las propiedades de los materiales y proporcionar a los clientes materiales de calidad y normalizados. Para ello, una de las técnicas más usadas en la actualidad es la técnica de fabricación en madera laminada encolada. Esta técnica se basa en la fabricación de elementos estructurales formados por varias láminas encoladas a presión y con la dirección de la fibra paralela. Como resultado se obtienen vigas estables y de dimensiones precisas, sin embargo, la desventaja que presenta esta técnica es que requiere realizar actuaciones de sustitución parcial o total de la estructura a intervenir [5].

En este proyecto se han estudiado vigas macizas de gran escuadría para la rehabilitación de la estructura portante del edificio.

Entre los diferentes procedimientos y técnicas de rehabilitación, se ha seleccionado la rehabilitación de la estructura portante utilizando refuerzo con CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*). Esta técnica presenta una de las soluciones más económica y ecológica, ya que nos permite conservar gran parte de los materiales originales del edificio. Este tipo de refuerzo es ampliamente usado en el refuerzo de estructuras de hormigón armado [3].

Sin embargo, aunque la madera ha sido uno de los materiales más usados en la historia de la construcción, el uso de estas técnicas de refuerzo es muy escaso en estructuras de madera.

Este proyecto de investigación tiene como objetivo mejorar el conocimiento existente sobre los refuerzos CFRP en madera. En la ejecución de este trabajo han colaborado las empresas DÁVILA RESTAURACIÓN DE MONUMENTOS S.L., SIKAS.A.U. y DRIZORO S.A.U. La primera suministró la madera antigua extraída durante la rehabilitación de las cubiertas de la Facultad de Derecho de la Universidad de Granada. Las dos últimas contribuyeron a la investigación con materiales propios para realizar refuerzos, entre los que destacan resinas y láminas o tejido de CRFP. Además, estas empresas han financiado y asesorado en el uso del material CFRP al grupo SNADS (*Signals and Numerical Analysis in Dynamical Systems*) de la ETS de Ingeniería de Edificación de la Universidad de Granada durante la duración del proyecto.

## **1.2. Justificación del estudio**

En el futuro se espera que aumenten las obras de rehabilitación con el objetivo de preservar el patrimonio arquitectónico y cultural existente y al mismo tiempo conseguir un desarrollo urbanístico sostenible en las ciudades. Para ello es necesario estudiar nuevas técnicas de rehabilitación que garanticen la calidad de los materiales y la capacidad portante de la estructura. Una de los materiales más novedosos en la actualidad en el campo de la edificación es la fibra de carbono. Es de vital importancia conocer en mayor profundidad las propiedades de este material y su implementación en el refuerzo de estructuras de madera de grandes dimensiones. Este tipo de refuerzos usando fibras de carbono han sido escasamente estudiados en el pasado, sin embargo, su conocimiento es de extrema importancia en la rehabilitación de edificios históricos y de interés cultural [3].

Además, debido al creciente uso de la madera como material de construcción, es necesario una normativa actualizada para los estándares de calidad existentes para la construcción de estructuras de madera. También es muy importante mejorar el conocimiento existente sobre las propiedades de las estructuras de madera, así como de las lesiones y/o patologías producidas tanto por agentes bióticos como abióticos [4].

Como consecuencia, se requiere profundizar en el estudio de técnicas de rehabilitación consistentes en el refuerzo de vigas grandes de madera con fibra de carbono con el objetivo de reparar los daños y lesiones que presenten las vigas. Este tipo de refuerzos evitarían la sustitución parcial o total de la estructura, con lo que se disminuirían costes de ejecución y tiempo, amén de un menor impacto ecológico.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivos generales del proyecto de investigación**

Este trabajo se enmarca dentro de un proyecto de investigación multidisciplinar llamado REVMAC, cuyos objetivos son:

- Avanzar en el conocimiento mecánico y de fallo, especialmente por delaminación, de vigas de madera antigua rehabilitadas con refuerzo de material compuesto avanzado CFRP.
- Catalogación de la madera antigua extraída por la empresa DÁVILA RESTAURACIÓN DE MONUMENTOS S.L.
- Estudio de la adherencia entre madera y refuerzo CFRP, haciendo una comparación entre los diferentes materiales que existen en el mercado.
- Realización de ensayos a flexión de vigas de madera sin refuerzo y vigas reforzadas con CFRP, aplicando el método de AT (*Acoustic emission testing*) para la evaluación en tiempo real del proceso de daño. Se ha prestado especial atención en la detección de delaminaciones sustrato-refuerzo.
- Ejecución de ensayos en vigas de gran escuadría, analizando el efecto de esta variación de longitud con respecto a vigas pequeñas.
- Establecer procedimientos y guías de aplicación del refuerzo, describiendo con detalle los procesos de elaboración y los materiales usados.

### **1.3.2. Objetivos específicos del proyecto fin de grado**

El objetivo general del proyecto fin de grado es desarrollar el conocimiento del uso de la fibra de carbono como material de refuerzo en la parte inferior de las vigas de gran escuadría de una estructura de madera.

Los objetivos específicos de este proyecto de fin de grado son:

- Catalogación y caracterización de la madera antigua extraída de las cubiertas de la sala de vistas y de la biblioteca de la Facultad de Derecho de la Universidad de Granada.
- Realización de ensayos a flexión de las vigas de gran escuadría sin reforzar y reforzadas. Para esta última se ha escogido el sistema que mejor resultado ha dado con las vigas pequeñas ensayadas con anterioridad por el grupo de investigación.
- Estudio y análisis del fallo producido en las vigas ensayadas a flexión.
- Estudio comparativo entre las vigas reforzadas de pequeña escuadría y de gran escuadría, en términos de tiempo necesario para su refuerzo. Análisis de la variación de la cantidad de resina utilizada para ambos tipos de vigas y comprobación de su rendimiento.

### **1.4. Estructura y alcance del estudio**

Tal como se ha explicado con detalle, con este trabajo de fin de grado se pretende profundizar en el conocimiento del uso de la fibra de carbono como material de refuerzo en la parte inferior de las vigas de gran escuadría de una estructura de madera. Este

proyecto se estructura en 8 capítulos principales y un anexo con las vigas catalogadas para los ensayos realizados.

En el capítulo 1 se incluye la motivación, contexto y justificación de la realización del estudio, exponiendo los objetivos generales y específicos de este proyecto fin de grado.

En el capítulo 2 se desarrolla el interés por conservar y proteger el patrimonio y las diversas actuaciones que se pueden llevar a cabo. Además, en este capítulo se presta especial atención a los refuerzos de vigas de madera con fibra de carbono.

En el capítulo 3 se analizan los defectos y/o patologías de la madera, así como la tipología de la misma. Es también en este capítulo donde se realiza la catalogación de las vigas mediante la normativa española de clasificación visual para clase resistente MEG.

En el capítulo 4 se introduce en los materiales compuestos, tanto en su estructura como en su composición. Se ha profundizado en el estudio de la fibra de carbono para conocer sus características mecánicas. Finalmente se caracterizan las propiedades de los materiales usados para los refuerzos de las vigas.

En el capítulo 5 se desarrolla la metodología de elaboración del refuerzo de las vigas y se realiza la comparación con las vigas de pequeña escuadría, en términos de tiempo y ahorro de material.

En el capítulo 6 se presentan y analizan los resultados de los ensayos a flexión de las vigas, además de la descripción del proceso de ensayo a flexión.

En el capítulo 7 se establecen las conclusiones finales que se responden con los objetivos establecidos en este proyecto.

Finalmente, se incluye un anexo con las fichas de catalogación de las vigas que incluye toda la información de la catalogación y el reportaje fotográfico de las vigas.

## **1.5. Hipótesis de partida**

Tradicionalmente, la madera se ha utilizado en la construcción de estructuras portantes. La madera ha sido ampliamente usada en edificaciones históricas como uno de los principales elementos constructivos. Hoy en día es uno de los elementos constructivos más utilizado para la realización de cubiertas tradicionales.

La madera es un material muy heterogéneo que normalmente presenta singularidades y defectos que disminuyen sus propiedades mecánicas. Esta disminución de las propiedades mecánicas da lugar a la aparición de patologías.

La resistencia de la madera depende en gran medida de su contenido de humedad, durante el secado de la madera aserrada se producen gran parte de los defectos de la misma.

Para la catalogación visual de las vigas de madera de gran escuadría se ha seguido la metodología de trabajo usada por la compañera del grupo de investigación Ángela Moreno Bazán en “Caracterización y adherencia entre madera antigua y fibra de carbono para refuerzo estructural: Resultados preliminares” [6]. Ángela Moreno realizó en el estudio de investigación anterior la catalogación de las vigas de pequeña escuadría. En él se han analizado los resultados de los ensayos y elegido el mejor refuerzo de los utilizados en ellos. También se adopta el mismo procedimiento de elaboración que se ha usado para las pequeñas escuadrías.

Los refuerzos en las vigas de madera más comunes son los aportes de madera o la utilización de perfiles metálicos o piezas metálicas para realizar el cosido de una viga. Con la utilización de un material como la fibra de carbono donde el espesor y el peso son muy inferiores a los refuerzos metálicos y de madera, se evitan el aumento del peso en la estructura y el deterioro por agentes abióticos y se mantiene la altura libre entre forjados.

Las actuaciones en madera con fibra de carbono son muy escasas debido al desconocimiento del comportamiento de este material en este tipo de estructuras. Este tipo de refuerzos han sido más usados en estructuras de hormigón, por lo que la mayoría de las metodologías de aplicación y de refuerzo están referenciadas a este tipo de estructura.

Los materiales compuestos son una combinación de polímeros y fibras con el fin de mejorar sus propiedades.



## Capítulo 2. Actuaciones en patrimonio

### 2.1. Interés por conservar el patrimonio

La Ley 8/2013 de rehabilitación, regeneración y renovación urbana, establece la conservación de estos espacios como un deber fundamental en el medio urbano. Actualmente existe la obligación moral de conservar y mejorar el patrimonio con el propósito de permitir el disfrute del mismo a las generaciones posteriores.

El patrimonio histórico es el principal testigo de la historia del hombre. Hoy en día, uno de los mayores problemas es el desconocimiento por parte de la población del patrimonio que les rodea. Es por ello que este patrimonio debe ponerse en valor mediante la preservación y la conservación. Ya que como popularmente se conoce “Solamente estudiando el pasado, podremos entender el presente” [7].

El interés por este tema comenzó en 1931 con la redacción de la Carta de Atenas, donde se establecieron recomendaciones comunes en Europa para las intervenciones en monumentos y se destacan la importancia de la comunicación pública de la intervención como parte primordial del proceso de conservación [8].

En la Carta de Atenas se definen además los términos de restauración y mantenimiento de la siguiente forma:

- Restauración: cualquier intervención que respete los principios de la conservación y con los estudios previos pertinentes, restituya el objeto en los límites de lo posible y necesario, concediéndole una relativa legibilidad.
- Mantenimiento: es el conjunto de programas y acciones interventoras, encaminadas a mantener los objetos de interés cultural en condiciones óptimas de integridad y uso, especialmente si han sufrido actuaciones de conservación y/o restauración.

En 1964 con la Carta de Venecia, evoluciona el concepto de monumento incluyendo aspectos más amplios como son la inclusión del ámbito urbano y rural, así como la dimensión cultural.

### 2.2. Actuaciones sobre el patrimonio

Antes de proponer cualquier tipo de actuación sobre el patrimonio a intervenir, es necesario un profundo conocimiento de su realidad constructiva, los materiales con los que se ha realizado y las patologías que pueda presentar la edificación [3].

El objetivo principal de una intervención es la búsqueda de la solución ante un determinado proceso patológico. Este proceso patológico se manifiesta a través de 3 grandes familias de lesiones:

- Físicas: Humedades, erosión y suciedad.

- Mecánicas: Deformaciones, grietas, fisuras, desprendimientos y erosiones mecánicas.
- Químicas: Eflorescencias, erosiones químicas, organismos, oxidaciones y corrosiones.

Una de estas lesiones puede ser el origen de otra lesión, por lo que podemos agruparlas en lesiones primarias y lesiones secundarias. La causa es el agente que actúa como origen del proceso patológico y que desemboca en una o varias lesiones, por lo tanto, en rehabilitación no solo debemos actuar sobre el síntoma de la lesión también sobre la causa que lo ha provocado [4].

Estas causas pueden ser:

- Directas: cuando constituyen el origen inmediato del proceso patológico.
- Indirectas: si se trata de errores o defectos del diseño o ejecución de la edificación, defectos de aplicación de los materiales usados durante su construcción.

Para realizar una actuación correctamente se debe seguir un sistema de actuación con el siguiente orden [4]:

#### **Información previa**

Recabar todos los datos relativos a su localización, estudio histórico del edificio y conocimiento de sus antecedentes. Esto nos dará una visión general de la problemática que nos permitirá evaluar la viabilidad de la actuación a realizar.

#### **Reconocimiento**

Realización de un estudio que incluya un análisis urbanístico, arquitectónico y constructivo de la edificación a intervenir, además de la información gráfica necesaria para el estudio y un análisis de las lesiones. Esto nos permitirá un conocimiento formal y técnico-constructivo del edificio y el estado de las lesiones o patologías que presente.

#### **Interpretación y diagnóstico**

Tras la recogida de datos y su posterior clasificación y análisis, se establece sobre cada unidad constructiva o unidad en estudio una propuesta de intervención. Se establece el nivel de daño para cada unidad que puede ser daño crítico, principal o secundario. En la Tabla 1 se muestra la relación entre el tipo de daño y el nivel de intervención.

Daño referente a	Elemento constructivo	Nivel de intervención
Seguridad	Estructura, fachada y cubierta	Imprescindible
Funcionalidad	Estructura, fachada, cubierta e instalaciones	Necesario
Confort	Fachada, cubierta e instalaciones	Conveniente
Aspecto	fachada, cubierta y acabados	Conveniente

Tabla 1. Relación entre el tipo de daño y el nivel de intervención. [35]

También hay que analizar los aspectos legales para cumplir con la normativa, la viabilidad económica y la planificación de la ejecución para permitir establecer los sistemas de provisión de fondos necesarios para la intervención.

### Proyecto e intervención

El objetivo principal es devolver a la unidad constructiva lesionada su funcionalidad, esto se consigue tras la aplicación de un conjunto de actuaciones destinadas a recuperar el estado original o mejorarlo. Se realizará el proyecto siguiendo el orden de anteproyecto, proyecto básico y proyecto de ejecución. Además del estudio de seguridad y salud que se ajuste a la actuación. La memoria incluirá las mediciones y presupuesto de la obra a realizar.

Una vez realizada la intervención se llevarán a cabo un conjunto de medidas de prevención y mantenimiento destinadas a evitar la aparición de nuevas lesiones.

### Difusión

Las actuaciones sobre el patrimonio histórico deben de ir acompañadas de una buena difusión para comunicar la actuación a realizar, comunicar los resultados y difundir su análisis para justificar la inversión realizada.

## 2.3. Problemas patológicos que afectan a la madera

La madera es un material que se encuentra en la mayoría de las construcciones donde se van a realizar rehabilitaciones. El estado en el que la encontramos es variable en función de si ha sido atacada por agente externos o no [3].

El agua y la humedad son los causantes de gran parte de las patologías. La degradación de la madera trae consigo otras patologías como la generación de hongos e insectos que disminuyen la resistencia mecánica del elemento y pueden provocar la destrucción y

colapso de la estructura, ya que los daños producidos en las piezas constituyen pérdidas de sección resistente que pueden llegar a hacerlas insuficientes para las cargas actuantes.

Existen partes de la estructura más expuestas al agua como los pasos de instalaciones, aleros, vuelos de cubierta, zonas de escorrentías de aguas, estancamientos, estructuras expuestas a ambientes marinos, presencia de agua por capilaridad, elementos expuestos a la intemperie, piezas en contacto o cercanas al suelo, sótanos, apoyo de vigas y otros elementos apoyados en los muros [4].

Los daños que pueden encontrarse en una estructura son producidos por elementos patológicos que atacan la madera. Estos pueden dividirse en agentes bióticos y abióticos, como se muestra en la Tabla 2.

Agente	Daño producido
ABIOTICOS	
Factores de crecimiento	Fibra torcida o revirada; madera entrelazada; verrugas y lupias; curvatura del tronco; desviación de las fibras; crecimiento anormal; acebolladuras; fendas; nudos.
Agentes climáticos	Decoloraciones; fendas; merma de facultades mecánicas; envejecimiento; meteorización.
Fuego	Carbonización; pérdida de resistencia, pudiendo llegar al colapso.
Uso mecánico	Fatiga y pérdida de resistencia; deformación y desgaste por rozamiento.
BIOTICOS	
Bacterias	Ligera alteración de propiedades, poco importantes.
Insectos xilófagos	Perforaciones y pérdida de masa; disminución de resistencia.
Hongos cromógenos	Cambios de color y ligera pérdida de resistencia. Ligero debilitamiento y predisposición de la madera a otros ataques.
Hongos de pudrición	Descomposición de la madera, pérdida de peso y de resistencia, variación de características organolépticas.

Tabla 2. Daño producido según el tipo de agente. [4]

### Agentes bióticos

Los agentes bióticos que degradan la madera reciben el nombre de *xilófagos* y usan la madera como alimento. Desde organismos elementales, como bacterias y hongos, hasta

más desarrollados como insectos, moluscos o crustáceos, encontramos muchas especies que pueden deteriorar la madera. En general, aunque con unos términos poco precisos suele hablarse de *podrición* cuando el ataque es realizado por hongos y de *infección* para insectos [4].

### Hongos cromógenos.

Estos hongos pertenecen a la familia de los deuteromicetos y provocan coloraciones en la madera hasta la albura. No afectan a las propiedades físico-químicas de la madera ni alteran la resistencia, pero propician otros ataques, ya que aumentan ligeramente la permeabilidad de esta. Se genera en madera húmeda recién aserrada. Las de color azulado son las más comunes en las coníferas [3].

### Hongos de podrición.

Estos hongos atacan la pared celular de la madera, alterando las propiedades físico-mecánicas, provocando una pérdida de resistencia. Suelen afectar a maderas que están en contacto con el suelo. Entre estas podriciones se encuentran la blanca, la parda y la blanda [3].

La podrición blanca o corrosiva es aquella en la que el hongo se alimenta de la celulosa, destruyéndola y dejando restos blancos y malolientes, en forma de alveolos con vetas blancas. Las maderas de coníferas son más susceptibles de ser atacadas dado su mayor cantidad de lignina en su composición, tal y como muestra la Tabla 3.

Composición	Coníferas	Fronosas
- Celulosa	50%	50%
- Hemicelulosa	23%	26%
- Lignina	27%	24%

Tabla 3. Composición de la madera. [4]

La podrición parda se alimenta de celulosa dejando restos de color pardo. Produce la disgregación de la madera en trozos cúbicos y grietas en todas las direcciones. La madera llega a deshacerse como polvo. Esta patología es más frecuente en las coníferas, debido a su mayor cantidad de celulosa.

La podrición blanda se produce en maderas sometidas a condiciones extremas de humedad, sin ventilación ni luz y en contacto con el terreno. La madera se reblandece desde la superficie hasta el interior, si la madera se seca se producen quiebras, fendas y fisuras [3].

### **Insectos xilófagos.**

Suelen describirse como una infección. Se desarrollan con las humedades de la madera y a temperaturas relativamente altas. Se pueden clasificar en dos grupos de insectos: los coleópteros y los isópteros [4].

Según Teresa Sánchez los coleópteros son carcomas, barrenillos y polillas, y los daños en la madera son causados por las larvas que se alimentan creando galerías en el interior del elemento. Los orificios de salida son realizados por los adultos para salir al exterior y reinfectar nuevas maderas.

Esta autora describe los isópteros que son termitas que suelen anidar en el suelo. Son la plaga más peligrosa para la madera y difícil de combatir, disminuyen la resistencia característica y pueden llegar a vaciar una pieza dejando solamente láminas de madera. Son difíciles de detectar, no dejan huella visible y al perforar la madera para crear galerías dejan una capa exterior para evitar que el problema sea visible.

La madera de albura de las distintas especies se supone siempre atacable por los organismos xilófagos, al contrario de lo que sucede con la parte del duramen.

### **Agentes abióticos**

Por otra parte, los agentes abióticos son de tipo físico y/o químico y están causados por fenómenos climáticos o meteorológicos como la radiación solar, la humedad ambiental, la lluvia, el viento, las heladas, o por fenómenos más puramente químicos, como el contacto con productos o materiales agresivos que provoquen manchas o deterioros sobre la madera y el fuego, difícil de clasificar como factor químico [3].

### **Deformaciones de crecimiento.**

Las deformaciones en la madera se producen por un crecimiento anómalo del árbol. Si se produce desviación de las fibras con respecto al eje durante el crecimiento del árbol, se produce una reducción de resistencia [3].

De acuerdo con la normativa española, las acebolladuras son roturas de las capas concéntricas de los anillos de crecimiento de la madera, la cual produce una disminución de la resistencia apareciendo hendiduras y grietas.

Otras deformaciones de crecimiento son la madera entrelazada, la aparición de lupias y verrugas, la curvatura del tronco del árbol, los nudos y las fendas.

### **Agentes Climáticos.**

Los agentes climáticos son los causantes de la meteorización de la madera por acción de las radiaciones del sol, del agua, del oxígeno del aire y de los iones de la polución que provocan una degradación del recubrimiento, como se observa en la Figura 1.

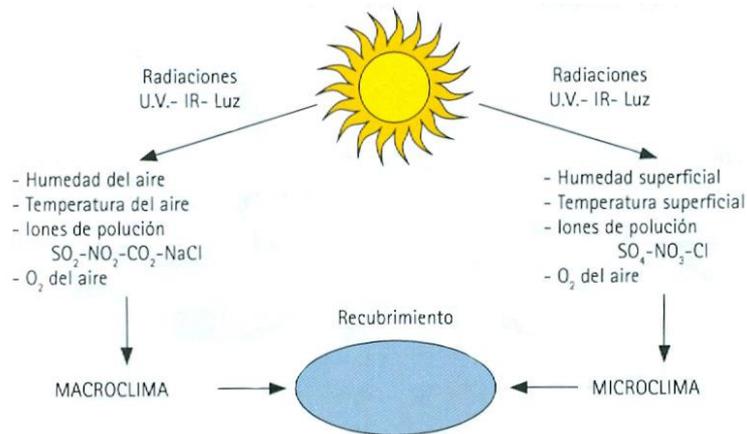


Figura 1. Degradación del recubrimiento por agentes climáticos. [3]

El deterioro por envejecimiento de la madera colocada al exterior se calcula que es de unos 0'5 mm/año, en condiciones normales y sin protección [4].

Un secado producido en condiciones irregulares o heterogéneas produce tensiones superficiales y deformaciones como los alabeos, revirados y/o agrietamiento de las piezas. Al perder humedad rápidamente se contrae y evita la salida de agua del interior, sufriendo tensiones a tracción que producen grietas. Por otra parte, el secado rápido de los extremos produce grietas en las testas de la viga.

El agrietamiento y rajado, también se produce por la acción combinada de la radiación infrarroja (IR) y la sucesión de ciclos termo-húmedos que se hinchan y encogen la madera.

Las alteraciones cromáticas por oxidación química producen decoloración en la lignina de la madera. Las maderas oscuras se vuelven claras y a la inversa, pero al final todas toman un color grisáceo muy característico [4].

### **Comportamiento frente al fuego.**

La madera es un material muy combustible. Su combustión provoca la carbonización de las capas externas. La capa carbonizada actúa como aislante para el núcleo de la viga, lo que le permite mantener sus propiedades mecánicas, al contrario del acero. La velocidad de combustión es de unos 4-5 cm/hora y el uso de coeficientes de seguridad para sobredimensionar las estructuras de madera, garantizan durante un tiempo una buena resistencia al fuego. En los elementos de madera ocultos puede continuar la combustión sin llama, deshidratando la celulosa y formando carbón vegetal, siendo esta situación muy peligrosa [4].

### **El uso mecánico de la estructura de madera.**

El uso de la estructura por parte de cargas cíclicas de tensión inferior a la resistencia límite, puede provocar fatiga en la estructura y pérdida de resistencia de la misma. La deformación y desgaste por rozamiento pueden llegar a ser importantes [4].

## 2.4. Soluciones Constructivas Contra Agentes Patológicos: Tratamientos Preventivos y Curativos de la Madera

El 31 % de la madera que se usa en el mundo va destinada al sector de la carpintería y la construcción. A lo largo del tiempo se ha protegido la madera de los agentes que producen su deterioro. La protección de la madera históricamente se ha efectuado de diversas formas [4]:

- Mediante la selección previa de las especies de madera para cada uso, considerando previamente las condiciones del medio de colocación.
- Protección mediante barreras físicas de cobertura.
- Protección mediante impregnación de la madera con soluciones de productos químicos de características biocidas.

Actualmente los tratamientos por impregnación química de la madera son los más efectivos y de menor coste. En cualquier caso, es importante conocer antes de aplicar un tratamiento los siguientes factores [4]:

- La especie de madera a proteger, ya que se comportan de diferente forma ante los agentes de deterioro por la falta de homogeneidad y propiedades específicas de sus componentes. La permeabilidad de la madera al paso de los líquidos mediante el tratamiento de impregnación viene reflejada en la normativa europea EN 350.1/94 y 350.2/94, las clases de permeabilidad quedan reflejadas en la Tabla 4.

Clase de permeabilidad	Tratabilidad de la madera	Explicación
Permeable o 1	Impregnable	Penetración total por tratamiento de presión
Moderadamente resistente a la penetración o 2	Medianamente impregnable	Generalmente no es posible alcanzar la penetración total, pero con un tiempo de 2-3 h., se alcanzan penetraciones de 6 mm, con presión
Resistente a la penetración o 3	Poco impregnable	Difíciles de tratar. Con tratamiento de 3-4 h., no se alcanzan más de 3 a 6 mm de penetración lateral con presión
Muy resistente a la penetración o 4	No impregnable	Virtualmente impenetrable. Penetraciones longitudinales y transversales mínimas. Tras 3-4 h. de tratamiento hay una pequeña absorción del protector

Tabla 4. Clases de permeabilidad de la madera. [4]

- La agresividad del medio de la ubicación futura de la madera y la clase de riesgo en la que se va a encontrar, se podrá seleccionar la especie más adecuada teniendo en cuenta su durabilidad natural. La clase de riesgo en la Tabla 5, que viene definida por la normativa EN 335.1/95 [9] y 335.2/95 [10].

Clase de riesgo	Ubicación de la madera
Riesgo 1	Las maderas situadas en lugares protegidas de la intemperie, con grados de humedad menores del 20 %
Riesgo 2	Las maderas colocadas en lugares protegidos de la intemperie y en los que tan solo de forma ocasional e pueden dar altos valores de humedad, sin provocar condensaciones
Riesgo 3	La madera no está en contacto con el suelo, está a la intemperie o en el exterior, en lugares donde se pueden producir condensaciones persistentes
Riesgo 4	Las maderas a la intemperie en contacto con el suelo o con el agua dulce, está sometida a un grado de humedad permanentemente
Riesgo 5	Las maderas están sumergidas permanentemente o intermitentemente en agua marina, con un elevado nivel de humedad

Tabla 5. Clases de riesgo según la UNE EN 335.1/95 y 335.2/95. [9][10]

Los productos químicos protectores de la madera suelen ser soluciones líquidas que deben cumplir las condiciones de ser biocidas. Estos deben quedar fijos en el interior de la madera tras su impregnación, no debiéndose de deslavar o evaporar. Además, estos deben poder ser introducidos en la madera para poder alcanzar buenos grados de penetración y de retención y no producir deterioro en las propiedades de la madera [4].

Los productos químicos de protección tienen como composición: disolvente, materias activas y coadyuvantes, que son elementos que refuerzan la acción de las materias activas incrementando su efectividad.

La normativa EN 599.1/96 [11] evalúa los protectores de la madera y relaciona los diferentes tipos de protectores con las clases de riesgo en que se encuentra la madera, el tipo de aplicación de la impregnación del protector químico. Esta evaluación queda recogida en la Tabla 6.

Tipo de protector	Tipo de aplicación	Nivel de riesgo
Insecticida	Superficial o en profundidad	1
Insecticidas y fungicidas	Superficial o en profundidad	2 y 3
Insecticidas y fungicidas	En profundidad	4 y 5

Tabla 6. Tipo de protector químico según la normativa UNE 599.1/96. [11]

También se pueden clasificar los protectores químicos de la madera según su naturaleza química:

- **Orgánicos naturales:** las creasotas son las más importantes que se obtienen de la destilación de alquitranes obtenidos de procesos de combustión de carbones grasos.
- **Hidrosolubles:** son soluciones acuosas de sales en distintas concentraciones, tienen propiedades biocidas frente a insectos y/o hongos xilófagos.
- **Disolvente orgánico:** emplea materias activas insolubles en agua, los coadyuvantes más usados son las ceras y las resinas que mejoran la estabilidad frente al agua.

Los tratamientos protectores de la madera se pueden clasificar en dos grandes grupos: tratamientos preventivos y tratamiento curativos [3].

Los tratamientos preventivos en la madera son muy importantes ya que se puede multiplicar por 4 o 5 veces la vida media de la madera que se va a colocar en servicio. Los tratamientos preventivos los podemos clasificar por el grado de humedad de la madera en el momento de su tratamiento. Los diferentes sistemas de tratamiento se muestran en la Tabla 7.

Tipo de madera	Tipo de proceso	Tipo de sistema
<b>Madera húmeda</b>	Sustitución de savia	Boucherie normal y modificado  De banda de presión  Mixto
	Difusión          Sin autoclave	Difusión normal  De bandas  De doble difusión  De orificios  Cobra  pincelado  Inmersión breve  Inmersión prolongada  Inmersión caliente y fría
<b>Madera seca</b>	Con autoclave y presión	Célula vacía  Célula llena
	Con autoclave y sin presión	Célula llena

Tabla 7. Diferentes sistemas de tratamiento para madera. [4]

Otros tratamientos preventivos para combatir el fuego es el revestimiento de las vigas con tablas de madera, lana de roca, placas de yeso laminado o proyecciones de mortero.

Los tratamientos curativos presentan como principal objetivo detener la acción de los agentes de deterioro y dejar la madera protegida de potenciales agentes posteriores. Estos tratamientos se integran en los procesos de restauración principalmente y no tanto en los de rehabilitación, ya que en los primeros se debe ser conservar tanto la forma como el material, mientras que en los segundos lo importante es conservar la forma y no tanto el material, pudiendo variarlo [4].

Los pasos de los tratamientos curativos de la madera son los siguientes:

### **Reconocimiento del maderamen.**

Se estudiarán los daños en la madera para conocer si estos son de origen abiótico o biótico. La detección de los daños se puede realizar por métodos tradicionales como sistemas de percusión y punción o por métodos más modernos como los aparatos de medición de la velocidad de propagación de ondas UT, detectores de sonidos emitidos por los insectos xilófagos y con aparatos de termografía axial computarizada (T.A.C.).

### **Reconocimiento del entorno próximo a la madera.**

Se deberá estudiar a fondo el entorno para poder eliminar las condiciones que favorecen la aparición de los agentes. Por lo general la presencia de agua es negativa para la conservación de la madera por lo que habrá que eliminarla.

### **Determinación de las medidas a aplicar en la madera y en su entorno.**

Las medidas constructivas se usan para mejorar las condiciones de la madera, mediante la eliminación de las condiciones favorecedoras para los agentes.

Las medidas estructurales mejoran la seguridad, la estabilidad y la vida media de servicio de las estructuras. Las medidas estructurales de mayor importancia son la sustitución, el refuerzo y la consolidación.

Las medidas de protección química de la madera son difíciles de estandarizar puesto que hay grandes diferencias existentes entre las afecciones producidas por los distintos agentes.

### **Medidas complementarias.**

Son todas aquellas que se efectúan fuera de la madera y su entorno como las inyecciones en los muros o la colocación de barreras tóxicas o cebos para termitas en el terreno.

## **2.5. Defectos constructivos en los entramados de madera**

Algunos problemas patológicos pueden ser consecuencia de defectos constructivos en los entramados de la madera. Los defectos constructivos se pueden agrupar en 3 grandes grupos [4]:

### **Errores en entramados inclinados:**

- Inadecuación o mala ejecución de los ensambles de la estructura de cubierta.
- Inadecuación de las pendientes a las zonas climáticas donde está ubicada la edificación.
- Falta de arriostamiento contraviento en los planos de faldón o de los pendolones.
- Falta o insuficiencia de atirantados en la estructura.

- Separaciones incorrectas entre cerchas, parecillos, listones y otros elementos.
- Falta de ventilación superior que imposibilite la salida del vapor de agua creando un microclima húmedo que propicie la aparición de xilófagos.
- Falta de ajabalconado en piezas con un vuelo excesivo.
- Falta de protección de las cabezas de los pares o tirantes salientes o enfrentes de canaletas o correas salientes en los hastiales.

#### **Errores en entramados verticales:**

- Apoyar los pies derechos y los muros de entramado directamente sobre el terreno.
- Disponer en entramados uniones por ensambles insuficientes.
- No prever el suficiente arriostramiento para muros de entramado.

#### **Errores en entramados horizontales:**

- Insuficiencia de entrega de vigas sobre muros y vigas maestras.
- No disponer de durmientes en muros para nivelación reparto correcto de las cargas entre las piezas.
- No arriostrar entre sí viguetas muy esbeltas para evitar su vuelco.
- No anclar al entramado horizontal los muros paralelos a la dirección de los forjados que se quedan sin arriostramiento.
- Pérdida de apoyo de las cabezas de las vigas en su encuentro con los muros.
- No dar la sección adecuada a los brochales donde reciben las cargas puntuales.
- No separar de los solados rígidos los forjados ni aislar de las conducciones de agua.

## **2.6. Intervenciones en Estructuras de Madera**

Tal como se ha manifestado anteriormente el objeto de estudio de este proyecto fin de grado es el refuerzo de vigas de madera.

Para solucionar los problemas patológicos que afectan a las estructuras de madera se pueden realizar diversas actuaciones que pueden clasificarse según el grado de intervención adoptado y la finalidad pretendida [5]:

### **Mantenimiento**

Cuando se propone recuperar la seguridad en una estructura de madera realizando las modificaciones mínimas, se recurre al apeo y refuerzo de las zonas dañadas.

Disposición de carreras de apoyo debajo de las cabezas de las vigas degradadas. Estas piezas también pueden apoyarse en el muro a través de ménsulas empotradas. Además,

será necesario la impermeabilización del apoyo y ventilación de la caja hacia la cara interior o exterior del muro.

Estas soluciones que son de carácter más o menos provisional se disponen sin modificar la estructura de la madera. Es importante decir que con estas medidas no se detiene la acción de los agentes xilófagos, por lo tanto será necesario un tratamiento químico adecuado.[5].

### **Consolidación y refuerzo**

La consolidación es el conjunto de actuaciones dirigidas a recuperar la estabilidad y la capacidad resistente de la estructura de madera en su estado original.

El refuerzo consiste en el aumento de la capacidad portante de una estructura o en la limitación de las deformaciones de estas para lograr el cumplimiento de la normativa o por cambios de uso con sobrecargas [5].

Tipos de actuaciones:

- Refuerzo del apoyo de una viga mediante perfiles metálicos, como se observa en la Figura 2. Se crea una estructura de apeo como un emparrillado en función de la longitud de la pudrición, paralela al muro de apoyo, que descansan sobre otras vigas paralelas a la dirección del forjado.

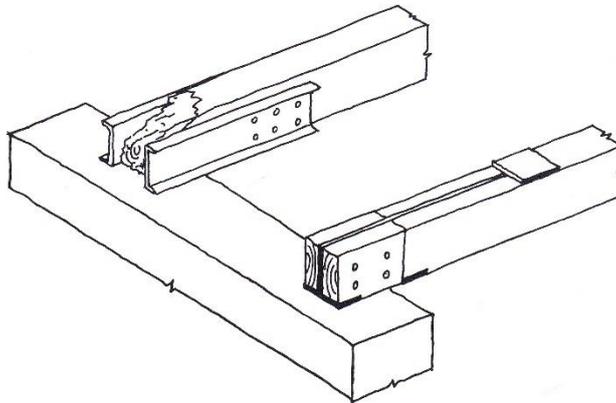


Figura 2. Refuerzo del apoyo una viga mediante perfiles metálicos. [5]

- Reparación puntual de la cabeza de una viga con la colocación de pletinas o perfiles en ángulo para alargar la longitud de la pieza. Estas piezas se atornillan a la madera.
- Adosado de perfiles UPN a la cabeza de la viga: se solapan a la madera sana 50-80 cm que conectan con pernos. En esta solución los refuerzos al entrar en carga también pueden deformarse.
- Adosado de piezas de madera a la viga unidas mediante medios mecánicos. Se usan pernos, clavos o bridas metálicas en un tramo suficiente de madera sana.

