



ugr

Universidad  
de Granada

# ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN UNIVERSIDAD DE GRANADA

---

## Refuerzo de vigas de madera antigua mediante CFRP Ensayos a flexión

Iván Jiménez Rubio

Proyecto Final de Grado  
Diciembre 2016





# Refuerzo de vigas de madera antigua mediante CFRP Ensayos a flexión

Proyecto Final de Grado  
Realizado por  
**Iván Jiménez Rubio**

Tutores  
**Francisco José Rescalvo Fernández**  
Departamento de Física Aplicada  
**Ignacio Valverde Palacios**  
Departamento de Construcciones Arquitectónicas  
**Antolino Gallego Molina**  
Departamento de Física Aplicada

**Granada, Diciembre 2016**





D. Francisco José Rescalvo Fernández, Investigador del Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Granada, D. Ignacio Valverde Palacios, Profesor del Departamento de Construcciones Arquitectónicas 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. Iván Jiménez Rubio.

Informan:

Que el presente trabajo titulado:

“Refuerzos de madera antigua mediante CFRP. Ensayos a flexión.”,

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

Granada, a 22 de Noviembre de 2016

Fdo.

Francisco José Rescalvo Fernández

Ignacio Valverde Palacios

Antolino Gallego Molina



---

# Refuerzo de vigas de madera antigua mediante CFRP Ensayos a flexión

---

## Resumen

Actualmente existe un gran interés por la conservación del patrimonio histórico y cultural. Para conseguirlo, es necesario aplicar técnicas de rehabilitación que garanticen la calidad y capacidad portante de los materiales con una alta durabilidad. En muchas ocasiones la sustitución de un elemento se considera inviable, ya sea técnica o económicamente. Es por esto por lo que surge la necesidad de investigar en el marco de la rehabilitación con sistemas de refuerzo alternativos al acero, mayoritariamente usado en la actualidad en el caso de estructuras de madera.

Los materiales compuestos como el CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) son muy usados en ciertos sectores industriales debido a su alta resistencia y baja densidad. En el ámbito de la construcción se han comenzado a usar en los últimos años. Su uso se ha centrado principalmente en el refuerzo de estructuras de hormigón, siendo muy limitados los casos de refuerzo en estructuras de madera.

Por lo tanto, se hace necesario un estudio profundo del comportamiento de los refuerzos de CFRP en madera, debido a que muchas de las estructuras que en el presente se califican como no recuperables en un futuro podrían llegar a rehabilitarse, suponiendo un ahorro considerable frente al coste que supondría una sustitución total del elemento. Asimismo, se mantiene el llamado valor por lo auténtico, al que tanta consideración se tiene en la rehabilitación arquitectónica.

El estudio se ha llevado a cabo con la colaboración de las empresas DÁVILA RESTAURACIÓN DE MONUMENTOS S.L., SIKA S.A.U. Y DRIZORO S.A.U. En este proyecto se presenta la aplicación de diferentes refuerzos de fibra de carbono en vigas de madera antigua pequeñas (de 1,3 m de longitud), con el objetivo de mejorar o recuperar la capacidad portante del elemento. Se describe el proceso de elaboración y la metodología del ensayo. Se analiza el comportamiento mecánico de forma pormenorizada de los distintos tipos de refuerzo, así como su aportación de resistencia al elemento base y la caracterización de los varios modos de fallo. Se compararon entre sí los diferentes refuerzos, en base a su coste económico, mejora en resistencia, rigidez y ductilidad.



# Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mis tutores Francisco Rescalvo por haberme ayudado y enseñado tanto durante el Proyecto, a Ignacio Valverde por su ayuda con los materiales y la maquinaria del laboratorio y a Antolino Gallego por haber confiado en mí para este Proyecto.

A todos los compañeros del grupo ADIME: Elías, Chihab, Elisabet, David, Jesús, Samuel y Antonio. Gracias por vuestro compañerismo.

A mis familiares y amigos, por motivarme cada día y prestarme ayuda inmediata cuando la he necesitado.

Doy las gracias en especial a mis padres, sin su trabajo y esfuerzo diario yo nunca podría haber tenido esta oportunidad.

Por último, agradezco a mi hermana Marta el apoyo y la madurez que ha mostrado



# Índice

<b>Resumen .....</b>	<b>i</b>
Índice i	
Índice de Figuras .....	v
Índice de Tablas.....	x
<b>Capítulo 1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1.    Motivación .....	1
1.2.    Objetivos .....	1
1.2.1.  Objetivos generales del proyecto de investigación.....	1
1.2.2.  Objetivos específicos de este PFG.....	2
1.3.    Estructura y alcance del Proyecto Fin de Grado.....	2
1.4.    Hipótesis de partida.....	3
<b>Capítulo 2. Descripción de probetas.....</b>	<b>5</b>
2.1.    Madera: Propiedades .....	5
2.1.1.  Introducción general de la madera .....	5
2.1.2.  Características físicas y mecánicas de la madera.....	6
2.1.3.  Normativa de aplicación a las muestras .....	9
2.1.4.  Comportamiento mecánico de la madera.....	9
2.1.5.  Vigas de madera de este proyecto. Características y origen.....	13
2.2.    Refuerzos: Propiedades .....	17
2.2.1.  Introducción al material compuesto de fibra de carbono .....	17
2.2.2.  Laminado.....	21
2.2.3.  Tejido.....	21
2.2.4.  Productos comerciales usados en este Proyecto .....	22
2.3.    Matriz de ensayo.....	25
2.3.1.  Descripción de los refuerzos.....	26
2.3.2.  Asignación de los refuerzos a las vigas.....	33
2.3.3.  Fecha del refuerzo y fecha del ensayo.....	35
2.4.    Elaboración .....	36
2.4.1.  Elaboración de los refuerzos con laminado.....	36
2.4.2.  Elaboración de los refuerzos con tejido.....	37
2.4.3.  Elaboración de soluciones mixtas .....	38
2.4.4.  Tiempos de elaboración .....	39
2.4.5.  Datos económicos de elaboración.....	40
<b>Capítulo 3. Descripción del ensayo e instrumentación .....</b>	<b>43</b>
3.1.    Equipos y maquinaria para los ensayos .....	43
3.2.    Instrumentación con galgas extensométricas.....	44
3.3.    Descripción del ensayo .....	46

<b>Capítulo 4. Resultados y análisis .....</b>	<b>49</b>
4.1.    Parámetros analizados en cada viga.....	49
4.2.    Resultados individualizados de cada viga .....	52
4.2.1.  NR .....	52
4.2.2.  LR-S-P.....	56
4.2.3.  LR-S-F.....	61
4.2.4.  LR-D-P.....	65
4.2.5.  LR-D-F.....	69
4.2.6.  WLR-S.....	73
4.2.7.  WLR-D-U.....	77
4.2.8.  WLR-D-B.....	81
4.2.9.  WR-S.....	85
4.2.10.  WR-D-U.....	89
4.2.11.  WR-D-B.....	93
4.3.    Comparación y discusión por grupos.....	97
4.3.1.  NR .....	97
4.3.2.  LR-S-P.....	98
4.3.3.  LR-S-F.....	99
4.3.4.  LR-D-P.....	100
4.3.5.  LR-D-F.....	101
4.3.6.  WLR-S.....	102
4.3.7.  WLR-D-U.....	103
4.3.8.  WLR-D-B.....	104
4.3.9.  WR-S.....	105
4.3.10.  WR-D-U.....	106
4.3.11.  WR-D-B.....	107
4.4.    Comparación y discusión entre distintos grupos.....	108
4.4.1.  Resumen de resultados promedios por grupo.....	109
4.4.2.  Resumen de modos de fallo .....	110
4.4.3.  Comparación de deformaciones.....	111
4.4.4.  Comparación de la ductilidad .....	113
4.4.5.  Comparación de los resultados de carga y tensión por vigas.....	115
<b>Capítulo 5. Conclusiones.....</b>	<b>117</b>
<b>Anexo I. Fichas técnicas de las vigas ensayadas.....</b>	<b>A-0</b>







# Índice de Figuras

<b>Figura 1.1.</b> Refuerzo de puente de Sins con láminas de material compuesto de fibra de carbono [3].	3
<b>Figura 1.2.</b> Deslaminación sufrida entre una viga de madera y un refuerzo de CFRP.....	4
<b>Figura 2.1.</b> Corte transversal de un tronco. Partes que conforman una sección de madera.....	5
<b>Figura 2.2.</b> Corte transversal de un tronco. Direcciones en las cuales podemos considerar a la madera como un material ortótropo. ....	6
<b>Figura 2.3.</b> Ejemplo de la tendencia de varias propiedades mecánicas de la madera con la variación del ángulo de inclinación de las fibras [15]. ....	7
<b>Figura 2.4.</b> Variación de la resistencia a compresión paralela a las fibras frente a la humedad de la madera (coníferas) [15]. ....	7
<b>Figura 2.5.</b> Fotografía de una de las vigas sin reforzar usadas en este proyecto. ....	8
<b>Figura 2.6.</b> Fotografía del fallo por cortante de una de las vigas ensayadas. ....	8
<b>Figura 2.7.</b> Modelo elástico plástico de Bazan [15]. ....	10
<b>Figura 2.8.</b> Modelo elástico-plástico simplificado (cuando $m=0$ ) [15]. ....	11
<b>Figura 2.10.</b> Numeración en la testa derecha de una viga pequeña. ....	13
<b>Figura 2.11.</b> Esquema de las dimensiones y origen de coordenadas de las vigas. ....	13
<b>Figura 2.12.</b> Ejecución de un refuerzo de forjado de hormigón armado mediante CFRP laminado colocado en la parte inferior de la vigueta [24]. ....	21
<b>Figura 2.13.</b> Ejecución de un refuerzo de forjado mediante CFRP en forma de tejido, en un elemento cilíndrico [24]. ....	21
<b>Figura 2.14.</b> Arriba: representación de una viga con los extremos empotrados. Abajo: disposición del refuerzo con respecto a la longitud total de la viga. ....	26
<b>Figura 2.15.</b> Fotografía de una viga sin reforzar. ....	26
<b>Figura 2.16.</b> Disposición de los refuerzos con laminado inferior. (Medidas en milímetros). ....	27
<b>Figura 2.17.</b> Fotografía de una viga con el refuerzo LR-S-P. ....	27
<b>Figura 2.18.</b> Fotografía de una viga con el refuerzo LR-D-P. ....	28
<b>Figura 2.19.</b> Fotografía de una viga con el refuerzo LR-S-F. ....	28
<b>Figura 2.20.</b> Fotografía de una viga con el refuerzo LR-D-F. ....	29
<b>Figura 2.21.</b> Disposición de los refuerzos con tejido. (Medidas en milímetros). ....	29
<b>Figura 2.22.</b> Fotografía de una viga con el refuerzo WR-S. ....	30
<b>Figura 2.23.</b> Fotografía de una viga con el refuerzo WR-D-U. ....	30
<b>Figura 2.24.</b> Fotografía de una viga con el refuerzo WR-D-B. ....	30
<b>Figura 2.25.</b> Disposición de los refuerzos mixtos. (Medidas en milímetros). ....	31
<b>Figura 2.26.</b> Fotografía de una viga con el refuerzo WLR-S. ....	31
<b>Figura 2.27.</b> Fotografía de una viga con el refuerzo WLR-D-U. ....	32
<b>Figura 2.28.</b> Fotografía de una viga con el refuerzo WR-D-B. ....	32
<b>Figura 2.29.</b> Fotografía de una viga a la cual se le ha aplicado la primera capa de resina. ....	36
<b>Figura 2.30.</b> Dosificador usado para impregnar de resina el laminado. ....	37
<b>Figura 2.31.</b> Colocación de tejido unidireccional de SIKA S.A.U sobre una de las vigas. ....	38
<b>Figura 2.32.</b> Proceso de elaboración de los refuerzos con CFRP. ....	39
<b>Figura 2.33.</b> Gráfico de tiempos de elaboración de los tipos de refuerzo en tanto por ciento, normalizados al refuerzo LR-S-P. ....	40