- Consolidación de la cabeza mediante la mediante el sistema Beta, que se observa en la Figura 3. El método de aplicación de este sistema es el siguiente:

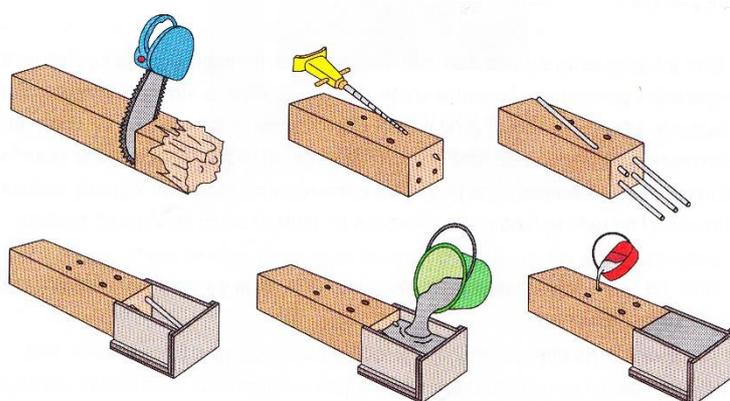


Figura 3. Sistema Beta. [3]

- Apeo de la viga sobre la que se va a actuar y corte de la zona degradada.
  - Realización de taladros en la parte sana de la madera para alojar las barras de refuerzo en un ángulo de 20 a 30 °.
  - Instalación de las barras de refuerzo en los orificios, limpiando la superficie para que no se perjudique la adherencia del mortero epoxi.
  - Montaje del encofrado con la dimensión necesaria para consolidar la viga.
  - Vertido del mortero, que es una mezcla de resina epoxi más endurecedor mezclado de arena y gravilla de cuarzo.
  - Rellenado de las holguras que quedan entre las barras de conexión y la madera con una formulación epoxi más que sirve para el anclaje de las barras.
- Reparación de la cabeza de una viga mediante prótesis de madera, como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Método de colocación:
    - Limpieza de la cabeza de la viga incrustada en la pared y degradada por el ataque de xilófagos.
    - Recorte de la parte afecta y fabricación de una prótesis, en madera maciza o laminada, con unos agujeros para colocar las barras de microfibra.
    - Ensamble de la prótesis y endurecimiento de la resina, con las barras de microfibra insertadas.

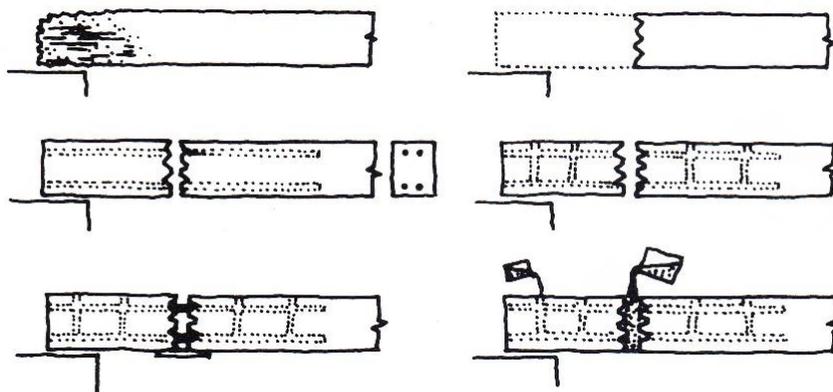


Figura 4. Reparación de la cabeza de una viga mediante prótesis de madera. [5]

- Reparación de vigas con decoración atacadas por xilófagos. Método de aplicación:
    - a) Limpieza de la viga atacada por los xilófagos y apuntalamiento de la viga.
    - b) Eliminación de la zona dañada.
    - c) Reconstrucción de la sección con mortero epoxi con virutas de madera y varillas de fibra de vidrio.
  - Consolidación con barras de refuerzo en un punto intermedio de la viga.
  - Consolidación con placas de refuerzo internas, como se aprecia en la Figura 5.
- Procedimiento:
- 

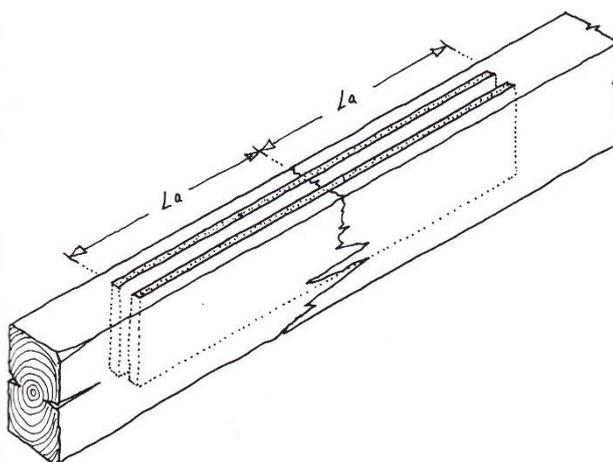


Figura 5. Consolidación mediante placas internas con formulación epoxi. [5]

- a) Se afea la viga.

- b) Realización de los cajeados para introducir las dos placas de refuerzo de longitud suficiente para la transmisión del momento flector y cortante que se produce en esa sección.
  - c) Vertido de la formulación epoxi hasta rellenar un 1/3 del cajeadado.
  - d) Introducción de las placas de refuerzo.
  - e) Llenado de formulación epoxi hasta enrasar.
- Consolidación del extremo inferior de un pie derecho con mortero epoxi.
  - Recalce con perfiles metálicos en pies derechos de muros entramados.
  - Recalce de pie derecho con hormigón o fábrica de ladrillo en un muro entramado.
  - Adosado de madera sana a lo largo de toda la viga dañada sin eliminar esta. El problema se plantea cuando las vigas originales están deformadas y las vigas sanas son rectas.
  - Colocación de una viga parte luz de forjado. Los muros de apoyo pueden necesitar un refuerzo para resistir la carga concentrada que causa esta viga.
  - Introducción de jabalcones que aportan puntos de apoyo intermedios. Los muros deben resistir empujes horizontales transmitidos por los jabalcones.
  - Refuerzo con una estructura interior, esta actuación se realizará cuando la luz sea demasiado grande para usar la solución de vigas parte luz.
  - Reconstrucción de la parte superior de la sección de la viga mediante mortero epoxi por la degradación de xilófagos. Se insertan los conectores de barras de fibra de vidrio y se rellena con mortero epoxi.
  - Aumento de sección de la viga mediante piezas de madera encolada. La madera nueva debe de tener la misma humedad que la antigua, también esta actuación implica la elevación del solado del forjado.
  - Refuerzo con hormigón del forjado de madera, como se muestra en la Figura 6. Con esta actuación aumentamos la carga del aljarafe mediante una estructura mixta al disponer una capa armada de 5 cm sobre la tablazón del aljarafe y conectada con la estructura lignaria existente. Con esta composición el hormigón actúa a compresión y la madera a tracción.

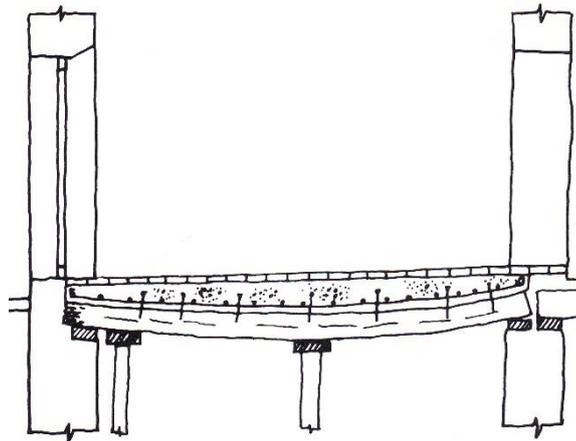


Figura 6. Refuerzo con hormigón de un forjado de madera. [5]

- Losa de hormigón sobre nervios principales del forjado. Las viguetas añadidas de hormigón armado se encofran de tal forma que simulen la forma original de la vigueta.
- Refuerzo con atirantado metálico y enanos comprimidos. Se disponen tirantes metálicos en la parte inferior de la viga permitiendo que el tirante quede traccionado y la viga comprimida. El tirante se apoya y se distancia de la viga a través de enanos metálicos que quedan comprimidos.
- Refuerzo con celosía interna: consiste en la introducción de una armadura interior constituida por barras de resina epoxi, reforzadas con fibra de vidrio formando armadura de compresión y de tracción.
- Refuerzo con barras inclinadas: en las secciones de grandes escuadrías es inevitable la aparición de grandes fendas que tienden a dividir la sección original en dos piezas acopladas. Se producen como consecuencia del secado de la madera, que provoca contracciones mayores en la dirección tangencial que en la radial, de tal forma que las grietas son radiales y afectan al plano medio de la sección. La solución consiste en el cosido de las fendas con barras inclinadas (con ángulos comprendidos entre 20-30°). Para su colocación se realizan los taladros al tresbolillo desde la cara superior, se sellan las fendas en las caras de la viga y se vierte o inyecta una formulación epoxi.

### **Sustitución.**

La sustitución se realiza cuando el deterioro es tal que no es posible su consolidación o cuando debido al escaso valor de la estructura se hace inviable económicamente. La sustitución puede ser puntual como la Figura 7, o una sustitución general.

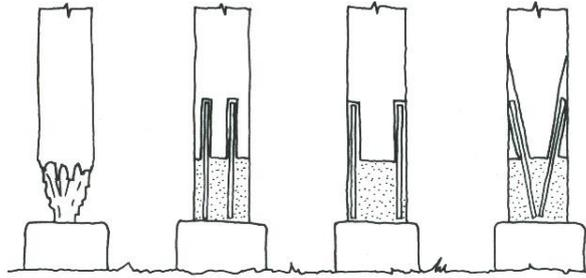


Figura 7. Sustitución del extremo dañado de un pie derecho. [5]

Para esta actuación se pueden usar otros materiales o madera nueva que puede ser madera laminada o madera encolada a tiras cuando no sea posible encontrar escuadrías grandes con largos suficientes en madera maciza. También podemos usar tableros derivados de la madera contra-chapada de partículas o de virutas [5].

Gran parte de las actuaciones de consolidación se pueden considerar que están en el grupo de sustitución parcial de una viga. Otras actuaciones son:

- Sustitución general de la madera de un forjado el cual sus vigas están muy dañadas.
- Sustitución estructural de la madera con perfiles de acero. Se colocan los perfiles por encima de cada vigueta de madera y para realizar el forjado se pueden usar chapas onduladas o placas de metal nervado, estas soluciones aligeran el peso de la estructura.
- Sustitución de parte del extremo de un pie derecho en contacto con el suelo con una basa de piedra u hormigón con un herraje oculto y retranqueado de la zona e contacto.
- Sustitución del extremo dañado de un pie derecho con mortero epoxi. Como se aprecia en la Figura 7.



## Capítulo 3. Catalogación y caracterización de la madera

### 3.1. Introducción

#### 3.1.1. Estructura de la madera

La madera se empezó a usar como material de construcción con la aparición de las primeras herramientas incisivas. Su uso como material estructural disminuyó con la aparición del acero y del hormigón estructural. Sin embargo, con la aparición de la madera laminada encolada, la madera está posicionándose de nuevo como un material indispensable en el ámbito de la construcción [4].

En la actualidad, en el sector de la construcción con madera se utilizan diversos derivados de la misma como elementos estructurales. Estos derivados son la madera en rollo, la madera aserrada, la madera empalmada, la madera micro laminada, la madera maciza encolada, la madera laminada encolada, la madera reconstituida, tableros derivados de la madera y paneles contralaminados de madera.

La madera es un material heterogéneo, formado por un conjunto de células especializadas en tejidos cuya función es la de conducir la savia, sostener el árbol y transformar y almacenar los nutrientes [5].

En España se comercializan alrededor de 150 especies de madera procedentes de todo el mundo. Estas especies de madera se pueden clasificar en los siguientes dos grandes grupos [4]:

- Coníferas: especies pertenecientes al orden coniferales (abetos, piceas, alerces, cedros, pinos, etc.). En este grupo se encuentran la mayor parte de las especies incluidas en la división de las gimnospermas.
- Frondosas: especies leñosas pertenecientes a la división de las angiospermas dicotiledóneas (roble, haya, olmo, encina, etc.).

La estructura de la madera es muy compleja. Sus células presentan una estructura tubular compuesta principalmente por celulosa, lignina y hemicelulosa[12]. En la Figura 8 se muestra las partes de un tronco de madera.

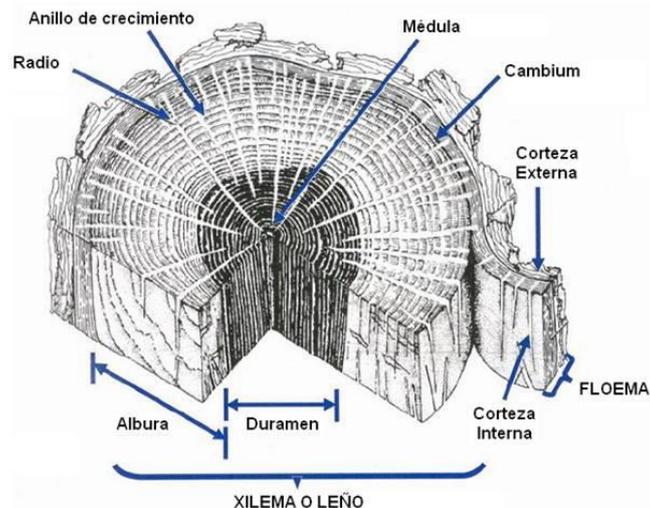


Figura 8 Partes de la estructura de la madera.

Las principales partes del tronco se describen a continuación.

Corteza: capa externa del árbol. Está formada por células muertas del mismo árbol y actúa como capa de protección contra los agentes atmosféricos.

Líber: parte interna de la corteza, filamentosa y poco resistente, que constituye la madera embrionaria viva.

Cambium: capa que se divide en dos: xilema y floema. El xilema pasa a constituir la madera del árbol, mientras que el floema se encarga de transportar los productos de la fotosíntesis por el árbol.

Albura: es la madera de más reciente formación, es la zona más viva, saturada de savia y sustancias orgánicas. Alberga la parte joven de la madera, muy susceptible de ataques químicos.

Duramen: parte interna del tronco, compuesta de tejidos que han alcanzado su máximo desarrollo y resistencia. Su madera es muy compacta.

Médula: parte central del tronco, de pequeño diámetro, constituida por tejido flojo y poroso de madera vieja.

El tipo de madera que producen las coníferas tiene una densidad y unos anillos de espesor constante, por lo que una disminución del anillo de crecimiento produce una reducción de la densidad de la madera [5].

La madera utilizada para este estudio de *Pinus Sylvestris* tiene una densidad entre 0,30 a 0,86 g/cm<sup>3</sup>, según Parviz Navi en su estudio titulado "Comportement thermo-hydrromécanique du bois" [13].

### 3.1.2. Propiedades físicas y mecánicas de la madera

En este apartado se pretende dar una idea general de las propiedades físicas y mecánicas que afectan a la madera en el diseño estructural.

Las propiedades físicas de la madera relevantes en el diseño estructural son las siguientes [12]:

### **Anisotropía**

Todas las propiedades de la madera tienen tres direcciones básicas: axial, en la dirección de crecimiento del árbol; radial, perpendicular a las fibras y tangencial que es tangente a los anillos de crecimiento.

### **Higroscopicidad**

La higroscopicidad es la capacidad de la madera para absorber humedad del medioambiente. Un exceso de humedad ambiental puede ocasionar la hinchazón de la madera y pérdida de humedad durante el secado. Este fenómeno puede producir la contracción de las fibras y originar deformaciones.

### **Densidad**

La densidad varía con respecto a la humedad de la madera. De acuerdo a esta característica se pueden clasificar las maderas en pesadas, ligeras y muy ligeras.

### **Dureza**

La dureza se define como la resistencia al desgaste, rayado, clavado y nivel de dificultad para labrar la madera. El duramen es más duro que la albura y del mismo modo, la madera seca es más dura que la madera verde.

Por otra parte, las propiedades mecánicas de la madera relevantes en el diseño estructural son las siguientes [12]:

### **Resistencia a tracción**

La madera tiene una elevada resistencia a tracción. La madera que está libre de defectos tiene una resistencia a tracción superior a la madera que presenta imperfecciones. Si la madera es clasificada como estructural, su resistencia se determina en función de la cantidad de defectos que presente la misma. Los valores característicos varían entre 8 - 18 N/mm<sup>2</sup>.

Las piezas que resisten estos esfuerzos se encuentran en las estructuras actuando como tirantes y pendolones.

### **Resistencia a compresión**

La resistencia a compresión de la madera es elevada. La madera clasificada como madera estructural presenta valores característicos entre 16-23 N/mm<sup>2</sup>. En el cálculo a compresión también se incluyen la comprobación de pandeo de las piezas. De este modo, las piezas más esbeltas tienen resistencia a compresión más baja.

Esta resistencia es importante en pilares, pares de cubierta y muros entramados.

### **Resistencia a flexión**

La resistencia a flexión de la madera es muy elevada. En coníferas de uso estructural los valores característicos están entre 14-30 N/mm<sup>2</sup>.

Esta propiedad es importante en piezas de estructuras como vigas, viguetas de forjado, pares de cubierta.

### **Resistencia al cortante**

Este esfuerzo origina tensiones tangenciales sobre las fibras de la madera. Estas tensiones las podemos clasificar en función de la orientación que presenta la fibra. De este modo, las tensiones tangenciales pueden ser de cortadura, deslizamiento o rodadura.

Lo valores característicos de la resistencia a cortante oscilan entre los 3-4 N/mm<sup>2</sup>. Estas tensiones se suelen producir en uniones encoladas entre el alma y el ala de una vigueta con sección en doble T.

### **Módulo de elasticidad**

El módulo de elasticidad de la madera varía según se trate de esfuerzos de compresión o tracción. Para especies de coníferas su valor varía entre 7.000-12.000 N/mm<sup>2</sup>.

## **3.2. Caracterización y catalogación de vigas de madera de gran escuadría**

### **3.2.1. Inspección básica**

Las vigas utilizadas para la realización de los ensayos fueron preseleccionadas por la empresa DÁVILA RESTAURACIÓN DE MONUMENTOS S.L. La preselección de las vigas se realizó mediante una inspección visual preliminar, donde se escogieron las vigas que estaban en mejor estado y tenían la longitud mínima para realizar las probetas de ensayo (4,50 m). Posteriormente, se llevó a cabo una inspección por el equipo que dirige esta investigación para indicar las medidas homogeneizadas de largo, ancho y alto de las vigas con las que se iban a realizar las probetas de ensayo, ya que las vigas preseleccionadas presentaban dimensiones diferentes.

La madera procede de la sustitución de la estructura de las cubiertas de la Facultad de Derecho de la Universidad de Granada. Se identificó esta madera como madera de pino que se caracteriza principalmente por la presencia de resina en el interior del árbol y hojas con forma de aguja. El uso de esta madera en la construcción es muy habitual dentro de los materiales que se han utilizado históricamente.

Estas vigas estaban identificadas con una nomenclatura en la cual se especificaba su situación original en la estructura de la cubierta. Esto puede observarse en la siguiente

Figura 9. La letra P identifica esta viga como un par de una cubierta con una numeración y la W indica la orientación oeste (West) del faldón de la cubierta a la que perteneció. Otra nomenclatura es “SN”, que quiere decir “sin nombre” y también va acompañada de un número.



Figura 9. Nomenclatura de las vigas.

### 3.2.2. Caracterización en laboratorio de las vigas grandes de madera

En la categoría de vigas grandes se ha contado con 10 vigas de dimensiones homogeneizadas de ensayo de 145 x 220 x 4500 mm. Sabiendo que las dimensiones medidas en las vigas pueden variar a lo largo de la misma, se ha desarrollado la Tabla 8 donde se reflejan las medidas medias de altura y ancho en cada una de las piezas.

Dimensiones de las vigas (mm)			
Viga	Ancho (b)	Alto (h)	Largo (L)
P 28	148	223	4500
P 10 w	147	219	4500
7 P	149	227	4501
PN 17	151	227	4499
P 31 w	142	223	4501
SN 6	159	226	4500
P 28 w	147	223	4503
P 48 e	147	218	4500
SN 8	144	216	4500
P 14 e	140	218	4502

Tabla 8. Dimensiones de las vigas.

Para la obtención de las medidas medias se han realizado grupos para tomar las medidas desde el centro de la viga y en las dos direcciones con una separación de 1 m, como se muestra en la Figura 44 en el apartado 6.1. En total se han realizado 5 medidas alrededor de las vigas. En la Tabla 9 se pueden observar todas las medidas realizadas.

Viga	Dimensiones de las medidas tomadas alrededor de la viga (mm)									
	1		2		3		4		5	
	b	h	b	h	b	h	b	h	b	h
<b>P 28</b>	154	236	148	226	143	218	145	216	148	218
<b>P 10 w</b>	154	224	150	220	144	218	144	215	142	216
<b>7P</b>	155	238	152	234	144	225	144	220	152	220
<b>PN 17</b>	147	224	150	226	149	227	152	230	156	229
<b>P 31 w</b>	155	221	143	222	136	222	134	224	140	226
<b>SN 6</b>	160	227	159	229	161	227	162	224	152	222
<b>P 28 w</b>	146	226	148	222	146	218	148	220	146	230
<b>P 48 e</b>	148	218	148	216	144	216	148	218	147	221
<b>SN 8</b>	154	218	145	216	142	214	141	214	140	220
<b>P 14 e</b>	141	222	138	220	136	216	143	215	143	219

Tabla 9. Dimensiones de los anillos.

Las vigas han sido ensayadas con emisión acústica, por lo tanto, la densidad de las mismas es necesaria para el cálculo del módulo de elasticidad ( $E$ ).

Para el cálculo del volumen de la viga se ha utilizado la fórmula matemática de tronco de cono indicada abajo. En esta fórmula se utilizan como bases las medidas de los anillos.

$$V = h/3 \times (S_1 + S_2 + \sqrt{S_1 \times S_2})$$

Donde  $V$  es el volumen de la viga,  $h$  es el canto,  $S_1$  es la superficie y  $S_2$  es superficie final.

Los resultados de la densidad se muestran en la Tabla 10.

<b>Densidad de las vigas (kg/m<sup>3</sup>)</b>			
<b>Viga</b>	<b>Peso (kg)</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>P 28</b>	82,60	0,1474	560,46
<b>P 10 W</b>	67,60	0,1442	468,72
<b>7 P</b>	88,20	0,1524	578,83
<b>PN 17</b>	80,30	0,1542	520,86
<b>P 31 W</b>	79,60	0,1414	563,10
<b>SN 6</b>	92,40	0,1618	571,12
<b>P 28 W</b>	76,90	0,1472	522,52
<b>P 48 E</b>	94,70	0,1439	658,11
<b>SN 8</b>	78,70	0,1402	561,53
<b>P 14 E</b>	78,60	0,1374	571,89

Tabla 10. Densidad de las vigas.

La densidad media de las vigas es de 557,71 kg/m<sup>3</sup>. De acuerdo a la clasificación de la norma UNE EN 338:2010 [16], estas vigas pertenecen a la clase resistente C50 por su densidad.

### 3.3. Clasificación visual

Las propiedades resistentes de la madera varían de un árbol a otro. La calidad de la madera es el factor que mayor influencia tiene en la resistencia de la misma [14]. Las singularidades de la madera son defectos que suponen una disminución de las propiedades mecánicas de este material. Con el objetivo de mejorar la precisión con la que se clasifica la resistencia de la madera estructural, se ha desarrollado una clasificación visual basada en la evaluación de los siguientes parámetros:

- Dimensiones de cada cara de la pieza.
- Longitud de la pieza.
- Defectos recogidos en la clasificación visual, con la anotación de su dimensión y posición.
- Identificación de defectos de origen biótico que afecten a la pieza.

Para poder realizar la anotación de la posición de cada uno de los defectos que hay en la pieza de madera, se ha establecido un eje cartesiano de coordenadas (X, Y, Z) en una de las testas de la pieza. Esto ha permitido determinar la posición exacta del defecto y disminuir posibles errores humanos en la medida.

Una vez decidida la posición de la pieza y su origen longitudinal, se han enumerado los cuatro lados de la sección rectangular de la testa que se ha seleccionado como origen de coordenadas. Empezando por el lado A (cara frontal), B (cara posterior), C (cara superior) y D (cara inferior).

El instrumental necesario para la realización de la inspección visual está formado por un cuaderno de apuntes, una pequeña regla rígida de 15 cm, calibre, cinta métrica, flexómetro, lápiz, bolígrafo y cámara fotográfica. Además, en este reconocimiento se han anotado y valorado los daños producidos por alteraciones biológicas, con la finalidad de evaluar la pérdida de material que puede afectar a la resistencia de la pieza.

Existe una gran diversidad de normas para la clasificación visual de la madera. Cada país dispone de una reglamentación en la que la calidad resistente de la madera se establece en función de la cantidad de nudos y el tamaño de los defectos presentes en las vigas.

Ejemplos de normas de clasificación visual utilizadas en los diferentes países son las siguientes:

- España – UNE 56544 Y 56546
- Alemania – DIN 4074-1
- Francia – NF B 52001
- Países Nórdicos – INSTA 142
- EEUU – NGRDL
- Canadá – NLGA

La norma que rige el proceso de clasificación visual para madera aserrada de coníferas para uso estructural en España es la UNE EN 56544:2011 [14]. En esta norma están recogidos los principios de clasificación y las características y singularidades de la madera. La norma UNE EN 1912:2012 [15] establece la asignación de calidades y especies, además de las clases resistentes para madera estructural, de igual manera que la norma UNE EN 338:2010 [16]. Es la norma UNE EN 1310:1997 [17] la que establece los métodos de medida de singularidades en madera aserrada.

En la Tabla 11 se indican la clase de calidad y la clase resistente en función de la dimensión de canto de la pieza.

<b>b ≤ 70 mm</b>	
Clase de calidad	Clase resistente
ME-1	C27
ME-2	C18
<b>b &gt; 70 mm</b>	
Clase de calidad	Clase resistente
MEG	C22
RECHAZO	-

Tabla 11. Clases resistentes respecto a la clase de calidad. [14][35]

Las vigas usadas en este estudio tienen un canto superior a 70mm. Es por ello que se han clasificado siguiendo la norma con el objetivo de conocer si presentan una calidad de Madera Estructural Gruesa (MEG) o por el contrario presentan RECHAZO. En la Tabla 12 se indican los criterios de las especificaciones de aceptación para la clasificación como MEG.

Criterios de calidad		MEG
Diámetro de los nudos sobre la cara (h)		$d \leq 2/3$ de h
Diámetro de los nudos sobre el canto (b)		$d \leq 2/3$ de b
Anchura máxima del anillo de crecimiento		Sin limitación
Fendas	De secado	$f \leq 3/5$ Las fendas de contracción solo se consideran si su longitud es mayor que la menor de las dimensiones siguientes: $\frac{1}{4}$ 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 $1,5 \cdot h$
Madera de compresión		Admisible en $2/5$ de la sección o de la superficie externa de la pieza
Desviación de la fibra		1:6 (16,7%)
Gemas:		
- Longitud		$\leq 1/3$ de L
- Dimensión relativa		$g \leq 1/3$
Médula		Admitida
Alteraciones biológicas:		
- Muérdago		No se admite
- Azulado		Se admite
- Pudrición		No se admite
- Galerías de insectos xilófagos		No se admiten
Deformaciones máximas:		
- Curvatura de cara		20 (10) mm (para una longitud de 2 m)
- Curvatura de canto		12 (8) mm (para una longitud de 2 m)
- Alabeo		2 (1) mm (por cada 25 mm de h)
- Abarquillado		Sin limitación

Tabla 12. Criterios de aceptación de calidad MEG. [14]

La norma UNE EN 14081-4 [18] establece para la madera aserrada la asignación de clase resistente en función de la calidad según la norma de la especie arbórea y su procedencia. De este modo, una madera de pino silvestre de España presenta una clasificación resistente de C22, cuyas características mecánicas según la norma UNE EN 338:2010 [16] se muestran en Tabla 13.

<b>Propiedades resistentes C22 (N/mm<sup>2</sup>)</b>		
Flexión	$f_{m,k}$	22
Tracción paralela a la fibra	$f_{t,0,k}$	13
Tracción perpendicular a la fibra	$f_{t,90,k}$	0,4
Compresión paralela a la fibra	$f_{c,0,k}$	20
Compresión perpendicular a la fibra	$f_{c,90,k}$	2,4
Cortante	$f_{v,k}$	3,8
<b>Propiedades de rigidez (kN/mm<sup>2</sup>)</b>		
Módulo de elasticidad medio paralelo a la fibra	$E_{0,medio}$	10
Módulo de elasticidad paralelo a la fibra (5% percentil)	$E_{0,k}$	6,7
Módulo de elasticidad medio perpendicular a la fibra	$E_{90,medio}$	0,33
Módulo medio de cortante	$G_{medio}$	0,63
<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>		
Densidad	$\rho_k$	340
Densidad media	$\rho_{media}$	410

Tabla 13. Características mecánicas de la madera de clase C22. [16]

### 3.3.1. Clasificación de las Singularidades y Defectos de la Madera

Como ya se mencionó en el apartado 3.3., la calidad de la madera es el factor de mayor importancia en la resistencia de la madera estructural. Las singularidades de la madera son defectos que suponen una disminución de sus propiedades mecánicas. Con el proceso de aserrado del tronco para la obtención de piezas de madera se interrumpe la

estructura natural del árbol y se producen defectos de aserrado como las gemas, los nudos y dimensiones inadecuadas [12].

Las singularidades y defectos están recogidas por la normativa UNE-EN 844 [19], 1310 [17] y 56544 [14], se describen a continuación.

### **Nudos**

Los nudos disminuyen la resistencia de las piezas de madera. Éstos originan efectos de distorsión en las fibras adyacentes al nudo y favorecen la pérdida de homogeneidad [14]. Si las irregularidades de la fibra alrededor del nudo no fueran claramente distinguibles de este, la medida del tamaño del nudo debe incorporarlas.

Este defecto es el que más incide en la calidad resistente de las piezas de madera, por lo tanto, cuando se requiera mayor capacidad resistente el criterio de limitación de nudos será más exigente.

En este estudio, los nudos se han medido perpendicularmente al eje longitudinal de la viga y se han diferenciado entre nudos en canto, cara y arista. Para que la viga pueda clasificarse como calidad MEG es necesario que se cumplan los criterios descritos a continuación.

- Nudos en cara: deben tener un diámetro menor a  $2/3$  del ancho para anchos menores o iguales a 150 mm y menores de 80 mm de diámetro y para anchos superiores a 150 mm.
- Nudos en canto: deben tener un diámetro menor a  $2/3$  del canto de la viga.
- Nudos de arista: son aquellos que se manifiestan en dos superficies contiguas, cara y canto y canto. Se miden y evalúan en aquella superficie que los corte más perpendicularmente. En caso de duda se toma la relación que resulte más desfavorable entre  $d_1/b$  y  $d_2/b$ .
- Nudos agrupados: Son aquellos nudos cuya distancia entre centro es menor o igual a 150 mm medidos según el eje longitudinal de la viga. Si los nudos agrupados no se solapan en la dirección perpendicular al eje longitudinal de la viga, se miden por suma de diámetros. Si los nudos agrupados se solapan sobre la dirección perpendicular al eje longitudinal de la viga, se miden globalmente.
- Los nudos de diámetro menor o igual a 10 mm se despreciarán, exceptuando que sean un nudo pasante.

### **Fendas**

Se denomina fenda a toda grieta o fisura longitudinal que se extiende cortando los anillos de crecimiento de la madera [14]. Estas fisuras se forman por la pérdida de humedad de la madera lo cual provoca tensiones internas que originan la separación de las fibras. Las fendas de secado son aceptadas por la normativa española con restricciones que se muestran en la Tabla 12.

Las fendas horizontales a solicitaciones de flexión pueden dividir la viga en dos partes provocando la pérdida de inercia de la sección [14]. Las fendas pueden facilitar la rotura de la pieza cuando son sometidas a esfuerzo cortante. En cambio, la presencia de las fendas en vigas de gran escuadría no llega a tener una influencia significativa.

Los requisitos para que una viga con fendas sea clasificada como calidad MEG son los siguientes [14]:

- No se tuvieron en cuenta aquellas fendas con una longitud inferior a la menor dimensión de los siguientes parámetros:  $\frac{1}{4}$  de la longitud de la pieza y 1 m.
- Las fendas que no superaron el ancho mayor de 1 mm se despreciaron.

### **Inclinación de las fibras**

La desviación de la fibra se manifiesta en el aserrado de la viga puesto que la estructura del árbol es de forma cónica. Para que la desviación de la fibra sea mínima, el corte debe de ser paralelo al centro del tronco y no a la cara. Este defecto afecta de manera importante a la resistencia a flexión y tracción. La desviación se mide sobre 1 m de longitud, que se expresa como el cociente entre la longitud desviada y la longitud de medición [14].

### **Acebolladuras**

La acebolladura es la separación total o parcial entre los anillos de crecimiento contiguos a lo largo de la pieza de madera. Las acebolladuras tienen lugar cuando los anillos contiguos se desarrollan a diferentes velocidades. Las acebolladuras no están permitidas por la normativa española de clasificación visual para categoría de calidad MEG [14].

### **Gemas**

Las gemas se definen como la falta de madera que se presenta en la arista de una pieza de madera aserrada. Este defecto se origina durante el aserrado de la madera en el proceso de despiece del tronco del árbol [14].

Este defecto no tiene mucha importancia en la resistencia de la pieza ya que no se cortan las fibras de la pieza en la superficie de la gema. Sin embargo, este defecto es de gran importancia constructiva en la resolución de los encuentros.

Según la norma UNE EN 1310 [17], la gema se evalúa por su longitud y por su dimensión transversal en relación a la longitud de la pieza. A efectos de la longitud, si la gema se manifiesta en diferentes lugares de la misma arista se suman las longitudes.

### **Bolsas de resina**

Las bolsas de resina son las aberturas entre los anillos anuales de una pieza de madera blanda que contiene o ha contenido resina líquida o sólida. Estas bolsas provocan una disminución de la resistencia de la madera [14].

## **Médula**

La médula es una zona situada en el interior del primer anillo de crecimiento del árbol y está constituida por material blando. Su estructura anatómica es distinta a la del resto de la madera y su problema radica en que la madera de su alrededor puede ser juvenil. La médula no tiene gran influencia en la resistencia de la pieza y está permitida por la norma [14].

## **Alteraciones de Tipo Biológico**

Las alteraciones de tipo biológico están recogidas por la norma UNE EN 844-10 y 11 [19]. Los principales ataques por alteración biótica que producen la degradación del aspecto y/o de las propiedades mecánicas de la madera son las indicadas a continuación:

- **Azulado:** decoloración originada por hongos, que produce un tono variable entre un azulado pálido hasta un color negro.
- **Pudrición:** descomposición de la madera por la acción de hongos y otros microorganismos que provocan reblandecimiento, pérdida de masa y resistencia progresivas.
- **Insectos xilófagos:** insectos que se alimentan de la madera. Estos insectos son muy peligrosos ya que escavan conductos en la madera provocando una gran disminución de la resistencia mecánica de la pieza.
- **Muérdago:** planta parasitaria que crece en los árboles, de la familia de las lorantáceas. Esta planta se alimenta de la savia del árbol por lo que acaba secándolo y reduciendo la resistencia de la madera.

## **Deformaciones de las Piezas**

Según la UNE EN 1310 [17], las deformaciones de la madera ocasionadas por un mal secado provocan tensiones internas originando las deformaciones mostradas en la Figura 10 y descritas a continuación:

- **Curvatura de la cara:** se mide la deformación máxima "x" de un tramo de 2m entre los extremos de la pieza, expresándose el resultado en mm por cada 2m de longitud.
- **Curvatura de canto:** se mide la deformación máxima "y" de un tramo de 2m entre los extremos de la pieza, expresándose el resultado en mm por cada 2m de longitud.
- **Alabeo:** se mide la deformación máxima "z" de la superficie sobre una longitud representativa de 2m.
- **Abarquillado:** se evalúa como la deformación máxima sobre la anchura de la sección. Se expresa el resultado en milímetros por cada 25 mm de anchura. La deformación máxima se expresa como "w" sobre la anchura de la sección.

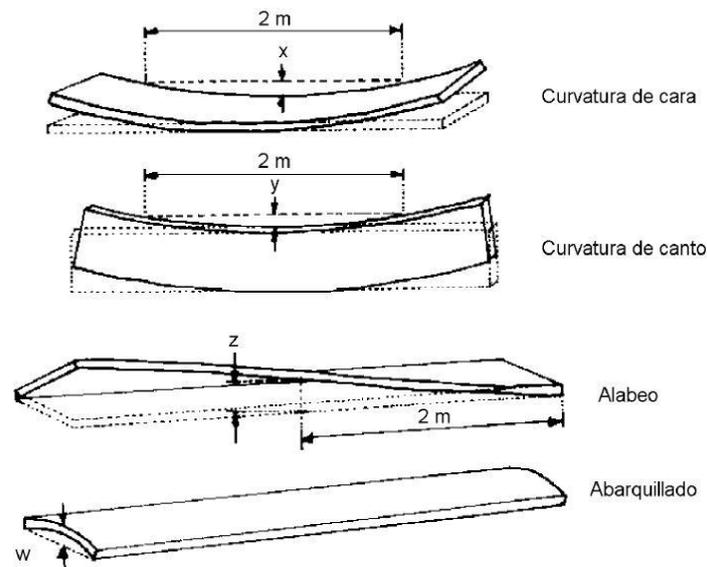


Figura 10. Deformaciones de las piezas de madera según la UNE EN 1310. [17]

### 3.3.2. Resultados de la clasificación visual

Una vez conocidos los parámetros para la clasificación visual, se ha procedido a la clasificación de las 10 vigas que componen el grupo a estudiar. Se ha realizado una ficha individual de cada viga en la que se refleja de forma detallada toda la información de su clasificación. Los resultados de la clasificación visual se muestran en la Tabla 14. En esta tabla se indica si la viga tiene calidad MEG (aceptada por la clasificación visual) o por lo contrario se clasifica como RECHAZO, indicando la causa del rechazo.

Clasificación visual		
Viga	Aceptación/Rechazo	Causa
P 28	RECHAZO	Nudos
P 10 W	RECHAZO	Nudos
7 P	RECHAZO	Nudos
PN 17	RECHAZO	Nudos
P 31 W	RECHAZO	Fendas
SN 6	RECHAZO	Nudos
P 28 W	RECHAZO	Nudos
P 48 E	RECHAZO	Nudos
SN 8	RECHAZO	Nudos
P 14 E	RECHAZO	Carcoma

Tabla 14. Clasificación visual de las vigas.

Como se puede apreciar en la tabla, todas las vigas son rechazadas por la clasificación visual, cuyos parámetros han sido descritos con anterioridad. Esto se debe a que en la normativa actual española no hay una norma específica para maderas de uso estructural de gran escuadría. Para realizar una clasificación visual más rigurosa se necesitaría de una normativa específica para este tipo de material estructural.

En la tabla de resultados de la clasificación visual sólo se ha indicado que las causas de rechazo pueden ser varias (nudos, fendas y carcoma). Sin embargo, se ha dado prioridad a las causas de rechazo que disminuyen más la resistencia mecánica de las vigas. Aplicando este criterio, se ha llegado a la conclusión de que el 80% de las vigas son rechazadas ya que la dimensión de sus nudos sobrepasa los límites de la norma. Así mismo, un 10% presentan fendas mayores a las permitidas en la norma y otro 10% tiene carcoma, la cual no está permitida en la clasificación.

### **3.4. Técnicas instrumentales básicas de caracterización**

Los valores característicos de la madera vienen expresados en la norma UNE EN 338 [16], en la que se definen las clases resistentes. Por otra parte, las normas UNE EN 384 [20] y 408 [21] indican como determinar las propiedades físicas y mecánicas. En este proyecto se han estudiado principalmente dos parámetros de caracterización de la madera que son la densidad y la humedad.

#### **3.4.1. Medida de densidad**

La densidad depende de la especie de la madera y es muy variable [12]. Las coníferas más utilizadas en la construcción tienen una densidad comprendida entre los 400 y 550 kg/m<sup>3</sup>. La densidad es una relación entre la masa y el volumen y está directamente relacionada con la humedad de la madera, que generalmente es del 12%.

$$Densidad (kg/m^3) = Peso (kg) / Volumen (m^3)$$

Para obtener la densidad de las vigas de gran escuadría se requiere el uso de una báscula que supere los 100 kg. Este tipo de báscula no estaba disponible en el laboratorio donde se ha desarrollado este proyecto, por lo que en su lugar se ha usado una báscula doméstica.

Tras realizar las medidas de volumen y masa correspondientes, explicado en el apartado 3.2.2, se ha calculado la densidad media de las vigas cuyo valor es de 557,71 kg/m<sup>3</sup>. Este valor sobrepasa en 7,71 kg/m<sup>3</sup> el límite establecido por la normativa.

#### **3.4.2. Contenido de Humedad**

El contenido de humedad se ha calculado con el método de resistencia eléctrica [12].



Figura 11. Higrómetro de resistencia eléctrica y sonda

La resistencia eléctrica aumenta cuando decrece el contenido de humedad. El instrumental utilizado para llevar a cabo el método de resistencia eléctrica es un higrómetro y una sonda que se observa en la Figura 11, el higrómetro es el modelo PROTIMETER SURVEYMASTER SM de la marca NEURTEX S.A. Estos instrumentos se clavan en la madera y registran los valores de humedad. El procedimiento de medida ha consistido en la toma de 5 muestras en cada viga. En las zonas delimitadas descritas anteriormente se ha calculado el volumen de la pieza. Las humedades de las vigas objeto de ensayo se han indicado en la Tabla 15.

Viga	Medidas de humedad (%)					
	Nº1	Nº2	Nº3	Nº4	Nº5	Valor medio
P 28	9,20	10,30	9,90	10,10	9,20	9,74
P 10 W	6,10	7,80	7,80	8,20	7,90	7,56
7 P	7,80	6,10	8,50	9,20	8,90	8,10
PN 17	6,60	6,90	7,20	6,90	6,30	6,78
P 31 W	8,80	10,20	9,70	9,20	9,60	9,50
SN 6	7,10	8,40	7,90	6,50	6,80	7,34
P 28 W	7,30	7,30	6,30	7,40	6,30	6,92
P 48 E	7,00	6,60	7,60	6,30	6,30	6,76
SN 8	6,30	6,50	6,90	7,80	7,80	7,06
P 14 E	8,50	7,30	6,80	8,80	6,30	7,54

Tabla 15. Humedad de las vigas de madera.

El valor medio total de humedad de las vigas es de 7,65%.

El contenido de humedad de las vigas pudo sufrir variaciones durante el tiempo que pasaron a la intemperie en el aserradero, ya que durante esos días la precipitación fue abundante en Granada. Por otra parte, el valor medio de humedad es inferior al umbral del 12% que establece la norma.

La madera es un material higroscópico. Por ello, en el caso de que el contenido de humedad sea superior al 12%, la densidad debe disminuirse un 0,5% por cada variación del 1% en el contenido de humedad. Cuando el contenido de humedad es inferior al 12%, la densidad debe de aumentarse un 0,5% por cada variación del 1% de contenido de humedad.

Las condiciones climáticas con las que se realizó la catalogación y refuerzo de las vigas se muestran en la Figura 12 y la Figura 13. En estas figuras se indican los valores de temperatura y humedad respectivamente. Estas medidas se tomaron durante los meses de Febrero y Marzo.

Finalmente, he de indicar que el lugar de acopio de las vigas fue una zona al aire libre cerca del laboratorio de Hidráulica de la Escuela Técnica Superior de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Granada.

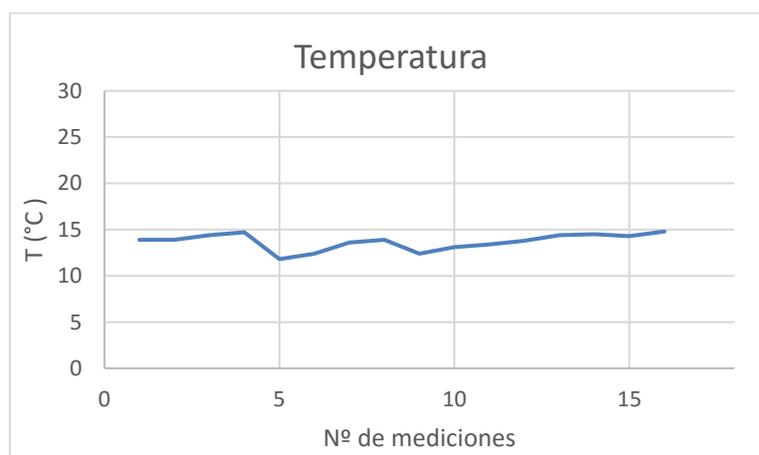


Figura 12. Temperatura durante la catalogación y refuerzo de las vigas.

Como se puede observar en la Figura 12, la temperatura media medida en las vigas es de 13,71 °C. Para el proceso de elaboración del refuerzo se escogió 15 °C como temperatura de referencia para la aplicación de los productos.

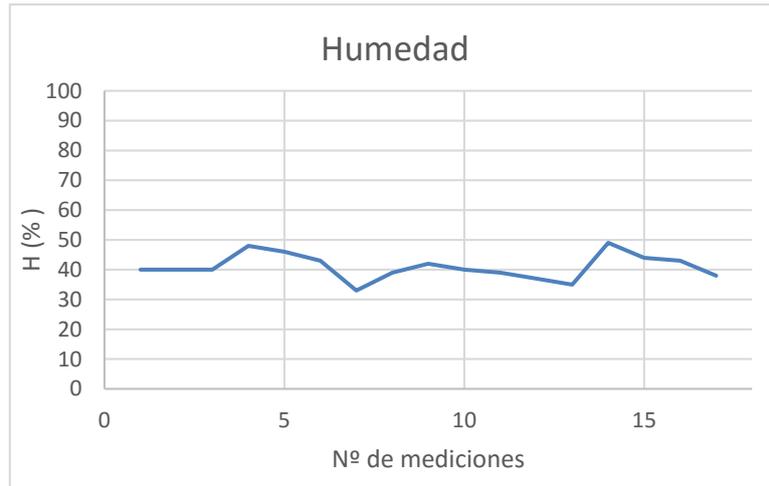


Figura 13. Porcentaje de humedad durante la catalogación y refuerzo de las vigas.

Como se puede observar en la Figura 13, el porcentaje medio de humedad medido en el laboratorio es de 40,94 %. Con este porcentaje de humedad no se produjo ningún problema por condensación de humedad de rocío, ya que no es elevada la humedad

.

## Capítulo 4. Materiales compuestos

### 4.1. Materiales compuestos: FRP

Los polímeros pueden combinarse con fibras con el fin de mejorar sus propiedades y convertirse en materiales compuestos. Se conoce como materiales compuestos o polímeros armados con fibras (FRP, como son conocidos por sus siglas en inglés) aquellos materiales formados por un armado en forma de fibras largas embebido en una matriz polimérica [22]. Los materiales compuestos son ampliamente usados en el refuerzo de estructuras debido a sus múltiples propiedades estructurales. En general las fibras son las responsables de las propiedades resistentes. La matriz envuelve a las fibras y las protege de potenciales daños mecánicos o ambientales [23].

La combinación de diferentes matrices con distintos tipos de disposiciones de fibra permite conseguir materiales con propiedades mecánicas muy especiales que pueden ser adaptados a diseños muy específicos [24].

Los materiales compuestos se pueden clasificar en función de su tipología o en función del tipo de sustancia componente. En la Tabla 16 se muestra la clasificación de los diferentes tipos de compuestos según el refuerzo.

Tipo de refuerzo	Disposición
Fibra larga y continua	Fibra orientada unidireccional
	Fibra orientada bidimensionales
	Fibra orientada tridimensional
	Orientación aleatoria
Fibra discontinua	Orientación aleatoria
	Orientación predominante
Partículas	Orientación aleatoria
	Orientación predominante

Tabla 16. Clasificación de los compuestos de matriz polimérica según la disposición y el tipo de refuerzo. [25]

Los FRP más comunes en aplicaciones industriales son los de matriz termoestable reforzada con fibras cerámicas largas orientadas, entrelazadas o cosidas. Estos materiales han sido ampliamente usados en el refuerzo de estructuras debido a la facilidad de producción, coste y propiedades mecánicas específicas. Las matrices más

comúnmente utilizadas en los FRP son las de resina epoxi o poliéster. En cuanto a las fibras, son la fibra de vidrio (GFRP) y de carbono (CFRP) las más usadas [24].

Las características estructurales más valoradas en los polímeros reforzados con fibra larga son sus elevadas propiedades específicas de rigidez y resistencia [24]. En la Figura 14 se puede observar una comparación en términos de resistencia específica y módulo específico entre materiales compuestos de matriz polimérica y metales.

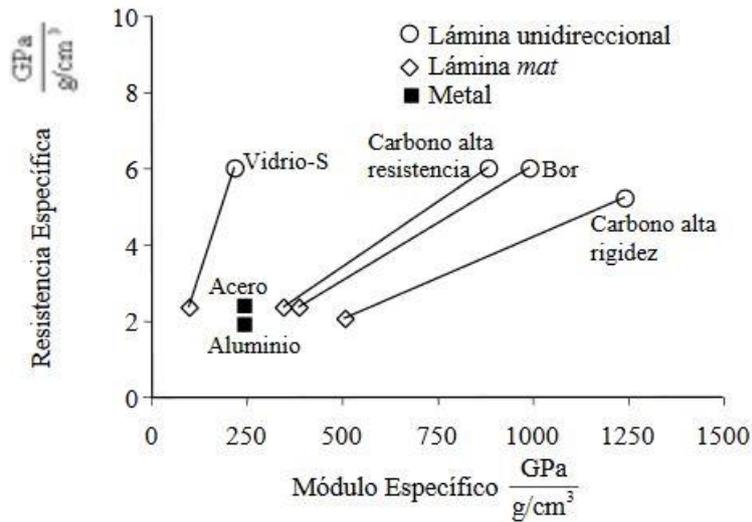


Figura 14. Comparación entre compuestos de matriz polimérica y metales. [25]

Las propiedades estructurales de un material compuesto se obtienen con la adición de los distintos componentes. Por lo tanto, la resistencia final de las propiedades mecánicas del compuesto depende de las propiedades de los constituyentes y su disposición geométrica [24].

Como se ha mencionado anteriormente, en el refuerzo de estructuras se utilizan habitualmente fibras de carbono y vidrio. En algunas aplicaciones específicas se utilizan también fibras vegetales como la aramida [24]. En la Tabla 17 se muestran las propiedades elásticas y de resistencia estática de las fibras más comunes usadas en polímeros reforzados.

Material	Densidad $P, (\text{g}/\text{cm}^3)$	Módulo elástico $E, (\text{GPa})$	Resistencia a tracción $S_t, (\text{MPa})$	Alargamiento (%)	Coef. Poisson $\sigma$	Módulo específico $(E/\rho)$	Resist. específica $(S_t/\rho)$
Fibra de vidrio							
E-Glass	2,54	72,4	3450	4,8	0,20	28,5	1,36
S-Glass	2,49	86,9	4300	5,0	0,22	34,9	1,73
Fibra de carbono							
T-40 (*)	1,81	290,0	5650	1,80	-	160,2	3,12
T-300 (*)	1,76	231,0	3650	1,40	0,20	131,3	2,07
Fibra de boro	2,70	393,0	3100	0,8	0,20	145,6	1,15
Fibra de aramida							
Kevlar 49 (**)	1,45	131,0	3620	2,8	0,35	90,3	2,50
Kevlar 149 (**)	1,47	179,0	3450	1,9	-	121,8	2,35

Tabla 17. Propiedades mecánicas de las fibras más comunes en FRP. (\*) Producto comercial de Amoco. (\*\*) Producto comercial de Du Pont. [26]

Además de las fibras mencionadas en la Tabla 17, también se pueden encontrar fibras metálicas, fibras cerámicas de cuarzo y sílice [24].

#### 4.1.1. Características de los distintos tipos de fibras

##### Fibras de vidrio

Las fibras de vidrio tienen una rigidez específica no superior a la de los metales tradicionales. Sin embargo, presentan una alta resistencia específica y un bajo coste [24].

### **Fibras de carbono**

Las fibras de carbono presentan unas excepcionales propiedades de rigidez y resistencia. Este tipo de fibras pueden variar mucho en función del proceso de producción y se pueden clasificar en dos tipos según sus características: las fibras de carbono de alta resistencia y las fibras de carbono de alta rigidez [24].

### **Fibras de boro**

Las fibras de boro son monofilamentos cerámicos relativamente gruesos con una baja flexibilidad. Estas fibras tienen una elevada rigidez y resistencia específica. Sin embargo, debido a su gran fragilidad son usadas en aplicaciones muy excepcionales [24].

### **Fibras de aramida**

Las fibras de aramida tienen una elevada flexibilidad mostrando muy buenas propiedades de resistencia específica y resistencia al impacto. Por el contrario, no presentan propiedades de rigidez excepcionales [24].

## **4.1.2. Características de la matriz**

La matriz es el material aglutinante que transmite los esfuerzos entre las fibras permitiéndoles trabajar de forma conjunta. Las principales limitaciones que presenta la matriz es la pérdida de propiedades a alta temperatura, su susceptibilidad medioambiental y la baja resistencia a cortante [24]. Las matrices poliméricas se pueden dividir en dos grandes grupos: matrices termoplásticas y matrices termoestables.

### **Matrices Termoplásticas**

Las matrices termoplásticas se reblandecen con la aplicación de calor y pueden ser remoldadas mediante la aplicación de una temperatura y presión adecuada. Aunque su proceso de producción limita su uso en compuestos de fibras largas, están indicadas en aquellos casos donde es necesario mucho volumen con bajo coste. Las matrices termoplásticas más utilizadas son las de aramida, poliuretano, polipropileno y el poli-eter-eter-ketone.

### **Matrices Termoestables**

Las matrices termoestables son materiales que polimerizan durante su fabricación y no se reblandecen con el calor. El estado líquido que presentan estos materiales antes del proceso de curado los hace idóneos para la producción de laminados con fibras largas. Las matrices termoestables más usadas son la de poliéster, que son usadas principalmente con fibras de vidrio y permite aplicaciones que pueden alcanzar hasta los 100 °C; los epoxis, que son más caras, resistentes a la humedad y tienen menos variaciones dimensionales durante el curado y aguantan temperaturas de hasta 175 °C y las de poliamida, que permiten aplicaciones de hasta 300 °C, pero su proceso de producción es más complejo [24].

En la Tabla 18 se muestran las propiedades elásticas y de resistencia estática de algunas matrices usadas en polímeros reforzados.

Material	Densidad $P, (\text{g/cm}^3)$	Módulo elástico $E, (\text{GPa})$	Resist. tracción $S_t, (\text{MPa})$	Alarga- miento (%)	Coef. Poisson $\sigma$	Módulo específico $(E/\rho)$	Resist. específica $(S_t/\rho)$
Termoplásticos							
PEEK (*)	1,30-1,32	3,24	100,0	50	0,4	2,5	76,3
PPS (**)	1,36	3,3	82,7	4	-	2,4	60,8
Termoestables							
Poliéster	1,1-1,4	2,1-3,4	34,5-103,5	1 – 5	-	2,2	55,2
Epoxi	1,38	4,6	58,6	-	0,36	5,5	74,0
Poliamida	1,46	3,5	103,0	-	0,35	2,4	70,5

Tabla 18. Propiedades mecánicas de las matrices más comunes en FRP. (\*) Producto comercial de ICL. (\*\*) Producto comercial de Phillips Petroleum. [26]

### 4.1.3. Cargas y aditivos usados en los polímeros compuestos

En la industria de los polímeros compuestos se utilizan diferentes productos que pueden ser incorporados al material compuesto para aportar características particulares o reducir los costes del compuesto [27]. Generalmente, se establece la distinción entre cargas y aditivos según la cantidad utilizada, ya que las cargas siempre se utilizan en mayores cantidades que los aditivos. Podemos dividir las cargas en dos grandes grupos: cargas reforzantes y cargas no reforzantes [22]. Estos dos grupos se describen a continuación.

#### Cargas reforzantes

Las cargas reforzantes se caracterizan por tener una geometría que reparte de forma homogénea los esfuerzos de las piezas evitando de esta forma la concentración de tensiones en el compuesto [23][22]. La relación volumen/superficie es mínima por lo que la influencia sobre la viscosidad de la resina es mínima permitiendo así su uso en

porcentajes altos [22]. Estas cargas pueden ser macizas o huecas. Las cargas más usadas son las siguientes:

- Micro esferas huecas de carbono con una densidad de  $120 \text{ kg/m}^3$  y un diámetro de  $5 - 150 \mu\text{m}$ .
- Micro esferas huecas orgánicas con una densidad de  $100 - 500 \text{ kg/m}^3$  y con un diámetro de  $10 - 800 \mu\text{m}$ .
- Micro esferas de vidrio con una densidad de  $150 - 600 \text{ kg/m}^3$  y un diámetro de  $10 - 150 \mu\text{m}$ . Estas esferas son las más utilizadas ya que son más baratas, aunque sus prestaciones son inferiores.

### **Cargas no reforzantes**

Las cargas no reforzantes se incorporan a la resina en proporciones compatibles con las características buscadas [22]. Las podemos clasificar en:

- Cargas de origen mineral procedentes de extractos de rocas y minerales, como por ejemplo los carbonatos, silicatos y sílices. Son las más usadas ya que su precio es bajo.
- Cargas ignífugas, como el hidrato de aluminio, óxido de antimonio boratos de zinc y productos orgánicos variados.
- Cargas conductoras de electricidad y calor, como los polvos metálicos, micro esferas metalizadas, negro de humo y filamentos metálicos muy finos.

### **Aditivos**

Las sustancias empleadas en menor proporción en los FRP son los aditivos. Cada tipo de aditivo tiene, por lo general, la propiedad de intervenir en una sola característica específica, por lo que es común utilizar varios tipos conjuntamente mientras éstos sean compatibles [22]. Si se emplean demasiados aditivos al mismo tiempo se pueden modificar otras propiedades del polímero base, por lo que es conveniente limitar su número en una misma matriz. Los tipos de aditivos más empleados son los siguientes:

- Lubricantes: los lubricantes internos modifican las fuerzas de cohesión intermoleculares y los lubricantes externos se usan para reducir la adherencia a los moldes.
- Agentes antiestáticos: los agentes antiestáticos son empleados en resinas incapaces de dispersar las cargas iónicas que se pueden dar sobre la superficie del producto durante su fabricación.
- Agentes antioxidantes: los agentes antioxidantes garantizan unas prestaciones prolongadas del material frente a la acción de los rayos UV y el ozono.
- Agentes que modifican las propiedades mecánicas: estos agentes se añaden al compuesto base durante la fabricación para influir en la rigidez del compuesto.
- Agentes retardantes de fuego o ignífugos.

- Conservantes: los aditivos conservantes impiden que el material sea atacado por microorganismos o insectos.
- Pigmentos: los pigmentos son productos insolubles en forma sólida de origen mineral u orgánico.
- Colorantes: los colorantes son compuestos solubles al agua o disolvente orgánico. Tienen mala resistencia química.
- Pastas colorantes: las pastas colorantes son dispersiones de pigmentos en un soporte pastoso, de fácil incorporación y dispersión en la resina.

## 4.2. Materiales Compuestos: CFRP

El uso de fibras de carbono es un sistema relativamente nuevo en estructuras de madera, pues existen pocos casos de aplicación. Sin embargo, múltiples análisis realizados en los últimos años indican que este tipo de fibras presentan grandes ventajas para la recuperación de una estructura [28]. Además, este tipo de fibras son excepcionales en aplicaciones de estructuras sometidas a cargas repetitivas o fatiga, ya que la fibra de carbono es un material cuyas propiedades mecánicas son muy poco sensibles a la aplicación de cargas cíclicas [24].

### 4.2.1. Características de las fibras de carbono

La resistencia específica es elevada, poseen bajo coeficiente de dilatación térmica, baja abrasión, inercia biológica y química, permeabilidad a los rayos X y a las ondas electromagnéticas, elevada amortiguación, alta resistencia a la corrosión y elevada conductividad eléctrica.

La conductividad térmica de las fibras de carbono aumenta con el incremento de la perfección del cristal y posee una estabilidad relativamente baja a la termo-oxidación. Según los análisis termo-gravimétricos, las fibras de carbono en el aire comienzan a degradarse entre los 500 – 700 °C. Los recubrimientos de resistencia a la oxidación tales como el óxido de boro o el carburo de silicio se pueden aplicar sobre la superficie de la fibra de carbono si se desea una estabilidad más elevada [22]. Además, las fibras de carbono son anisótropas. Ésta característica aumenta cuando se incrementa el módulo axial. El CFRP es un material heterogéneo que presenta comportamiento lineal hasta la rotura [28].

#### Principales ventajas que presenta el refuerzo con fibra de carbono

La principal ventaja de este refuerzo es la facilidad de manejo ya que su peso es muy bajo, la densidad es también baja, entorno a 1,6 g/cm<sup>3</sup> y las piezas poseen unos espesores de 1,2 y 1,4 mm.

Otro aspecto positivo se encuentra en la implantación de este tipo de refuerzos en una estructura, ya que el aumento de peso que producen es insignificante [3].

Además, estos polímeros ofrecen numerosas ventajas con respecto a los materiales convencionales en términos de ligereza, resistencia a la corrosión y flexibilidad en los procesos de fabricación [22].

#### Principales desventajas que presenta el refuerzo con fibra de carbono

La principal desventaja que presenta este sistema de refuerzo es su aplicación, ya que para el uso de resinas epóxicas se necesita mano de obra cualificada para garantizar una perfecta ejecución que evite la delaminación entre el refuerzo y la madera. La delaminación es un proceso en el cual el refuerzo se desprende de forma repentina para valores de tensión y deformación muy inferiores a los de rotura del material de refuerzo [23].

Además, este sistema de refuerzo es costoso y por tanto poco viable en viviendas convencionales de carácter privado [23].

#### 4.2.2. Factores que dificultan los refuerzos con fibras de carbono

Los principales factores que dificultan la difusión de los refuerzos con fibras de carbono son la falta de conocimiento de la respuesta del sistema, el bajo interés por colocar este tipo de sistemas y sobre todo la escasa disponibilidad y elevado precio. En los últimos años el precio de las fibras de carbono se está reduciendo gracias al aumento de la demanda en otros sectores productivos y gracias a los compuestos híbridos que incorporan fibras de vidrio o aramida [29].

#### 4.2.3. Tipos de fibra de carbono

En la Tabla 19 se muestran las propiedades de la fibra de carbono provenientes del proceso de poliacrilonitrilo (PAN).

Designación	Alta resistencia (HR)	Alto módulo (HM)	III
Diámetro de hilo ( $\mu\text{m}$ )	8	7	7 – 8
Densidad ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1,74 – 1,76	1,81 – 1,87	1,82
Módulo elástico (GPa)	230	390	290
Resistencia tracción (MPa)	2600 – 5000	2100 – 2700	3100
Alargamiento (%)	2	0,7	1,1
Módulo específico	130	210	160
Coef. expansión térmica ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	2,56	2,56	2,56

Tabla 19. Propiedades de las diferentes fibras de carbono provenientes de PAN. [22]

#### 4.2.4. Fabricación de las fibras de carbono

Las fibras de carbono se fabrican mediante pirolisis controlada y ciclización de los precursores de fibras orgánicas. Los precursores más comunes son las de poliacrilonitrilo (PAN), el alquitrán y el rayón [22]. Los dos primeros son los más utilizados. En las técnicas de procesado se pueden distinguir las siguientes etapas:

- Estabilización: un filamento es estirado y pasado a través de un horno de oxidación a baja temperatura para adquirir estabilidad dimensional.
- Carbonización: este proceso de carbonización de la estructura interna del polímero tiene lugar a una alta temperatura de más de 800 °C. Durante el periodo de calentamiento, muchos elementos diferentes del carbono se eliminan y los cristales de carbono se orientan a lo largo de toda la longitud.
- Grafitización: es el tratamiento de calentamiento a más alta temperatura, por encima de 2000 °C, el tamaño de los cristales de carbono aumenta y mejora la orientación de los cristales en la fibra.
- Tratamiento de superficie: la fibra pasa a través de una cámara de tratamiento de superficie para promover la adhesión de la fibra.

Los filamentos de carbono tienen un diámetro que oscila entre 5 – 8  $\mu\text{m}$  y están combinados en mechas que contienen entre 5.000 – 12.000 filamentos. Estas mechas pueden retorcerse en hilos y formar tejidos, similares a la fibra de vidrio [22].

La ubicación del refuerzo de fibra de carbono responde a la deficiencia que se genera en las zonas de tracción de las piezas. Su colocación deberá ir en la zona inferior del elemento. La resistencia a tracción de las fibras de carbono puede alcanzar los 28.000  $\text{kg}/\text{cm}^2$ , muy superior a la resistencia que tiene el acero, 3.000  $\text{kg}/\text{cm}^2$  [28].

### 4.3. Caracterización de materiales de refuerzo utilizados para los ensayos de las vigas de madera

En los ensayos que se han realizado en este proyecto se han utilizado dos tipos de laminado de fibra de carbono, dos tipos de resinas epoxi y un tipo de imprimación. Estos materiales pertenecen a las casas comerciales colaboradoras con el proyecto, SIKA S.A.U. y DRIZORO S.A.U. Para realizar la caracterización de estos materiales se ha nombrado a los productos de la casa comercial Sika como “Tipo 1” y a los productos de la casa comercial Drizoro como “Tipo 2”. Esta nomenclatura se seguirá en todo el proyecto para hacer mención a estos materiales.

#### 4.3.1. Fibra de carbono

El laminado es un polímero armado con fibras de carbono con matriz epoxi obtenido mediante pultrusionados automatizados y diseñado para el refuerzo de estructuras. Como ya se ha mencionado anteriormente, para los ensayos realizados se han utilizado

dos tipos de laminado de casas comerciales diferentes. En la Tabla 20 se muestran las propiedades mecánicas y físicas de cada tipo de laminado utilizado.

Material		Tipo 1	Tipo 2
Densidad	$P,(\text{g}/\text{cm}^3)$	1,55	-
Módulo elástico	$E,(\text{GPa})$	170	165
Resist. característica a tracción	(MPa)	2250	2200
Deformación de rotura	(%)	1,35	1,60
Contenido volumétrico en fibra	(%)	> 70	68
Espesor	(mm)	1,4	1,4
Ancho	(mm)	100	100
Sección	(mm <sup>2</sup> )	140	140

Tabla 20. Propiedades mecánicas y físicas de los tipos de laminado de fibra de carbono. [30][31]

La temperatura es un aspecto importante a considerar durante el almacenamiento de estos materiales. La temperatura de almacenamiento debe de permanecer en un rango de 5 - 40 °C y los materiales deben protegerse de la exposición directa al sol.

En la Figura 15 se muestran los tipos de laminado que se usó para el refuerzo de las vigas.



Figura 15. Laminado SIKA izq. y laminado DRIZORO derecha.

El uso estructural de este tipo de laminado de fibra de carbono presenta una elevada resistencia sin sobrecargar la estructura de refuerzo. Todo lo contrario, sucede en refuerzos con perfiles metálicos u hormigón. Además, el laminado de fibra de carbono mejora las condiciones de servicio al reducir la flecha, la deformación y la fatiga. Finalmente, su fácil manejabilidad para su aplicación es una gran ventaja respecto a otras soluciones.

#### 4.3.2. Resinas

Para cada ensayo se ha usado la resina de la casa comercial correspondiente al laminado de fibra de carbono. Por lo tanto, la denominación de las resinas sigue la misma nomenclatura que los laminados. La resina de la casa comercial Sika es la resina denominada como “Tipo 1” y la resina de la casa comercial Drizoro se ha denominado como resina “Tipo 4”. Estas resinas son adhesivos estructurales bicomponentes, es decir, con componente A y B, como se observa en Figura 16. En este caso el componente A y B es la combinación entre las resinas epoxi y cargas. En la Tabla 21 se muestran las propiedades mecánicas y físicas de cada tipo de resina utilizada.

Material		Tipo 1	Tipo 4
Densidad	$P, (\text{g}/\text{cm}^3)$	1,65	-
Resistencia. a tracción	$(\text{N}/\text{mm}^2)$	14 – 17	> 29
Resistencia. a cortante	$(\text{N}/\text{mm}^2)$	24 – 27	> 9,8
Módulo de elasticidad a tracción	$(\text{N}/\text{mm}^2)$	11200	-
Adherencia	$(\text{N}/\text{mm}^2)$	> 4	> 2,5
Proporción	(peso)	3:1	4:1
Rendimiento sobre cada tipo de laminado	(kg/m)	0,55 – 0,8	0,7 – 0,8
<i>Pot Life</i>	(minutos)	90	> 180
Tiempo de secado	(horas)	10	18
Tiempo de curado	(días)	7	14

Tabla 21. Propiedades mecánicas y físicas de los tipos de laminado de fibra de carbono. [30 y 31]

Las propiedades mecánicas y físicas están muy relacionadas con la temperatura y el tiempo de curado. Se ha tomado como referencia 15 °C para la temperatura, exceptuando el módulo de elasticidad donde la temperatura es 23 °C.



Figura 16. Izq. Componentes resina de SIKA y a la derecha componentes de DRIZORO.

Estas resinas son de fácil aplicación. Del mismo modo, el proceso de mezclado de componentes es igualmente sencillo.

El Tipo 1 es tixotrópico, es decir, no se descuelga en aplicaciones verticales hasta un espesor de 3–5 mm, endurece sin retracción del compuesto, tiene alta resistencia a la fluencia bajo carga permanente y es impermeable a líquidos o vapor de agua.

Los componentes A y B de las resinas son de diferentes colores para facilitar su identificación. La mezcla de los componentes se realiza durante al menos 3 minutos con una batidora a bajas revoluciones hasta que el material tenga una consistencia uniforme.

### 4.3.3. Imprimación

Para todas las vigas ensayadas se ha utilizado la misma imprimación, la correspondiente a la casa comercial Drizoro. La finalidad de la utilización de esta imprimación es mejorar la adherencia de las resinas adhesivas al soporte de aplicación del refuerzo. En la Tabla 22 se muestran los datos técnicos de la resina de imprimación.

Material		Imprimación
Peso específico	(g/cm <sup>3</sup> )	1,1 ± 0,1
Viscosidad	(mPa·s)	600 – 700
Tiempo de secado	(horas)	4 – 5
Tiempo de repintado	(horas)	14 – 15
Tiempo de curado	(días)	7
Proporción A:B	(peso)	4:1
Rendimiento	(kg/m <sup>2</sup> )	0,25 – 0,50

Tabla 22. Datos técnicos de la resina de imprimación. [31]

La resina de imprimación es un bicomponente, es decir, el componente A es una resina y el componente B es un endurecedor, como se muestra en la Figura 17. La mezcla se ha de realizar con una batidora a baja velocidad para que la mezcla sea lo más homogénea posible y evitar así la aparición de pompas de aire que puedan reducir la adherencia del material.



Figura 17. Componentes de la imprimación.



## Capítulo 5. Refuerzo de vigas de gran esquadría (4,5 m)

Las vigas se reforzaron con laminado de fibra de carbono, resinas adhesivas e imprimación siguiendo el esquema que se muestra en la Figura 18.

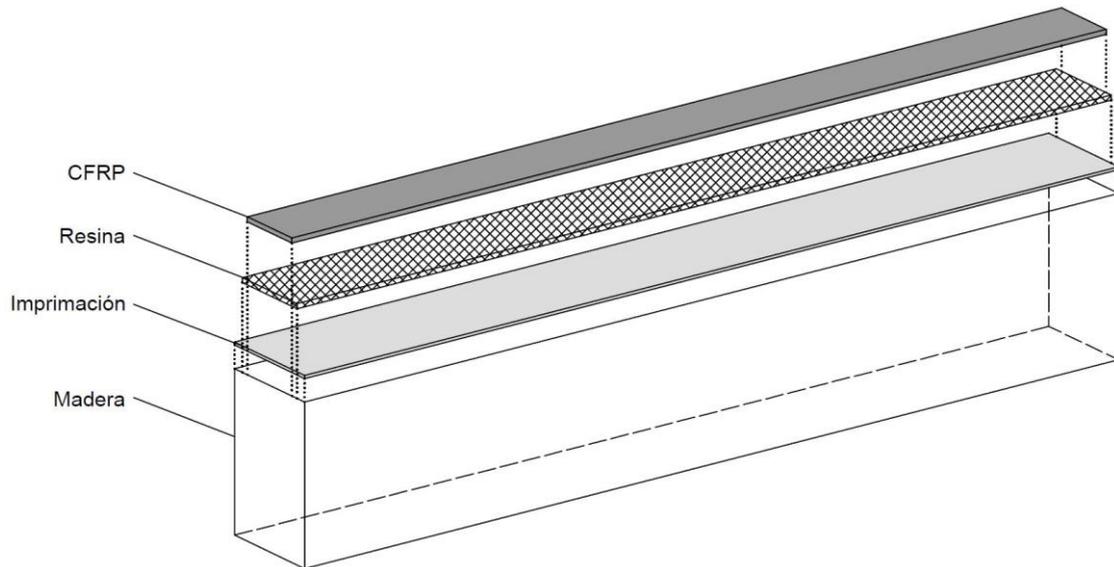


Figura 18. Esquema de las distintas capas de un refuerzo con laminado de fibra de carbono.