<b>Figura 2.34.</b> Gráfico del coste de los materiales empleados en la elaboración de cada grupo en tantos por ciento, normalizados al refuerzo LR-S-P. ....	41
<b>Figura 3.1.</b> Montaje completo antes de un ensayo a flexión de una viga reforzada.....	44
<b>Figura 3.2.</b> Esquema de la relación entre los distintos equipos para la realización de los ensayos.....	44
<b>Figura 3.3.</b> Modelo de galga de extensimetría 10/120 LY41-2L-0,5M de HBM usada en este Proyecto. Cotas en mm.....	45
<b>Figura 3.4.</b> Esquema de la disposición de las galgas en la sección central de una viga para ensayar. Donde L es la longitud de la viga, b el ancho de la base, y h la altura. ....	46
<b>Figura 3.6.</b> Esquema de la disposición del ensayo. Distancias en mm.....	47
<b>Figura 3.7.</b> Izquierda: fotografía del apoyo central entre los apoyos laterales inferiores desmontados de la prensa. Derecha: esquema de un apoyo inferior y la protección contra hundimiento.....	47
<b>Figura 4.1.</b> Distribución de tensiones en una sección rectangular a flexión simple.....	49
<b>Figura 4.2.</b> Esquemas de cortante de cortadura (a la izquierda), y cortante de deslizamiento (a la derecha). ....	49
<b>Figura 4.3.</b> Esquema de flecha y del hundimiento producido tras un ensayo a flexión a tres puntos. ....	51
<b>Figura 4.4.</b> Modelos de fallo de las vigas ensayadas [3].....	51
<b>Figura 4.5.</b> Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga NR-1.....	52
<b>Figura 4.6.</b> Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga NR-1. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D. ....	53
<b>Figura 4.7.</b> Rotura de la viga NR-1.....	53
<b>Figura 4.8.</b> Rotura de la viga NR-2.....	54
<b>Figura 4.9.</b> Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga NR-3.....	54
<b>Figura 4.10.</b> Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga NR-3. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D. ....	54
<b>Figura 4.11.</b> Rotura de la viga NR-3.....	55
<b>Figura 4.12.</b> Gráfica Carga- Tiempo del ensayo de la viga NR-4.....	55
<b>Figura 4.13.</b> Rotura de la viga NR-4.....	56
<b>Figura 4.14.</b> Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga LR-S-P-1. ....	56
<b>Figura 4.15.</b> Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga LR-S-P-1. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D. ....	57
<b>Figura 4.16.</b> Rotura de la viga LR-S-P-1. ....	57
<b>Figura 4.17.</b> Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga LR-S-P-2. ....	58
<b>Figura 4.18.</b> Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga LR-S-P-2. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D. ....	58
<b>Figura 4.19.</b> Rotura de la viga LR-S-P-2. ....	58
<b>Figura 4.20.</b> Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga LR-S-P-3. ....	59
<b>Figura 4.21.</b> Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga LR-S-P-3. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D. ....	59
<b>Figura 4.22.</b> Rotura de la viga LR-S-P-3. ....	60
<b>Figura 4.23.</b> Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga LR-S-P-4. ....	60
<b>Figura 4.24.</b> Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga LR-S-P-4. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D. ....	60
<b>Figura 4.25.</b> Rotura de la viga LR-S-P-4. ....	61
<b>Figura 4.26.</b> Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga LR-S-F-1. ....	61
<b>Figura 4.27.</b> Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga LR-S-F-1. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D. ....	62

<b>Figura 4.28.</b> Rotura de la viga LR-S-F-1. ....	62
<b>Figura 4.29.</b> Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga LR-S-F-2. ....	63
<b>Figura 4.30.</b> Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga LR-S-F-2. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D. ....	63
<b>Figura 4.31.</b> Rotura de la viga LR-S-F-2. ....	63
<b>Figura 4.32.</b> Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga LR-S-F-3. ....	64
<b>Figura 4.33.</b> Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga LR-S-F-3. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D. ....	64
<b>Figura 4.34.</b> Rotura de la viga LR-S-F-3. ....	65
<b>Figura 4.35.</b> Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga LR-D-P-1. ....	65
<b>Figura 4.36.</b> Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga LR-P-D-1. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D. ....	66
<b>Figura 4.37.</b> Rotura de la viga LR-D-P-1. ....	66
<b>Figura 4.38.</b> Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga LR-D-P-2. ....	67
<b>Figura 4.39.</b> Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga LR-P-D-2. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D. ....	67
<b>Figura 4.40.</b> Rotura de la viga LR-D-P-2. ....	67
<b>Figura 4.41.</b> Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga LR-D-P-3. ....	68
<b>Figura 4.42.</b> Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga LR-P-D-3. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D. ....	68
<b>Figura 4.43.</b> Rotura de la viga LR-D-P-3. ....	69
<b>Figura 4.44.</b> Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga LR-D-F-1. ....	69
<b>Figura 4.45.</b> Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga LR-D-F-1. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D. ....	70
<b>Figura 4.46.</b> Rotura de la viga LR-D-F-1. ....	70
<b>Figura 4.47.</b> Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga LR-D-F-2. ....	71
<b>Figura 4.48.</b> Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga LR-D-F-2. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D. ....	71
<b>Figura 4.49.</b> Rotura de la viga LR-D-F-2. ....	71
<b>Figura 4.50.</b> Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga LR-D-F-3. ....	72
<b>Figura 4.51.</b> Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga LR-D-F-3. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D. ....	72
<b>Figura 4.52.</b> Rotura de la viga LR-D-F-3. ....	73
<b>Figura 4.53.</b> Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga WLR-S-1. ....	74
<b>Figura 4.54.</b> Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga WLR-S-1. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D. ....	74
<b>Figura 4.55.</b> Rotura de la viga WLR-S-1. ....	74
<b>Figura 4.56.</b> Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga WLR-S-2. ....	75
<b>Figura 4.57.</b> Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga WLR-S-2. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D. ....	75
<b>Figura 4.58.</b> Rotura de la viga WLR-S-2. ....	76
<b>Figura 4.59.</b> Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga WLR-S-3. ....	76
<b>Figura 4.60.</b> Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga WLR-S-3. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D. ....	76
<b>Figura 4.61.</b> Rotura de la viga WLR-S-3. ....	77

<b>Figura 4.62.</b> Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga WLR-D-U-1. ....	77
<b>Figura 4.63.</b> Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga WLR-D-U-1. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D. ....	78
<b>Figura 4.64.</b> Rotura de la viga WLR-D-U-1. ....	78
<b>Figura 4.65.</b> Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga WLR-D-U-2. ....	79
<b>Figura 4.66.</b> Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga WLR-D-U-2. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D. ....	79
<b>Figura 4.67.</b> Rotura de la viga WLR-D-U-2. ....	80
<b>Figura 4.68.</b> Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga WLR-D-U-3. ....	80
<b>Figura 4.69.</b> Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga WLR-D-U-3. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D. ....	80
<b>Figura 4.70.</b> Rotura de la viga WLR-D-U-3. ....	81
<b>Figura 4.71.</b> Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga WLR-D-B-1. ....	82
<b>Figura 4.72.</b> Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga WLR-D-B-1. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D. ....	82
<b>Figura 4.73.</b> Rotura de la viga WLR-D-B-1. ....	83
<b>Figura 4.74.</b> Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga WLR-D-B-2. ....	83
<b>Figura 4.75.</b> Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga WLR-D-B-2. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D. ....	83
<b>Figura 4.76.</b> Rotura de la viga WLR-D-U-2. ....	84
<b>Figura 4.77.</b> Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga WLR-D-B-3. ....	84
<b>Figura 4.78.</b> Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga WLR-D-B-3. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D. ....	85
<b>Figura 4.79.</b> Rotura de la viga WLR-D-U-3. ....	85
<b>Figura 4.80.</b> Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga WR-S-1. ....	86
<b>Figura 4.81.</b> Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga WR-S-1. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D. ....	86
<b>Figura 4.82.</b> Rotura de la viga WR-S-1. ....	87
<b>Figura 4.83.</b> Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga WR-S-2. ....	87
<b>Figura 4.84.</b> Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga WR-S-2. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D. ....	87
<b>Figura 4.85.</b> Rotura de la viga WR-S-2. ....	88
<b>Figura 4.86.</b> Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga WR-S-3. ....	88
<b>Figura 4.87.</b> Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga WR-S-3. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D. ....	88
<b>Figura 4.88.</b> Rotura de la viga WR-S-3. ....	89
<b>Figura 4.89.</b> Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga WR-D-U-1. ....	89
<b>Figura 4.90.</b> Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga WR-D-U-1. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D. ....	90
<b>Figura 4.91.</b> Rotura de la viga WR-D-U-1. ....	90
<b>Figura 4.92.</b> Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga WR-D-U-2. ....	91
<b>Figura 4.93.</b> Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga WR-D-U-2. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D. ....	91
<b>Figura 4.94.</b> Rotura de la viga WR-D-U-2. ....	92
<b>Figura 4.95.</b> Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga WR-D-U-3. ....	92

<b>Figura 4.96.</b> Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga WR-D-U-3. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D. ....	92
<b>Figura 4.97.</b> Rotura de la viga WR-D-U-3. ....	93
<b>Figura 4.98.</b> Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga WR-D-B-1. ....	93
<b>Figura 4.99.</b> Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga WR-D-B-1. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D. ....	94
<b>Figura 4.100.</b> Rotura de la viga WR-D-B-1. ....	94
<b>Figura 4.101.</b> Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga WR-D-B-2. ....	95
<b>Figura 4.102.</b> Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga WR-D-B-2. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D. ....	95
<b>Figura 4.103.</b> Rotura de la viga WR-D-B-2. ....	95
<b>Figura 4.104.</b> Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga WR-D-B-3. ....	96
<b>Figura 4.105.</b> Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga WR-D-B-3. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D. ....	96
<b>Figura 4.106.</b> Rotura de la viga WR-D-B-3. ....	97
<b>Figura 4.107.</b> Carga máxima de las vigas NR. Línea roja discontinua: valor medio. ....	98
<b>Figura 4.108.</b> Carga máxima de las vigas LR-S-P. Línea verde continua: valor medio del grupo. Línea roja discontinua: valor medio de las vigas sin refuerzo. ....	99
<b>Figura 4.109.</b> Carga máxima de las vigas LR-S-F. Línea verde continua: valor medio del grupo. Línea roja discontinua: valor medio de las vigas sin refuerzo. ....	100
<b>Figura 4.110.</b> Carga máxima de las vigas LR-D-P. Línea verde continua: valor medio del grupo. Línea roja discontinua: valor medio de las vigas sin refuerzo. ....	101
<b>Figura 4.111.</b> Carga máxima de las vigas LR-D-F. Línea verde continua: valor medio del grupo. Línea roja discontinua: valor medio de las vigas sin refuerzo. ....	102
<b>Figura 4.112.</b> Carga máxima de las vigas WLR-S. Línea verde continua: valor medio del grupo. Línea roja discontinua: valor medio de las vigas sin refuerzo. ....	103
<b>Figura 4.113.</b> Gráfica de carga de las vigas WLR-D-U. Verde: valor medio del grupo. Rojo: valor medio de las vigas sin refuerzo. ....	104
<b>Figura 4.114.</b> Carga máxima de las vigas WLR-D-B. Línea verde continua: valor medio del grupo. Línea roja discontinua: valor medio de las vigas sin refuerzo. ....	105
<b>Figura 4.115.</b> Carga máxima de las vigas WR-S. Línea verde continua: valor medio del grupo. Línea roja discontinua: valor medio de las vigas sin refuerzo. ....	106
<b>Figura 4.116.</b> Carga máxima de las vigas WR-D-U. Línea verde continua: valor medio del grupo. Línea roja discontinua: valor medio de las vigas sin refuerzo. ....	107
<b>Figura 4.117.</b> Gráfica de carga de las vigas WR-D-B. Verde: valor medio del grupo. Rojo: valor medio de las vigas sin refuerzo. ....	108
<b>Figura 4.118.</b> Porcentaje de mejora del MOR de cada grupo de vigas con respecto a la media de la carga máxima de las vigas sin reforzar. Gris: SIKA S.A.U. Verde: DRIZORO S.A.U. Contorno negro continuo: laminado completo. Contorno negro discontinuo: laminado parcial. Trama rayada: tejido unidireccional. Trama a cuadros: tejido bidireccional. ....	110
<b>Figura 4.119.</b> Comparación entre la galga C de una viga sin refuerzo, una con laminado de ancho parcial y otra con laminado de ancho completo de la casa SIKA S.A.U. ....	112
<b>Figura 4.120.</b> Comparación entre la galga C de una viga sin refuerzo, una con laminado de ancho parcial y otra con laminado de ancho completo de la casa DRIZORO S.A.U. ....	112
<b>Figura 4.121.</b> Gráfico de resultados de MOR de todas las vigas ensayadas y MOR medio por grupos en kN. Gris: SIKA S.A.U. Verde: DRIZORO S.A.U. Contorno negro continuo: laminado completo. Contorno negro discontinuo: laminado parcial. Trama rayada: tejido unidireccional. Trama a cuadros: tejido bidireccional. ....	116