### 5.1. Método de elaboración del refuerzo de vigas de 4,5 m

Para la elaboración del refuerzo en las vigas se siguieron los procedimientos de aplicación recomendados por las dos casas comerciales SIKA S.A.U. y DRIZORO S.A.U. Estos refuerzos han de ser aplicados por profesionales con experiencia para evitar errores en la aplicación, tales como la aparición de burbujas, falta de contacto entre los materiales o una mala fijación. La metodología de elaboración de un refuerzo es la que se observa en el diagrama de la Figura 19.

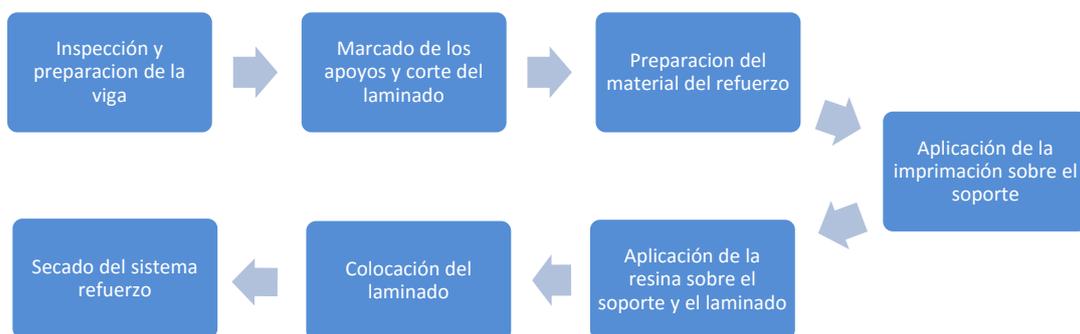


Figura 19. Diagrama del proceso de refuerzo de laminado de CFRP.

### **5.1.1. Inspección y preparación de la viga**

En primer lugar, se deben inspeccionar las superficies donde se va a aplicar el refuerzo para detectar posibles imperfecciones.

En nuestro caso se realizó un cepillado de la superficie para su regularización, como se observa en la Figura 20 y se eliminaron las partes sueltas o disgregadas. Se limpió la superficie de la viga mediante aspirado con el objetivo de eliminar restos de polvo.



Figura 20. Cepillado de la viga para su regularización.

### **5.1.2. Marcado de los apoyos del ensayo y del laminado en la viga**

A continuación, se realizó el marcado en la viga de los apoyos y de la situación del laminado. Se debe prestar especial atención a que este quede lo más centrado posible respecto de los ejes de la viga.

### **5.1.3. Preparación de las herramientas y el material**

Posteriormente, se prepararon el material y las herramientas a usar y se comprobó que se disponía de todo el equipo necesario. El proceso de refuerzo comenzó con el corte del laminado en la longitud adecuada, limpieza del mismo y eliminación del polvo sobre la superficie.

### **5.1.4. Aplicación de la imprimación sobre el soporte**

La imprimación consta de dos componentes principales, el agente principal y el endurecedor. La mezcla de los mismos debe hacerse en la proporción indicada en la ficha técnica del producto. Para medir la cantidad necesaria se usó una báscula digital con precisión en gramos, prestando especial atención al tiempo de vida de la imprimación. La mezcla se realizó en un recipiente limpio y con una batidora a bajas revoluciones para conseguir una mezcla homogénea. Además, es necesario prestar especial atención de que la mezcla no contenga burbujas de aire.



Figura 21. Imprimación aplicada sobre la viga.

La aplicación de la imprimación se realizó utilizando una herramienta adecuada para su alta viscosidad. Por último, tras la aplicación de la imprimación sobre la superficie de refuerzo se debe dejar un tiempo de secado de entre 3 y 5 días antes de comenzar la aplicación del refuerzo sobre la viga.

#### **5.1.5. Aplicación de la resina sobre el soporte**

La resina epoxi se suministró en dos componentes. Al igual que ocurrió con el proceso de imprimación, el proceso de mezclado se realizó en las proporciones que marcan las fichas técnicas de los productos y en la cantidad necesaria para realizar el refuerzo, pero siempre teniendo en cuenta el tiempo de vida de la mezcla. La mezcla se realiza en un recipiente limpio y con ayuda de una batidora a bajas revoluciones. Con objeto de conseguir una mezcla homogénea.



Figura 22. Aplicación de la resina sobre la viga.

Proceso de aplicación de la resina epoxi como se observa en la Figura 22. Este proceso se realizó mediante la utilización de una herramienta adecuada, dependiendo de la viscosidad de la resina epoxi.

### **5.1.6. Colocación del laminado sobre el soporte.**

Una vez aplicada la resina sobre el soporte se aplicó una capa sobre el laminado con ayuda de un dosificador, como el de la Figura 23. De ésta manera se garantizó que la aplicación del espesor de la resina fue continua y uniforme.



Figura 23. Dosificador de resina para el laminado.

El siguiente paso fue la colocación del laminado sobre el soporte en la situación correcta, marcada previamente en el eje central de la viga. Se aplicó presión sobre el laminado hasta que el adhesivo sale por ambas caras de este. Posteriormente se retiró la resina sobrante con una espátula. En todo momento se debe evitar la aplicación de una excesiva presión sobre el laminado para evitar la salida de más resina de la necesaria y dejar un espesor inferior al recomendado.

## **5.2. Puesta en obra del sistema de refuerzo**

La puesta en obra de los sistemas de refuerzo debe ser realizada por empresas cualificadas y especialidades en la reparación de estructuras y en la aplicación de refuerzos con fibra de carbono y en la aplicación de resinas sintéticas.

Para conseguir la máxima eficacia en este tipo de refuerzos es imprescindible tener una superficie sana y limpia, ya que si no es así la adherencia de la capa de resina será débil y las propiedades del refuerzo no serán las necesarias.

Las condiciones climáticas y el entorno durante la puesta en obra son muy importantes ya que no están tan controladas como en el interior de un laboratorio. Durante la puesta en obra se debe intentar que no haya viento que pueda incrustar polvo en las resinas y que las superficies a reforzar estén protegidas de la lluvia para evitar la humedad de los soportes. Por otra parte, si la higrometría es superior al 80% es necesario controlar la

creación de condensaciones en el soporte. Además, la temperatura del aire debe de estar comprendida entre 5 – 30 °C para que no afecte a los materiales compuestos. Finalmente, una vez reforzada la viga hay que mantenerla por encima de 5 °C para evitar retracciones en los materiales adhesivos.

En el Apartado 3.4.2. se muestran unas gráficas con las temperaturas y el porcentaje de humedad con el que se realizaron los refuerzos en el laboratorio.

### 5.3. Comparativa entre el refuerzo de las vigas de 1,3 y 4,5 m.

En este apartado se ha realizado un estudio sobre la comparativa de los incrementos sobre el tiempo de catalogación y refuerzo para cada dimensión de viga reforzada. Se han tomado los datos de las vigas de 1,3 m de los trabajos ya realizados previamente por el grupo de investigación. También se ha realizado la comparación con el incremento de imprimación y resina necesarias para reforzar las vigas.

Para empezar, se ha calculado la superficie de refuerzo de cada dimensión de viga como se muestra en la Tabla 23.

<b>Dimensiones de las vigas reforzadas (mm)</b>	1300	4500
<b>Longitud del área de refuerzo (mm)</b>	1000	4000
<b>Ancho del área de refuerzo (mm)</b>	60	120
<b>Área de refuerzo (mm<sup>2</sup>)</b>	60000	480000

Tabla 23. Superficie de refuerzo según la dimensión de la viga. Fuente: Elaboración propia.

Se aprecia un incremento del 800 % en el área de refuerzo, es decir, el área a reforzar en las vigas de gran escuadría ha experimentado un fuerte incremento con respecto a las vigas de pequeña escuadría.

En la Tabla 24 se muestran los datos de los rendimientos de la imprimación y de las resinas, tomando como referencia los datos obtenidos en las vigas de 1,3 m.

<b>Viga</b>	1,3 m	4,5 m
<b>Imprimación</b>	100%	89%
<b>LR-S</b>	100%	121%
<b>LR-D</b>	100%	108%

Tabla 24. Rendimientos de la imprimación y de las resinas.

Como se puede apreciar la cantidad de resina utilizada para las vigas de 4,5 m fue menor. Por el contrario, para las resinas fue necesario una mayor cantidad de resina en las vigas de 4,5 m para poner el refuerzo. La resina de SIKA necesitó una mayor cantidad que la de Drizoro.

En la Tabla 25 se muestran los tiempos de aplicación de la imprimación y de las resinas.

<b>Viga</b>	<b>1,3 m</b>	<b>4,5 m</b>
<b>Imprimación</b>	100%	385%
<b>LR-S</b>	100%	575%
<b>LR-D</b>	100%	398%

Tabla 25. Tiempos de aplicación de la imprimación y de las resinas

Se aprecian unos importantes incrementos de tiempo en la aplicación de la imprimación y las resinas para el refuerzo de las vigas de 4,5 m. Para la resina de SIKA fue necesario más tiempo ya que fue necesaria más resina que la de DRIZORO y su aplicación fue más lenta. También hay que mencionar que para el refuerzo de los dos tipos de vigas no se utilizó el mismo número de personas. Para las vigas de 4,5 m fue necesaria la participación de más personas durante el refuerzo.

# Capítulo 6. Ensayo a flexión de las vigas

## 6.1. Comportamiento mecánico

### 6.1.1. Definición de conceptos

#### Tensión

El esfuerzo de tensión se define como la fuerza por unidad de área en la que se aplica y produce una deformación. Este esfuerzo puede descomponerse en una suma vectorial de dos fuerzas, una normal y otra paralela a la fibra de la madera [34].

- Se denomina esfuerzo de tracción cuando la dirección es hacia el exterior de la sección; un esfuerzo de compresión es cuando la dirección es hacia el interior de la sección del elemento, como se puede apreciar en la Figura 24.

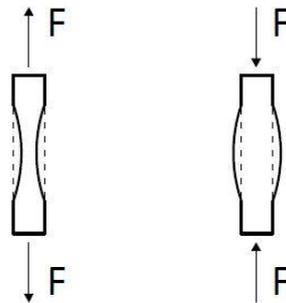


Figura 24. Esquemas de esfuerzos a tracción y compresión. Izq.: Esfuerzo a tracción. Dcha.: Esfuerzo a compresión.

- El esfuerzo cortante (Figura 25) origina tensiones tangenciales sobre la fibra de la madera que actúan de dos modos; cortadura: las fibras son cortadas transversalmente por el esfuerzo y el fallo se produce por aplastamiento y deslizamiento; deslizamiento: el fallo se produce por el desplazamiento de las fibras con respecto a otras en la dirección longitudinal.

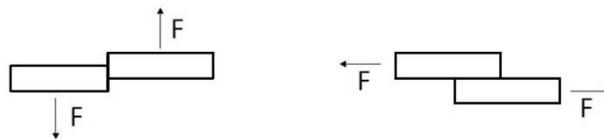


Figura 25. Esquemas de esfuerzo cortante. Izq.: Cortante de cortadura. Dcha.: Cortante de deslizamiento.

#### Flexión

La flexión es una combinación de esfuerzos a tracción y a compresión. Cuando se aplica una carga, en la parte superior de la viga las fibras se comprimen, mientras que en la parte inferior de la viga se traccionan, como se observa en la Figura 26.

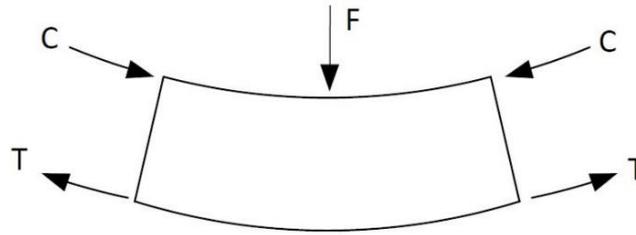


Figura 26. Esfuerzos de tracción y compresión en una viga a flexión.

### Deformación

La deformación es el fenómeno mediante el cual un cuerpo cambia de tamaño o forma debido a la aplicación de una o más esfuerzos sobre el mismo, como los esfuerzos térmicos [34]. Como se muestra en la Figura 27 la deformación en un eje se consigue determinando el incremento de longitud ( $\Delta L$ ) por unidad de longitud ( $L_0$ ), de la forma

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} .$$

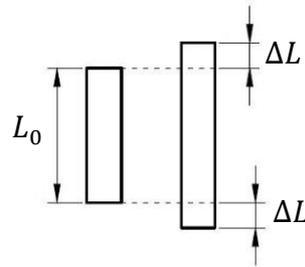


Figura 27. Deformación a lo largo de un eje.

### Galgas extensiométricas

Las galgas extensiométricas tienen como función medir las deformaciones y transformar la deformación inducida en una variación de resistencia mediante el efecto piezorresistivo. Las galgas extensiométricas son sensores cuya resistencia eléctrica varía con la aplicación de un esfuerzo, el cual puede ser registrado y traducido en deformaciones. Al sufrir una deformación la galga extensiométrica experimenta una elongación en su superficie que se registra en micrómetros ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )[32].

Los principales tipos de galgas extensiométricas son metálicas, por resistencia, por capacitancia, foto-eléctricas y semiconductoras. Están compuestas por una capa de aislamiento, denominada soporte, a la que se une una rejilla de medida (Figura 28).

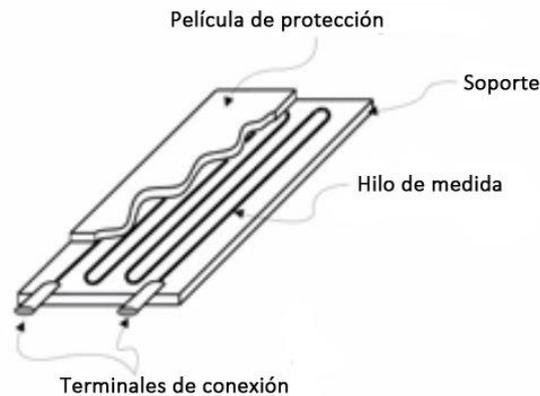


Figura 28. Estructura de una galga extensiométrica.

La resistencia de las galgas extensiométricas ( $R_g$ ) viene dada por la su resistencia nominal ( $R_0$ ) por el factor de galga ( $K$ ) que determina la sensibilidad de la resistencia y por la deformación ( $\varepsilon$ ), de la forma

$$R_g = R_0(1 + K \cdot \varepsilon).$$

Se utilizó el puente de Wheatstone (Figura 29) para medir resistencias desconocidas mediante el equilibrio de los brazos del puente. Estos están constituidos por cuatro resistencias que forman un circuito cerrado. Además, cualquier variación de la resistencia por efecto de la temperatura fue anulada con una variación semejante en la otra resistencia.

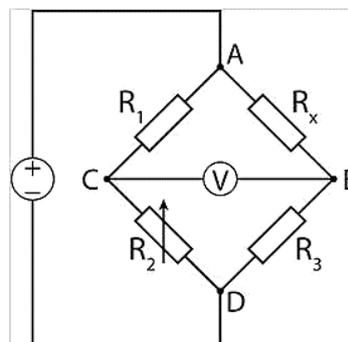


Figura 29. Esquema del puente de Wheatstone.

$R_x$  es la resistencia que se quiso determinar;  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_3$  son resistencias conocidas.

Las galgas extensiométricas empleadas fueron de la marca HBM, con una dimensión (Figura 30) cada una de ellas de 8 mm de ancho y 18 mm de largo y con un tamaño de la rejilla de 5 mm de ancho y 10 mm de largo.

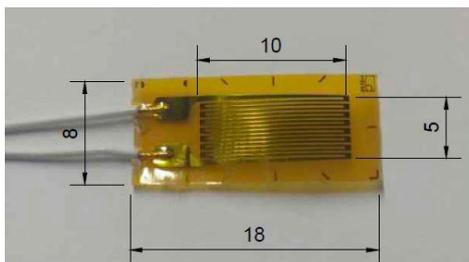


Figura 30. Galga extensiométrica utilizada. Cotas en mm.

Las principales características de las galgas extensiométricas que se usaron se muestran en la Tabla 26.

Resistencia ( $\Omega$ )	Factor de galga	Sensibilidad transversal (%)	Máximo voltaje de alimentación (V)
120	2	0,2	13

Tabla 26. Características de las galgas extensiométricas.

La instalación de las galgas y la preparación de la superficie para la adhesión de las galgas a la viga de madera se explica en el Apartado 6.2.

### LVDT's

Un LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) consiste en un bobinado primario alimentado por una señal de corriente alterna y dos bobinados secundarios (Figura 31). Su principio de funcionamiento es inductivo, es decir, el desplazamiento se obtiene por el movimiento del núcleo en el interior de las bobinas, el cual modifica la amplitud de la señal inducida entre el bobinado primario (A) y el secundario (B) [33].

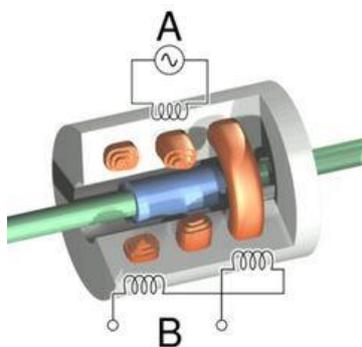


Figura 31. Esquema de funcionamiento de un LVDT.

La corriente alterna en el bobinado primario produce un campo magnético variable alrededor del núcleo, induciendo un voltaje alterno en el bobinado secundario que está próximo al núcleo. El voltaje de la señal inducida en el bobinado secundario es una relación lineal del número de espiras, la cual es

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{N_{out}}{N_{in}},$$

siendo  $V_{out}$  la tensión de salida;  $V_{in}$  es la tensión de entrada;  $N_{out}$  es el número de espiras del bobinado secundario;  $N_{in}$  es el número de espiras del bobinado primario.

Los LVDT's que se utilizaron para medir el desplazamiento vertical de la viga en este proyecto se muestran en la Figura 32. El desplazamiento se registró en milímetros (mm). El LVDT 1 y 3 eran de 100 mm y el LVDT 2 era de 200 mm, ambos de la marca HBM.



Figura 32. LVDT's empleados en los ensayos a flexión. Izq.: LVDT de 100 mm. Dcha.: LVDT de 200 mm

### Ley de Hooke

La Ley de Hooke establece la relación entre el alargamiento o acortamiento longitudinal y la fuerza aplicada. Cuando se tracciona o comprime un muelle (Figura 33), la fuerza recuperadora ( $F$ ) es directamente proporcional a la deformación del muelle ( $x$ ) y de signo contrario a ésta, siendo  $k$  una constante de proporcionalidad, denominada constante elástica, como se describe en la fórmula siguiente

$$F = - k \cdot x.$$

El signo negativo en la ecuación se debe a que la fuerza recuperadora es opuesta a la deformación.

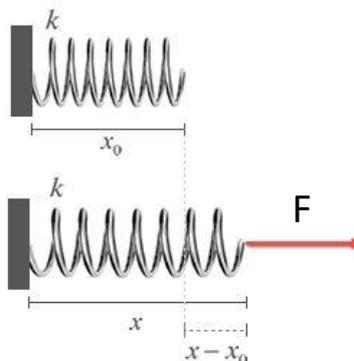


Figura 33. Esquema de la Ley de Hooke.

### Módulo de Young

Se aplica una fuerza  $F$  a una barra de longitud  $L_0$ , el material se deforma longitudinalmente y se alarga  $L - L_0$ . La razón de proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación unitaria está dada por la constante  $E$ , denominada módulo de Young, que es un valor característico de cada material [34]. Por lo tanto, la rigidez de un material queda caracterizado por la relación entre el esfuerzo axial  $\sigma_x$  y la deformación  $\epsilon$ , de la forma

$$E = \frac{\sigma_x}{\epsilon} = \frac{F_x/A}{\Delta L/L_0}.$$

Para calcular el módulo de elasticidad de las vigas de este Proyecto, fue necesario calcular la tensión máxima mediante la formula

$$\sigma_{max} = \frac{M_z \cdot y}{I},$$

siendo  $M_z$  el momento máximo;  $y$  es el canto de la viga desde la fibra neutra;  $I$  es el momento de inercia de la viga. Una vez que se obtuvo la tensión máxima, se cogieron los datos de las deformaciones de las galgas 2B y 2B de cada viga. Puesto que estaban en la zona de máxima tracción, se tomaron los valores entre el rango 30% - 50% de la tensión máxima que define el tramo elástico, de tal forma que

$$E = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{30\%}}{\epsilon_{50\%} - \epsilon_{30\%}}.$$

### Flecha

La flecha es el desplazamiento en el eje vertical que se produce por la acción de una fuerza. Se pueden encontrar dos tipos de flechas: flecha máxima y flecha activa, como se aprecia en la Figura 34.

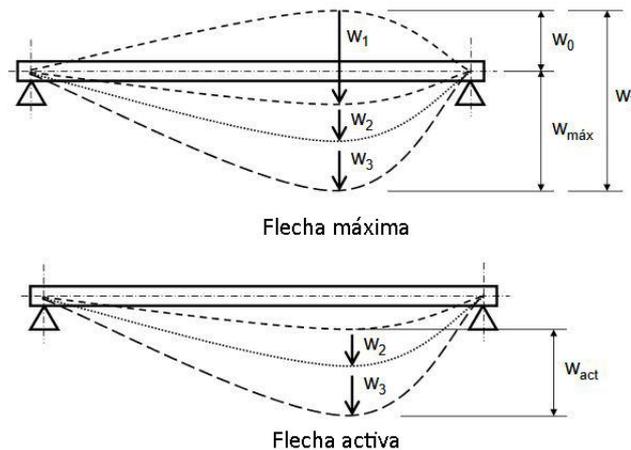


Figura 34. Tipos de flechas [34].

Además de éstas se encuentra la contraflecha ( $w_0$ ), es decir la flecha impuesta al elemento antes de entrar en carga. La flecha instantánea ( $w_1+w_3$ ) es la producida de

forma inmediata al aplicar las acciones permanentes ( $w_1$ ) y variables ( $w_2$ ). Flecha diferida ( $w_2$ ) es la flecha producida a lo largo del tiempo por el efecto de las acciones permanentes. La flecha total ( $w_T$ ) es la suma de las flechas instantáneas ( $w_0+w_{max}$ ) y diferida ( $w_2$ ). Finalmente, se denomina flecha activa ( $w_{act}$ ) a la flecha que actúa sobre los elementos no estructurales que gravitan sobre la estructura deformada, de valor ( $w_2+w_3$ ).

El Código Técnico de la Edificación Seguridad Estructural en su Art. 4.3.3.1. [35], establece unas limitaciones de flecha en elementos estructurales entre dos puntos, como se muestra en la Tabla 27.

Concepto	Elementos	W	Limitaciones de flecha
Daños en elementos secundarios	Pavimentos	$W_{act}$	1/500
	Pavimentos rígidos con juntas	$W_{act}$	1/400
	Resto de casos	$W_{act}$	1/300
Confort usuarios	Estructura horizontal	$W_T$	1/350
Apariencia	Estructura horizontal	$W_T$	1/300

Tabla 27. Limitaciones de flecha relativa. [35]

Las vigas analizadas en este proyecto pertenecieron a la estructura de una cubierta con flecha activa máxima de 1/300. En el caso de las vigas ensayadas en este PFG estuvieron colocadas en una cubierta con una luz entre los apoyos de 4.000 mm. Esto se traduce en un desplazamiento vertical máximo de 13,33 mm.

### Representación de la carga frente al tiempo

La representación de la carga frente al tiempo establece la relación entre el aumento de carga constante entre un tiempo de inicio ( $t_0$ ) y un tiempo de rotura ( $t_r$ ). El dibujo de la relación de la carga frente al tiempo es una línea recta si la carga es constante, como se representa en la Figura 35.

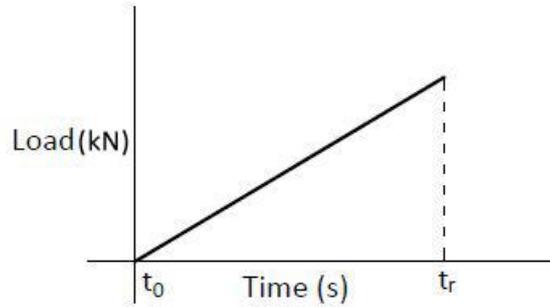


Figura 35. Relación de una carga constante frente al tiempo.

### Representación de la tensión frente a la deformación

Como se ha comprobado, existe una relación intrínseca entre los esfuerzos y las deformaciones, por lo cual adquiere sentido representar la deformación en función de la tensión (Figura 36).

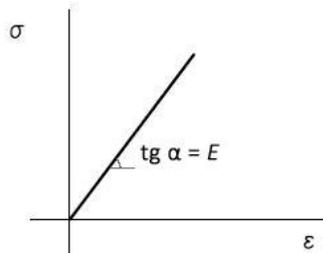


Figura 36. Relación entre la tensión frente a la deformación según la Ley de Hooke.

La tangente del ángulo  $\alpha$  es relación entre la deformación  $\epsilon$  de una barra sometida a un esfuerzo axial, con la tensión normal generada por dicho esfuerzo  $\sigma_x$ , que es igual a la constante  $E$  denominado módulo de elasticidad lineal o módulo de Young [34], de tal forma que

$$\text{tg } \alpha = E = \frac{\sigma_x}{\epsilon}.$$

Como se puede observar en la Figura 37, se aprecia un tramo de comportamiento perfectamente lineal hasta el punto A, que se asocia con un comportamiento elástico del material. Desde el punto A hasta el punto B, el diagrama empieza a describir una curva, vinculándose a un comportamiento elástico-plástico, ya que se deforma rápidamente y no recupera todo su estado inicial. Si se sigue aumentando la carga desde el punto B al C, el material entra en la zona plástica hasta que se rompe en el punto C.

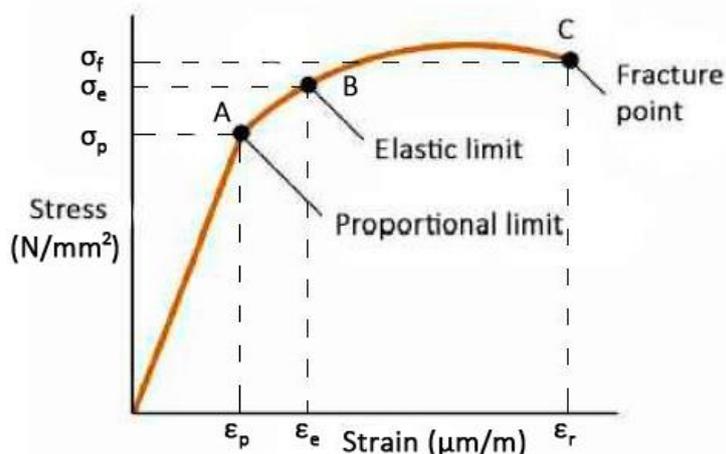


Figura 37. Relación esfuerzo frente a la deformación para un material dúctil. [34]

$\sigma_p$  es la tensión de proporcionalidad;  $\sigma_e$  es la tensión elástica y  $\sigma_f$  es la tensión de rotura.

### 6.1.2. Modelos de comportamiento mecánico de la madera

El modelo constitutivo de la madera sometida a esfuerzos en la dirección paralela a la fibra se define por medio de diferentes modelos de tensión-deformación. Los modelos tienen en común los esfuerzos a tracción teniendo un comportamiento elástico lineal [28]. Este comportamiento se define mediante la relación de la tensión frente a la deformación con una pendiente constante. En este modelo también es posible observar el rango plástico donde la tensión es constante y la deformación sigue incrementándose. La Figura 38 muestra un modelo elástico-plástico simplificado, en el cual se define el tramo plástico con una recta horizontal, es decir, la tensión permanece constante.

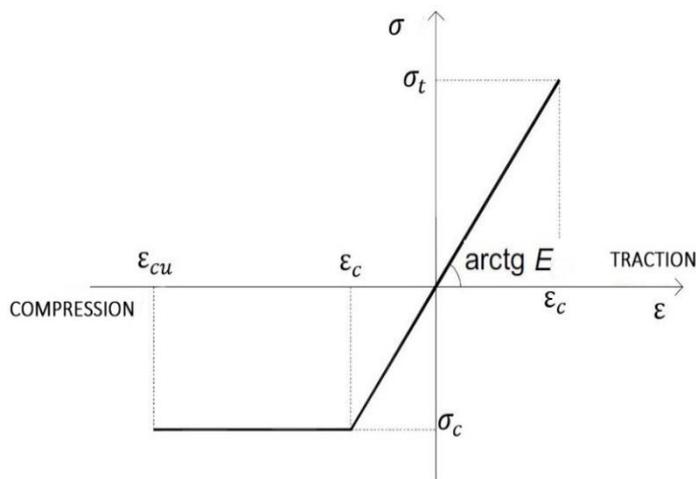


Figura 38. Modelo elástico-plástico simplificado. [36]

$\epsilon_{cu}$  es la deformación a compresión ultima;  $\epsilon_c$  es la deformación a compresión;  $\epsilon_c$  es la deformación a tracción;  $\sigma_c$  es la tensión a compresión;  $\sigma_t$  es la tensión a tracción.

En la Figura 39 se observa el modelo elástico-plástico propuesto por Bazan [36]. En este gráfico se aprecia un tramo rectilíneo inclinado de pendiente negativa, es decir, la tensión disminuye mientras que la deformación aumenta.

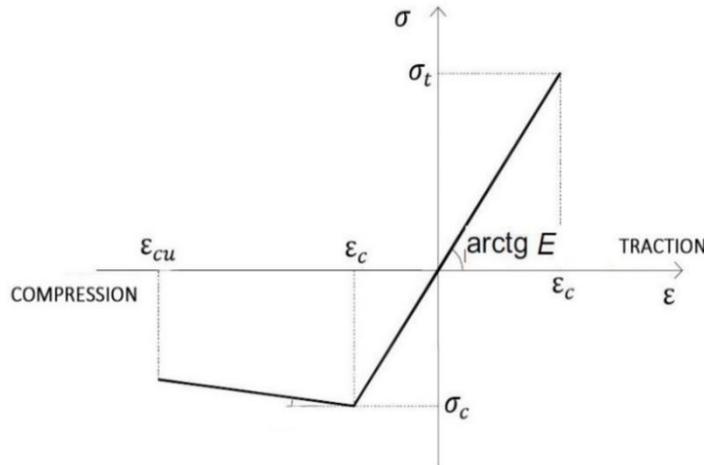


Figura 39. Modelo elástico-plástico propuesto por Bazan. [36]

En la Figura 40 se representa el modelo elástico-plástico propuesto por O'Halloran [36], en el cual el tramo plástico a compresión queda definido mediante una curva.

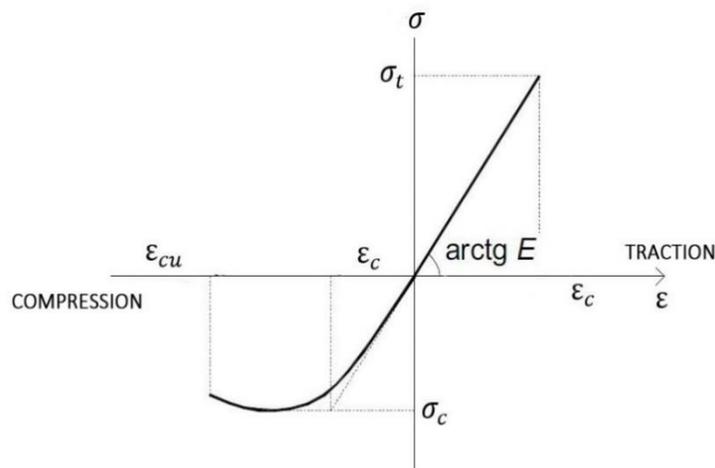


Figura 40. Modelo elástico-plástico propuesto por O'Halloran. [36]

En los tres modelos la pendiente del tramo a tracción es la misma, por lo tanto, se considera el mismo módulo de elasticidad para ambos modelos.

La resistencia a tracción de la madera es mayor que a compresión. Sin embargo, para el caso de madera maciza de uso estructural hay que contar con la presencia de defectos. Los defectos disminuyen la resistencia de la madera afectando en mayor medida a la resistencia a tracción y en menor medida a la resistencia de compresión [28].

El modo de fallo de un elemento de madera sometido a flexión depende de distintos factores:

- La relación entre los valores de resistencia a tracción y a compresión del elemento.
- La plastificación de las fibras comprimidas en el momento de la rotura de la viga, produciéndose el fallo con menor o mayor fragilidad.
- La presencia de defectos localizados, que son más perjudiciales ante esfuerzos de compresión.

En la madera maciza sometida a flexión la forma de fallo más común se produce en la fibra extrema en la zona de tracción, al alcanzar la tensión última. Otra forma de fallo común es la plastificación de las fibras en la zona comprimida [28].

En la Tabla 28 se indican los principales modos de fallo de la madera sometida a flexión según la norma CNR-DT 201/2005 [36].

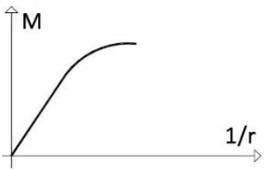
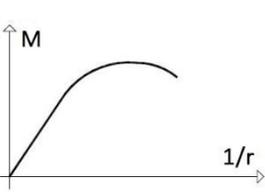
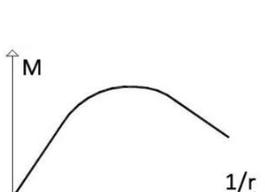
Descripción del fallo	Diagrama
<p>1</p> <p>Se produce una rotura frágil en la zona de tracción, con una relación lineal entre el momento y la curvatura hasta la rotura. Suele producirse por la presencia de defectos en la madera.</p>	
<p>2</p> <p>La rotura se produce en la zona traccionada seguida de una plastificación de las fibras comprimidas y un descenso de la fibra neutra hacia la zona traccionada.</p>	
<p>3</p> <p>Se produce en la zona traccionada de forma más dúctil que en el fallo 2, debido a que previamente se ha producido una plastificación de la sección transversal recta correspondiente a la zona comprimida.</p>	
<p>4</p> <p>El fallo se produce en la zona comprimida con gran ductilidad, debido a la considerable plastificación de la sección transversal. Se observa un claro descenso al final del diagrama. Este fallo es propio de madera verde, ya que no está suficientemente curada la madera.</p>	

Tabla 28. Principales modos de fallo de la madera sometidos a flexión. [36]

## 6.2. Instrumentación y descripción de ensayo

Los ensayos realizados en este PFG se han llevado a cabo en el Laboratorio de Mecánica de Estructuras de la Escuela Técnica Superior de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Granada. La máquina utilizada en los ensayos es de la marca SERVOSIS S.L., modelo CH4-ST-100. Esta máquina dispone de tres actuadores para realizar otro tipo de ensayos, utilizando para nuestros ensayos el actuador 1 con capacidad de 100 t, tal y como se observa en la Figura 41. El software asociado a la máquina es el CATMAN EASY versión 4.1 de la marca HBM.

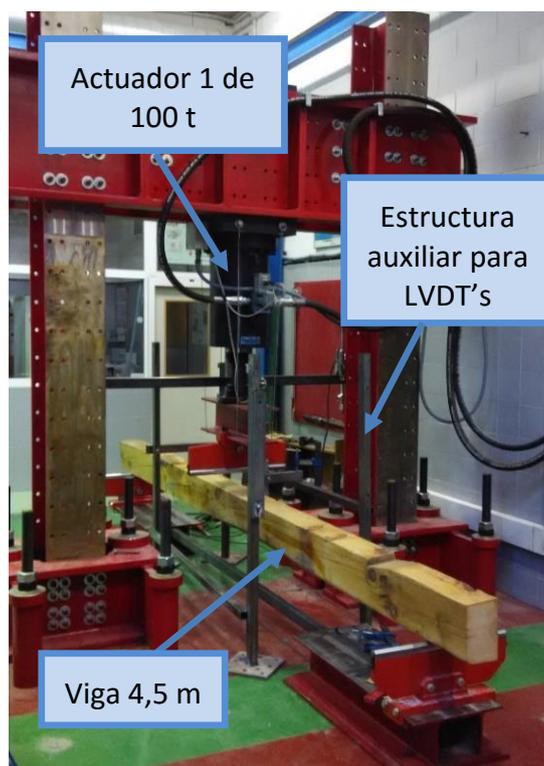


Figura 41. Máquina de ensayos modelo CH4-ST-100 de SERVOSIS S.L. con un actuador de 100 t y estructura auxiliar para los LVDT's.