# Índice de Tablas

<b>Tabla 2.1.</b> Principales modos de fallo de la madera a flexión simple [15].	12
<b>Tabla 2.2.</b> Listado de las vigas y sus dimensiones [2].	14
<b>Tabla 2.3.</b> Listado de volúmenes, pesos y densidades [2].	15
<b>Tabla 2.4.</b> Resultado de la clasificación visual de las 51 vigas analizadas según norma UNE EN 56544:2010 [2].	16
<b>Tabla 2.5.</b> Características de las vigas añadidas.	17
<b>Tabla 2.6.</b> Características de los tres tipos de fibra de carbono existentes en la actualidad.	18
<b>Tabla 2.7.</b> Valores de módulo de elasticidad, tensión máxima, deformación máxima y densidad de distintos tipos de fibra.	18
<b>Tabla 2.8.</b> Clasificación de diferentes matrices usadas en materiales compuestos [22].	19
<b>Tabla 2.9.</b> Propiedades de las matrices más comunes en FRP [23]. PEEK es un producto comercial ICL. PPS es un producto comercial <i>Phillips Petroleum</i> .	20
<b>Tabla 2.10.</b> Propiedades de los laminados de SIKA S.A.U. [25].	22
<b>Tabla 2.11.</b> Propiedades de los laminados de DRIZORO S.A.U. [24].	23
<b>Tabla 2.12.</b> Propiedades del tejido de SIKA S.A.U. [25].	23
<b>Tabla 2.13.</b> Propiedades del tejido de DRIZORO S.A.U. [24].	24
<b>Tabla 2.14.</b> Propiedades físicas y mecánicas de la resina Tipo 1 [25].	24
<b>Tabla 2.15.</b> Propiedades físicas y mecánicas de la resina Tipo 4 [24].	25
<b>Tabla 2.16.</b> Datos técnicos de la resina de imprimación [24].	25
<b>Tabla 2.15.</b> Características y nomenclatura de los tipos de refuerzo.	33
<b>Tabla 2.16.</b> Asignación de los refuerzos a las vigas.	34
<b>Tabla 2.17.</b> Fecha de refuerzo y de ensayo de cada viga.	35
<b>Tabla 2.18.</b> Tiempos de elaboración de cada refuerzo en porcentaje, normalizados al refuerzo LR-S-P.	40
<b>Tabla 2.19.</b> Coste medio de los materiales empleados en la elaboración de cada refuerzo en porcentaje, normalizados al refuerzo LR-S-P.	40
<b>Tabla 3.1.</b> Características de las galgas de extensometría 10/120 LY41-2L-0,5M de HBM usadas [26].	45
<b>Tabla 4.1.</b> Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para la viga NR-1.	52
<b>Tabla 4.2.</b> Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para la viga NR-2.	53
<b>Tabla 4.3.</b> Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para la viga NR-3.	54
<b>Tabla 4.4.</b> Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para la viga NR-4.	55
<b>Tabla 4.5.</b> Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para la viga LR-S-P-1.	56
<b>Tabla 4.6.</b> Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para la viga LR-S-P-2.	57
<b>Tabla 4.7.</b> Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para la viga LR-S-P-3.	59
<b>Tabla 4.8.</b> Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para la viga LR-S-P-4.	60





<b>Tabla 4.35.</b> Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para la viga WR-D-B-3.....	96
<b>Tabla 4.36.</b> Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para las vigas NR, y sus valores medios. ....	97
<b>Tabla 4.37.</b> Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para las vigas LR-S-P y sus valores medios. ....	98
<b>Tabla 4.38.</b> Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para las vigas LR-S-F y sus valores medios.....	99
<b>Tabla 4.39.</b> Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para las vigas LR-D-P y sus valores medios. ....	100
<b>Tabla 4.40.</b> Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para las vigas LR-D-F y sus valores medios. ....	101
<b>Tabla 4.41.</b> Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para las vigas WLR-S y sus valores medios.....	102
<b>Tabla 4.42.</b> Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para las vigas WLR-D-U y sus valores medios.....	103
<b>Tabla 4.43.</b> Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para las vigas WLR-D-B y sus valores medios.....	104
<b>Tabla 4.44.</b> Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para las vigas WR-S y sus valores medios.....	105
<b>Tabla 4.45.</b> Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para las vigas WR-D-U y sus valores medios.....	106
<b>Tabla 4.46.</b> Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para las vigas WR-D-B y sus valores medios. ....	107
<b>Tabla 4.47.</b> Resultados medios de todos los grupos de vigas ensayados. (*) Imposibilidad de realizar la media con todas las vigas del grupo.....	109
<b>Tabla 4.48.</b> Porcentaje de mejora en carga máxima, MOR, MOE, flecha máxima y densidad de la media de cada grupo frente a la media de las vigas sin refuerzo. Rojo: menores mejoras. Verde: mayores mejoras. ....	109
<b>Tabla 4.49.</b> Resultados medios de todos los grupos de vigas ensayados. X: sin deslaminación. DX: con deslaminación.....	111
<b>Tabla 4.50.</b> Resultados medios de MOE de los grupos de vigas. (*) Imposibilidad de realizar la media con todas las vigas del grupo. ....	111
<b>Tabla 4.51.</b> Resultados medios de flecha máxima de los grupos de vigas. (*) Imposibilidad de realizar la media con todas las vigas del grupo.....	113
<b>Tabla 4.52.</b> Gráficas carga-tiempo de todas las vigas NR.....	113
<b>Tabla 4.53.</b> Gráficas carga-tiempo de todas las vigas reforzadas sólo con laminado de SIKA S.A.U.....	114
<b>Tabla 4.54.</b> Gráficas carga-tiempo de todas las vigas reforzadas sólo con laminado de DRIZORO S.A.U. ....	114
<b>Tabla 4.55.</b> Gráficas carga-tiempo de todas las vigas con refuerzos mixtos.....	114
<b>Tabla 4.56.</b> Gráficas carga-tiempo de todas las vigas reforzadas sólo con tejido.....	115
<b>Tabla 4.57.</b> Resultados de carga máxima de todas las vigas ensayadas y carga máxima media por grupos. ....	116





# Capítulo 1. Introducción

## 1.1. Motivación

Este Proyecto Fin de Grado se engloba en un Proyecto de Investigación multidisciplinar en curso llamado REVMAC (*Rehabilitación de vigas de madera mediante refuerzos de material compuesto laminado de fibra de carbono*), financiado por la empresa DÁVILA RESTAURACIÓN DE MONUMENTOS S.L, que tiene como objetivo avanzar en el conocimiento del uso en rehabilitación de refuerzos de materiales compuestos, principalmente CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) [1].

Este tipo de refuerzos están siendo usados principalmente en estructuras de hormigón. Dos empresas especializadas en el sector de la fibra de carbono han colaborado; SIKA S.A.U. y DRIZORO S.A.U., contribuyendo en la investigación con materiales propios para la realización de los refuerzos, como resinas, laminados y tejidos de CFRP.

El Proyecto de Investigación en el que se incluye este Proyecto Fin de Grado plantea realizar un estudio comparativo entre estructuras de madera antigua sin refuerzo y maderas reforzadas con material CFRP. La madera utilizada para los ensayos ha sido extraída por la empresa DÁVILA RESTAURACIÓN DE MONUMENTOS S.L. de las obras de rehabilitación de la cubierta de la Facultad de Derecho de la Universidad de Granada. Esta empresa financia el Proyecto debido a su importante experiencia en rehabilitación de cubiertas de madera de edificios históricos, complementando al grupo de investigación ADIME de la ETS de Ingeniería de Edificación de la Universidad de Granada, con experiencia en material CFRP y ensayos de materiales y estructuras [2].

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivos generales del proyecto de investigación

- Avanzar en el conocimiento mecánico y de fallo 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, desde un punto de vista comparativo entre los diferentes materiales que existen en el mercado.
- Realización de ensayos a flexión de vigas de madera de 1,30 m sin refuerzo y vigas reforzadas con CFRP, aplicando el método de AT para la evaluación en tiempo de real del proceso de daño con especial hincapié en la detección de deslaminaciones 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.

### **1.2.2. Objetivos específicos de este PFG**

El objetivo principal es estudiar el comportamiento de diferentes tipos de refuerzo de CFRP en vigas de madera de 1,30 m sometidas a un esfuerzo de flexión. Para ello, se fijan los siguientes objetivos pormenorizados:

- Elaboración de diferentes tipos de refuerzo de CFRP en vigas de madera y obtención de costes y de tiempos de elaboración.
- Realización de ensayos a flexión de las vigas de madera con y sin refuerzo. Realizar una toma de datos, tanto de carga como de deformaciones.
- Comparación entre resultados de vigas con y sin refuerzo.
- Analizar la diferencia entre diversos tipos de laminado en el refuerzo, atendiendo a la casa comercial y a su ancho con respecto al ancho de la viga.
- Analizar la diferencia entre diferentes tipos de tejido en el refuerzo, atendiendo a la casa comercial y a la trama del propio tejido (unidireccional o bidireccional).
- Estudiar los modos de fallo de las vigas ensayadas.
- Comparar el comportamiento de una alta variedad de tipos de refuerzo para establecer las características mecánicas de cada uno.

### **1.3. Estructura y alcance del Proyecto Fin de Grado**

El Proyecto se estructura en 5 Capítulos y un anexo.

En el Capítulo 1 se incluye la motivación y los objetivos generales y específicos del proyecto, así como una hipótesis de partida.

En el Capítulo 2 se describen las probetas ensayadas, explicando las características y comportamiento de los materiales que las conforman así como el proceso de elaboración.

En el Capítulo 3 se hace una descripción de la metodología de los ensayos y de la instrumentación .

En el Capítulo 4 se presentan y analizan todos los resultados obtenidos de los ensayos y se realiza una comparación entre las vigas de cada grupo y entre los distintos grupos.

En el Capítulo 5 se establecen las conclusiones finales del trabajo.

Por último, se incluye un anexo con las fichas técnicas de cada una de las vigas ensayadas, en las que se presentan tanto resultados de los ensayos como fotos de las mismas tras el ensayo.

## 1.4. Hipótesis de partida

A lo largo de la historia la madera ha sido un material muy empleado en la construcción. Con el objetivo de incrementar o recuperar la capacidad portante de los elementos estructurales de madera, se han ideado diferentes sistemas de refuerzo [3].

Tradicionalmente el refuerzo de estos elementos se ha realizado mediante el aporte de madera con cosido, clavos o tirafondos para aumentar la sección, o con la incorporación de acero para aumentar la resistencia. En vigas de madera, el refuerzo siempre se ha colocado en la zona inferior, pues se pretende eliminar el fallo por tracción. No obstante, algunos autores han estudiado el refuerzo de vigas con acero en los laterales de la viga e incluso en la cara superior [4].

Las principales desventajas que presentan estos tipos de refuerzo son: el aumento del peso que producen en la estructura, el tamaño del refuerzo, que a veces llega a ser tan grande como el propio elemento a reforzar, la susceptibilidad a la corrosión de los elementos metálicos, el tiempo empleado en el refuerzo, las herramientas muchas veces necesarias para reforzar, y las limitaciones que se presentan a la hora de adaptar el refuerzo a formas irregulares.

El uso de las nuevas técnicas de refuerzo mediante materiales compuestos permite realizar refuerzos mucho menos invasivos, y con un aporte despreciable al peso propio de la estructura. La primera intervención importante realizada en madera mediante CFRP fue el puente de Sins (Suiza). Un proyecto llevado a cabo por G. Schwegler y H. Meier en el año 1995 [5] (Figura 1.1).



**Figura 1.1.** Refuerzo de puente de Sins con láminas de material compuesto de fibra de carbono [3].

Actualmente no existe una metodología a seguir a la hora de reforzar estructuras de madera con materiales compuestos, presentándose únicamente una serie de indicaciones poco precisas a seguir. La complejidad de fijar unas pautas en un refuerzo con madera reside en la anisotropía de la misma. Nudos, fendas y otros factores hacen que la previsión del comportamiento de este material sea de mayor complejidad. Aun así, algunos autores han propuesto modelos de cálculo para predecir la capacidad de carga de las vigas reforzadas [6-8].

Un factor determinante en el funcionamiento del refuerzo es el comportamiento de la superficie de unión entre la fibra y la madera [9,10]. En esta superficie se puede producir un fallo llamado deslaminación, en el que el refuerzo pierde su adherencia y se desprende del elemento reforzado en unos valores de tensión muy inferiores a los de rotura del CFRP. En la Figura1.2 se puede observar un fallo por deslaminación. Según el estudio de Dagher

en 1999, si este fallo se evita o controla es posible aumentar la resistencia a flexión en un 100% reforzando las vigas por su cara inferior [11].



**Figura 1.2.** Deslaminación sufrida entre una viga de madera y un refuerzo de CFRP.

La incorporación del refuerzo de CFRP supone un aumento en la rigidez de alrededor de un 30% con una proporción de refuerzo de 0,4% con respecto a la sección según el trabajo de Fiorelli J. [12]. El aumento de la capacidad de carga de las vigas reforzadas depende de la naturaleza y la disposición de los refuerzos, pudiéndose dar incrementos de la capacidad portante de entre un 20 y un 40% en vigas macizas reforzadas con tejido unidireccional de CFRP y resina epoxi [13].



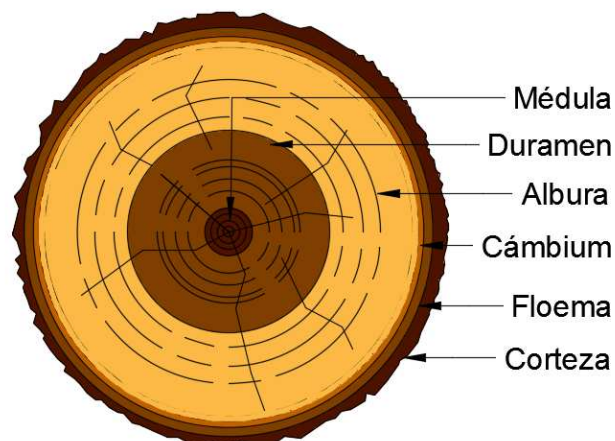
## Capítulo 2. Descripción de probetas

A fin de entender el comportamiento de los materiales utilizados, en este capítulo se va a realizar una descripción de los elementos que componen las probetas ensayadas. La madera, en el Apartado 2.1, y el material compuesto de fibra de carbono, o CFRP por sus siglas en inglés (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) que se desarrolla en el Apartado 2.2. Asimismo, se configuró una matriz de ensayos para este proyecto, en el Apartado 2.3. Por último, en el Apartado 2.4 se atenderá a la elaboración de las probetas en sí.

### 2.1. Madera: Propiedades

#### 2.1.1. Introducción general de la madera

La madera es uno de los recursos naturales más usados por el hombre, y por ello a lo largo de la historia ha sido un material muy comúnmente usado en la construcción. Esto se debe a que la madera tiene un buen comportamiento mecánico gracias a su estructura interna formada por fibras longitudinales de celulosa y una matriz de lignina que las mantiene cohesionadas. De este modo, las fibras se encargan de soportar las tracciones, mientras que la matriz de lignina soporta las compresiones. Se puede definir como un polímero natural que se obtiene del tronco de los árboles. Aunque se debe de saber que dependiendo de la parte del tronco de la que se obtenga la madera, se tienen características muy distintas. Las partes del tronco de un árbol las podemos diferenciar en la Figura 2.1.



**Figura 2.1.** Corte transversal de un tronco. Partes que conforman una sección de madera.

A continuación se explican brevemente desde la parte externa a la interna.

**Corteza:** es la capa exterior del tronco y ramas. Su función es la de proteger al árbol.

**Floema o liber:** tejido conductor que permite el transporte de la savia elaborada y de las sustancias orgánicas. Está asociado con el xilema.

**Cámbium:** la capa delgada de células vivas dentro de la corteza se llama cámbium. Es la parte del árbol que crea madera nueva hacia adentro, y corteza hacia afuera.

**Albura:** el nombre científico para albura es xilema. Esta capa la forman células vivas con vasos conductores de savia en funcionamiento. Es la madera más joven del árbol. Con los años, las capas internas de albura mueren y se convierten en duramen.

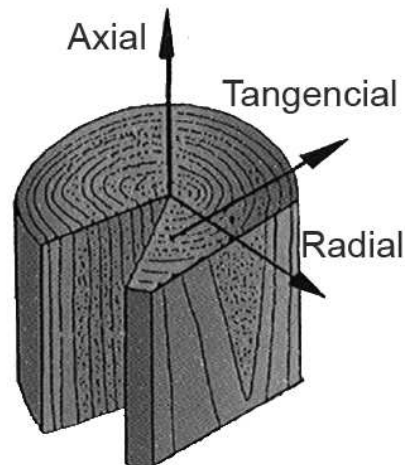
**Duramen:** el duramen es albura muerta en el centro del tronco, pero con vasos llenos de lignina y celulosa. Es la madera más dura del árbol.

**Médula:** la médula es la pequeña zona oscura de células vivas esponjosas justo en el centro del tronco del árbol.

La zona de la que proceda la madera de las probetas puede ser un dato relevante a la hora de comparar resultados.

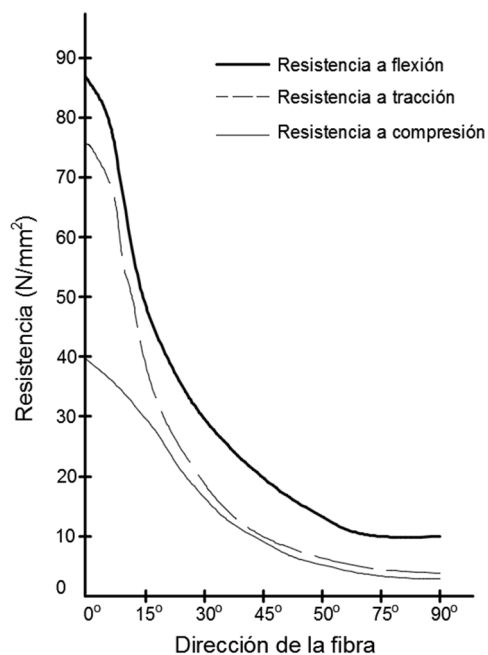
### 2.1.2. Características físicas y mecánicas de la madera

La madera es un material anisótropo y altamente heterogéneo. Esto quiere decir que presenta propiedades físicas y mecánicas diferentes en todas las direcciones que pasan por un punto. No obstante se puede considerar como un material ortótropo en las tres direcciones señaladas en la Figura 2.2.



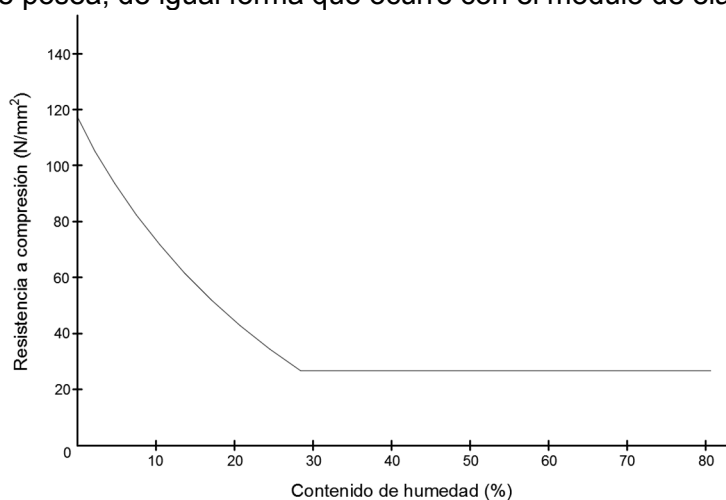
**Figura 2.2.** Corte transversal de un tronco. Direcciones en las cuales podemos considerar a la madera como un material ortótropo.

La dirección axial (dirección de las fibras), la radial, que es perpendicular a la axial, es decir corta transversalmente el tronco, y la dirección tangencial, que es normal a las otras dos. La resistencia a tracción radial es del orden de entre 30 y 70 veces menor que la resistencia a tracción axial. La resistencia a compresión es cuatro veces mayor en la dirección axial que en la radial [14]. Por esto la dirección de la fibra y la dirección de la fuerza aplicada hacen muy distintas las características resistentes, tal y como podemos ver en la Figura 2.3.



**Figura 2.3.** Ejemplo de la tendencia de varias propiedades mecánicas de la madera con la variación del ángulo de inclinación de las fibras [15].

Además, la madera es un material higroscópico, es decir, intercambia humedad dependiendo del medio en el que se encuentre. Este gradiente de humedad tiene como consecuencia una variación de las características físicas y mecánicas de la madera [16] y de su volumen, siendo esto último algo fácilmente apreciable, ya que la madera sufre unas variaciones volumétricas de hasta un 16%, dependiendo de la especie. Como podemos ver en la Figura 2.4, la resistencia de la madera es inversamente proporcional al porcentaje de humedad que posea, de igual forma que ocurre con el módulo de elasticidad.



**Figura 2.4.** Variación de la resistencia a compresión paralela a las fibras frente a la humedad de la madera (coníferas) [15].

Otros aspectos que se han de tener en cuenta a la hora de analizar las características de una muestra de madera, son la presencia de nudos, los cuales hacen variar en diferentes formas la resistencia. Se debe tener en cuenta el estado de salud de la madera (insectos xilófagos, hongos, putrefacción...), y la presencia de defectos físicos que puedan afectar a su resistencia, tales como fendas, oquedades o gemas.

En cuanto a sus características mecánicas, las más relevantes para este proyecto se pueden resumir a:

### **Resistencia a compresión**

En general la madera tiene una alta resistencia a compresión. Para la madera de tipo estructural, los valores oscilan entre los 16 y 23 N/mm<sup>2</sup> (Argüelles et al., 1996). Debido a esto, a lo largo de la historia se han construido elementos como pilares o pares de cubierta de madera.

### **Resistencia a tracción**

En la madera de tipo estructural los valores característicos varían entre 8 y 18 N/mm<sup>2</sup> (Argüelles et al., 1996). En una estructura se pueden encontrar elementos de madera trabajando a tracción, tales como tirantes y pendolones.

### **Resistencia a flexión**

En cuanto a la flexión, la madera tiene una resistencia muy elevada. En madera de coníferas de uso estructural los valores característicos se presentan entre 14 y 30 N/mm<sup>2</sup> [14]. Las vigas y viguetas de madera son elementos estructurales que soportan esfuerzos de flexión. En la Figura 2.5 podemos ver un elemento estructural de madera que trabaja a flexión.



**Figura 2.5.** Fotografía de una de las vigas sin reforzar usadas en este proyecto.

### **Resistencia a cortante**

El esfuerzo cortante origina tensiones tangenciales en la madera. Estas tensiones pueden ser de cortadura, de deslizamiento o de rodadura. Los valores característicos de resistencia a cortante de la madera de tipo estructural están entre 3 y 4 N/mm<sup>2</sup> [14]. El tipo de fallo por cortante es un aspecto muy a tener en cuenta, ya que puede provocar el colapso de una estructura de forma violenta. En la Figura 2.6. se presenta una fotografía de una de las vigas ensayadas en el proyecto, la cual falló por cortante.



**Figura 2.6.** Fotografía del fallo por cortante de una de las vigas ensayadas.

### 2.1.3. Normativa de aplicación a las muestras

En un Proyecto de Fin de Grado anterior, dentro del proyecto general REVMAC, realizado por Ángela Moreno Bazán, y tutorizado por Antolino Gallego Molina y Elisabet Suárez Vargas del Dpto. de Física Aplicada de la Universidad de Granada, se realizó una clasificación y catalogación de la madera empleada en las probetas. La utilización de métodos visuales de la madera está regulada en España a través de la norma UNE-EN 338:2010, donde se clasifican las diferentes resistencias de la madera aserrada [17]. La norma UNE 56544:2011 para la clasificación visual de la madera aserrada de uso estructural [18] y la norma UNE-EN 1912:2012 para la asignación de calidades visuales y especies [19]. A través de la primera, se diferenciaron las maderas en función de la morfología de sus defectos, lo cual viene marcado por la normativa, en sus clases resistentes correspondientes.

También se tuvieron en cuenta el Eurocódigo 5 [20] y el Código Técnico de la Edificación, Documento Básico de Seguridad Estructural para estructuras de madera [21], como normas de cálculo.

### 2.1.4. Comportamiento mecánico de la madera.

El comportamiento mecánico de la madera ha sido configurado generalmente por dos modelos distintos. Estos modelos se definen mediante diagramas tensión-deformación y se diferencian fundamentalmente en que cada uno de ellos atiende a una simplificación diferente [15]. Cada uno de ellos tiene grados de aproximación diferentes. Aun así, todos coinciden en los siguientes aspectos:

#### Comportamiento a tracción

Para el comportamiento a tracción, el modelo más comúnmente aceptado es el elástico-lineal, cuya simplificación es un diagrama rectilíneo con una pendiente constante. ( $E_t$ ), ya que a tracción se puede considerar que la madera no sufre plastificación. De este modo, una vez obtenemos la fuerza máxima antes de la rotura, podemos obtener la tensión máxima.

#### Comportamiento a compresión

Bajo esfuerzos de compresión la madera puede llegar a sufrir plastificación. En el rango elástico el diagrama tiene una pendiente parecida a la que tendría si fuera un esfuerzo a tracción. Aunque no suele ser la misma, ya que los módulos de elasticidad de compresión y tracción son diferentes. Conforme nos alejamos del centro del diagrama, y pasamos el límite elástico, la pendiente sufre una variación continua como se puede ver en los modelos de Bazan (Figura 2.7) y de O'Halloran (Figura 2.9).

#### Módulo de elasticidad

Es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza. Relaciona la tensión según la dirección con las deformaciones sufridas en esa dirección. Es una medida de la tenacidad y la rigidez de un material. Es decir, determina la elasticidad de un material. Se define como la pendiente de la recta que podemos trazar dentro del dominio elástico del diagrama tensión-deformación en el rango elástico.

A continuación se muestran los dos diagramas a los que se les ha hecho referencia.

### 1- Modelo de Bazan

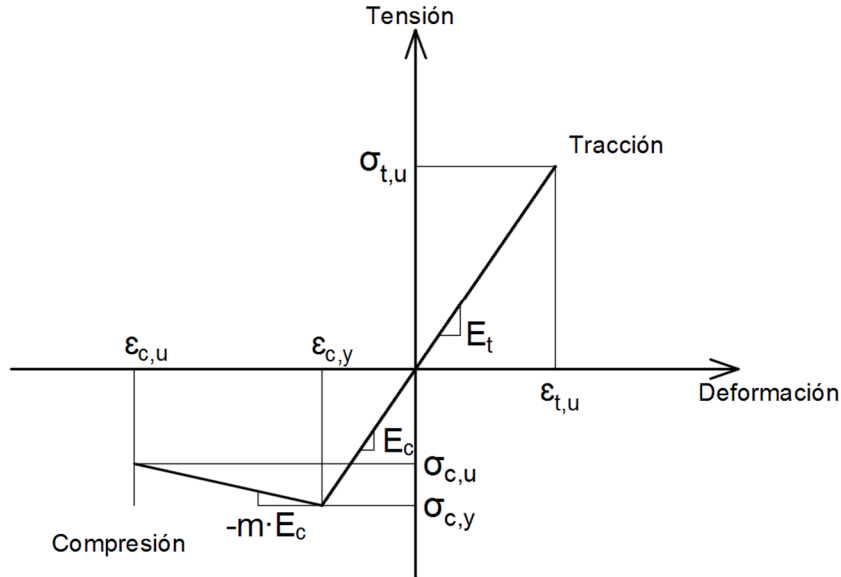


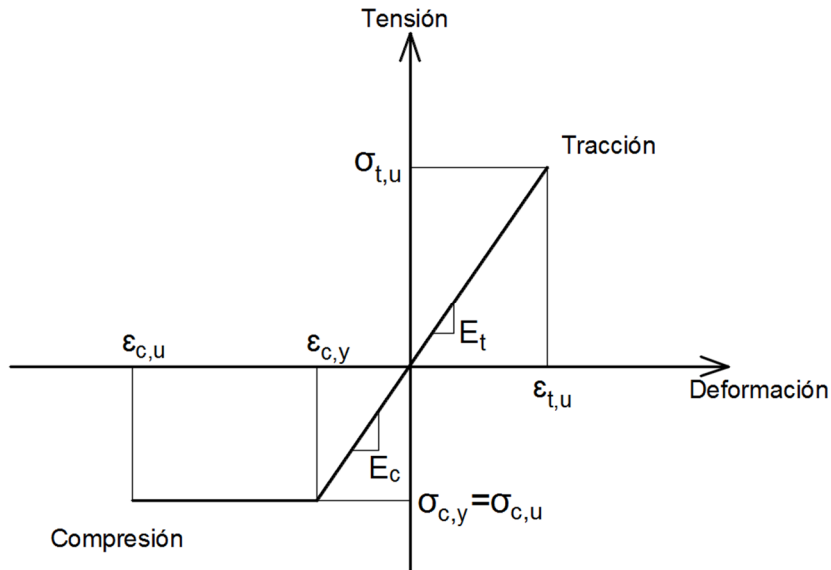
Figura 2.7. Modelo elástico plástico de Bazan [15].