Se llevaron a cabo ensayos a flexión de vigas de madera con y sin refuerzo, empleándose en el caso de las vigas con refuerzo un laminado de CFRP. La dimensión de las vigas ensayadas es de  $140 \pm 11$  mm de ancho,  $220 \pm 7$  mm de canto y  $4.500 \pm 3$  mm de largo. Las características de la madera se han indicado en el Capítulo 3 y las características de los distintos materiales de refuerzo en el Capítulo 4. En la Tabla 29 se muestran las vigas ensayadas según el tipo de refuerzo y la casa comercial del CFRP. Las vigas se nombraron como "SR" para las vigas sin refuerzo, "LRS" en el caso de vigas con refuerzo longitudinal de SIKA y "LRD" para vigas con un refuerzo longitudinal de DRIZORO.

Vigas ensayadas	Tipo de refuerzo	Casa comercial del CFRP
P28W – SR1	Sin refuerzo	-
SN6 – SR2	Sin refuerzo	-
P14E – LRS1	Laminado inferior	SIKA
7P – LRS2	Laminado inferior	SIKA
SN8 – LRD1	Laminado inferior	DRIZORO
PN17 – LRD2	Laminado inferior	DRIZORO

Tabla 29. Vigas ensayadas según el tipo de refuerzo y la casa comercial del CFRP.

Se realizaron ensayos a flexión a 3 puntos, aplicando una carga puntual en el centro de la viga y dos apoyos separados por 4.000 mm, como se muestra en la Figura 42. En el punto de aplicación de la fuerza y en los apoyos se colocó una pieza de goma y otra de laminado de fibra de carbono para reducir el hincado del pistón semicircular en la madera de la viga a ensayar.

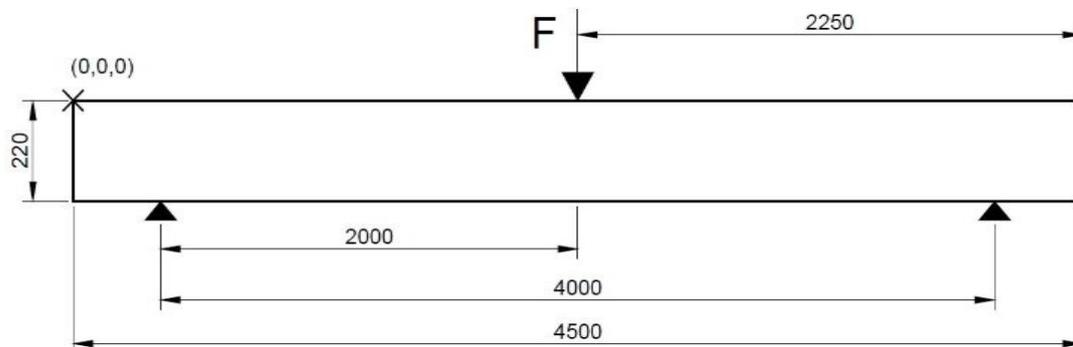


Figura 42. Esquema de ensayo a flexión a 3 puntos. Cotas en mm.

Los ensayos se llevaron a cabo con una velocidad de posición de 1,5 mm/min. Por otro lado, el registro de datos de las galgas extensiométricas se realizó tomando 10 datos cada segundo, con el equipo que se muestra en la Figura 43, modelo QUANTUMX MX 1615 B de la marca HBM.



Figura 43. Equipo de registro de las galgas extensiométricas y LVDT's.

Además de registrar los datos de carga y desplazamiento mediante la prensa citada anteriormente, se instalaron 12 galgas extensiométricas de la marca HBM, la cuales se distribuyeron en 3 grupos numerados 1, 2 y 3. Cada uno de estos grupos de galgas estaba compuesto por cuatro galgas denominadas A, B, C y D, como se muestra en la Figura 44. Por lo tanto, cada galga se nombró con un número que indica su grupo y una letra que indica su posición dentro de cada grupo.

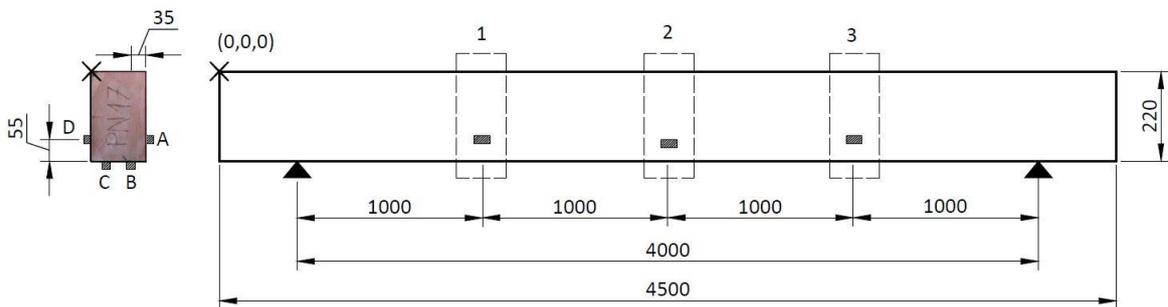


Figura 44. Distribución de galgas extensiométricas en cada viga. Izq.: Nomenclatura de galgas extensiométricas dentro de cada grupo. Dcha.: Grupos de galgas. Cotas en mm.

En la Figura 44 se aprecia el esquema teórico de distribución de los grupos de galgas extensiométricas, es decir, que si durante su colocación con estas medidas había un nudo u otro defecto en esa posición, el grupo se desplazaba levemente hasta un lugar libre de defectos importantes en la viga. Para la fijación de las galgas extensiométricas a las vigas de madera se usó un adhesivo, el cual se muestra en la Figura 45. Este adhesivo bicomponente fue el modelo 1 - X60 de la marca comercial HBM.



Figura 45. Componentes del adhesivo de fijación de las galgas extensiométricas.

El proceso de preparación de la superficie se realizó a través de un lijado de la superficie y una limpieza de la zona.

La instalación de una galga consiste en lograr una perfecta adherencia y una alineación adecuada de la galga sobre la superficie. Las conexiones eléctricas son muy sensibles a los cambios de temperatura por lo que se protegieron con cinta adhesiva.

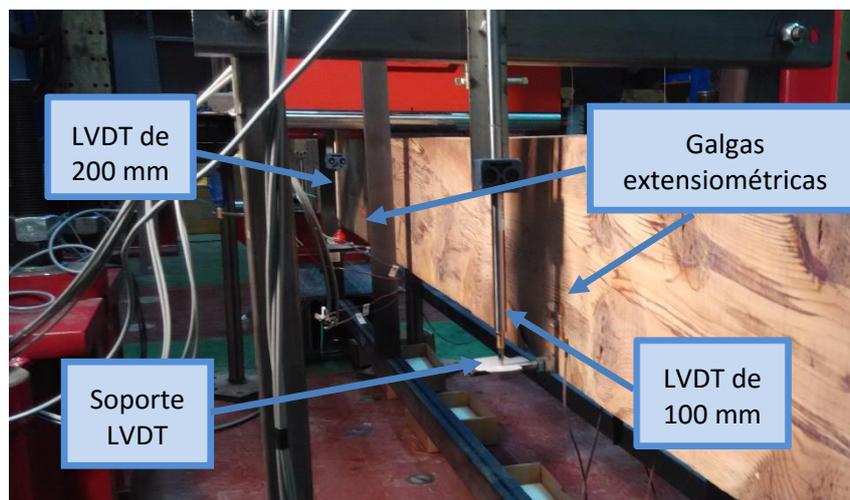


Figura 46. Disposición de LVDT's y galgas extensiométricas durante el ensayo.

En la misma localización donde se encuentran los grupos de las galgas extensiométricas, se dispusieron 3 dispositivos LVDT's como se muestra en la Figura 46. Los LVDT's de la Figura 32 se ha utilizado para medir el desplazamiento vertical de la viga en este proyecto. El LVDT 1 y 3 son de 100 mm y el LVDT 2 es de 200 mm, ambos de la marca HBM. El equipo de registro de los LVDT's fue un MX 840 B de la marca HBM (Figura 43).

Para la utilización de los LVDT's fue necesaria la construcción de una estructura auxiliar donde fueron colocados. Esta estructura estaba formada por perfiles metálicos rectangulares atornillados, como se observa en la Figura 41. Tal y como se aprecia en la Figura 46, se colocó un soporte al LVDT para realizar la medición desde la altura de la cara inferior de la viga.

### 6.3. Resultados de los ensayos a flexión de las vigas

En este apartado se exponen los resultados de los ensayos realizados. Se han llevado a cabo ensayos con 3 tipologías diferentes. Para cada tipología se han ensayado dos vigas. Se analizaron en primer lugar las vigas sin refuerzo, a continuación, las vigas reforzadas con materiales de SIKA S.A.U. y, por último, las vigas reforzadas con materiales de DRIZORO S.A.U.

#### 6.3.1. Vigas sin refuerzo (SR)

En este apartado se presentan los resultados de las vigas sin refuerzo SR1 y SR2. En la Figura 47 se muestra la historia de carga que experimentaron ambas vigas.

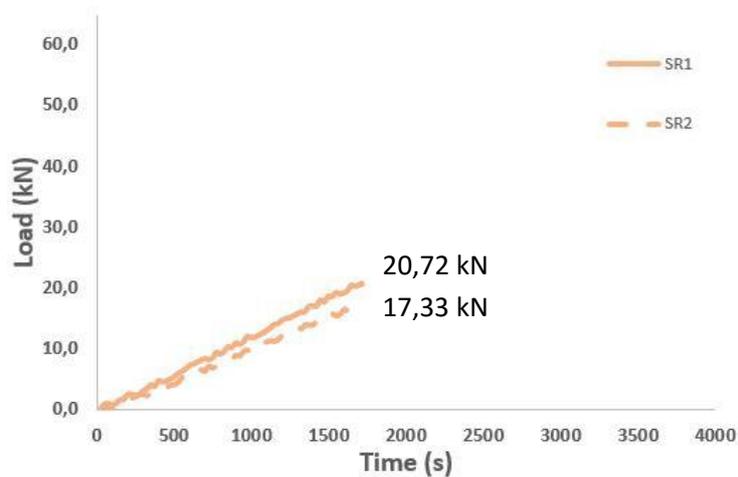


Figura 47. Historia de carga de las vigas sin refuerzo. SR1: En línea continua. SR2: En línea discontinua.

La carga máxima soportada por la viga SR1 fue de 20,72 kN, siendo ligeramente superior a la carga soportada por la viga SR2 que fue de 17,33 kN. Los defectos ocasionaron una reducción de la resistencia en las vigas de madera ensayadas, ya que los nudos presentes en las vigas evitaron una correcta distribución longitudinal de las fibras, lo cual reduce la resistencia de la viga frente a esfuerzos de tracción y compresión. Esta es la causa de la reducción de la resistencia observada en las vigas. Se puede apreciar en la Figura 48 el nudo donde se inició el fallo en la viga SR1.

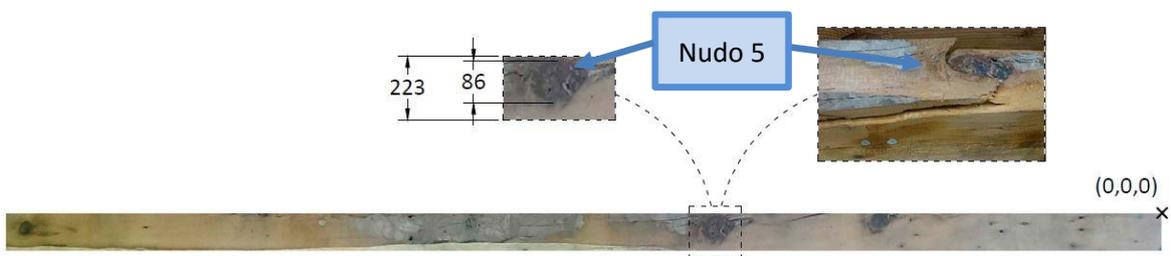


Figura 48. Nudo 5 que provocó el fallo en la cara B de la viga SR1. Izquierda arriba: Nudo antes del ensayo. Derecha arriba: Nudo después del ensayo. Abajo: Viga SR1 cara B. Cotas en mm

Como se puede observar en la Figura 48 el nudo 5 de 86 mm (Anexo I), fue el lugar por donde se inició la rotura a cortante. Este nudo representa un punto débil de esta viga que ocupa parcialmente la base de la cara B. En la Figura 49 se observa la rotura en la cara C de la viga SR1.



Figura 49. Rotura en la cara C de la viga SR1. Cotas en mm.

La rotura de la viga SR1 que se aprecia en la Figura 49, se debió a un fallo por cortante en la parte inferior de la viga que originó una fractura en la viga hasta casi llegar a la cara superior de 1.230 mm de longitud.

En la Figura 50 se muestra el fallo de la viga SR2 que pudo ser originada por unos nudos que presenta en su parte central.

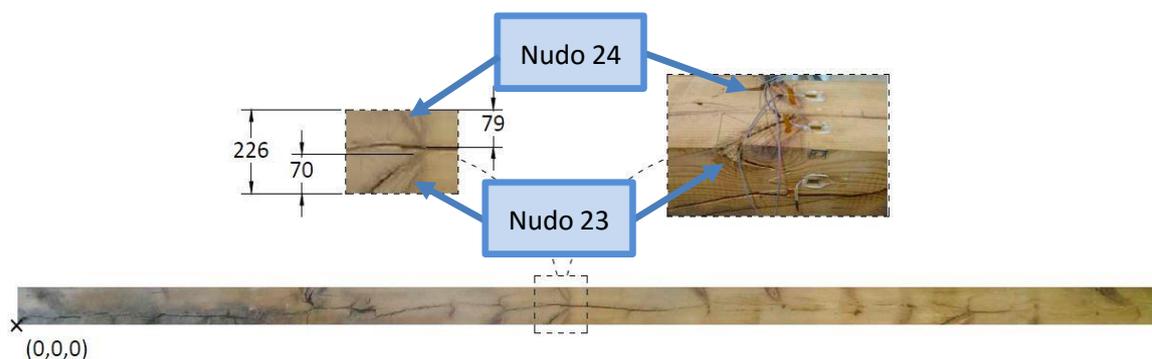


Figura 50. Nudos que provocaron el fallo en la cara B de la viga SR2. Izquierda arriba: Nudo antes del ensayo. Derecha arriba: Nudo después del ensayo. Abajo: Viga SR2 cara B. Cotas en mm.

Se muestran en la Figura 50 los nudos 23 de 70 mm y 24 de 79 mm (Anexo I). En estos nudos se inició la rotura ya que eran puntos débiles de la madera al estar los nudos situados muy próximos. Estos defectos se han descrito detalladamente en las fichas de catalogación de las vigas, incluidas en el Anexo I. En la Figura 51 se muestra la rotura en la cara D de la viga SR2 desde la cara D.

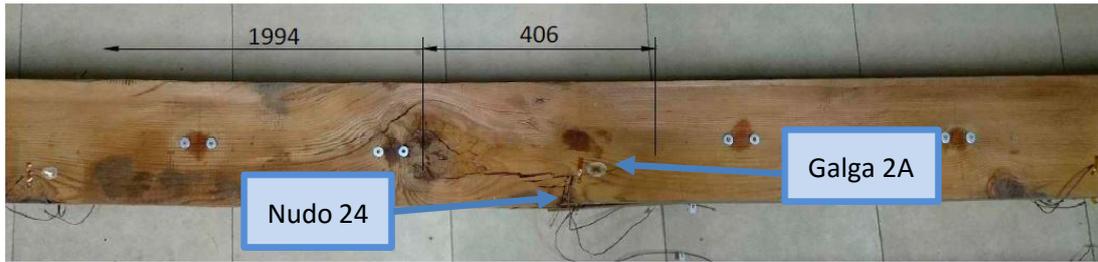


Figura 51. Rotura en la cara D de la viga SR2. Cotas en mm.

En la Figura 51 se observa que la rotura de la viga SR2 se produjo por un fallo a tracción. El fallo ocasionó una fractura en la viga de una longitud de 406 mm.

Se muestra en la Figura 52 el desplazamiento vertical en mm registrado en cada grupo de los LVDT's (1, 2 y 3) de las vigas sin refuerzo.

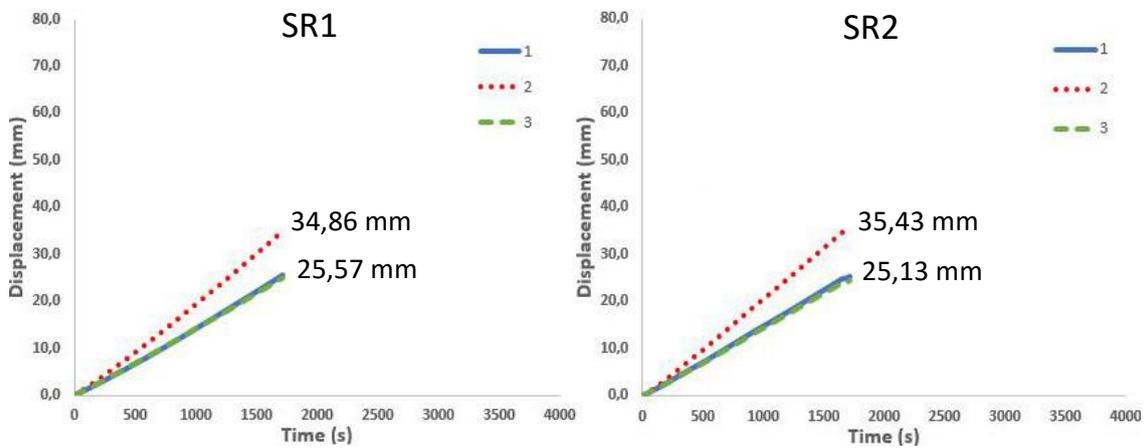


Figura 52. Desplazamiento de los distintos grupos de LVDT's. Izq.: Viga SR1. Dcha.: Viga SR2.

Se puede apreciar en la Figura 52 que los desplazamientos máximos del grupo 2 fueron de 34,86 mm en la viga SR1 y 35,43 mm en la SR2. Estos desplazamientos fueron superiores a los que se registraron en los otros grupos debido a que este grupo estaba situado en el punto donde se aplicó la fuerza (centro de la viga) y por lo tanto el desplazamiento fue mayor. Además, en ambas vigas los grupos 1 y 3 tuvieron un desplazamiento similar ya que se encontraban a la misma distancia tanto de los apoyos como del punto de aplicación de la fuerza en el centro de la viga (Figura 44). Esto quiere decir que en ambos puntos se estaba aplicando una fuerza simétrica y no se estaba produciendo ninguna torsión en la viga. En la Figura 53 se representa la tensión frente a la deformación de la viga SR1.

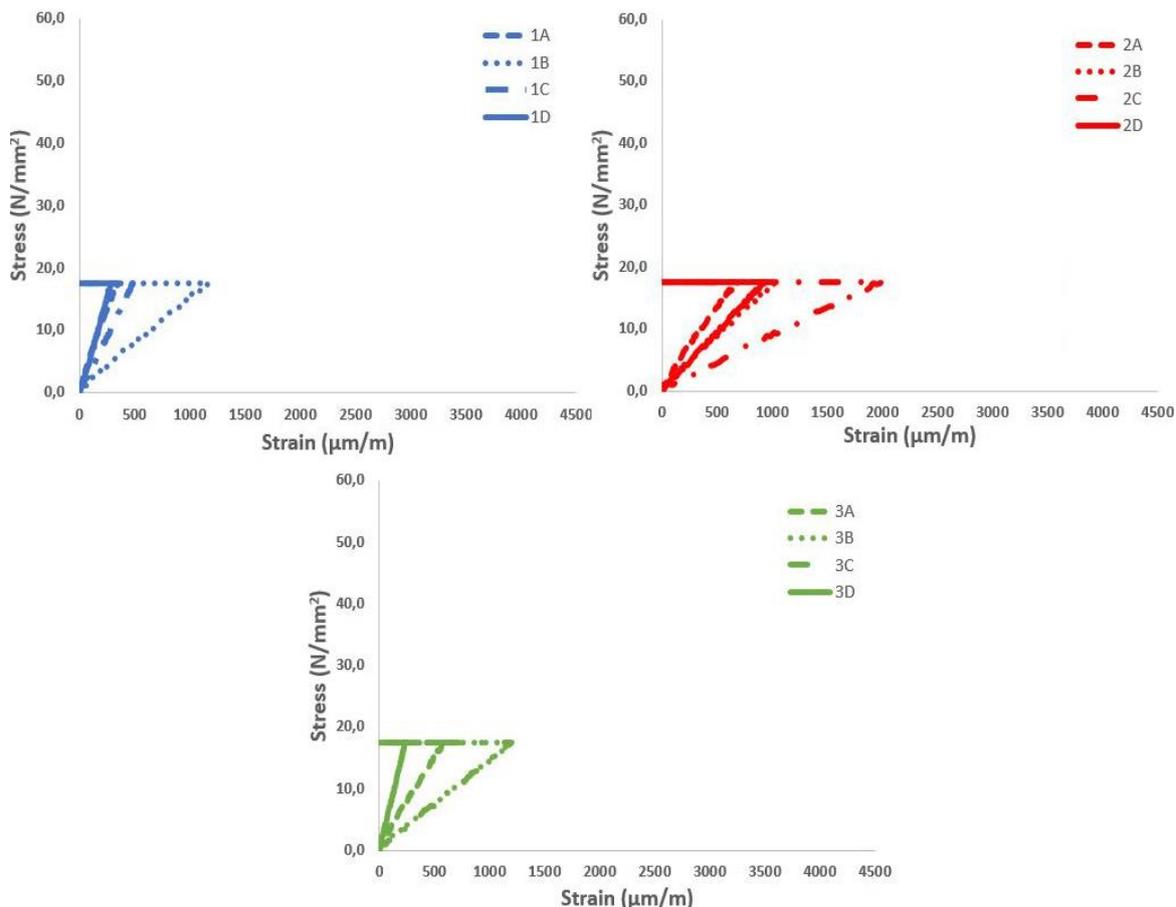


Figura 53. Tensión frente a la deformación de los grupos de galgas de la viga SR1. Izquierda arriba: Grupo 1 de galgas (Azul). Derecha arriba: Grupo 2 de galgas (Rojo). Abajo: Grupo 3 de galgas (Verde). Galga A: Línea discontinua. Galga B: Línea de puntos. Galga C: Línea discontinua con punto. Galga D: Línea continua.

En la Figura 53 se observa un comportamiento lineal elástico en la viga hasta que se produjo una rotura frágil en la zona de tracción del material. Las diferencias entre los registros de los grupos se debieron a su colocación en la viga (Figura 44). En todos los grupos, las galgas B y C son las que registraron la mayor deformación, ya que estas galgas estuvieron colocadas en la zona de máxima tracción de la viga. También los grupos 1 y 3 estaban situados a la misma distancia tanto de los apoyos como del punto de aplicación de la fuerza (centro de la viga), por lo que los resultados de antes las galgas extensiométricas son muy similares entre si. La máxima deformación registrada por la galga extensiométrica 2C fue de 1.995,23  $\mu\text{m/m}$  con una tensión máxima de 17,59  $\text{N/mm}^2$ .

En la Figura 54 se ha representado la tensión frente a la deformación solamente del grupo 2 de galgas de la viga SR2, ya que fue la más significativa de los tres grupos porque estaba situada en la zona de deformaciones máximas de la viga.

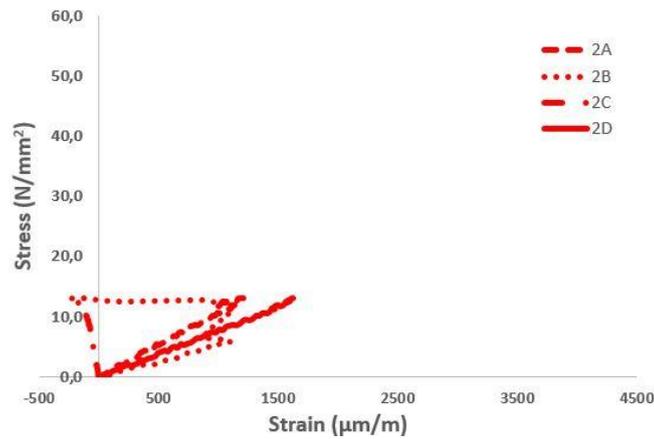


Figura 54. Tensión frente a la deformación del grupo 2 de la viga SR2. Galga A: Línea discontinua. Galga B: Línea de puntos. Galga C: Línea discontinua con punto. Galga D: Línea continua.

Como se observa en la Figura 54, existen dos galgas (2B y 2C) con un comportamiento inusual. Observando la zona en la que se sitúan, pese a estar en la zona de máxima tracción, se obtiene que sufrieron unas deformaciones a compresión, porque tal y como se puede apreciar en la Figura 50, estas galgas estaban muy cerca de los nudos 23 y 24. Las fibras de madera que los rodeaban se comprimieron por el movimiento de estos nudos. Para la galga 2C este hecho ocurrió desde el inicio del ensayo, pero para la galga 2B este hecho tuvo lugar a partir de una tensión superior a los 10 N/mm<sup>2</sup>. Con una tensión máxima de 13,17 N/mm<sup>2</sup> se registró una deformación máxima de la galga extensiométrica 2D de 1.626,81 μm/m. Se observa como en la viga SR2 se produjo una rotura frágil en la zona de tracción, la cual es debida a la presencia de defectos de la madera en esa zona.

En la Tabla 30 se muestran los datos de carga y desplazamiento máximos reflejados en las Figura 47 y 54. Además, se ha obtenido el módulo elástico de ambas vigas de los datos registrados por las galgas B y C del grupo 2 de cada viga (Figura 53 y 56), ya que estaban colocadas en la zona de máxima tracción de la viga.

Viga	Q <sub>max</sub> (kN)	δ <sub>max</sub> (mm)	σ <sub>max</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	E (N/mm <sup>2</sup> )
SR1	20,72	34,86	17,59	12.356,95
SR2	17,33	35,43	13,17	13.583,47

Tabla 30. Carga máxima (Q<sub>max</sub>), desplazamiento vertical máximo (δ<sub>max</sub>), tensión máxima (σ<sub>max</sub>) y módulo de elasticidad (E) de las vigas sin refuerzo.

### 6.3.2. Vigas con refuerzo de laminado inferior de SIKA (LRS)

A continuación se muestran los resultados de los ensayos realizados en vigas con refuerzo en su cara inferior con laminado de SIKA. Se ensayaron dos vigas con este tipo de refuerzo. La Figura 55 indica la historia de carga que experimentaron las vigas LRS1 y LRS2.

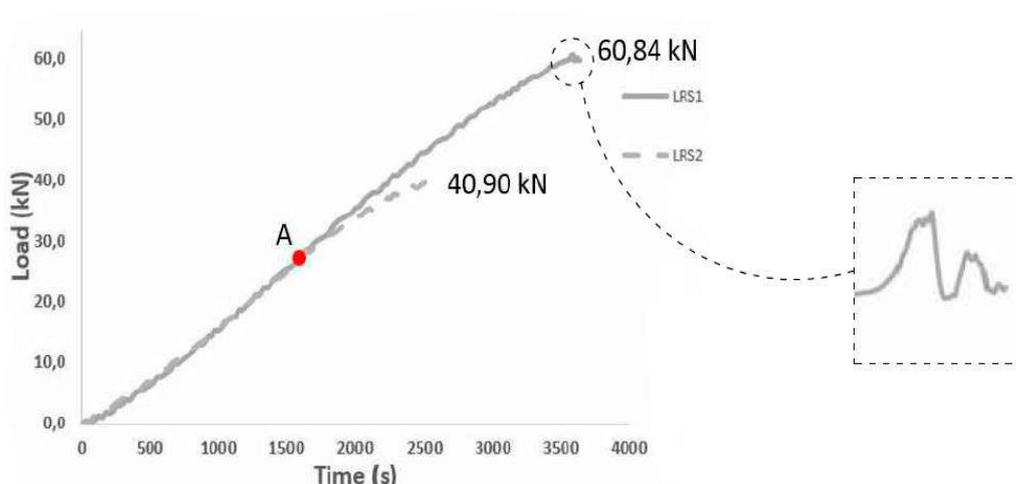


Figura 55. Historia de carga de las vigas con refuerzo de laminado inferior de SIKA. LRS1: En línea continua. LRS2: En línea discontinua.

Como se puede observar en la Figura 55 la resistencia que presentan ambas vigas es muy semejante hasta el punto A con una carga de 27,76 kN y un tiempo de 1.625 s. A partir de este momento la viga LRS2 empezó a tener un comportamiento elástico más lento que la viga LRS1. Los pequeños descensos de la resistencia en los tramos finales de la gráfica se corresponden con las roturas de la madera previas a la rotura final de la viga. La carga máxima soportada por la viga LRS1 fue de 60,84 kN, superior a la carga soportada por la viga LRS2 de 40,90 kN.

En la Figura 56 se muestra la rotura de la viga LRS1 en los nudos 11 y 41.



Figura 56. Nudos 11 y 41 de la viga LRS1 después del ensayo.

Se aprecia en la Figura 56 como la fisura provocada por el fallo en la viga LRS1 buscó los nudos y los fue rodeando, ya que las fibras que rodean a los nudos son zonas débiles.

La rotura de la viga LRS1 por la cara D se muestra en la Figura 57.

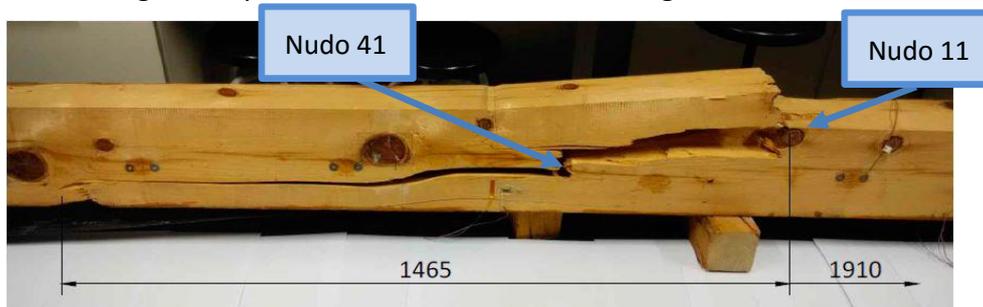


Figura 57. Rotura en la cara D de la viga LRS1.

Se puede observar en la Figura 57 que la rotura se produjo en la zona traccionada de la viga y continuó mediante un fallo a cortante hasta la zona superior de la viga donde se encontraba el nudo 11. Este fallo ocasionó una fractura de 1.465 mm de longitud. En la Figura 58 se muestra la delaminación del CFRP en la viga LRS1.

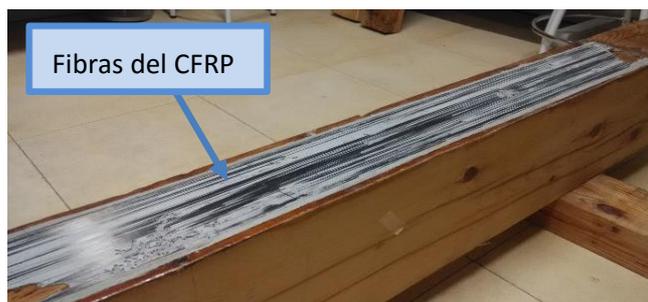


Figura 58. Delaminación del CFRP en la viga LRS1.

Se observan en la Figura 58 fibras de carbono del CFRP, como resultado de la delaminación del refuerzo. Se produjo la separación del CFRP de la resina de la viga LRS1. A continuación, en la Figura 59 se aprecia la rotura en la cara C de la viga LRS2.



Figura 59. Rotura en la cara C de la viga LRS2. Cotas en mm.

Como se puede observar en la Figura 59, la rotura de la viga LRS2 se produjo por un fallo a cortante y tracción en la viga. El fallo se inició en la cara inferior de la viga, la fractura de una longitud de 709 mm, fue buscando los puntos débiles de la madera como los nudos.

En la Figura 60 se muestra la delaminación del CFRP en la viga LRS2.



Figura 60. Delaminación del CFRP de la viga LRS2.

Como se puede apreciar en la Figura 60 se produjo un fallo por delaminación del CFRP. Además, se observa como una parte de la madera siguió adherida al laminado de fibra de carbono.

Se ha representado en la Figura 61 la relación del desplazamiento vertical frente al tiempo de las vigas LRS1 y LRS2.

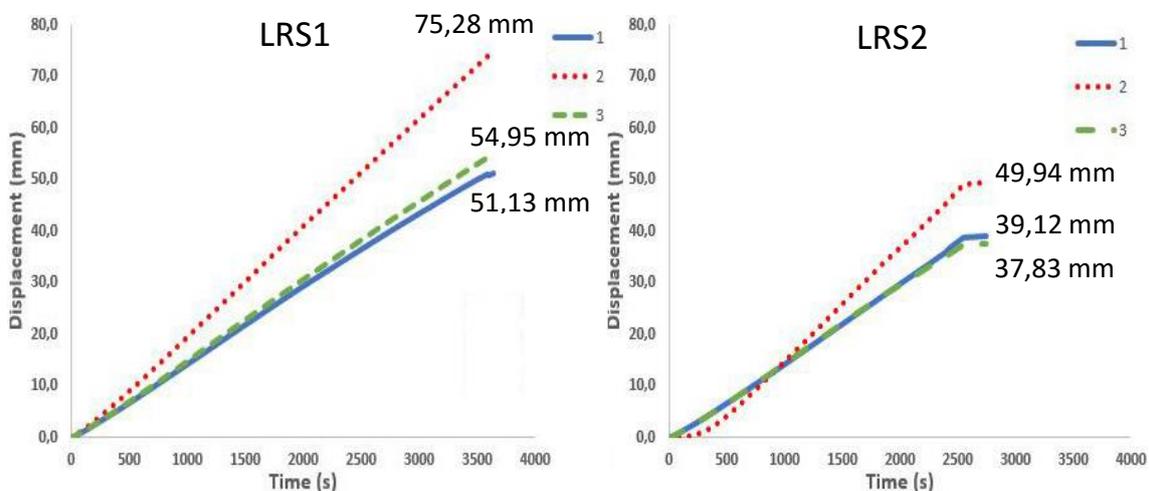


Figura 61. Izq.: Desplazamiento de los distintos grupos de LVDT's. Izq.: Viga LRS1. Dcha.: Viga LRS2.

En la Figura 61 izquierda se observa como el LVDT del grupo 2 registró el mayor desplazamiento en la viga LRS1 de 75,28 mm. Del mismo modo, el grupo 2 de la viga LRS2 también registró el mayor desplazamiento de 49,94 mm. Esto se debió a que en ambos casos el grupo 2 se encontraba en la zona de aplicación de la fuerza. Por otra parte, tanto en la viga LRS1 como en la viga LRS2 los grupos 1 y 3 han sufrido un proceso de menores e iguales desplazamientos, ya que estaban situados a la misma distancia tanto de los apoyos como del centro de la viga (Figura 44). Esto se debió a que no se

estaba registrando ninguna torsión en la viga y que la fuerza de aplicación era simétrica en ambos puntos. En la viga LRS2 en los instantes finales de la pendiente de desplazamiento fue casi horizontal hasta la rotura. Esto se debió al hincado del pistón semicircular de la prensa en la madera de la viga (Figura 62). Este hecho provocó que la carga siguiera aumentando y el desplazamiento vertical no. Un hecho a tener en cuenta es que los valores de carga y desplazamiento de la viga LRS1 fueron 1,5 veces superiores a los de la viga LRS2, con lo que podemos considerar que la madera de mayor calidad y de menores defectos era la LRS1.



Figura 62. Hincado del pistón semicircular de la máquina de ensayos en la madera de la viga LRS2.

En la Figura 63 se ha representado la relación de la tensión frente a la deformación de la viga LRS1.

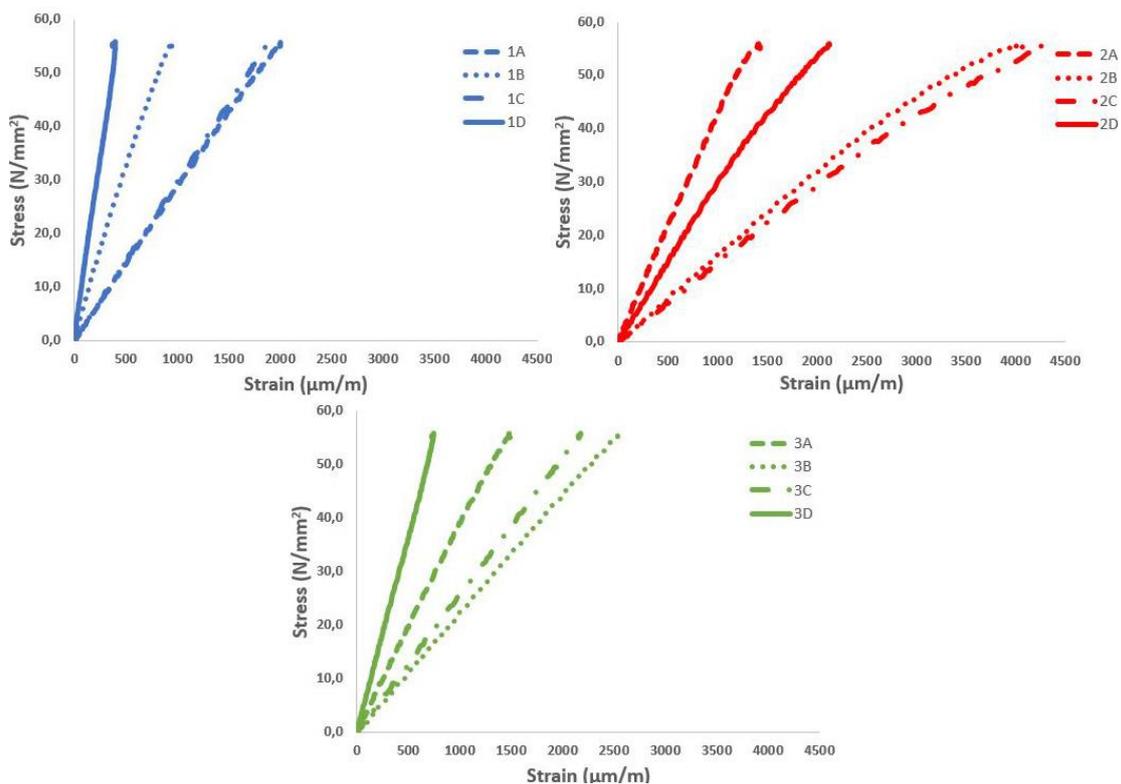


Figura 63. Tensión frente a la deformación de los grupos de galgas de la viga LRS1. Izquierda arriba: Grupo 1 de galgas (Azul). Derecha arriba: Grupo 2 de galgas (Rojo). Abajo: Grupo 3 de galgas (Verde). Galga A: Línea discontinua. Galga B: Línea de puntos. Galga C: Línea discontinua con punto. Galga D: Línea continua

Se puede observar en la Figura 63 como la pendiente fue constante en el tramo elástico de las gráficas. En todos los grupos, las galgas B y C son las que registraron la mayor deformación, ya que estas galgas estuvieron colocadas en la zona de máxima tracción de la viga. La máxima deformación registrada por la galga extensiométrica 2C fue de  $4.258,73 \mu\text{m}/\text{m}$  con una tensión máxima de  $55,90 \text{ N}/\text{mm}^2$ . Al igual que en las vigas sin refuerzo los grupos 1 y 3 obtuvieron registros similares, ya que estaban situados a la misma distancia tanto de los apoyos como del punto de aplicación de la fuerza (centro de la viga).

La Figura 64 representa la relación de la tensión frente a la deformación solamente del grupo 2 de las galgas de la viga LRS2, ya que fue la más significativa de los tres grupos porque estaba situada en la zona de deformaciones máximas de la viga.

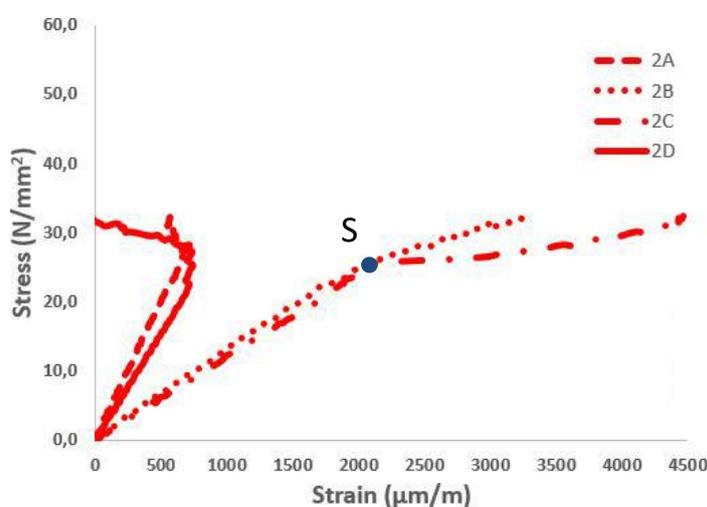


Figura 64. Tensión frente a la deformación del grupo 2 de la viga LRS2. Galga A: Línea discontinua. Galga B: Línea de puntos. Galga C: Línea discontinua con punto. Galga D: Línea continua.

En la Figura 64 se observa que la pendiente fue constante hasta la tensión  $24,85 \text{ N}/\text{mm}^2$  (punto S), donde las galgas extensiométricas situadas en la zona de máxima tracción, 2B y 2C, se deforman de forma muy rápida. Esto indica que la madera está entrando en estado plástico. En esta figura también se observa como las galgas 2A y 2D se comprimieron reduciendo de este modo su deformación acumulada. La máxima deformación registrada por la galga extensiométrica 2C fue de  $4.466,78 \mu\text{m}/\text{m}$  con una tensión máxima de  $32,65 \text{ N}/\text{mm}^2$ .

En la Tabla 31 se muestran los datos de carga y desplazamiento máximos reflejados en las Figura 55 y 63.

Además, se ha obtenido el módulo elástico de ambas vigas de los datos registrados por las galgas B y C del grupo 2 de cada viga (Figura 63 y 66), ya que estaban colocadas en la zona de máxima tracción de la viga.

Viga	$Q_{\max}$ (kN)	$\delta_{\max}$ (mm)	$\sigma_{\max}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E$ (N/mm <sup>2</sup> )
LRS1	60,84	75,28	55,90	14.126,48
LRS2	40,91	49,94	32,65	11.840,16

Tabla 31. Carga máxima ( $Q_{\max}$ ), desplazamiento vertical máximo ( $\delta_{\max}$ ), tensión máxima ( $\sigma_{\max}$ ) y módulo de elasticidad ( $E$ ) de las vigas con refuerzo de laminado inferior de SIKA (LRS).

De la se desprende que las vigas reforzadas en la cara inferior con laminado de fibra de carbono de SIKA (LRS) presentan una notable mejora en términos de resistencia con respecto a las vigas sin reforzar (Tabla 30). En las vigas reforzadas fue posible aumentar la carga máxima en un 268%, la tensión máxima en un 288% y el desplazamiento vertical en un 178%. Es decir, con la aplicación de este refuerzo es posible obtener una mayor resistencia de carga y de tensiones y además de una mayor flecha sin llegar a la rotura.

### 6.3.3. Vigas con refuerzo de laminado inferior de DRIZORO (LRD)

A continuación se muestran los resultados de los ensayos realizados sobre vigas con refuerzo en su cara inferior con laminado de DRIZORO. Se ensayaron dos vigas con este tipo de refuerzo. La historia de carga que experimentaron las vigas LRS1 y LRS2 se muestra en la Figura 65.

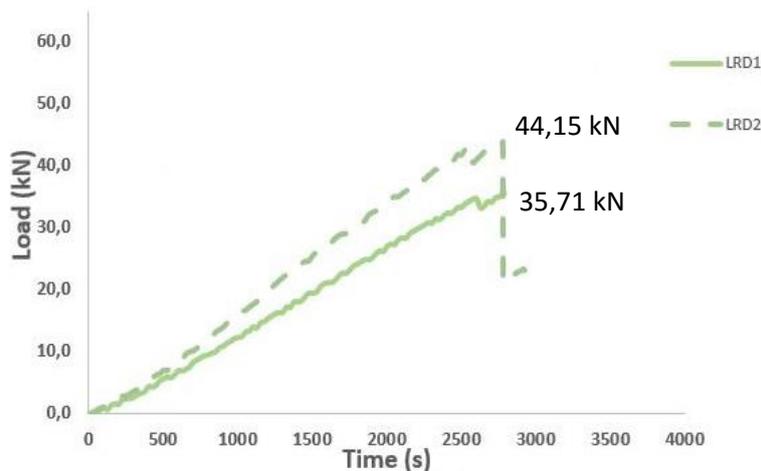


Figura 65. Historia de carga de las vigas con refuerzo de laminado inferior de DRIZORO. LRD1: En línea continua. LRD2: En línea discontinua.

Se aprecia en la Figura 65 que la carga aumenta progresivamente en las dos vigas hasta el instante 2.550 s, donde se produjo una caída en la carga debida a una rotura en la madera. La carga máxima soportada por la viga LRD2 fue de 44,15 kN, siendo ligeramente superior a la carga soportada por la viga LRD1 de 35,71 kN. Una vez que la viga LRD2 llegó a su carga máxima, sufrió un descenso de 22,33 kN, quedando cargada a 21,71 kN. Después de esto, se incrementó de nuevo la carga hasta los 23,44 kN, la cual fue superior a la carga soportada por las vigas sin refuerzo, lo que implica que este tipo

de refuerzo fue capaz de resistir grandes cargas incluso después de haberse producido la rotura de la viga de madera. En la Figura 66 se observa la rotura en la cara D de la viga LRD1.

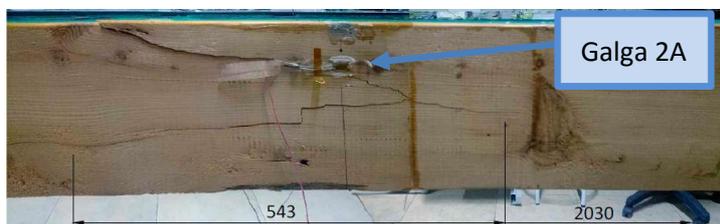


Figura 66. Rotura en la cara D de la viga LRD1. Cotas en mm.

Se observa en la Figura 66 que la rotura de la viga LRD1 se produjo por un fallo a cortante en la viga. Se creó una fractura con una longitud de 543 mm. En la Figura 67 se muestra la delaminación del CFRP de la resina que se produjo en la viga LRD1.



Figura 67. Delaminación del CFRP de la resina en la viga LRD1. Cotas en mm.

Como se aprecia en la Figura 67, se produjo un claro fallo por delaminación entre el laminado y la resina de la viga LRD1. A continuación, en la Figura 68 se muestra el nudo 9 en la cara B de la viga LRD2.

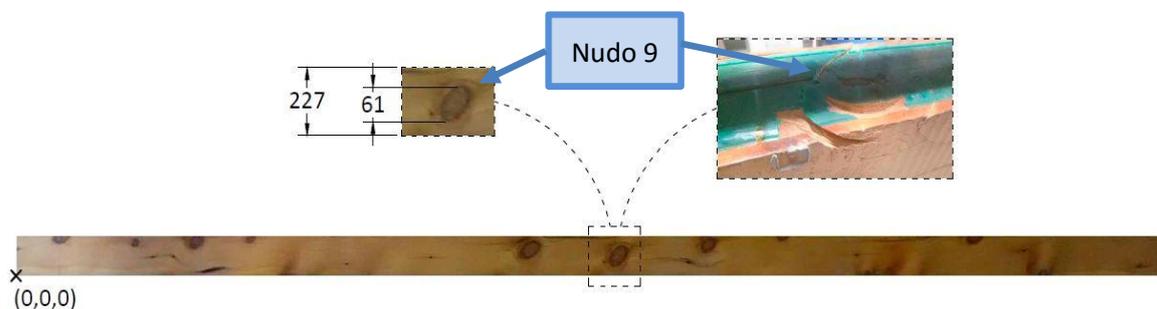


Figura 68. Nudo que provocó el fallo en la cara B de la viga LRD2. Izquierda arriba: Nudo antes del ensayo. Derecha arriba: Nudo después del ensayo. Abajo: Viga LRD2 cara B. Cotas en mm.

Como se puede apreciar en la Figura 68 derecha arriba, la fisura bordeaba el nudo en la cara B. Además se observa como la resina en este punto se resquebrajó y se favoreció la delaminación del refuerzo. En la Figura 69 se observa la rotura en la cara C de la viga LRD2.

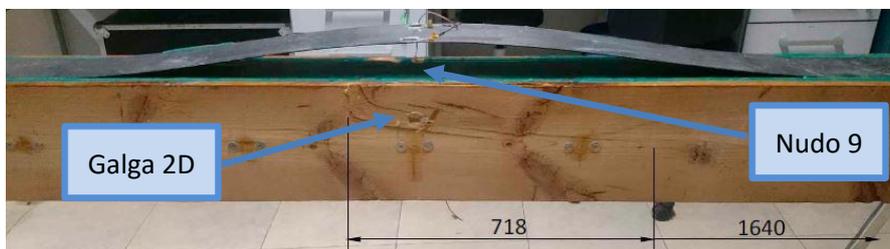


Figura 69. Rotura en la cara C de la viga LRD2. Cotas en mm.

Se aprecia en la Figura 69 que la rotura de la viga LRD2 se produjo por un fallo a tracción y cortante. Se originó en el nudo 9, y con este fallo se creó una fractura de 718 mm de longitud. En la Figura 70 se muestra la delaminación del CFRP en la viga LRD2.



Figura 70. Delaminación del CFRP de la viga LRD2.

En la Figura 70 se observa como el refuerzo arrancó parte de la madera superficial de la cara B de la viga LRD2, durante el proceso de delaminación. La relación del desplazamiento vertical frente al tiempo de las vigas LRD1 Y LRD2 se ha representado en la Figura 71.

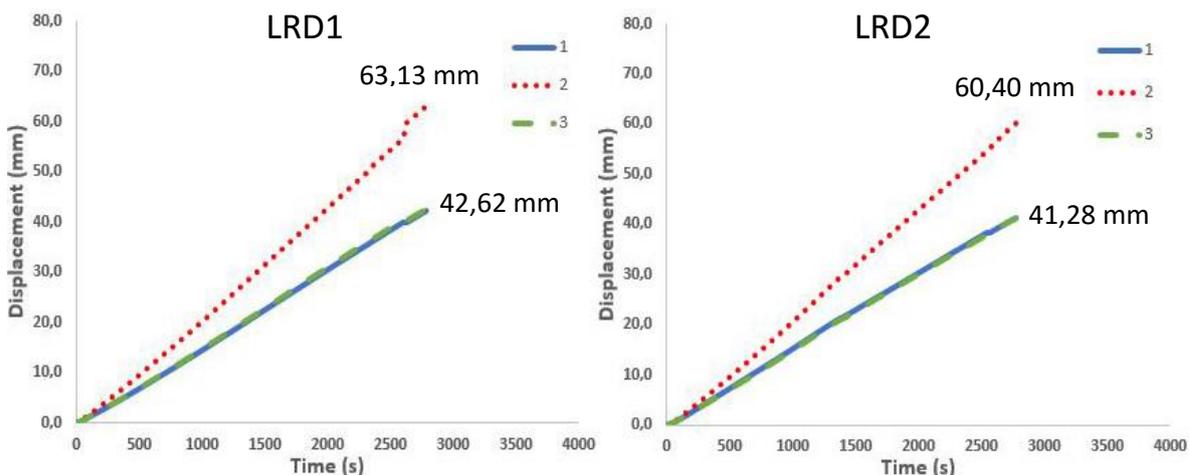


Figura 71. Desplazamiento de los distintos grupos de LVDT's. Izq.: Viga LRD1. Dcha.: Viga LRD2.

Como se puede observar en la Figura 71 los desplazamientos máximos del grupo 2 fueron de 63,13 mm en la viga LRD1 y 60,40 mm en la viga LRD2. Estos desplazamientos fueron superiores a los que se registraron en los otros grupos debido a que este grupo estaba situado en el punto donde se aplicó la fuerza (centro de la viga). En la viga LRD1 se aprecia un pequeño salto en el desplazamiento del grupo 2 debido a la rotura sufrida por la madera en el instante 2.550 s.

Se ha representado la tensión frente a la deformación de la viga LRD2 en la Figura 72.

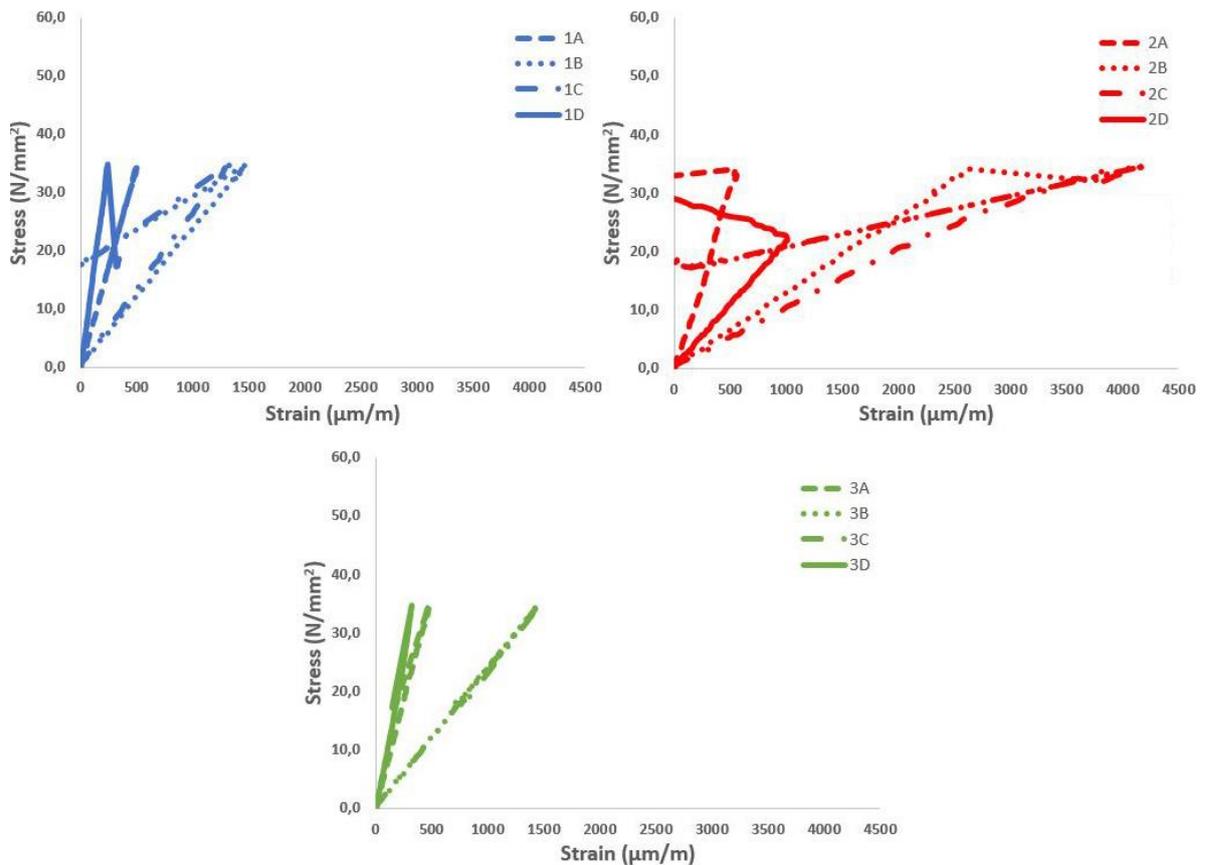


Figura 72. Tensión frente a la deformación de los grupos de galgas de la viga LRD2. Izquierda arriba: Grupo 1 de galgas (Azul). Derecha arriba: Grupo 2 de galgas (Rojo). Abajo: Grupo 3 de galgas (Verde). Galga A: Línea discontinua. Galga B: Línea de puntos. Galga C: Línea discontinua con punto. Galga D: Línea continua

Se observa en la Figura 72 que la pendiente en el tramo elástico fue constante hasta el punto de rotura de la viga donde la deformación aumentó muy rápidamente hasta la rotura final. También se observa que, al iniciarse la puesta en carga de nuevo, la deformación se volvió a iniciar. En el grupo 2 hay variaciones en las deformaciones producidas por la rotura previa de la madera antes de romper. En todos los grupos, las galgas B y C son las que registraron la mayor deformación, ya que estas galgas estuvieran colocadas en la zona de máxima tracción de la viga. Los grupos 1 y 3, al igual que en las vigas SR y LRS, las galgas tuvieron un comportamiento similar, ya que estaban situadas a la misma distancia tanto de los apoyos como del punto de aplicación de la fuerza (centro de la viga). La máxima deformación registrada por la galga extensiométrica 2C fue de 4.223,75 µm/m con una tensión máxima de 34,85 N/mm<sup>2</sup>.

La Figura 73 representa la relación de la tensión frente a la deformación solamente del grupo 2 de las galgas de la viga LRD2, ya que fue la más significativa de los tres grupos porque estaba situada en la zona de deformaciones máximas de la viga.

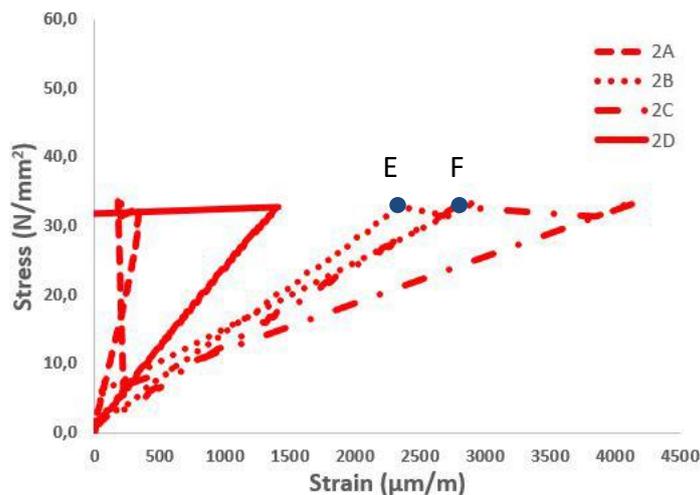


Figura 73. Tensión frente a la deformación del grupo 2 de la viga LRD1. Galga A: Línea discontinua. Galga B: Línea de puntos. Galga C: Línea discontinua con punto. Galga D: Línea continua.

Se aprecia en la Figura 73 que con una tensión de  $32,08 \text{ N/mm}^2$  (puntos E y F) se produjo una pequeña rotura, la cual hizo disminuir la tensión, pero la deformación aumentó rápidamente hasta el punto de rotura. Las galgas extensiométricas B y C fueron las que registraron la mayor deformación, ya que estas galgas estuvieron colocadas en la zona de máxima tracción de la viga. La máxima deformación registrada por la galga extensiométrica 2C fue de  $4.188,70 \text{ µm/m}$  con una tensión máxima de  $33,58 \text{ N/mm}^2$ .

En la Tabla 32 se muestran los datos de carga y desplazamiento máximos reflejados en las Figura 65 y 73. Además, se obtuvo el módulo elástico de ambas vigas de los datos registrados por las galgas B y C del grupo 2 de cada viga (Figura 72 y 75), ya que estaban colocadas en la zona de máxima tracción de la viga.

Viga	$Q_{\max}$ (kN)	$\delta_{\max}$ (mm)	$\sigma_{\max}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E$ (N/mm <sup>2</sup> )
LRD1	35,69	63,13	33,58	13.266,39
LRD2	44,04	60,40	34,85	11.818,29

Tabla 32. Carga máxima ( $Q_{\max}$ ), desplazamiento vertical máximo ( $\delta_{\max}$ ), tensión máxima ( $\sigma_{\max}$ ) y módulo de elasticidad ( $E$ ) de las vigas con refuerzo de laminado inferior de DRIZORO (LRD).

Se observa que los resultados de las vigas reforzadas en la cara inferior con laminado de fibra de carbono de DRIZORO son mejores que los resultados obtenidos por las vigas sin reforzar (Tabla 30), ya que la carga máxima se aumentó en un 210%, la tensión máxima en un 222% y el desplazamiento vertical en un 176%, lo que significa que la aplicación de este refuerzo dio una mayor resistencia de carga y de tensiones y así como una mayor flecha sin llegar a romper.



## Capítulo 7. Conclusiones

Con este Proyecto Fin de Grado se pretende desarrollar el conocimiento sobre el uso del CFRP como material de refuerzo en la parte inferior de las vigas de madera de gran escuadría para actuaciones en patrimonio. Se ha realizado un estudio de cada una de las partes (la madera, la fibra de carbono y resinas epoxi) que implica el uso de este tipo de refuerzo en estructuras de madera. Las fibras de carbono presentan propiedades de resistencia específica elevada y bajo coeficiente de dilatación térmica. Además, la facilidad para su colocación como refuerzo se debe a que tienen una densidad de  $1,6 \text{ g/cm}^3$  y un espesor de  $1,2 \text{ mm}$ , por lo que el aumento de peso de la estructura es insignificante.

En este proyecto se ha demostrado que es necesario actualizar la normativa española vigente de catalogación visual de la madera. La normativa actual debería incluir una parte más específica para vigas de gran escuadría, puesto que solamente diferencia entre vigas superiores o inferiores de  $70 \text{ mm}$ . Además, las vigas de este proyecto fueron rechazadas por la catalogación visual. Sin embargo, la evaluación de las vigas sin refuerzo (SR) en el laboratorio dio como resultado resistencias de carga de  $20,70 \text{ kN}$  y  $17,33 \text{ kN}$ , valores propios de la clase resistente C22.

Los ensayos a flexión de las vigas desprendieron unos resultados muy favorables en términos de resistencia de carga. Se ha demostrado que la resistencia de carga de las vigas se ha mejorado mediante el uso de los refuerzos LRS un  $268\%$  y con los LRD un  $210\%$ . Es importante mencionar el comportamiento observado en la viga LRD2, la cual fue capaz de resistir una carga de  $23,44 \text{ kN}$  después de su rotura.

En este estudio se ha demostrado que el fallo mayoritario sufrido por las vigas ensayadas fue por tracción y cortante. Se ha comprobado como las vigas rompen en la zona de máxima tracción de la viga y posteriormente la fractura de la madera se dirige mediante un esfuerzo cortante hacia las zonas más débiles de la madera que son los nudos.

Con la resina de SIKA el fallo se produjo por el despegue del laminado y con la resina de DRIZORO se produjo por el deslizamiento del laminado.

Con el estudio del rendimiento de la resina, se llegó a la conclusión de que la resina de SIKA se necesita una mayor cantidad de tanto de resina como de tiempo para poder realizar el refuerzo de la viga

.

## Bibliografía

- [1] Rescalvo Fernández, F. J. (2015). Rehabilitación de vigas de madera mediante refuerzos de material compuesto laminado de fibra de carbono (REVMAC). Comportamiento mecánico y evaluación de fallos con emisión acústica.
- [2] Tello, M., (2004). Cultura, memoria y patrimonio cultural inmueble: su valoración, conservación y sostenibilidad integral.
- [3] Sánchez, T. O. (2015). Experto en rehabilitación de edificios. Análisis de patologías y reparación. Málaga. IC Editorial.
- [4] Monjo, J. DCTA, & UPM (2008). Patología y técnicas de intervención: elementos estructurales (Tratado de rehabilitación). Madrid, Spain.
- [5] Arriaga, F., Perez, F., Esteban, M., Bobadilla, I., & García, F. (2002). Intervención en estructuras de madera. Editora AITIM Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera.
- [6] Moreno Bazán, A. (2015). Caracterización y adherencia entre madera antigua y fibra de carbono para refuerzo estructural: Resultados preliminares.
- [7] Nicolás, M.E., (2007). Paleontología: Estudiar el pasado para entender el presente.
- [8] Esteban, J., (2005). Seminario. Doctrina de la restauración a través de las cartas internacionales.
- [9] UNE-EN 335.1:2007. Durabilidad de la madera y de los productos derivados de la madera. Definición de las clases de uso. Parte 1: Generalidades. Madrid. Asociación Española de Normalización (AENOR).
- [10] UNE-EN 335.2:2007. Durabilidad de la madera y de los productos derivados de la madera. Definición de las clases de uso. Parte 2: Aplicación a la madera maciza. Madrid. Asociación Española de Normalización (AENOR).
- [11] UNE-EN 599-1:1997. Durabilidad de la madera y de los productos derivados de la madera. Prestaciones de los protectores de la madera determinadas mediante ensayos biológicos. Parte 1: Especificaciones para las distintas clases de riesgo. Madrid. Asociación Española de Normalización (AENOR).
- [12] Argüelles, R., Arriaga, F., & Martínez, J. J. (2000). Estructuras de madera. Diseño y cálculo. Asociación de Investigación Técnica de la Industria de la Madera y del Corcho (AITIM).
- [13] Navi, P., Heger, F. (2005). *Comportement thermo-hydrromécanique du bois. Applications technologiques et dans les structures.*
- [14] UNE-EN 56544:2011. Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas. Madrid. Asociación Española de Normalización (AENOR).

- [15] UNE-EN 1912:2012. Madera estructural clases resistentes. Asignación de calidades visuales y especies. Madrid. Asociación Española de Normalización (AENOR).
- [16] UNE-EN 338:2010. Madera estructural. Clases resistentes. Madrid. Asociación Española de Normalización (AENOR).
- [17] UNE-EN 1310:1997. Madera aserrada y de rollo. Método de medida de singularidades. Madrid. Asociación Española de Normalización (AENOR).
- [18] UNE 14081-1:2006+A1:2011. Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por su resistencia. Parte 1: Requisitos generales. Madrid. Asociación Española de Normalización (AENOR).
- [19] UNE-EN 844:1997. Madera aserrada y madera en rollo. Terminología. Madrid. Asociación Española de Normalización (AENOR).
- [20] UNE-EN 384:2010. Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad. Madrid. Asociación Española de Normalización (AENOR).
- [21] UNE-EN 408:2011. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. Madrid. Asociación Española de Normalización (AENOR).
- [22] Miravete, A. (2012). *Materiales compuestos (Tomo 1)*. Reverté.
- [23] Olivares Santiago, M., Galán Marín, C., & Roa Fernández, J. (2003). *Los Composites. Características y aplicaciones en la edificación. Informes de la construcción*.
- [24] Mayugo Majó, J. A. (2003). *Estudio constitutivo de materiales compuestos laminados sometidos a cargas cíclicas*.
- [25] Barbero, E.J. (1999). *Introduction to composite material design*.
- [26] Reifsnider, K. L., & Case, S. W. (2002). *Damage tolerance and durability of material systems. Damage Tolerance and Durability of Material Systems, by Kenneth L. Reifsnider, Scott W. Case*.
- [27] Besednjak, A. (2009). *Materiales compuestos (Vol. 100)*. Universidad Politécnica de Cataluña.
- [28] García, R. (2013). *Análisis de elementos de madera reforzados con materiales compuestos (Doctoral dissertation, Edificación)*.
- [29] Recuero, A., Gutiérrez, J. P., Miravete, A., & Cuartero, J. (1997). *Strengthening of structure using advanced composites*.
- [30] [www.sika.com](http://www.sika.com)
- [31] [www.drizoro.com](http://www.drizoro.com)
- [32] [www.hbm.com](http://www.hbm.com)
- [33] [www.sensing.com](http://www.sensing.com)
- [34] Navarro Bernal, M. *Elasticidad*. Universidad de Almería

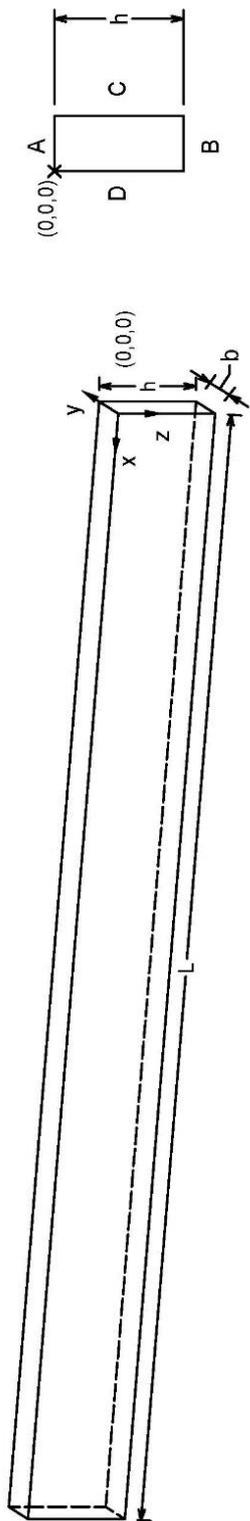
- [35] Código Técnico de la Edificación. Documento Básico. Seguridad Estructural. (2009). Ministerio de Fomento.
- [36] CNR-DT 201/2005. *Guidelines for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures*

.

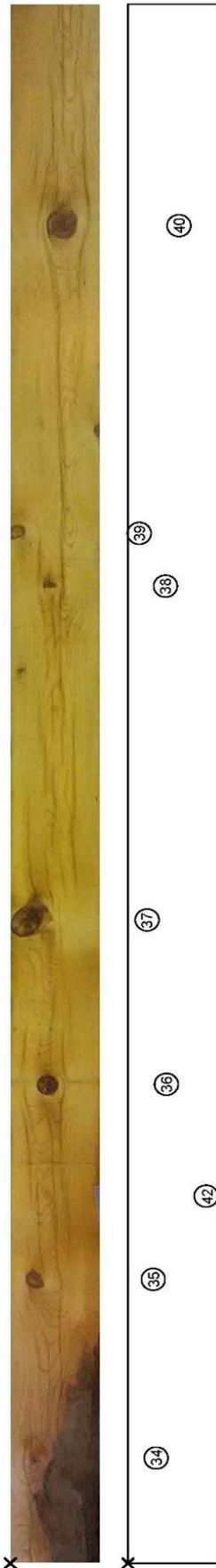
## **Anexo 1**

En este anexo se han realizado las fichas de catalogación de las vigas de madera de 4,5 m respecto a la normativa española referente a la clasificación visual de la madera.