- $E_t$  es el módulo de elasticidad a tracción.
- $E_c$  es el módulo de elasticidad a compresión.
- $\sigma_t$  es la tensión a tracción.
- $\sigma_c$  es la tensión a compresión.
- $\sigma_{t,u}$  es la tensión última a tracción.
- $\sigma_{c,u}$  es la tensión última a compresión.
- $\sigma_{c,y}$  es la tensión límite de plastificación a compresión.
- $\epsilon_t$  es la deformación a tracción.
- $\epsilon_c$  es la deformación a compresión.
- $\epsilon_{c,u}$  es la deformación última a compresión.
- $\epsilon_{t,u}$  es la deformación última a tracción.
- $\epsilon_{c,y}$  es la deformación límite de plastificación a compresión.

Este modelo es una simplificación de lo que realmente ocurre en la realidad. Adquiere así las ventajas que otorga la simplicidad de un diagrama compuesto por rectas. En este diagrama nos encontramos una pendiente negativa. Viene dada por el coeficiente  $m$  y muestra el comportamiento en el dominio plástico, que sólo se da a compresión. Se puede ver en la Figura 2.7 y se define por la expresión analítica:

$$\begin{aligned} \sigma_t &= E_t \cdot \epsilon_t && \text{para } 0 < \epsilon_t \leq \epsilon_{t,u} \\ \sigma_c &= E_c \cdot \epsilon_c && \text{para } \epsilon_{c,y} \leq \epsilon_c < 0 \\ \sigma_c &= \sigma_{c,y} + m \cdot E_c (\epsilon_c - \epsilon_{c,y}) && \text{para } \epsilon_{c,u} \leq \epsilon_c < \epsilon_{c,y} \end{aligned}$$

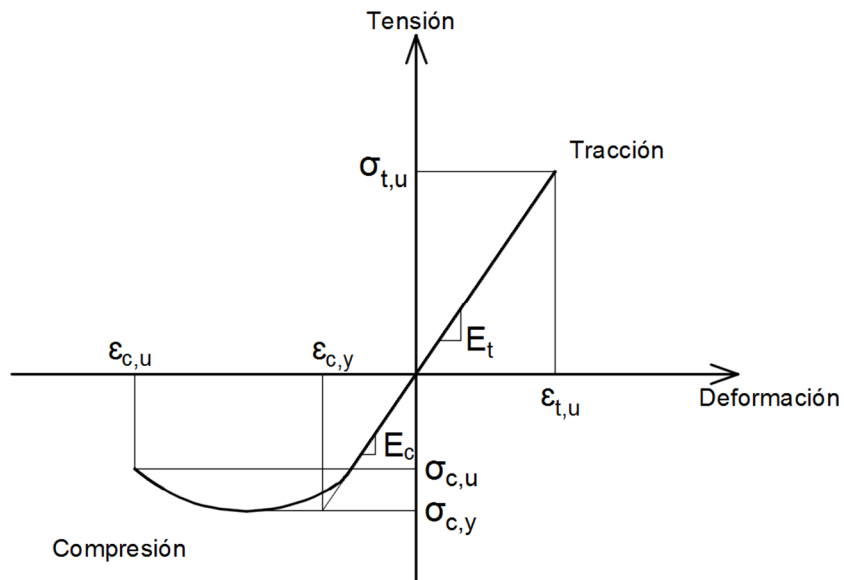
Puede darse el caso de que la pendiente dada por el coeficiente  $m$  sea igual a cero. En este caso se obtiene el llamado modelo elástico plástico simplificado, que se muestra en la Figura 2.8, y se define por la expresión:



**Figura 2.8.** Modelo elástico-plástico simplificado (cuando  $m=0$ ) [15].

$$\begin{aligned} \sigma_t &= E_t \cdot \varepsilon_t && \text{para } 0 < \varepsilon_t \leq \varepsilon_{t,u} \\ \sigma_c &= E_c \cdot \varepsilon_c && \text{para } \varepsilon_{c,y} \leq \varepsilon_c < 0 \\ \sigma_c &= \sigma_c && \text{para } \varepsilon_{c,u} \leq \varepsilon_c < \varepsilon_{c,y} \end{aligned}$$

## 2- Modelo de O'Halloran



**Figura 2.9.** Modelo elástico-plástico de O'Halloran [15].

Es el diagrama que más se ajusta a la realidad del comportamiento de la madera. Como se ve en la Figura 2.9 la rama de las compresiones sufre una variación continua de la pendiente, que continúa en el límite plástico hasta su rotura. Para definir este diagrama se

necesitan dos nuevos parámetros,  $A$  y  $n$ , ambos positivos. Se define por la expresión analítica:

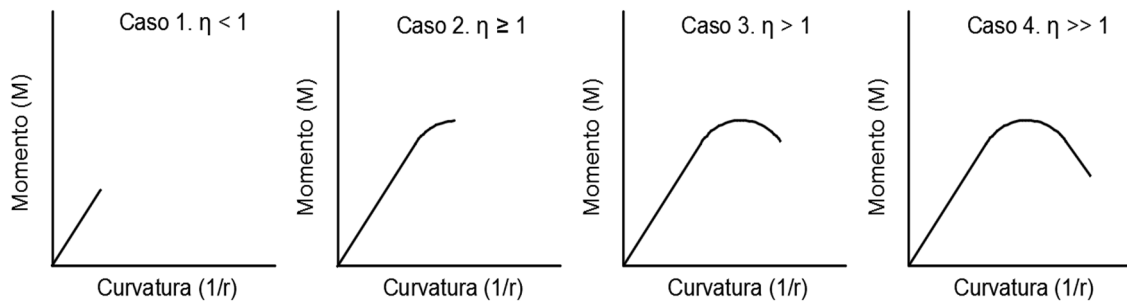
$$\begin{aligned} \sigma_t &= E_t \cdot \varepsilon_t && \text{para } 0 < \varepsilon_t \leq \varepsilon_{t,u} \\ \sigma_c &= E_c \cdot \varepsilon_c && \text{para } \varepsilon_{c,y} \leq \varepsilon_c < 0 \\ \sigma_c &= |A|^{1/n} + E_c \cdot \varepsilon_c && \text{para } \varepsilon_{cu} \leq \varepsilon_c < \varepsilon_{c,y} \end{aligned}$$

### Comportamiento a flexión

El análisis del comportamiento hasta su colapso de un elemento de madera bajo flexión muestra que el modo de fallo depende esencialmente de:

- La relación entre los valores de la resistencia a la tracción y resistencia a la compresión.
- La no linealidad del comportamiento en el estado límite último de la madera a compresión.
- La cantidad de material bajo tensión, un parámetro que es directamente proporcional a la probabilidad de desencadenar un fallo prematuro debido a los defectos localizados.

La Tabla 2.1. muestra los principales modos de fallo de la madera a flexión simple, donde  $\eta$  es la relación entre la resistencia a la tracción y la compresión,  $\sigma_{t,u} / \sigma_{c,u}$ . Se puede afirmar que, para la madera sólida, el tipo más común de fallo se produce cuando el valor límite de la tensión o, para ser más precisos, el valor último de la deformación de la fibra, se alcanza en la zona de tracción, la mayoría de las veces en la presencia de una plastificación de la zona de compresión.



Caso 1. ( $\eta < 1$ ) Rotura frágil en la zona de tensión.

Caso 2. ( $\eta \geq 1$ ) Fallo en la zona de tracción y plastificación en la zona de compresión. La fibra neutra se ve desplazada hacia abajo.

Caso 3. ( $\eta > 1$ ) Fallo en la zona de tracción, pero con más ductilidad debido a la plastificación de la sección transversal.

Caso 4. ( $\eta \gg 1$ ) Fallo en la zona de compresión con gran ductilidad debido a la considerable plastificación de la sección transversal.

**Tabla 2.1.** Principales modos de fallo de la madera a flexión simple [15].



### 2.1.5. Vigas de madera de este proyecto. Características y origen.

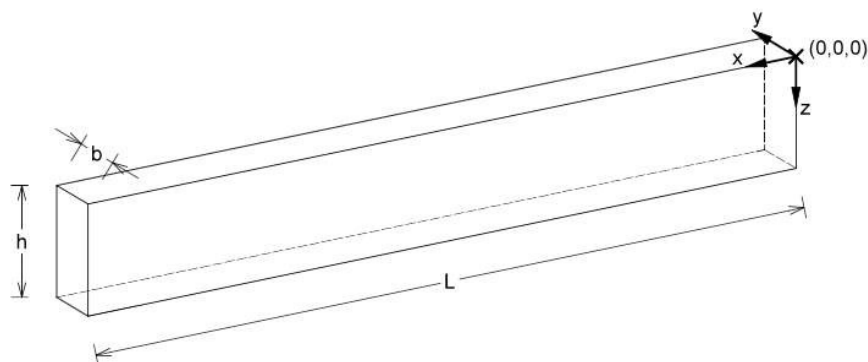
Las vigas utilizadas en los ensayos de este Proyecto proceden de la cubierta de la Facultad de Derecho de la Universidad de Granada. Tras el desmontaje de la cubierta, las vigas fueron acopiadas en una de las naves de la empresa DÁVILA RESTAURACIÓN DE MONUMENTOS S.L. encargada de la obra, protegidas de las inclemencias del tiempo. El personal de la empresa seleccionó las vigas que visualmente se encontraban en mejor estado, y de ellas se extrajeron las vigas de menor tamaño a ensayar.

El tipo de madera se identificó como pino silvestre (*Pinus Sylvestris*), una conífera perteneciente al grupo de las pináceas. Esta madera se caracteriza por ser muy resinosa y tener un buen comportamiento resistente con un peso relativamente bajo en comparación con otras maderas, lo que la hace una de las más usadas en el sector de la construcción.



**Figura 2.10.** Numeración en la testa derecha de una viga pequeña.

Tras aserrar las muestras seleccionadas, se seleccionaron un total de 51 vigas pequeñas con unas dimensiones aproximadas de  $145 \pm 1$  mm de alto,  $75 \pm 2$  mm de ancho y  $1290 \pm 3$  mm de largo, para ser ensayadas a flexión. Se designó cada una con una referencia en la testa derecha, indicando la letra V (de viga) y su número, tal y como se muestra en la Figura 2.10. Posteriormente se tomaron las medidas de todas las vigas, las cuales se muestran en la Tabla 2.2. En el esquema de la Figura 2.11 podemos identificar a que se refieren estas medidas.