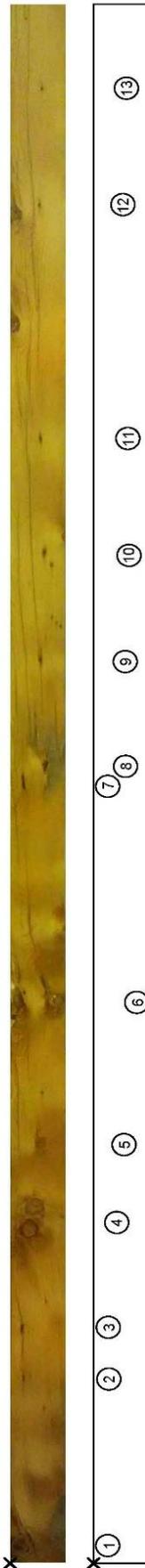
# Viga 7P



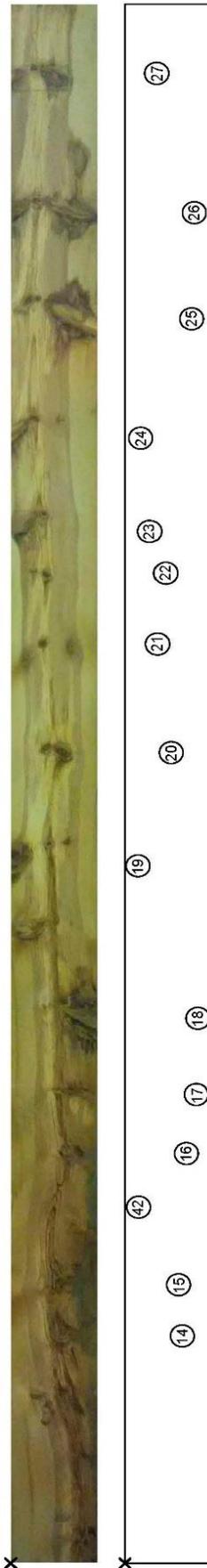
CARA SUPERIOR (C)



CARA FRONTAL (A)



CARA INFERIOR (D)



CARA POSTERIOR (B)



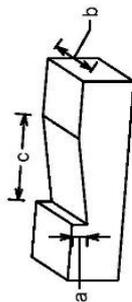
TESTA DCHA



TESTA IZQ



\*Ag = Nudo agrupado \*\*Detalle de empalme de unión  
 Ar = Nudo de arista 42. a = 20 mm  
 b = 149 mm  
 c = 164 mm

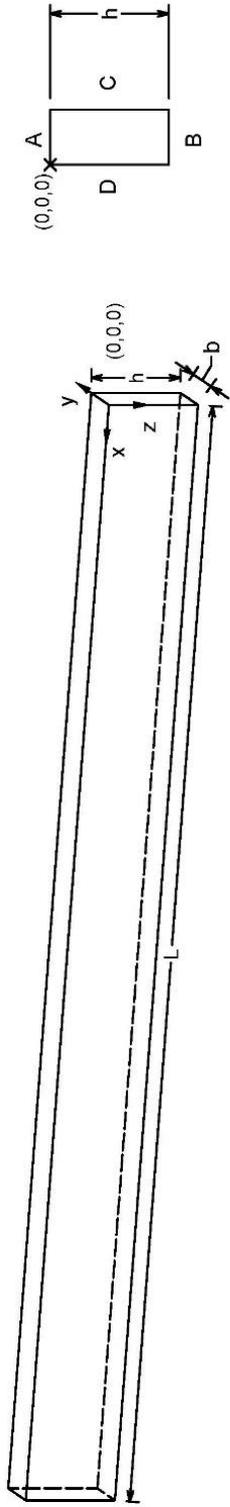


DATOS GENERALES	
Dimensiones h x b x L (mm)	149 x 227 x 4501
Peso (kg)	88,20
Especie	Pino silvestre
Nudos (mm)	Cara > 146 Canto > 96
Longitud de fendas (mm)	> 1000
Gemas (mm)	> 1485
Alteraciones biológicas	-
Bolsa de resina (mm)	> 330
Clasificación visual norma UNE 56545	Rechazo

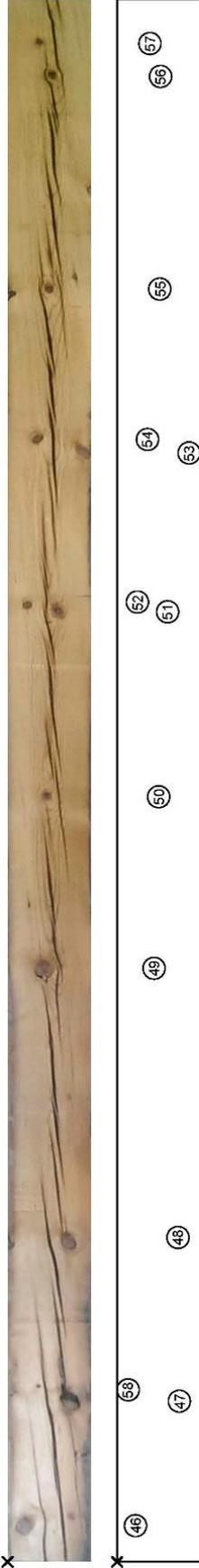
CARACTERIZACIÓN DE LA MADERA	
Densidad (kg/m3)	578,83
Contenido de humedad (%)	8,10
Flexión	-
Compresión	Perpendicular a la fibra
	Paralela a la fibra
Clase resistente según UNE-EN 339	-

DEFECTOS (mm)	
1. 73 ; (58, 37, 0)	22. y 23. (45 + 74) ; 33. 47 ; (3946, 24, 227)
4. 58 ; (1045, 63, 0)	(2975, 0, 145)(3109, 0, 167) 34. 21 ; (325, 149, 69)
5. 25 ; (1268, 83, 0)	24. 54 ; (3360, 0, 191) Ar 35. 47 ; (864, 149, 66)
6. 52 ; (1690, 122, 0)	25. 131 ; (3670, 0, 66) Ar 36. 52 ; (1443, 149, 93)
14. 56 ; (713, 0, 84)	26. 211 ; (3956, 0, 116) Ar 37. 96 ; (1938, 149, 47)
16. 47 ; (1265, 0, 76)	27. 148 ; (4306, 0, 150) 38. 32 ; (2910, 149, 98)
17. 85 ; (1447, 0, 66)	28. 79 ; (840, 60, 227) 39. 39 ; (3052, 149, 20)
18. 115 ; (1654, 0, 58) Ar	29. 97 ; (1930, 63, 227) 40. 70 ; (3912, 149, 130)
19. 59 ; (2132, 0, 196) Ar	30. 95 ; (3052, 62, 227) 41. 68 ; (0, 46, 121)
20. 71 ; (2460, 0, 105)	31. 52 ; (3342, 116, 227) Ar
21. 21 ; (2776, 0, 139)	32. 86 ; (3672, 54, 227) Ar
Fendas	-
Desviación de las fibras	1,90%
Gemas	Vértice entre las caras B y C - 770
Médula	-
Observaciones	2. Agujero (17 x 5) 3. Agujero (24 x 8) 7. Agujero (44 x 6) 8. Agujero (8 x 8) 9. Agujero (8 x 8)
	10. Agujero (8 x 8) 11. Agujero (8 x 8) 12. Agujero (8 x 8) 13. Agujero (8 x 8) 15. Bolsa de resina (12 x 10)
	42.** Empalme de unión

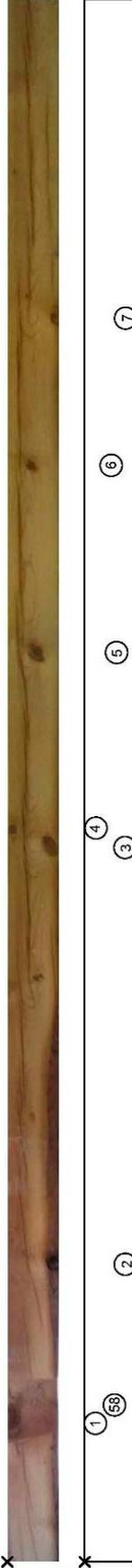
# Viga P 10 w



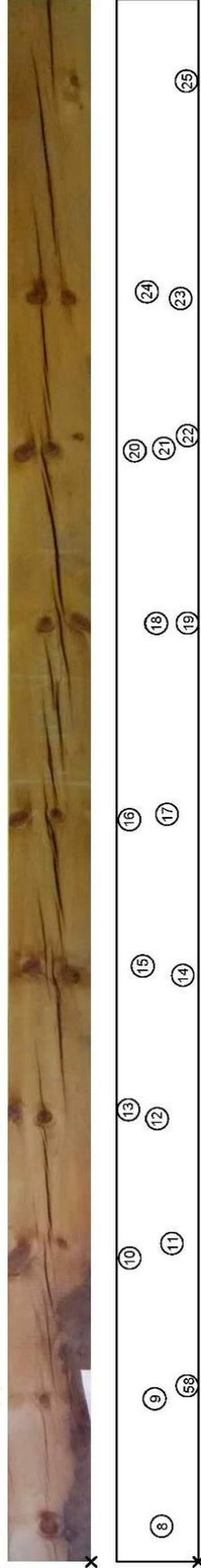
CARA SUPERIOR (C)



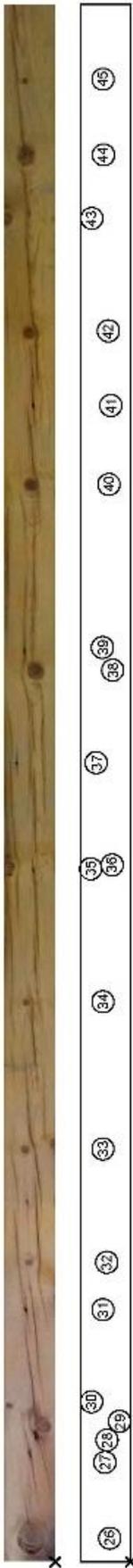
CARA FRONTAL (A)



CARA INFERIOR (D)



CARA POSTERIOR (B)



TESTA DCHA

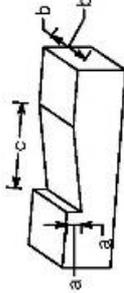


TESTA IZQ



\*Ag = Nudo agrupado \*\* Detalle de empalme de unión

Ar = Nudo de arista a = 38 mm  
b = 147 mm  
c = 180 mm

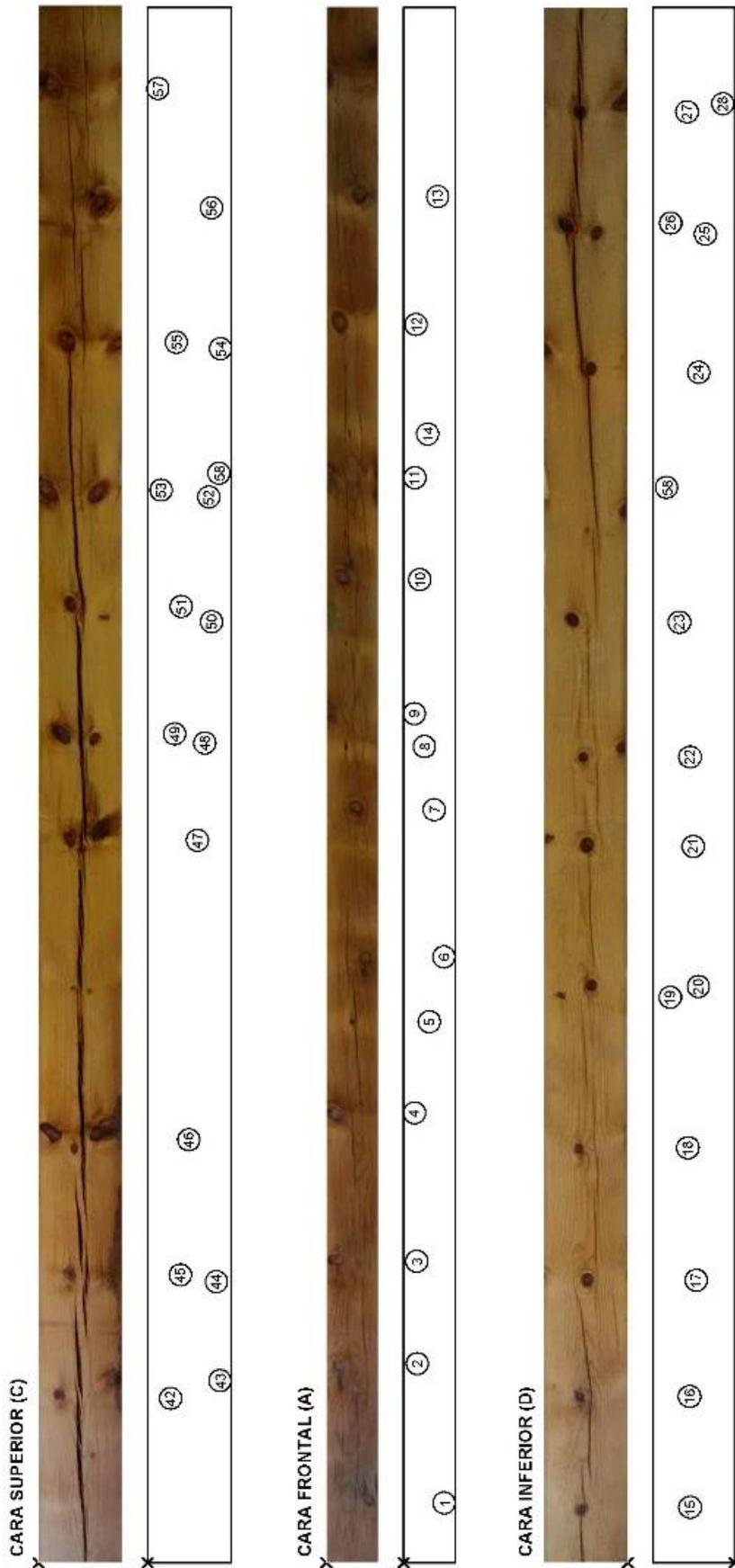
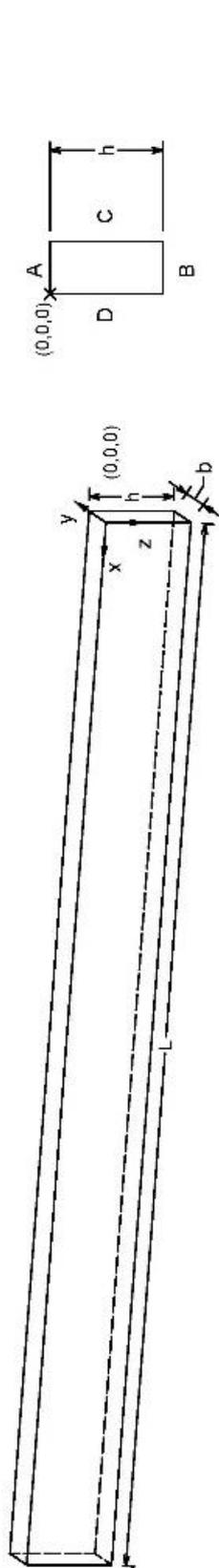


DATOS GENERALES	
Dimensiones b x h x L (mm)	147 x 219 x 4500
Peso (kg)	67,60
Especie	Pino silvestre
Nudos (mm)	Cara > 146 Canto > 96
Longitud de fendas (mm)	> 1000
Gemas (mm)	> 1485
Alteraciones biológicas	Carcoma
Bolaa de resina (mm)	> 330
Clasificación visual norma UNE 56545	Rechazo

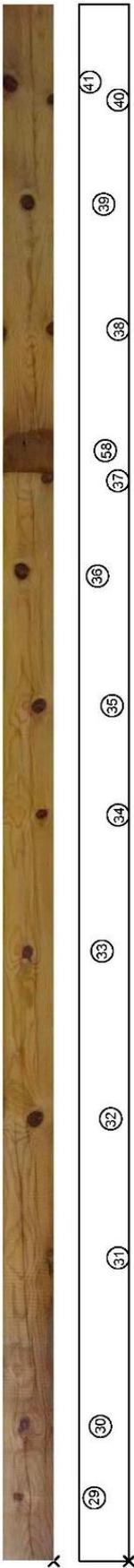
CARACTERIZACIÓN DE LA MADERA	
Densidad (kg/m³)	468,72
Contenido de humedad (%)	7,50
Flexión	-
Compresión	Perpendicular a la fibra
	Paralela a la fibra
Clase resistente según UNE-EN 339	-

DEFECTOS (mm)	
1. 49 ; (432, 25, 0) Ar	16. y 17. (50 + 37) ; (2148, 33. 18 ; (1274, 84, 219)
2. 45 ; (899, 135, 0) Ar	34. 16 ; (1716, 83, 219)
3. y 4. (42 + 24) ; (2129, y 16. Ar	35. 33 ; (2110, 131, 219)
113. 0 ; (2168, 12, 0) Ag	38. 40 ; (3688, 56, 219)
5. 40 ; (2684, 78, 0)	40. 31 ; (3215, 67, 219)
6. 26 ; (2820, 64, 0)	42. 28 ; (3628, 73, 219)
7. 27 ; (3630, 129, 0) Ar	(3212, 0, 17) ; (3222, 0, 103)
8. 41 ; (106, 0, 107)	(3260, 0, 42) Ag
9. 22 ; (474, 0, 127)	23. y 24. (33 + 36) ; (3651, 0, 61) ; (3660, 0, 145)
10. y 11. (50 + 18) ; (882, 0, 192) ; (920, 0, 80) Ag	46. 47 ; (104, 147, 48)
12. y 13. (32 + 38) ; (1280, 0, 125) ; (1293, 0, 206) Ag	47. 55 ; (462, 147, 160)
14. y 15. (39 + 32) ; (1696, 0, 64) ; (1716, 0, 156) Ag	48. 36 ; (904, 147, 153)
	49. 40 ; (1664, 147, 98)
	41, 219) ; (496, 136, 219) Ag
	50. 21 ; (2172, 147, 106)
	51. y 52. (28 + 25) ; (2716, 147, 133) ; (2732, 147, 55)
	Ag
	53. y 54. (36 + 30) ; (3180, 147, 198) ; (3217, 147, 83)
	Ag
	55. 25 ; (3654, 147, 110)
	56. y 57. (27 + 20) ; (4273, 147, 115) ; (4371, 147, 83)
	Ag
Fendas	Pequeñas fendas longitudinalmente consecutivas a lo largo de toda la cara A, C y D
Desviación de las fibras	-
Gemas	Vértice entre las caras A y C - 2100
Médula	-
Observaciones	27. Agujero (8 x 21) 28. Agujero (8 x 25) 31. Agujero (8 x 10) 36. Agujero (5 x 8) 37. Agujero (5 x 8) 39. Agujero (6 x 8) 41. Agujero (6 x 8) 58. **Empalme de unión

# Viga P 28



CARA POSTERIOR (B)



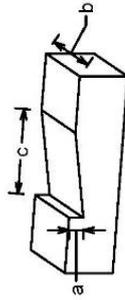
TESTA DCHA



TESTA IZQ



\*Ag = Nudo agrupado \*\* Detalle de empalme de unión  
 Ar = Nudo de arista  
 a = 17 mm  
 b = 148 mm  
 c = 125 mm

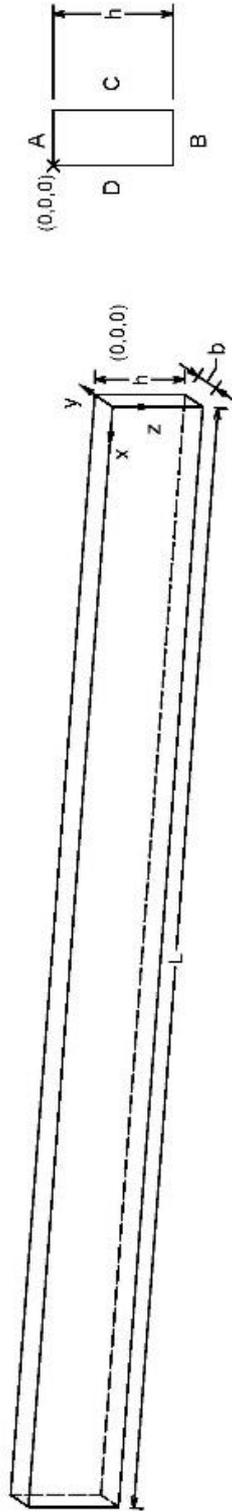


DATOS GENERALES	
Dimensiones b x h x L (mm)	148 x 223 x 4500
Peso (kg)	82,60
Especie	Pino silvestre
Nudos (mm)	Cara > 146 Canto > 96
Longitud de fendas (mm)	> 1000
Gemas (mm)	> 1485
Alteraciones biológicas	Carcoma
Bolsa de resina (mm)	> 330
Clasificación visual norma UNE 56545	Rechazo

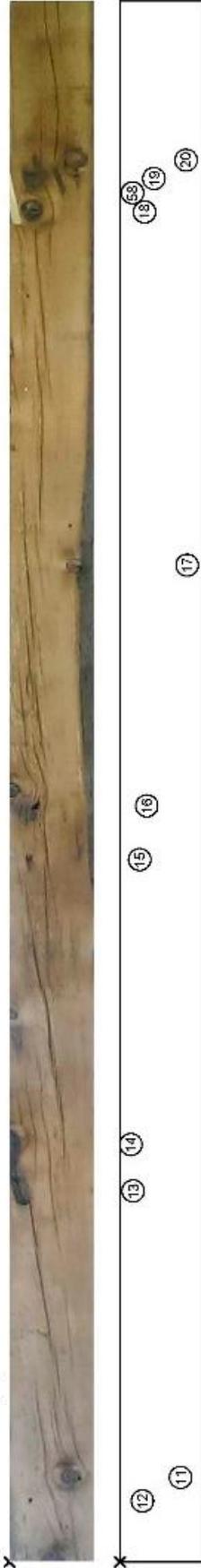
CARACTERIZACIÓN DE LA MADERA	
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	560,46
Contenido de humedad (%)	9,50
Flexión	-
Compresión	Perpendicular a la fibra
	Paralela a la fibra
Clase resistente según UNE-EN 339	-

DEFECTOS (mm)	
1. 30 ; (184, 127, 0)	19. Y 20. (22 + 30) ; (1710, 35. 40 ; (2479, 45, 223)
2. 34 ; (572, 43, 0)	0. 172 (1742, 0, 93) Ag 36. 41 ; (2872, 91, 223)
3. 43 ; (860, 32, 0)	21. 37 ; (2160, 0, 102) 37. 40 ; (2142, 20, 223) Ag
4. 53 ; (1286, 27, 0)	22. 25 ; (2420, 0, 112) 38. 27 ; (3572, 13, 223) Ar
6. 34 ; (1720, 108, 0)	23. 38 ; (2817, 0, 139) 39. 33 ; (3929, 77, 223)
7. 41 ; (2180, 83, 0)	24. 30 ; (3523, 0, 93) 40. Y 41. (26 + 41) ; (4225, Ag
9. 24 ; (2452, 12, 0) Ar	25. Y 26. (30 + 39) ; (3892, 13, 223) (4270, 125, 223)
10. 47 ; (2846, 44, 0)	0. 80 (3911, 0, 154) Ag Ag Y Ar
11. 29 ; (3130, 15, 0) Ar	27. Y 28. (35 + 40) ; (4217, 42. Y 43. (27 + 52) ; (498, Ag Y 53. Ar
12. 44 ; (3567, 41, 0)	0. 118 (4252, 0, 22) Ag 148, 60 (550, 148, 206)
13. 41 ; (3933, 96, 0)	29. 24 ; (101, 101, 223) Ag 148, 196 (3558, 148, 73)
15. 28 ; (166, 0, 127)	30. 34 ; (396, 86, 223) Ag 44. Y 45. (39 + 33) ; (836, Ag
16. 30 ; (518, 0, 130)	31. 27 ; (874, 13, 223) Ar 148, 186 (848, 148, 88)
17. 32 ; (866, 0, 106)	32. 41 ; (1275, 55, 223) Ag 56. 57 ; (3940, 148, 160)
18. 27 ; (1257, 0, 125)	33. 29 ; (1754, 74, 223) Ag 57. 68 ; (4274, 148, 34) Ar
	34. 33 ; (2164, 37, 223) 47. 132 ; (2137, 148, 133)
Fendas	Cara C
Desviación de las fibras	2,70%
Gemas	-
Médula	-
Observaciones	5. Agujero (8 x 8) 8. Agujero (6 x 12) 14. Agujero (8 x 12) 58.** Empalme de unión

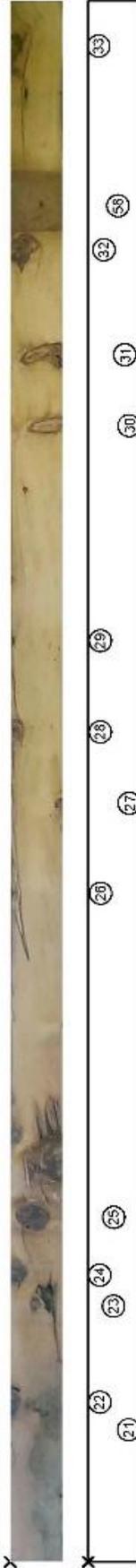
# Viga P 28 w



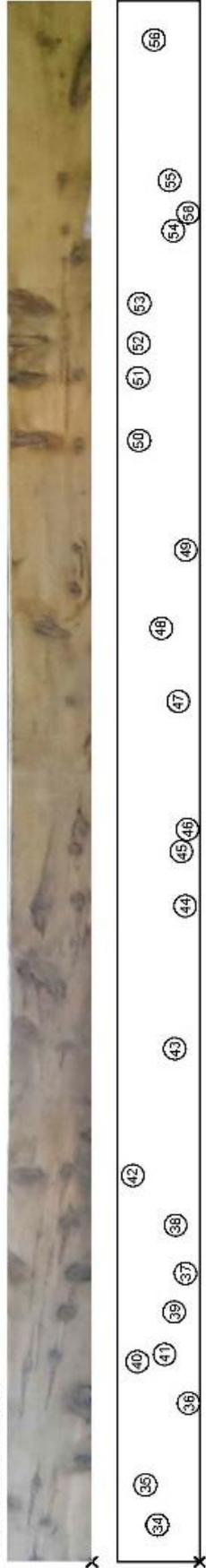
CARA SUPERIOR (C)



CARA FRONTAL (A)



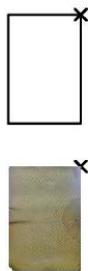
CARA INFERIOR (D)



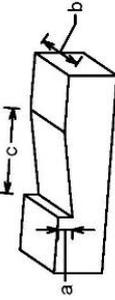
CARA POSTERIOR (B)



TESTA DCHA



TESTA IZQ

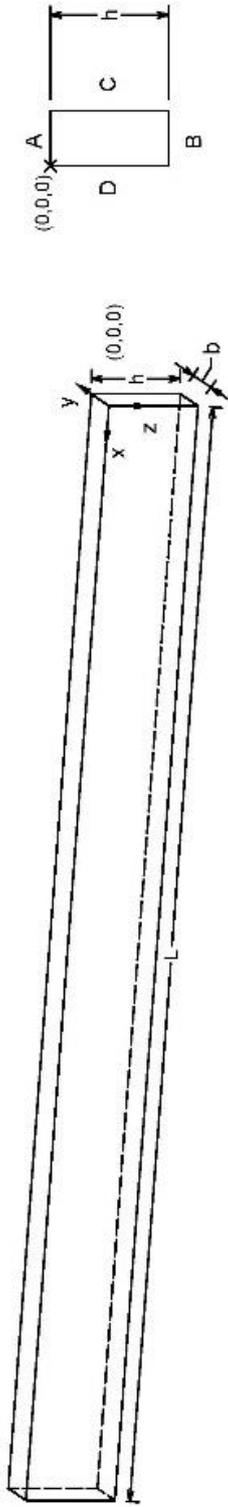


\*Ag = Nudo agrupado \*\* Detalle de empalme de unión  
 Ar = Nudo de artista 58. a = 30 mm  
 b = 147 mm  
 c = 178 mm

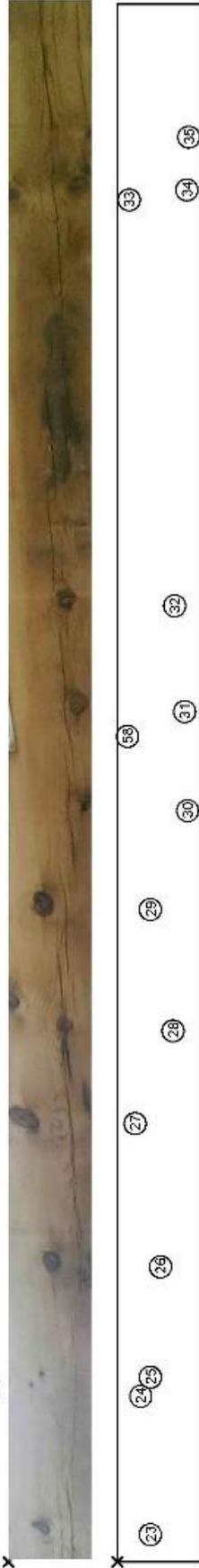
DATOS GENERALES	
Dimensiones b x h x L (mm)	147 x 223 x 4500
Peso (kg)	76,90
Especie	Pino silvestre
Nudos (mm)	Cara > 146 Canto > 96
Longitud de fendas (mm)	> 1000
Gemas (mm)	> 1485
Alteraciones biológicas	-
Bolsa de resina (mm)	> 330
Clasificación visual norma UNE 56545	Rechazo
CARACTERIZACIÓN DE LA MADERA	
Densidad (kg/m3)	522,52
Contenido de humedad (%)	6,92
Flexión	-
Compresión	Perpendicular a la fibra
	Paralela a la fibra
Clase resistente según UNE-EN 339	-

DEFECTOS (mm)	
4. 59 ; (1148, 112, 223) Ar	24. y 25. (67 + 36) ; (1166, 37. y 38. (45 + 34) ; (577, 51. y 52. (92 + 106) ; (3440, 5. 86 ; (1763, 85, 223) Ar 113. 0)(1236, 18, 0) Ag 0, 71)(612, 0, 100) Ag 0, 173)(3538, 0, 166) y Ar 39. 34 ; (736, 0, 71) Ag y Ar
10. 48 ; (4414, 75, 223)	26. 15 ; (1936, 7, 0) Ar 40. y 41. (19 + 21) ; (1004, 53. 116 ; (3660, 0, 164) Ar
11. 49 ; (240, 147, 161)	27. 32 ; (2200, 130, 0) Ar 0, 62)(1142, 0, 72) Ag 54. y 55. (18 + 21) ; (3864, 28. 30 ; (2402, 15, 0) Ar 42. 26 ; (1343, 0, 13) Ar 0, 76)(4010, 0, 84) Ag
14. 36 ; (1548, 147, 18) Ar	29. 11 ; (2667, 5, 0) Ar 43. 59 ; (1507, 0, 73) 56. 29 ; (4390, 0, 128)
15. 18 ; (1995, 147, 57)	30. 105 ; (3294, 94, 0) Ar 44. 30 ; (1940, 0, 46) 57. 77 ; (0, 119, 72) Ar
17. 46 ; (2854, 147, 166)	31. 114 ; (3881, 147, 59) 45. y 46. (26 + 29) , (2087, 18. 55 ; (3881, 147, 59) 0, 52)(2150, 0, 40) Ag
20. 56 ; (4030, 147, 169)	32. 72 ; (3798, 35, 0) 47. 22 ; (2521, 0, 67) 21. y 22. (64 + 49) ; (780, 33. 42 ; (4337, 21, 0) 48. 85 ; (2730, 0, 117)
Nudo. Diámetro; Posición (x,y,z)	34. y 35. (38 + 23) ; (104, 0, 108)(232, 0, 144) Ag 49. 19 ; (2966, 0, 44) y 20. Ar
Fendas	23. 86 ; (1006, 61, 0) 36. 54 ; (478, 0, 27) Ar 50. 102 ; (3275, 0, 166) Ar
Desviación de las fibras	2,85%
Gemas	Vértice entre las caras B y C - 2620
Médula	-
Observaciones	1. Agujero (8 x 12) 7. Agujero (10 x 8) 12. Agujero (8 x 8) 19. Agujero (108 x 70) 2. Agujero (8 x 10) 8. Agujero (8 x 8) 13. Agujero (98 x 58) 58.** Empalme de unión 3. Agujero (8 x 8) 9. Agujero (8 x 9) 16. (25 x 10)

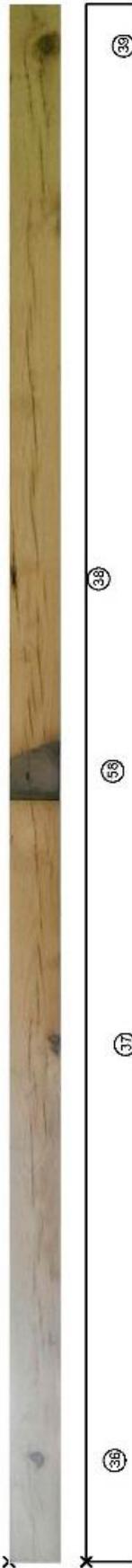
# Viga P 31 w



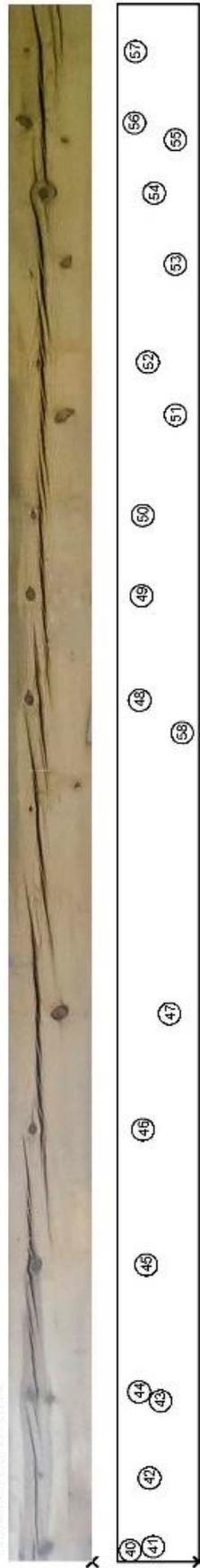
CARA SUPERIOR (C)



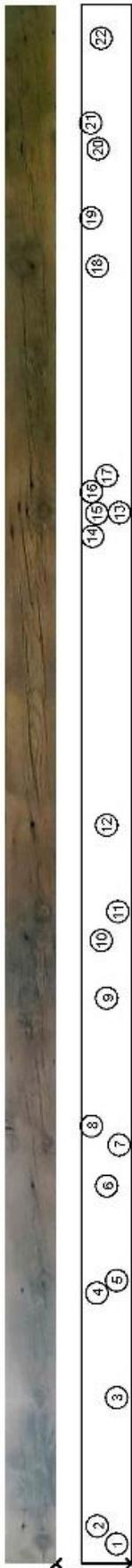
CARA FRONTAL (A)



CARA INFERIOR (D)



CARA POSTERIOR (B)



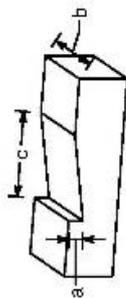
TESTA DCHA



TESTA IZQ



\*Ag = Nudo agrupado \*\* Detalle de empalme de unión  
 Ar = Nudo de arista 58. a = 24 mm  
 b = 142 mm  
 c = 176 mm

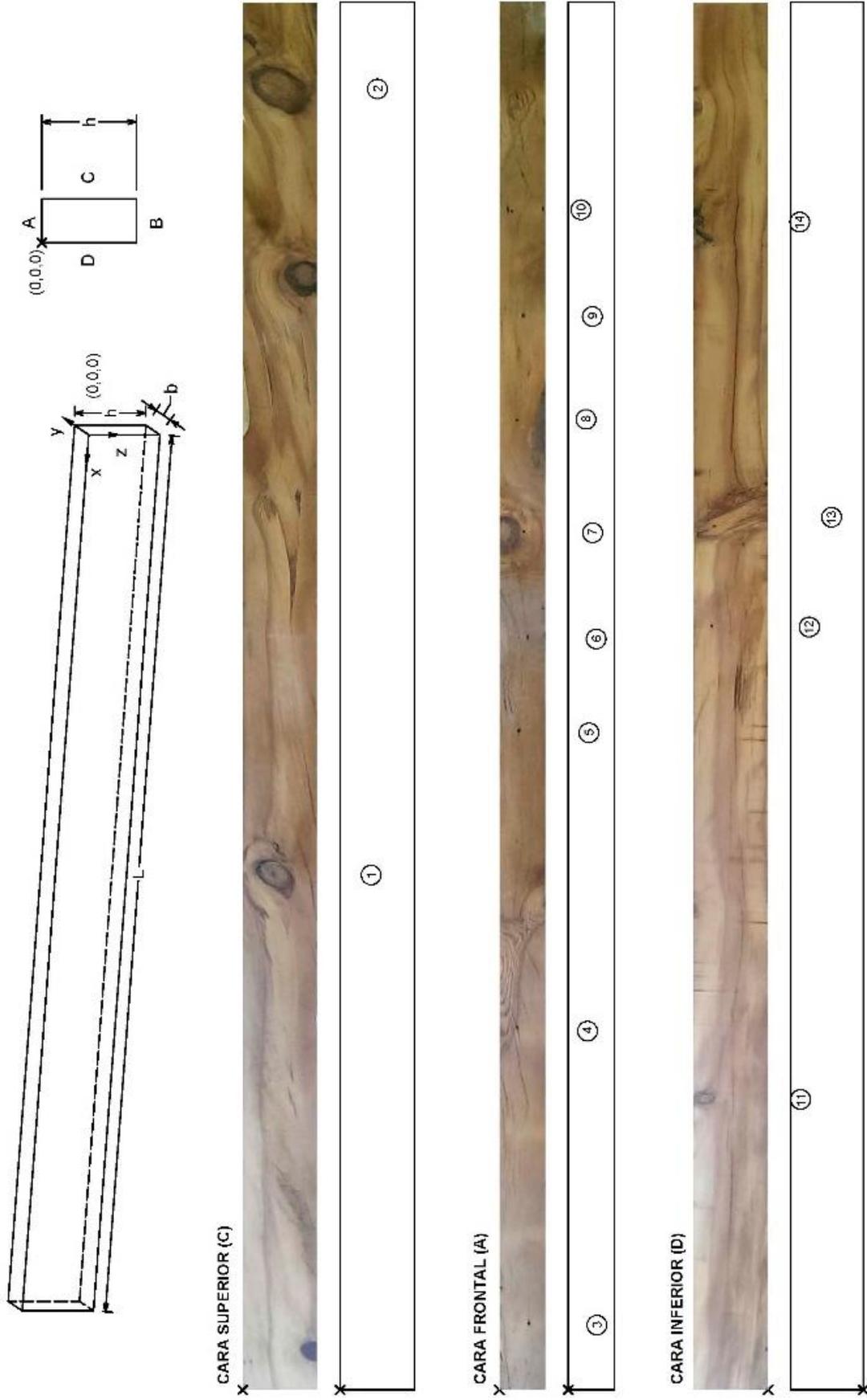


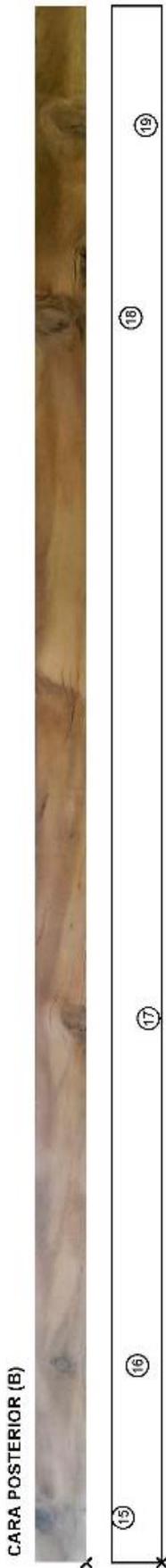
DATOS GENERALES	
Dimensiones b x h x L (mm)	142 x 223 x 4500
Peso (kg)	79,60
Especie	Pino silvestre
Nudos (mm)	Cara > 146 Canto > 96
Longitud de fendas (mm)	> 1000
Gemas (mm)	> 1485
Alteraciones biológicas	-
Bolsa de resina (mm)	> 330
Clasificación visual norma UNE 56545	Rechazo

CARACTERIZACIÓN DE LA MADERA	
Densidad (kg/m3)	563,10
Contenido de humedad (%)	9,45
Flexión	-
Compresión	Perpendicular a la fibra
	Paralela a la fibra
Clase resistente según UNE-EN 339	-

DEFECTOS (mm)			
1. 36 ; (64, 42, 223)	23. 46 ; (92, 142, 98)	36. 42 ; (331, 77, 0)	49. 29 ; (2766, 0, 161)
3. 35 ; (887, 52, 223)	26. 45 ; (855, 142, 118)	37. 39 ; (1605, 121, 0) Ar	50. 17 ; (2999, 0, 153)
5. 34 ; (820, 38, 223)	27. 81 ; (1259, 142, 146)	39. 47 ; (4365, 91, 0)	51. 56 ; (3290, 0, 73)
7. y 8. (27 + 33) ; (1214, 31, 223)(1264, 132, 223)	28. 41 ; (1534, 142, 146)	40. y 41. (15 + 34) ; (18, 29. 53 ; (1888, 142, 92)	52. 14 ; (3442, 0, 142)
Ag y 8. Ar	30. 44 ; (2186, 142, 20)	0, 168(40, 0, 126) Ag	53. 33 ; (3740, 0, 73)
9. 34 ; (1570, 90, 223)	31. 47 ; (2474, 142, 184)	42. 12 ; (243, 0, 137)	54. 35 ; (3938, 0, 131)
11. 40 ; (1876, 40, 223)	32. 44 ; (2782, 142, 150)	43. y 44. (27 + 22) ; (460, 0, 112)(470, 0, 160)	55. y 56. (22 + 46) ; (4092, 0, 78)(4144, 0, 182)
13. 38 ; (3048, 36, 223)	33. y 34. (40 + 44) ; (3942, 142, 20)(3968, 142, 186)	45. 26 ; (830, 0, 145)	57. 18 ; (4358, 0, 172)
18. 30 ; (3488, 38, 223)	142, 20)(3968, 142, 186)	46. 23 ; (1212, 0, 153)	
19. 82 ; (3754, 89, 223)	Ag y 33. Ar	47. 46 ; (1540, 0, 84)	
21. 26 ; (3340, 133, 223)	35. 26 ; (4124, 142, 216) Ar	48. 24 ; (2462, 0, 162)	
Nudo. Diámetro;			
Posición (x,y,z)			
Fendas			
Desviación de las fibras			Cara C 2,90%
Gemas			-
Médula			-
Observaciones			
	2. Agujero (9 x 15)	14. Agujero (35 x 8)	22. Agujero (13 x 8)
	4. Agujero (11 x 8)	15. Agujero (23 x 7)	24. Agujero (7 x 7)
	6. Agujero (8 x 10)	16. Agujero (23 x 7)	25. Agujero (10 x 8)
	10. Agujero (10 x 8)	17. Agujero (13 x 8)	38. Agujero (28 x 7)
	12. Agujero (10 x 8)	20. Agujero (28 x 6)	58.** Empalme de unión

# Viga P 48 e





TESTA DCHA



TESTA IZQ



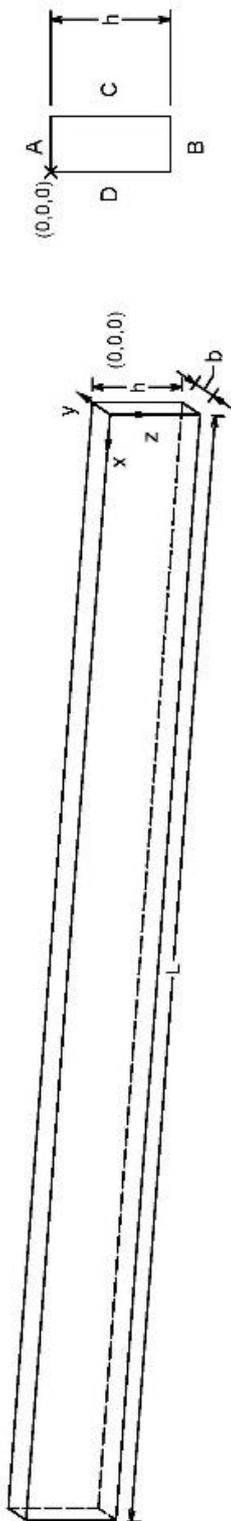
\*Ag = Nudo agrupado  
Ar = Nudo de arista

DATOS GENERALES	
Dimensiones b x h x L (mm)	147 x 218 x 4500
Peso (kg)	94,70
Especie	Pino silvestre
Nudos (mm)	Cara > 146
	Canto > 96
Longitud de fendas (mm)	> 1000
Gemas (mm)	> 1485
Alteraciones biológicas	Carcoma
Bolsa de resina (mm)	> 330
Clasificación visual norma UNE 56545	Rechazo

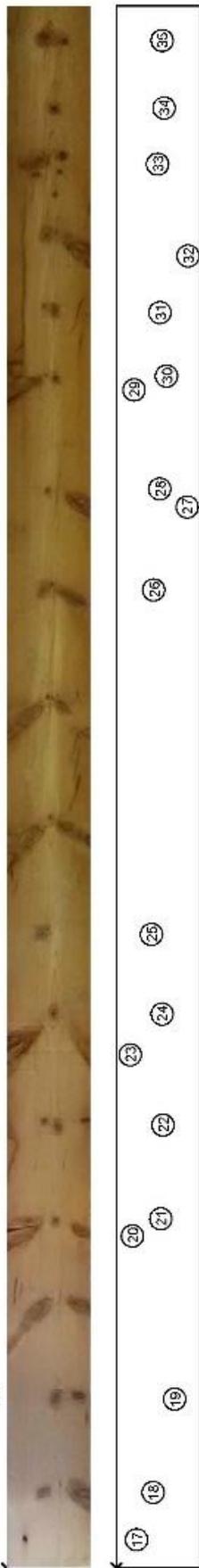
DEFECTOS (mm)	
1. 104 ; (1646, 147, 88)	
2. 156 ; (4214, 147, 116)	
11. 64 ; (940, 0, 186)	
13. 204 ; (2841, 0, 186) Ar	
14. 58 ; (3765, 0, 192)	
15. 66 ; (134, 116, 218) Ar	
16. 50 ; (586, 75, 218)	
17. 73 ; (1562, 36, 218) Ar	
18. 110 ; (3600, 94, 218) Ar	
19. 74 ; (4150, 37, 218) Ar	
Fendas	-
Desviación de las fibras	-
Gemas	Vértice entre las caras A y C - 288
Médula	-
Observaciones	3. Agujero (11 x 10)
	4. Agujero (12 x 11)
	5. Agujero (11 x 11)
	6. Agujero (12 x 9)
	7. Agujero (9 x 9)
	8. Agujero (8 x 8)
	9. Agujero (11 x 10)
	10. Agujero (20 x 9)
	12. Agujero (8 x 8)

CARACTERIZACIÓN DE LA MADERA	
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	658,11
Contenido de humedad (%)	6,78
Flexión	-
	-
Compresión	Perpendicular a la fibra
	Paralela a la fibra
Clase resistente según UNE-EN 339	-

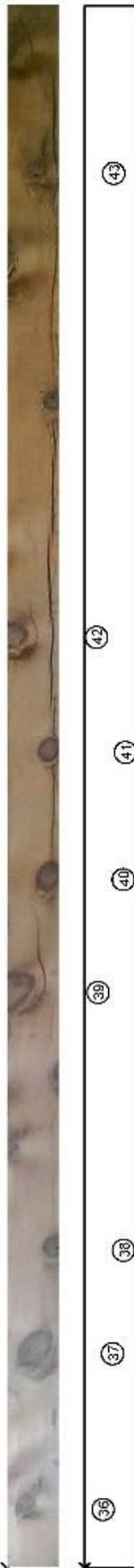
# Viga PN 17



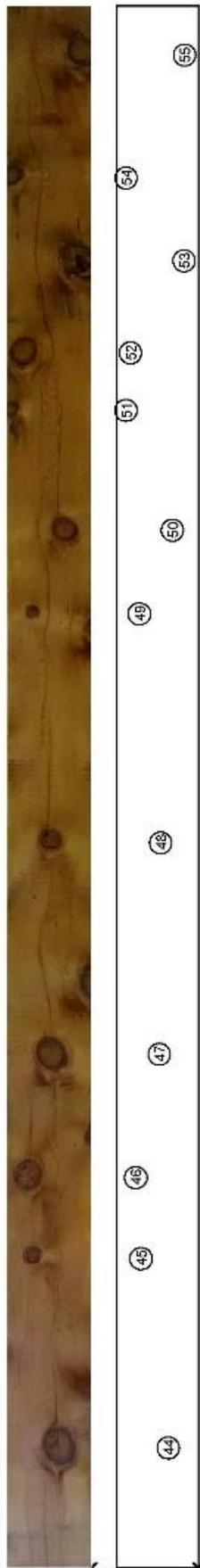
CARA SUPERIOR (C)



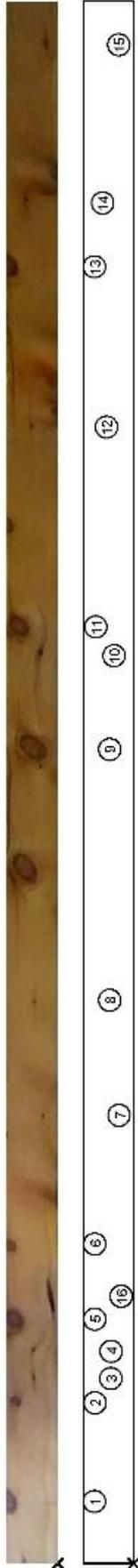
CARA FRONTAL (A)



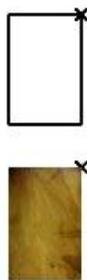
CARA INFERIOR (D)



CARA POSTERIOR (B)



TESTA DCHA



TESTA IZQ



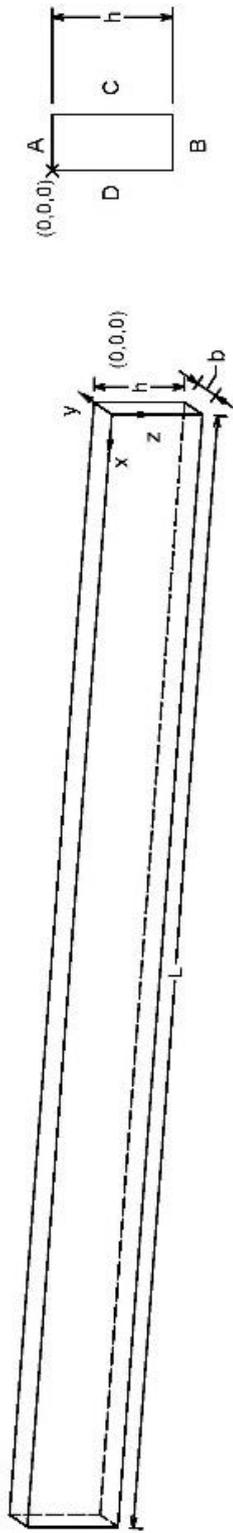
\*Ag = Nudo agrupado  
Ar = Nudo de arista

DATOS GENERALES	
Dimensiones b x h x L (mm)	151 x 227 x 4500
Peso (kg)	79,60
Especie	Pino silvestre
Nudos (mm)	Cara > 146 Canto > 96
Longitud de fendas (mm)	> 1000
Gemas (mm)	> 1485
Alteraciones biológicas	-
Bolsa de resina (mm)	> 330
Clasificación visual norma UNE 56545	Rechazo

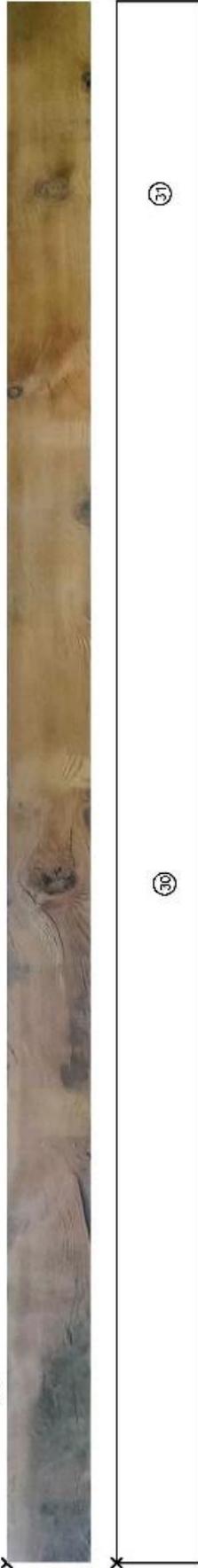
CARACTERIZACIÓN DE LA MADERA	
Densidad (kg/m3)	520,86
Contenido de humedad (%)	6,60
Flexión	-
Compresión	Perpendicular a la fibra Paralela a la fibra
Clase resistente según UNE-EN 339	-

DEFECTOS (mm)	
1. 96 ; (172, 131, 227)	23. y 24. (78 + 21) ; (1417, 33. 89 ; (4024, 151, 115)
2. 26 ; (460, 118, 227)	151, 40) (1516, 151, 123)
5. 47 ; (694, 128, 227)	Ag y 23. Ar
6. 34 ; (889, 134, 227)	25. 29 ; (1754, 151, 95)
9. 61 ; (1992, 98, 227)	26. 43 ; (2758, 151, 108)
11. 69 ; (2342, 74, 227)	27. 59 ; (3002, 151, 202) Ar
13. 53 ; (2696, 115, 227)	28. y 29. (96 + 19) ; (3356, 39. 74 ; (1648, 38, 0) Ar
18. 31 ; (210, 151, 92)	151, 50) (3378, 151, 135)
19. 85 ; (462, 151, 153)	Ag y 28. Ar
20. y 21. (90 + 20) ; (916, 30. 49 ; (3586, 151, 123)	41. 56 ; (2346, 113, 0) Ar
151, 90) (948, 151, 126)	42. 57 ; (2676, 29, 0) Ar
Ag y 20. Ar	31. y 32. (70 + 22) ; (3754, 43. 48 ; (4016, 96, 0)
22. 53 ; (1208, 151, 117)	151, 200) (3806, 151, 108)
	Ag y 31. Ar
	45. 43 ; (878, 0, 158)
Fendas	Cara B – 300
Desviación de las fibras	2,20%
Gemas	-
Médula	-
Observaciones	3. Agujero (5 x 8) 10. Agujero (5 x 5) 16. Agujero (130 x 22) 4. Agujero (6 x 6) 12. Agujero (14 x 8) 17. Agujero (13 x 8) 7. Agujero (5 x 8) 14. Agujero (8 x 6) 8. Agujero (5 x 6) 15. Agujero (10 x 6)

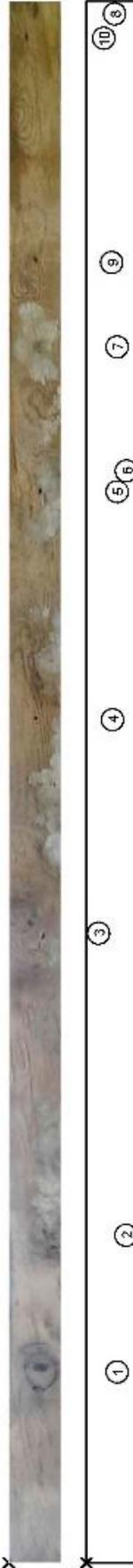
# Viga SN 6



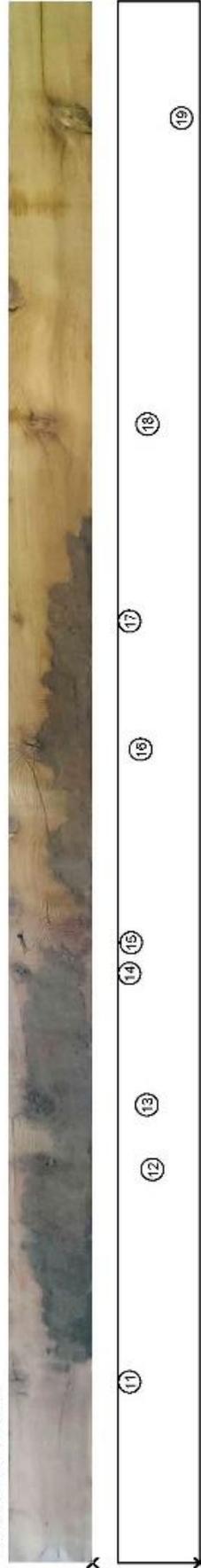
CARA SUPERIOR (C)



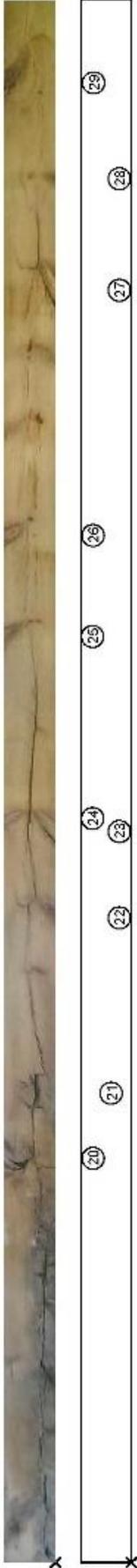
CARA FRONTAL (A)



CARA INFERIOR (D)



CARA POSTERIOR (B)



TESTA DCHA



TESTA IZQ



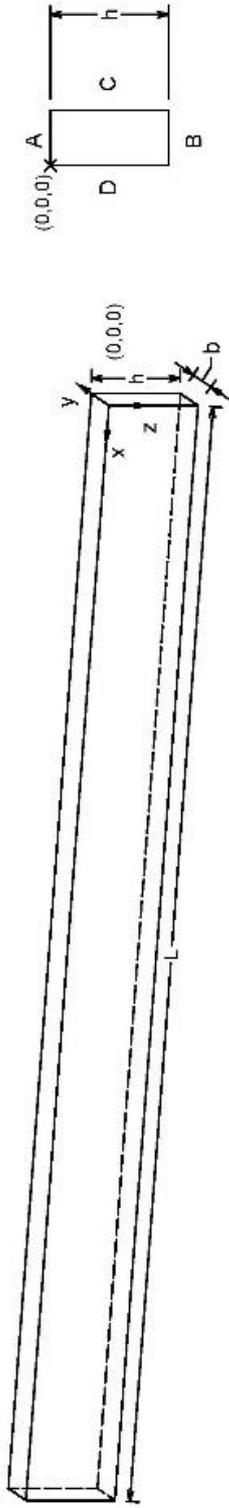
\*Ag = Nudo agrupado  
Ar = Nudo de arista

DATOS GENERALES	
Dimensiones b x h x L (mm)	159 x 226 x 4500
Peso (kg)	76,90
Especie	Pino silvestre
Nudos (mm)	Cara > 146 Canto > 96
Longitud de fendas (mm)	> 1000
Gemas (mm)	> 1485
Alteraciones biológicas	-
Bolsa de resina (mm)	> 330
Clasificación visual norma UNE 56545	Rechazo

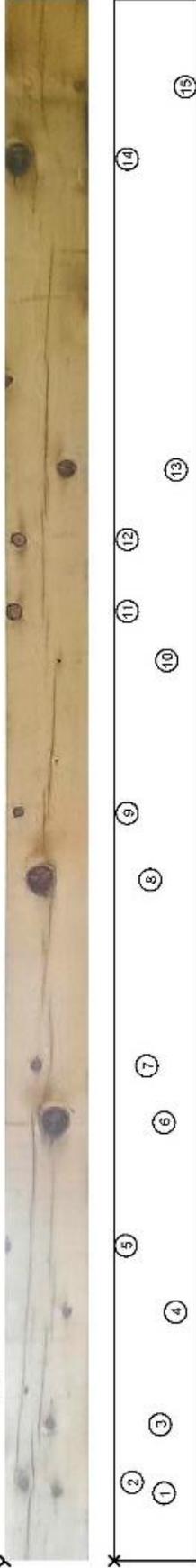
CARACTERIZACIÓN DE LA MADERA	
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	571,12
Contenido de humedad (%)	7,05
Flexión	-
Compresión	Perpendicular a la fibra
	Paralela a la fibra
Clase resistente según UNE-EN 339	-

DEFECTOS (mm)	
1. 96 ; (577, 93, 0)	20. 105 ; (1245, 114, 226) Ar
2. 95 ; (986, 116, 0) Ar	22. 45 ; (1960, 22, 226) Ar
3. 80 ; (1902, 40, 0) Ar	23. y 24. (70 + 79) ; (2208, 35, 226) (2231, 126, 226) Ag y Ar
6. 43 ; (3344, 141, 0) Ar	7. 32 ; (9542, 91, 0) Ag y Ar
Nudo. Diámetro:	11. 42 ; (574, 0, 204) Ar
Posición (x,y,z)	12. 41 ; (1027, 0, 113) Ar
	13. 82 ; (1382, 0, 144) Ar
	14. 43 ; (1765, 0, 189) Ar
	16. 65 ; (2437, 0, 155) Ar
	17. 15 ; (2794, 0, 194) Ar
	18. 58 ; (3345, 0, 147) Ar
	19. 114 ; (4180, 0, 59) Ar
Fendas	Pequeñas fendas consecutivas a lo largo de la cara B
Desviación de las fibras	-
Gemas	-
Médula	-
Observaciones	4. Agujero (8 x 9)
	10. Agujero (9 x 9)
	5. Agujero (10 x 12)
	15. Agujero (8 x 8)
	8. Bolsa de resina (29 x 30)
21. Agujero (111 x 54)	
9. Agujero (9 x 11)	

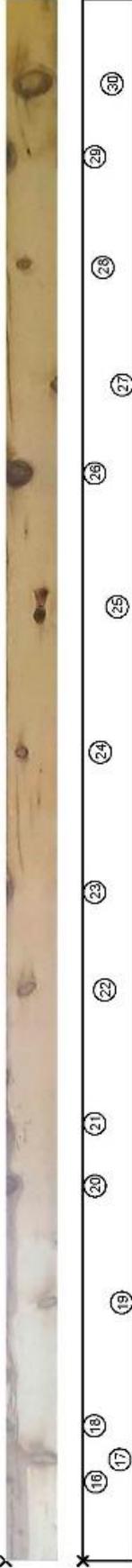
# Viga P 14 e



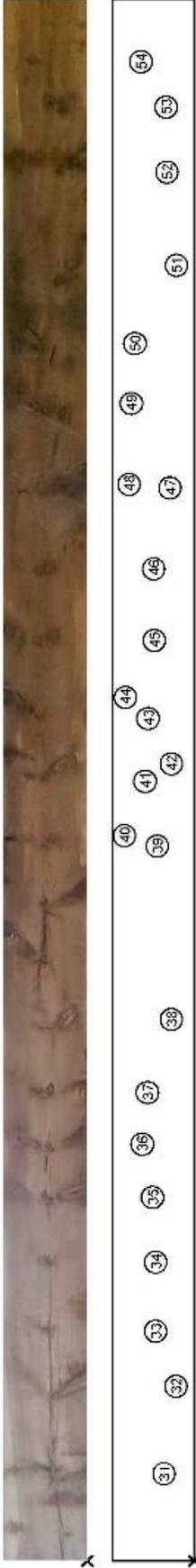
CARA SUPERIOR (C)



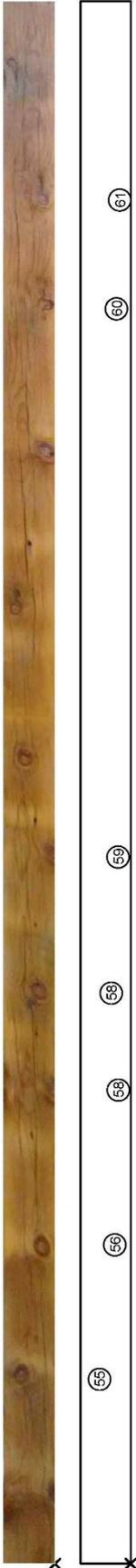
CARA FRONTAL (A)



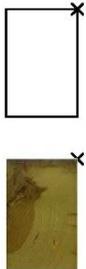
CARA INFERIOR (D)



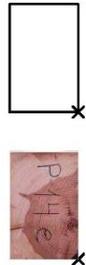
CARA POSTERIOR (B)



TESTA DCHA



TESTA IZQ



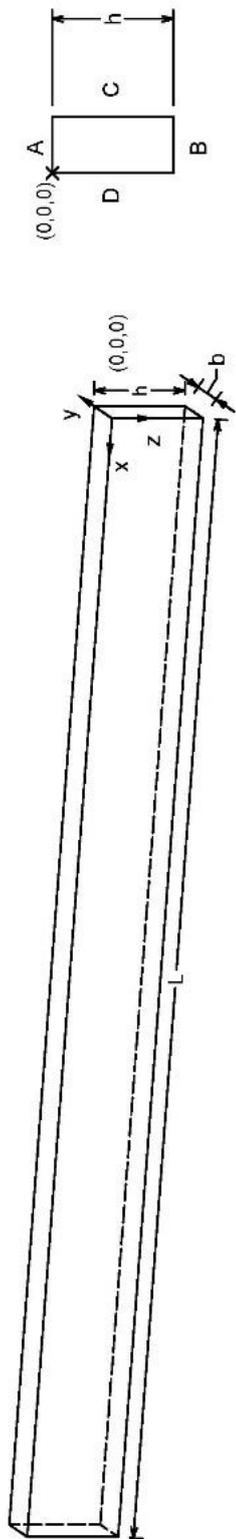
\*Ag = Nudo agrupado  
Ar = Nudo de arista

DATOS GENERALES	
Dimensiones b x h x L (mm)	140 x 218 x 4500
Peso (kg)	78,60
Especie	Pino silvestre
Nudos (mm)	Cara > 146
	Carto > 96
Longitud de fendas (mm)	> 1000
Gemas (mm)	> 1485
Alteraciones biológicas	Carcoma
Bolsa de resina (mm)	> 330
Clasificación visual norma UNE 56545	Rechazo

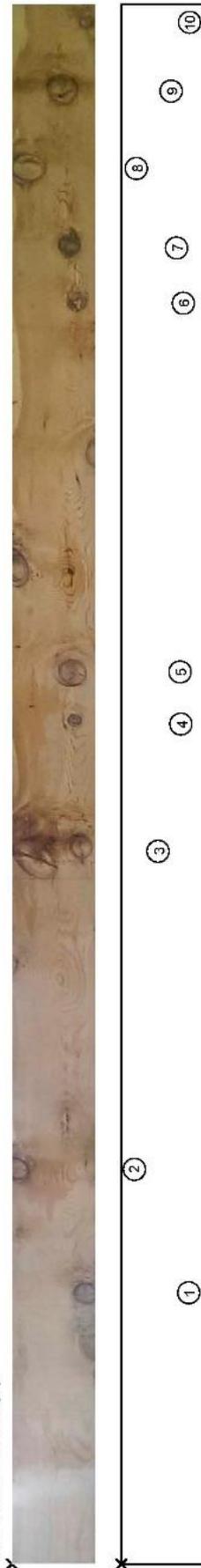
CARACTERIZACIÓN DE LA MADERA	
Densidad (kg/m3)	571,89
Contenido de humedad (%)	7,54
Flexión	Perpendicular a la fibra
	Paralela a la fibra
Compresión	Perpendicular a la fibra
	Paralela a la fibra
Clase resistente según UNE-EN 339	-

		DEFECTOS (mm)	
Nudo, Diámetro; Posición (x,y,z)	1. y 2. (31 + 29); (221, 140, 140)(248, 140, 58) Ag	17. 68; (310, 105, 0)	33. 38; (718, 0, 108)
	3. 19; (430, 140, 120)	18. 26; (404, 19, 0)	34. 42; (916, 0, 109)
	4. 23; (762, 140, 158)	19. 56; (788, 111, 0)	35. 40; (1108, 0, 110)
	5. 17; (960, 140, 8'5)	20. y 21. (37 + 10); (1138, 210, 0)(1186, 5, 0) Ag	36. 93; (1268, 0, 133)
	6. 75; (1320, 140, 125)	22. 48; (1708, 54, 0)	37. 59; (1426, 0, 123)
	7. 30; (1490, 140, 79)	23. 17; (2000, 7'5, 0)	38. 46; (1642, 0, 51)
	8. 74; (2032, 140, 86)	24. 35; (2405, 39, 0)	39. y 40. (50 + 53); (2162, 0, 98)(2164, 0, 197) Ag
	9. 29; (2228, 135, 31)	26. 62; (3207, 69, 0)	41. y 42. (60 + 59); (2344, 0, 134)(2386, 0, 62) Ag
	11. 46; (2806, 135, 23)	27. 27; (3456, 126, 0)	43. y 44. (17 + 62); (2522, 0, 124)(2576, 0, 19) Ag
	12. 39; (3006, 135, 33)	28. 35; (3778, 54, 0)	45. 65; (2748, 0, 105)
	13. 47; (3204, 139, 150)	29. 38; (4062, 19, 0)	46. 52; (2942, 0, 107)
	14. 74; (4056, 139, 37)	30. 88; (4264, 81, 0)	47. 80; (3178, 0, 88)
	15. 36; (4262, 139, 188)	31. 64; (267, 0, 50)	
	16. 21; (250, 17, 0)	32. 99; (552, 0, 48)	
	Fendas	-	
	Desviación de las fibras	-	
Gemas	Vértice entre las caras C y B - 630		
Médula	-		
Observaciones	10. Agujero (8 x 8) 25. Agujero (48 x 123)		

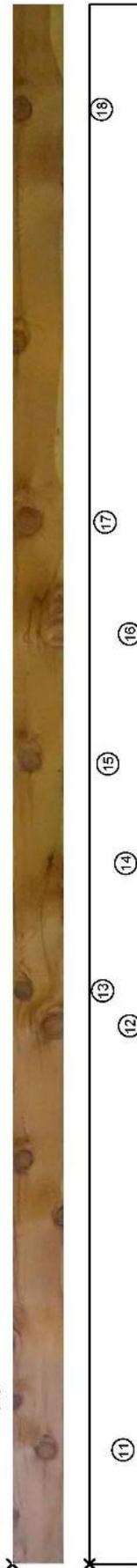
# Viga SN 8



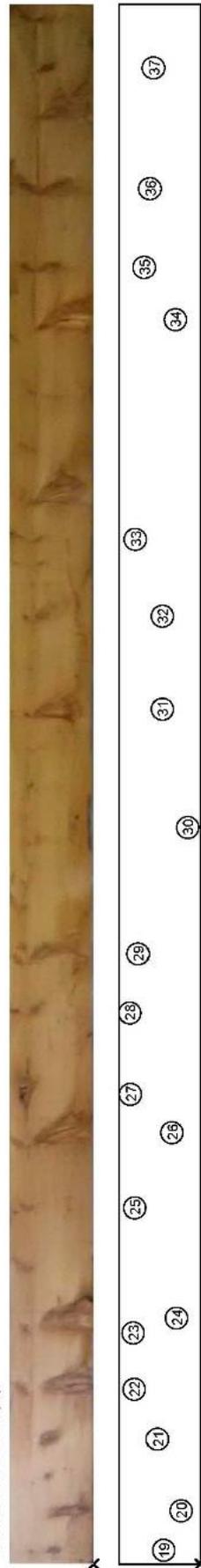
CARA SUPERIOR (C)



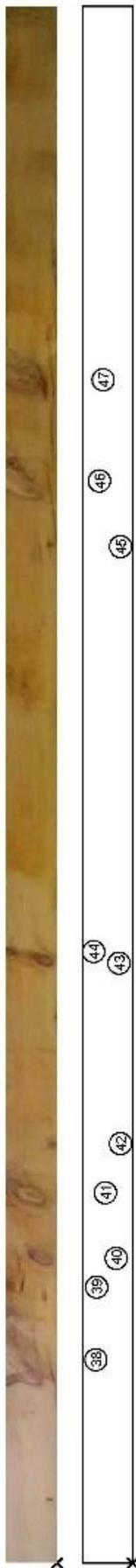
CARA FRONTAL (A)



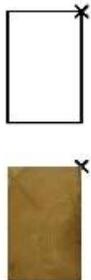
CARA INFERIOR (D)



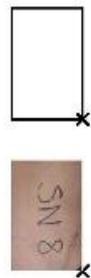
CARA POSTERIOR (B)



TESTA DCHA



TESTA IZQ



\*Ag = Nudo agrupado  
Ar = Nudo de anísia

DATOS GENERALES	
Dimensiones b x h x L (mm)	144 x 216 x 4500
Peso (kg)	78,70
Especie	Pino silvestre
Nudos (mm)	Cara > 146 Canto > 96
Longitud de fendas (mm)	> 1000
Gemas (mm)	> 1485
Ateraciones biológicas	-
Bolsa de resina (mm)	> 330
Clasificación visual norma UNE 56545	Rechazo

CARACTERIZACIÓN DE LA MADERA	
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	561,53
Contenido de humedad (%)	7,06
Flexión	Perpendicular a la fibra
	Paralela a la fibra
Compresión	Perpendicular a la fibra
	Paralela a la fibra
Clase resistente según UNE-EN 339	-

DEFECTOS (mm)			
1. 60 ; (772, 144, 188) Ar	16. 69 ; (2875, 106, 0) Ar	31. 92 ; (1793, 143, 153)	46. 98 ; (3192, 92, 216) Ar
2. 53 ; (1127, 144, 27)	17. 78 ; (3161, 46, 0) Ar	33. 32 ; (2790, 140, 126)	47. 100 ; (3472, 81, 216)
3. 19 ; (2056, 144, 106)	18. 52 ; (4210, 29, 0) Ar	34. 143 ; (3625, 140, 73)	
4. 45 ; (2432, 144, 151)	19. y 20. (32 + 87) ; (44, 152, 101) (160, 152, 56)	35. 81 ; (3767, 140, 140)	
5. 67 ; (2573, 144, 153)	Ag y 20. Ar	36. 48 ; (3974, 140, 136)	
6. 50 ; (3644, 144, 169)	21. y 22. (24 + 41) ; (266, 152, 116) (376, 152, 109) Ag	37. 33 ; (3314, 140, 118)	
7. 55 ; (3808, 144, 149)	23. y 24. (26 + 114) ; (534, 154, 184) (596, 154, 58)	38. 104 ; (615, 95, 216) Ar	
8. 96 ; (4024, 144, 48) Ar	Ag y 24. Ar	40. 63 ; (920, 48, 216)	
9. 75 ; (4255, 144, 134)	25. 19 ; (700, 152, 176) Ar	41. y 42. (109 + 33) ; (1104, 90, 216) (1250, 17, 216)	
10. 37 ; (4449, 144, 192)	26. 81 ; (728, 152, 40)	Ag y Ar	
11. 55 ; (378, 99, 0)	27. 42 ; (886, 148, 174)	43. y 44. (64 + 33) ; (1792, 46, 216) (1812, 115, 216)	
12. y 13. (66 + 48) ; (1710, 109, 0) (1814, 32, 0) Ag	28. 32 ; (1056, 146, 167)	Ag y 44. Ar	
y 12. Ar	29. 136 ; (1278, 144, 68) Ar	45. 17 ; (3008, 21, 216)	
15. 49 ; (2494, 47, 0) Ar			
Fendas	-		
Desviación de las fibras	3,20%		
Gemas	-		
Médula	-		
Observaciones	14. Agujero (21 x 4)	32. Agujero (8 x 8)	
	30. Bolsa de resina (81 x 30)	39. Bolsa de resina (114 x 21)	