**Figura 2.11.** Esquema de las dimensiones y origen de coordenadas de las vigas.

<b>DIMENSIONES DE LAS VIGAS (mm)</b>							
<b>Viga</b>	Alto (h)	Ancho (b)	Largo (L)	<b>Viga</b>	Alto (h)	Ancho (b)	Largo (L)
<b>V-1</b>	146	74	1288	<b>V-27</b>	146	75	1287
<b>V-2</b>	145	75	1288	<b>V-28</b>	145	75	1288
<b>V-3</b>	145	75	1290	<b>V-29</b>	145	75	1289
<b>V-4</b>	146	76	1290	<b>V-30</b>	145	75	1288
<b>V-5</b>	146	76	1288	<b>V-31</b>	144	76	1287
<b>V-6</b>	146	76	1289	<b>V-32</b>	145	74	1288
<b>V-7</b>	145	76	1289	<b>V-33</b>	145	75	1287
<b>V-8</b>	146	76	1288	<b>V-34</b>	145	75	1288
<b>V-9</b>	146	77	1288	<b>V-35</b>	145	75	1288
<b>V-10</b>	146	77	1288	<b>V-36</b>	145	75	1287
<b>V-11</b>	146	76	1287	<b>V-37</b>	145	75	1287
<b>V-12</b>	146	76	1290	<b>V-38</b>	145	75	1288
<b>V-13</b>	145	75	1288	<b>V-39</b>	146	75	1288
<b>V-14</b>	146	75	1287	<b>V-40</b>	145	75	1288
<b>V-15</b>	146	75	1289	<b>V-41</b>	145	75	1287
<b>V-16</b>	145	76	1288	<b>V-42</b>	145	74	1289
<b>V-17</b>	146	75	1289	<b>V-43</b>	144	74	1288
<b>V-18</b>	146	76	1289	<b>V-44</b>	145	75	1288
<b>V-19</b>	145	75	1288	<b>V-45</b>	145	75	1288
<b>V-20</b>	146	76	1287	<b>V-46</b>	145	75	1287
<b>V-21</b>	145	74	1288	<b>V-47</b>	145	75	1288
<b>V-22</b>	145	75	1287	<b>V-48</b>	145	76	1289
<b>V-23</b>	146	76	1288	<b>V-49</b>	145	75	1286
<b>V-24</b>	145	74	1288	<b>V-50</b>	145	75	1288
<b>V-25</b>	146	75	1288	<b>V-51</b>	145	75	1288
<b>V-26</b>	146	76	1287	-	-	-	-

**Tabla 2.2.** Listado de las vigas y sus dimensiones [2].

Además se realizó un cálculo del volumen, el peso y la densidad de cada pieza, siendo los resultados los que se muestran en la Tabla 2.3.

<b>DENSIDAD DE LAS PIEZAS (kg/m<sup>3</sup>)</b>							
<b>Viga</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Peso (kg)</b>	<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Viga</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Peso (kg)</b>	<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>V-1</b>	0,0139	8,9	639,57	<b>V-27</b>	0,0141	9,7	688,30
<b>V-2</b>	0,0140	7,2	514,03	<b>V-28</b>	0,0140	6,4	456,91
<b>V-3</b>	0,0140	7,2	513,23	<b>V-29</b>	0,0140	8,5	606,37
<b>V-4</b>	0,0143	8,5	593,83	<b>V-30</b>	0,0140	6,6	471,19
<b>V-5</b>	0,0143	8,5	594,75	<b>V-31</b>	0,0141	7,7	546,68
<b>V-6</b>	0,0143	9,9	692,17	<b>V-32</b>	0,0138	8,8	636,75
<b>V-7</b>	0,0142	7,4	520,95	<b>V-33</b>	0,0140	8,8	628,75
<b>V-8</b>	0,0143	9,0	629,74	<b>V-34</b>	0,0140	8,8	628,26
<b>V-9</b>	0,0145	10,4	718,25	<b>V-35</b>	0,0140	6,0	428,36
<b>V-10</b>	0,0145	7,4	511,06	<b>V-36</b>	0,0140	6,0	428,69
<b>V-11</b>	0,0143	8,4	588,21	<b>V-37</b>	0,0140	6,5	464,41
<b>V-12</b>	0,0143	8,9	621,78	<b>V-38</b>	0,0140	7,2	514,03
<b>V-13</b>	0,0140	9,2	656,81	<b>V-39</b>	0,0141	9,8	694,86
<b>V-14</b>	0,0141	8,4	596,06	<b>V-40</b>	0,0140	6,9	492,61
<b>V-15</b>	0,0141	7,6	538,45	<b>V-41</b>	0,0140	7,3	521,57
<b>V-16</b>	0,0142	7,8	549,54	<b>V-42</b>	0,0138	6,4	462,73
<b>V-17</b>	0,0141	7,8	552,62	<b>V-43</b>	0,0137	7,2	524,59
<b>V-18</b>	0,0143	9,6	671,20	<b>V-44</b>	0,0140	7,6	542,59
<b>V-19</b>	0,0140	7,7	549,73	<b>V-45</b>	0,0140	9,0	642,54
<b>V-20</b>	0,0143	6,2	434,16	<b>V-46</b>	0,0140	9,6	685,90
<b>V-21</b>	0,0138	9,6	694,63	<b>V-47</b>	0,0140	8,1	578,28
<b>V-22</b>	0,0140	6,8	485,85	<b>V-48</b>	0,0142	9,8	689,91
<b>V-23</b>	0,0143	6,8	475,80	<b>V-49</b>	0,0140	7,4	529,13
<b>V-24</b>	0,0138	6,4	463,09	<b>V-50</b>	0,0140	9,7	692,51
<b>V-25</b>	0,0141	6,7	475,06	<b>V-51</b>	0,0140	7,3	521,17
<b>V-26</b>	0,0143	7,7	539,19	-	-	-	-

**Tabla 2.3.** Listado de volúmenes, pesos y densidades [2].

Las vigas utilizadas, al tener un ancho mayor de 70 mm, se clasificaron visualmente según la norma UNE-EN 56544:2011 “Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural” [18]. Una vez clasificadas en base a esta normativa, solo se pudieron encuadrar dentro de la clase resistente MEG (Madera Estructura de Gruesa Escuadría). Se muestra en la Tabla 2.4.

<b>CLASIFICACIÓN VISUAL</b>					
<b>Viga</b>	<b>Aceptación/ Rechazo</b>	<b>Motivo</b>	<b>Viga</b>	<b>Aceptación /Rechazo</b>	<b>Motivo</b>
V-1	MEG	-	V-27	MEG	-
V-2	RECHAZO	Nudo	V-28	RECHAZO	Fenda
V-3	MEG	-	V-29	RECHAZO	Fenda
V-4	MEG	-	V-30	RECHAZO	Fenda
V-5	MEG	-	V-31	RECHAZO	Carcoma
V-6	RECHAZO	Nudo	V-32	MEG	-
V-7	MEG	-	V-33	RECHAZO	Nudo
V-8	RECHAZO	Fenda	V-34	RECHAZO	Nudo
V-9	RECHAZO	Nudo	V-35	RECHAZO	Fenda
V-10	RECHAZO	Nudo	V-36	RECHAZO	Fenda
V-11	RECHAZO	Fenda	V-37	RECHAZO	Fenda
V-12	MEG	-	V-38	MEG	-
V-13	RECHAZO	Nudo	V-39	RECHAZO	Carcoma
V-14	RECHAZO	Carcoma	V-40	RECHAZO	Carcoma
V-15	MEG	-	V-41	MEG	-
V-16	RECHAZO	Nudo	V-42	RECHAZO	Carcoma
V-17	MEG	-	V-43	RECHAZO	Carcoma
V-18	MEG	-	V-44	RECHAZO	Carcoma
V-19	MEG	-	V-45	MEG	-
V-20	RECHAZO	Fenda	V-46	MEG	-
V-21	RECHAZO	Nudo	V-47	MEG	-
V-22	RECHAZO	Nudo	V-48	RECHAZO	Nudo
V-23	RECHAZO	Carcoma	V-49	RECHAZO	Carcoma
V-24	RECHAZO	Fenda	V-50	RECHAZO	Nudo
V-25	RECHAZO	Fenda	V-51	RECHAZO	Fenda
V-26	RECHAZO	Fenda	-	-	-

**Tabla 2.4.** Resultado de la clasificación visual de las 51 vigas analizadas según norma UNE EN 56544:2010 [2].

Durante el desarrollo de los ensayos surgió la necesidad de añadir vigas nuevas, para completar los datos. Estas vigas fueron las V-52, V-53 y V-60. Sus características se muestran en la Tabla 2.5.

Viga	V-52	V-53	V-60
<b>Dimensiones hxbxL (mm)</b>	145x75x1300	145x75x1300	145x75x1300
<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>	0,0141	0,0141	0,0142
<b>Peso (kg)</b>	7,57	7,02	11,06
<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	535,60	496,58	780,95
<b>Catalogación</b>	RECHAZO	RECHAZO	MEG
<b>Motivo</b>	Nudo	Nudo	-

Tabla 2.5. Características de las vigas añadidas.

## 2.2. Refuerzos: Propiedades

### 2.2.1. Introducción al material compuesto de fibra de carbono

Un material compuesto presenta dos elementos principales: fibra y matriz. La adecuada combinación de estos elementos origina un material con mejores características resistentes que las que pueden tener ambos por separado. Además, se pueden introducir en la composición del nuevo material otras cargas o aditivos que concedan características peculiares para usos específicos [22].

#### Fibra:

La fibra aporta resistencia, rigidez y dureza al material compuesto. Se caracterizan por tener una alta resistencia a tracción específica y un alto módulo específico. Es decir, una alta resistencia a tracción y un alto módulo de elasticidad en relación a su densidad. Se pueden clasificar según su origen.

De origen mineral:

- Fibras cerámicas (carburo de silicio).
- Fibras metálicas.
- Fibras de origen inorgánico (carbono, vidrio, boro).

De origen orgánico: aramida, polietileno.

En este Proyecto se ha trabajado con fibra de carbono. Hay tres precursores que se utilizan actualmente para fabricar fibras de carbono, entre los cuales el poliacrilonitrilo (PAN), una meofase del alquitrán y la celulosa, es el más usado actualmente. Las fibras basadas en el PAN tienen diámetros que oscilan entre los 5 y 7  $\mu\text{m}$ , siendo además un copolímero que contiene metil acrilato, metil metacrilato, vinil acetato, ácido itacónico, o cloruro de vinilo. Es hilado mediante la técnica de hilado húmedo, aunque también se ha desarrollado para el PAN la técnica de hilado fundido [22].

La fibra de carbono es un material excepcional para su aplicación en estructuras sometidas a cargas repetitivas o fatiga ya que sus propiedades mecánicas son poco sensibles a la

aplicación de una carga cíclica. En cuanto al comportamiento elástico sus propiedades son también muy elevadas. Como su densidad es de tan sólo  $1600 \text{ kg/m}^3$  sus propiedades características en función a su peso son muy elevadas, ya que añade a la estructura reforzada alta resistencia a la corrosión, la cual es otra de las múltiples ventajas del uso de la fibra de carbono frente a otros tipos de fibra. Los materiales reforzados con fibra de carbono adquieren una mayor resistencia que los reforzados con fibra de vidrio o aramida. Como desventaja, la fibra de carbono sigue siendo una fibra cara, en comparación con otras. Aún así su precio está bajando en los últimos años debido al incremento de la demanda en diversos sectores como el aeroespacial o el mundo deportivo. Existen tres tipos de fibra de carbono:

- HM-Carbon (alto módulo de elasticidad).
- HR-Carbon (alta resistencia).
- III-Carbon (más barata y con menos rigidez que las anteriores).

En la Tabla 2.6 se muestran sus características.

Designación	HR	HM	III
Diámetro del hilo ( $\mu\text{m}$ )	8	7	7 - 8
Densidad ( $\text{kg/m}^3$ )	1,74 - 1,76	1,81 - 1,87	1,82
Módulo de elasticidad (GPa)	230	390	290
Resistencia a tracción (GPa)	2,6 - 5	2,1 - 2,7	3,1
Elongación a la rotura (%)	2	0,7	1,1
Módulo específico	130	210	160
Coefficiente expansión térmica ( $10^{-6}/^\circ\text{C}$ )	2,56	2,56	2,56

Tabla 2.6. Características de los tres tipos de fibra de carbono existentes en la actualidad.

Las propiedades mecánicas de algunas de las fibras más comúnmente usadas, además de la fibra de carbono, se presentan en la Tabla 2.7.

	$E_{\text{axial}} / E_{\text{radial}}$ (Gpa)	$\sigma_{\text{max}}$ (GPa)	$\epsilon_{\text{max}}$ (%)	$\rho$ ( $\text{g/cm}^3$ )
E-Glass (vidrio)	76 / 76	2,0	2,6	2,6
HM Carbon (carbono)	380 / 12	3,0	0,6	1,95
HS Carbon (carbono)	230 / 20	3,4	1,1	1,75
Aramida	130 / 10	2,4	2,3	1,45

Tabla 2.7. Valores de módulo de elasticidad, tensión máxima, deformación máxima y densidad de distintos tipos de fibra.

La orientación de las fibras respecto a los ejes principales del elemento y la concentración de las fibras también definen al material compuesto, siendo clave en los resultados mecánicos del mismo.

### Matriz

El segundo elemento principal de un material compuesto es la matriz. Es la encargada de aglutinar las fibras y hacerlas trabajar de forma conjunta, siendo la matriz de uso más frecuente la formada a base de resinas poliméricas. Las limitaciones de las resinas son la pérdida de sus propiedades a altas temperaturas y la baja resistencia a cortante. Las resinas se dividen en dos grupos: matrices termoplásticas y matrices termoestables, estando ambas dentro de las matrices orgánicas, tal y como muestra la Tabla 2.8.

<b>Inorgánicas</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>-Cemento</li> <li>-Geopolímeros</li> <li>-Yeso</li> <li>-Matrices cerámicas</li> <li>-Matrices metálicas</li> </ul>
<b>Orgánicas</b>	<b>Termoplásticas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Policloruro de vinilo (PVC)</li> <li>-Copolímeros de estireno (ABS,SAN)</li> <li>-Polietileno (PE)</li> <li>-Polipropileno (PP)</li> <li>-Policarbonato (PC)</li> <li>-Poliuretano (PU)</li> <li>-Polimetacrilato de metilo (PMMA)</li> <li>-Poliestireno (PS)</li> <li>-Acetato</li> <li>-Aramida</li> <li>-Polioximetileno (POM)</li> <li>-PBT</li> <li>-Polieteramida</li> <li>-Nylon</li> <li>-PET</li> <li>-PEEK</li> <li>-PEKK</li> <li>-Poliamida</li> <li>-PAI</li> <li>-PAS</li> </ul>
	<b>Termoestables</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Epoxi</li> <li>-Viniléster</li> <li>-Poliéster</li> <li>-Fenólica</li> <li>-Ésteres cianato</li> <li>-Bismaleimidias</li> <li>-Poliamidias</li> <li>-Polieteramida</li> </ul>

**Tabla 2.8.** Clasificación de diferentes matrices usadas en materiales compuestos [22].

- **Matrices termoplásticas**

Su modo de producción limita su uso en compuestos en los que se requieran fibras largas, siendo su uso indicado para casos en los que se requiera un gran volumen con un coste moderadamente bajo. Son sólidas a temperatura ambiente y se debe aumentar la temperatura hasta el estado líquido para usarlas en cualquier proceso, con lo cual, pueden ser remoldadas mediante la aplicación de calor y presión, ya que se reblandecen de nuevo al aumentar la temperatura. Este ciclo se puede repetir indefinidamente sin que sufran ningún cambio químico. Las más utilizadas son el poliéter-éter-éter-ketone (PEEK), aramida, poliuretano y polipropileno.

- **Matrices termoestables**

A diferencia de las termoplásticas, las matrices termoestables no se reblandecen con el calor, ya que polimerizan durante su fabricación, presentándose en estado líquido, lo cual facilita su uso en cualquier proceso. Para alcanzar el estado sólido deben curarse por medio de rayos ultravioletas, microondas, rayos gamma, o haz de electrones. Una vez curadas presentan una red molecular de enlaces altamente cruzados, los cuales no pueden volverse a fundir sin sufrir una seria degradación. Si se aumenta demasiado la temperatura, el polímero comienza a descomponerse de forma irreversible.

Las matrices termoestables más usadas son las de poliéster, las epoxis y las de poliamida. Su frecuente uso se debe a que son matrices muy estables dimensionalmente durante el curado, tienen un buen comportamiento frente a la humedad, y aguantan temperaturas elevadas, desde los 100°C de la de poliéster a los 300°C de la poliamida. Las propiedades de elasticidad y resistencia de las matrices más comunes se muestran en la Tabla 2.9.

Tipo	Termoplásticos		Termoestables		
Material	PEEK	PPS	Poliéster	Epoxi	Poliamida
Densidad $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,30-1,32	1,36	1,10-1,40	1,38	1,46
Módulo de elasticidad E (Gpa)	3,24	3,3	2,1-3,4	4,6	3,5
Resistencia a tracción (Mpa)	100,0	82,7	34,5-103,5	58,6	103,0
$\epsilon_{\max}$ (%)	50	4	1-5	-	-
Coef. Poisson $\nu$	0,4	-	-	0,36	0,35
Módulo específico (E/ $\rho$ )	2,5	2,4	2,2	5,5	2,4
Resist. Específica ( $\sigma_{\max}/\rho$ )	76,3	60,8	55,2	74,0	70,5

**Tabla 2.9.** Propiedades de las matrices más comunes en FRP [23]. PEEK es un producto comercial ICL. PPS es un producto comercial *Phillips Petroleum*.



## 2.2.2. Laminado

Una de las formas en las que se puede encontrar un material compuesto es en forma de laminado. No es más que un conjunto de capas de fibra moldeadas juntas con una matriz en una determinada dirección, obteniéndose mediante pultrusión o laminación. El laminado de fibra de carbono es un polímero armado con fibras de carbono con una matriz epoxi, siendo concebido principalmente para el refuerzo estructural, adhiriéndose al elemento a reforzar mediante una resina. Se consigue así aumentar la resistencia de la estructura y disminuir su flecha, mejorando sus condiciones de servicio, sin añadir prácticamente peso adicional. En la Figura 2.12. se observa un tipo de refuerzo con laminado de CFRP.



**Figura 2.12.** Ejecución de un refuerzo de forjado de hormigón armado mediante CFRP laminado colocado en la parte inferior de la vigueta [24].

## 2.2.3. Tejido

Cuando el material compuesto se presenta en forma de tejido, pueden darse dos casos: el primero, en el que el fabricante ya haya impregnado el tejido en fábrica con la resina y esta se encuentre en un estado intermedio de curado (tejido preimpregnado o parcialmente impregnado), o que se suministre la fibra sin impregnar. En este caso se ha de realizar la composición de la matriz con las fibras en el mismo momento del refuerzo. Los refuerzos realizados con tejido son más versátiles en cuanto a formas de refuerzo se trata, pues son sumamente dóciles a la hora de adaptarse a la geometría del elemento a reforzar, siendo en contra su ejecución algo más laboriosa. En la Figura 2.13 se puede ver a un operario realizando el refuerzo de un pilar con tejido a base de fibra de carbono.



**Figura 2.13.** Ejecución de un refuerzo de forjado mediante CFRP en forma de tejido, en un elemento cilíndrico [24].

Tanto los refuerzos ejecutados con laminados como los de tejido, necesitan mano de obra de personal cualificado, a fin de evitar al máximo cometer errores que puedan llevar al refuerzo a su fallo. La deslaminación es un típico modo de fallo de estos refuerzos, la cual consiste en que el refuerzo se desprende del elemento base, inutilizando el conjunto. En muchas ocasiones este fallo por deslaminación viene provocado por una mala ejecución.

## 2.2.4. Productos comerciales usados en este Proyecto

En este Proyecto se han usado refuerzos de material compuesto de fibra de carbono (CFRP). Se han elaborado refuerzos tanto con laminado como con tejido, y se han usado varios tipos de resina. También se utilizó una imprimación para aplicar a la madera antes del refuerzo y así mejorar su adherencia. Los materiales han sido suministrados por las multinacionales SIKA S.A.U. y DRIZORO S.A.U. A continuación se muestran los productos usados y sus características.

### Laminados:

Se emplearon dos tipos diferentes de laminados. Uno de cada casa comercial. Dentro de cada una de éstas se eligieron dos laminados con idénticas propiedades, siendo la única variación su ancho. Así, a la hora de elaborar los especímenes, se pudieron hacer refuerzos de ancho parcial y refuerzos de ancho completo, otorgando la posibilidad de realizar refuerzos con cuatro laminados diferentes. Los laminados utilizados de SIKA S.A.U. son los reflejados junto a sus propiedades en la Tabla 2.10.

	Sika® CarboDur® E-512	Sika® CarboDur® E-812
Ancho (mm)	50	80
Espesor (mm)	1,2	1,2
Sección (mm <sup>2</sup> )	60	96
Módulo de elasticidad E (N/mm <sup>2</sup> )	170.000	170.000
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1,55	1,55
Contenido volumétrico de fibra (%)	≥70	≥70
Resistencia última característica (N/mm <sup>2</sup> )	2300	2300
Elongación de rotura (%)	≥1,35	≥1,35

Tabla 2.10. Propiedades de los laminados de SIKA S.A.U. [25].

Los laminados de SIKA S.A.U. son polímeros armados con fibras no pultrusionadas (CFRP) con una temperatura máxima de servicio es de 50°C. A continuación se muestran los laminados de DRIZORO S.A.U. y algunas de sus propiedades en la Tabla 2.1

	<b>DRIZORO® COMPOSITE</b>	<b>DRIZORO® COMPOSITE</b>
	<b>1405</b>	<b>1410</b>
<b>Ancho (mm)</b>	50	100
<b>Espesor (mm)</b>	1,4	1,4
<b>Sección (mm<sup>2</sup>)</b>	70	140
<b>Módulo de elasticidad E (N/mm<sup>2</sup>)</b>	165.000	165.000
<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>	-	-
<b>Contenido volumétrico de fibra (%)</b>	68	68
<b>Resistencia última característica (N/mm<sup>2</sup>)</b>	1320	1320
<b>Elongación de rotura (%)</b>	1,60	1,60

**Tabla 2.11.** Propiedades de los laminados de DRIZORO S.A.U. [24].

Los laminados de DRIZORO S.A.U. son laminados de fibra de carbono en matriz epoxi (CFRP) obtenidos mediante un proceso de pultrusión continuo y automatizado.

### Tejidos:

Se utilizaron tres tipos diferentes de tejido a base de fibra de carbono; un tejido unidireccional de la internacional SIKA S.A.U y otro unidireccional de la nacional DRIZORO S.A.U. El tercer tipo de tejido, también de DRIZORO S.A.U. fue un tejido bidireccional ortogonal. En las Tablas 2.12 y 2.13 se muestran las características de dichos materiales, correspondiéndose la primera con los de SIKA S.A.U. y la segunda con los de DRIZORO S.A.U.

<b>Sika® Wrap®-230 C</b>	
<b>Orientación</b>	0° unidireccional
<b>Urdimbre</b>	Fibras de carbono
<b>Peso (g/m<sup>2</sup>)</b>	235 ± 10
<b>Módulo de elasticidad E (kN/mm<sup>2</sup>)</b>	220
<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,82
<b>Espesor de diseño de tejido (mm)</b>	0,129 (sección neta de fibras)
<b>Espesor nominal del laminado (mm)</b>	0,129
<b>Resistencia a tracción de la fibra (N/mm<sup>2</sup>)</b>	4000
<b>Elongación de rotura de la fibra (%)</b>	1,7%

**Tabla 2.12.** Propiedades del tejido de SIKA S.A.U. [25].

Sika® Wrap®-230 C es un tejido unidireccional a base de fibra de carbono para su aplicación por proceso seco o húmedo. Su uso está indicado para refuerzos de elementos o estructuras de hormigón armado, fábrica de ladrillo y madera para incrementar su capacidad portante a flexión y cortante.

	<b>DRIZORO® WRAP 200</b>	<b>DRIZORO® CARBOMESH 210</b>
<b>Orientación</b>	0° (unidireccional)	0° / 90° (ortogonal/bidireccional)
<b>Módulo de elasticidad E (kN/mm<sup>2</sup>)</b>	230.000	230.000
<b>Espesor de diseño de tejido (mm)</b>	0,111	0,06
<b>Resistencia a tracción de la fibra (N/mm<sup>2</sup>)</b>	3400	4900
<b>Elongación de rotura de la fibra (%)</b>	-	2,1
<b>Gramaje carbono (g/m<sup>2</sup>)</b>	-	210 ± 5%
<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>	-	1,8 ± 5%

Tabla 2.13. Propiedades del tejido de DRIZORO S.A.U. [24].

Como se observa en la Tabla 2.13 DRIZORO S.A.U. ofrece tejidos a base de fibra de carbono tanto unidireccionales como bidireccionales. Su aplicación en seco o en húmedo dotan al elemento reforzado de una mayor capacidad portante a flexión y cortante.

#### Resinas:

En la elaboración de las probetas se han usado dos tipos diferentes de resina. La resina de la casa comercial SIKA S.A.U, a la cual se le denominará a partir de ahora como resina Tipo 1, y la resina de la nacional DRIZORO S.A.U. a la cual se le denomina resina Tipo 4. Las resinas se han aplicado con sus laminados y tejidos, sin hacer combinaciones entre ambas casas comerciales. Ambas resinas son adhesivos que se conforman a base de dos componentes: resina epoxi de dos componentes y cargas. La mezcla se ha de realizar durante un mínimo de 3 minutos, con batidora a baja revolución. Las propiedades físico-mecánicas de las resinas aparecen en las Tablas 2.14 y 2.15, tomándose como referencia una temperatura de 15°C para todas las propiedades, a excepción del módulo de elasticidad, en el cual se tomó como referencia una temperatura de 23°C.

<b>Resina Tipo 1</b>	
<b>Densidad <math>\rho</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,65
<b>Resistencia a tracción (N/mm<sup>2</sup>)</b>	14-17
<b>Resistencia a cortante (N/mm<sup>2</sup>)</b>	24-27
<b>Módulo de elasticidad a tracción (N/mm<sup>2</sup>)</b>	11.200
<b>Adherencia (N/mm<sup>2</sup>)</b>	>4
<b>Proporción en peso</b>	3:1
<b>Rendimiento sobre cada tipo de laminado</b>	0,55-0,8
<b>Tiempo de empleo útil (min.)</b>	90
<b>Tiempo de secado (h.)</b>	10
<b>Tiempo de curado (d.)</b>	7-10

Tabla 2.14. Propiedades físicas y mecánicas de la resina Tipo 1 [25].

La resina Tipo 1 es tixotrópica, lo cual quiere decir que puede ser usada en aplicaciones verticales de hasta 5 mm de espesor, endurece sin retracción y es impermeable a líquidos y vapor de agua.

Resina Tipo 4	
Densidad $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	-
Resistencia a tracción (N/mm <sup>2</sup> )	>29
Resistencia a cortante (N/mm <sup>2</sup> )	>9,8
Módulo de elasticidad a tracción (N/mm <sup>2</sup> )	-
Adherencia (N/mm <sup>2</sup> )	>2,5
Proporción en peso	4:1
Rendimiento sobre cada tipo de laminado	0,7-0,8
Tiempo de empleo útil (min.)	>180
Tiempo de secado (h.)	18
Tiempo de curado (d.)	14

Tabla 2.15. Propiedades físicas y mecánicas de la resina Tipo 4 [24].

La resina Tipo 4 tiene una consistencia notablemente más fluida que la Tipo 1, lo que hace que su aplicación sea, en muchos casos, más sencilla y rápida. Por otro lado, la excesiva fluidez puede ser un hándicap a la hora de su aplicación horizontal.

### Imprimación:

De los ensayos de adherencia realizados en el proyecto REVMAC se confirmó que la aplicación de una imprimación mejoraba notablemente los resultados. Por esto se decidió que todas las vigas que se ensayaron llevaran una capa de imprimación bicomponente. Nuevamente la mezcla se realiza con batidora a baja revolución. La aplicación de la imprimación ha de ser lo más meticulosa posible, prestando especial atención en que la muestra esté libre de polvo, y evitando la aparición de burbujas de aire, dos factores que podrían mermar notablemente la adherencia y causar el efecto contrario al buscado con la capa de imprimación. En la Tabla 2.16. se pueden ver los datos técnicos de la resina de imprimación, obtenidos de la web de DRIZORO S.A.U.

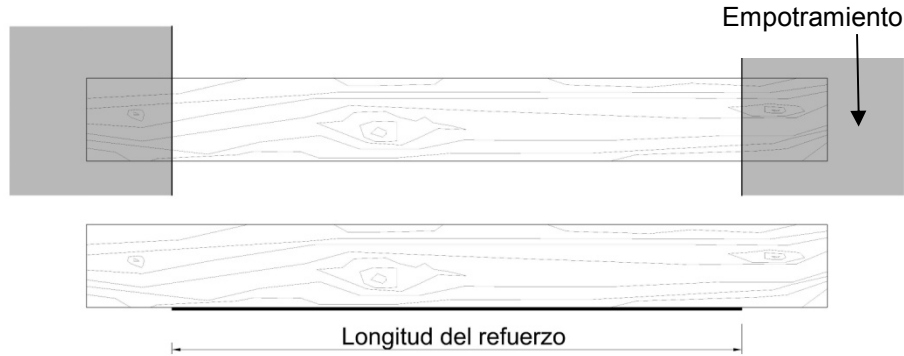
Imprimación	
Peso específico (g/cm <sup>3</sup> )	1,1±0,1
Viscosidad (mPa·s)	600-700
Tiempo de secado (h)	4-5
Tiempo de repintado (h)	14-15
Tiempo de curado (d)	7
Proporción de los componentes en peso	4:1
Rendimiento (kg/m <sup>2</sup> )	0,25-0,50

Tabla 2.16. Datos técnicos de la resina de imprimación [24].

## 2.3. Matriz de ensayo.

En este apartado se describirán los diferentes tipos de refuerzo usados. De las vigas que se indicaron en el Apartado 2.1.5 se reforzaron un total de 35, usando laminados y tejidos a base de fibra de carbono. En la mayoría de los casos, las vigas sometidas a flexión rompen por fallo a tracción de las fibras inferiores, que son las que más tracción soportan [3]. Este ha sido el motivo por el que los laminados fueron adheridos a la parte inferior de las vigas. Los tejidos se han adherido también a la cara inferior subiendo también por los laterales de la viga hasta cubrir un medio del canto con objeto de prevenir el fallo a cortante y conferir ductilidad al elemento. Aunque las vigas tienen una longitud de alrededor de 1300 mm, el refuerzo no se colocó de extremo a extremo si no que ocupaba 1000 mm de la zona central de la viga, dejando sin reforzar unos 150 mm por cada extremo. De esta manera se consiguieron unas condiciones lo más reales posibles durante el ensayo, tal y

como se puede ver en la Figura 2.14. No bastante, en algunas vigas se llevó el refuerzo sólo hasta esos puntos. En otras se reforzó toda la cara inferior, y a continuación se le hicieron unas muescas en la zona de los apoyos con la ayuda de una herramienta multifunción giratoria, hasta llegar a la madera. De esta forma la zona de refuerzos que queda en los extremos queda inutilizada, haciendo que el resultado sea el mismo.



**Figura 2.14.** Arriba: representación de una viga con los extremos empotrados. Abajo: disposición del refuerzo con respecto a la longitud total de la viga.

Los tipos de refuerzo que se usaron fueron: refuerzo longitudinal con laminado, refuerzo con tejido, y un refuerzo mixto en el que se usa tanto laminado como tejido. La combinación de los tipos de tejido con los tipos de laminado que se explicaron en el Apartado 2.2.4 han dado la posibilidad de crear 6 tipos de refuerzo: refuerzo longitudinal de ancho parcial, longitudinal de ancho completo, con tejido unidireccional, con tejido bidireccional, con laminado y tejido unidireccional, y con laminado y tejido bidireccional. Se crearon grupos diferentes de refuerzos, atendiendo también a la casa comercial con la que se elaboraron. De esta forma, junto con el grupo de las vigas sin refuerzo, se obtuvieron un total de 11 grupos diferentes de vigas para ensayar. También se tuvo en cuenta que cada grupo contuviera como mínimo una viga catalogada como MEG.

### 2.3.1. Descripción de los refuerzos.

A continuación se explica la configuración de los diferentes refuerzos que se usaron en el Proyecto.

#### Sin refuerzo

De las 35 vigas, se ensayaron 4 sin refuerzo con objeto de poder determinar la efectividad del refuerzo. En la Figura 2.15. aparece una viga sin reforzar ensayada.



**Figura 2.15.** Fotografía de una viga sin reforzar.

## Refuerzo longitudinal inferior

Para explicar cómo se conforman los refuerzos con sólo laminado, en la Figura 2.16 se presenta la disposición de los refuerzos de este tipo. Tanto los de ancho parcial como los de ancho completo.

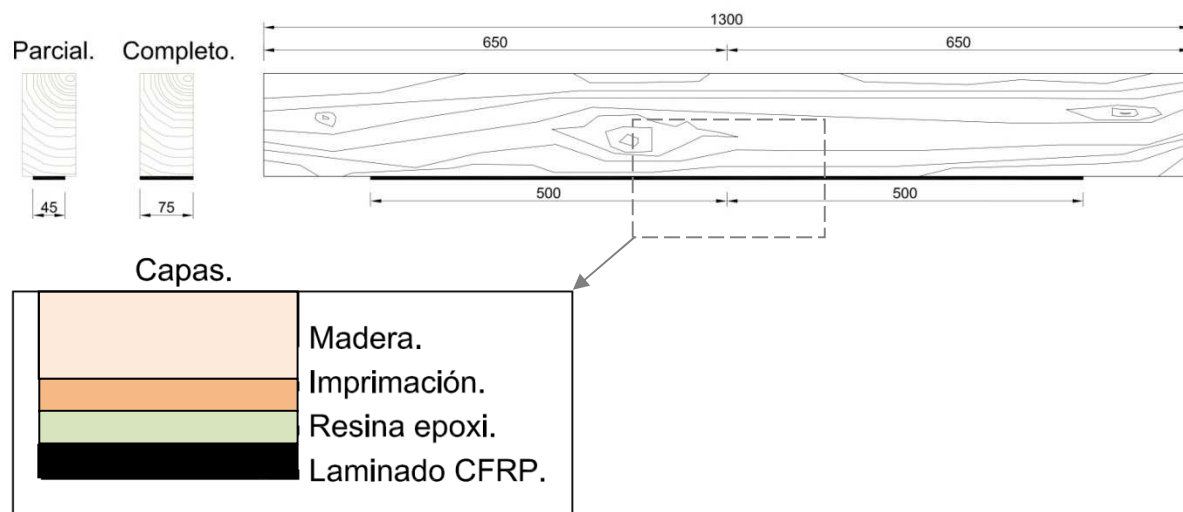


Figura 2.16. Disposición de los refuerzos con laminado inferior. (Medidas en milímetros).

- **Refuerzo longitudinal con laminado inferior. (Ancho parcial)**

Este tipo de refuerzo consiste en la adhesión del laminado a la cara inferior de la viga, estando ésta colocada de canto. El ancho del laminado usado en este tipo de refuerzos fue de 45mm. Como la base de la viga tiene un ancho de 75mm, el refuerzo ocupa alrededor de un 60% con respecto al ancho total. Se utilizó un laminado de cada una de las casas comerciales del Apartado 2.2.4, dando lugar a los siguientes dos grupos de vigas:

### LR-S-P

Por sus siglas en inglés *Longitudinal Reinforcement - Sika - Partial width*. Este refuerzo lleva un laminado Sika® CarboDur® E-512 y está adherido con resina Tipo 1. Se reforzaron 3 vigas de dicha forma, pero a fin de homogeneizar los resultados, se tuvo que añadir una más a este grupo, siendo un total de 4 vigas del tipo LR-S-P. La Figura 2.17 muestra este tipo de refuerzo.



Figura 2.17. Fotografía de una viga con el refuerzo LR-S-P.



### LR-D-P

De sus siglas en inglés *Longitudinal Reinforcement - Drizoro - Partial width*. Se usó un laminado DRIZORO® COMPOSITE 1405 y la resina Tipo 4. Se configuraron 3 vigas con este refuerzo (Figura 2.18).



Figura 2.18. Fotografía de una viga con el refuerzo LR-D-P.

- **Refuerzo longitudinal con laminado inferior. (Ancho completo)**

Es un tipo de refuerzo similar al longitudinal de ancho parcial. La diferencia es que en este caso el laminado sí abarca todo el ancho de la base, dando lugar a refuerzos con laminado inferior de un ancho de 75mm. Atendiendo a ambas casas comerciales se generaron dos grupos diferentes.

### LR-S-F

Acrónimo de *Longitudinal Reinforcement - Sika - Full width* en inglés. En este refuerzo se usó un laminado Sika® CarboDur® E-812 y se adhirió con resina Tipo 1. Se reforzaron 3 vigas de dicha forma (Figura 2.19).



Figura 2.19. Fotografía de una viga con el refuerzo LR-S-F.

### LR-D-F

Por sus siglas en inglés *Longitudinal Reinforcement - Drizoro - Full width*. Se utilizó un laminado DRIZORO® COMPOSITE 1410 y la resina Tipo 4. Se configuraron 3 vigas con este refuerzo. Se puede ver una de esas vigas en la Figura 2.20.

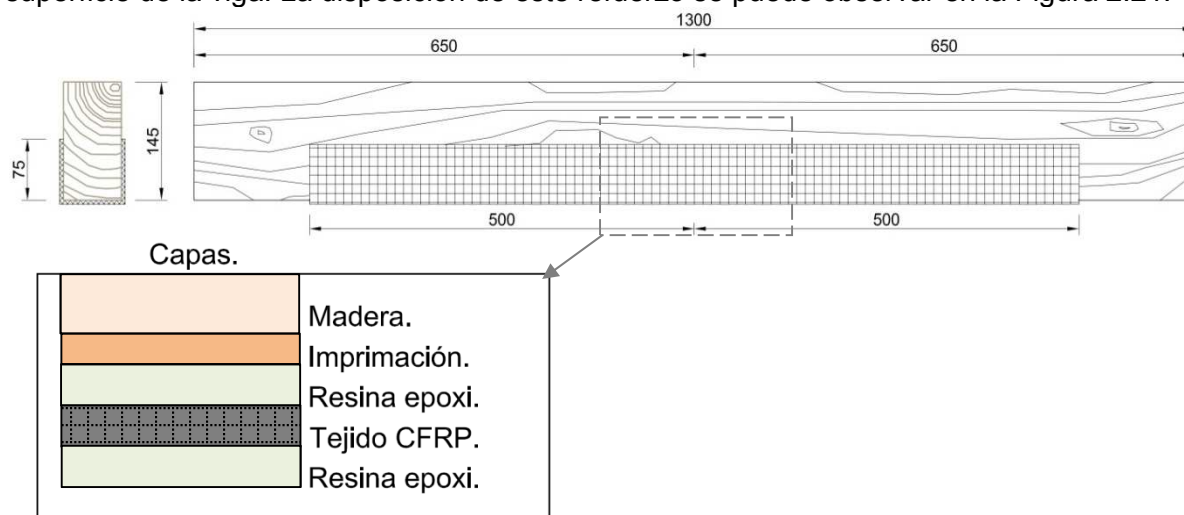




**Figura 2.20.** Fotografía de una viga con el refuerzo LR-D-F.

- **Refuerzo con tejido.**

El tejido es adherido a la parte inferior de la viga, pero también se extiende por los laterales hasta la mitad del canto, dando un refuerzo en forma de U. Como se explicó en el Apartado 2.2.4 se disponía tanto de tejido unidireccional como de tejido bidireccional. En el caso del unidireccional, se reforzaron vigas usando materiales de ambas casas comerciales. En cambio, sólo se disponía de tejido bidireccional de DRIZORO S.A.U. El tejido unidireccional se dispuso de tal manera que las fibras de carbono fueran paralelas a la fibra de la madera. En el caso del bidireccional, al ser ortogonal, unas fibras discurrían paralelas a la fibra, mientras que otras eran perpendiculares a ésta en el plano de la superficie de la viga. La disposición de este refuerzo se puede observar en la Figura 2.21.



**Figura 2.21.** Disposición de los refuerzos con tejido. (Medidas en milímetros).

Se obtuvieron 3 grupos diferentes al usar simplemente tejido:

### WR-S

Por sus siglas en inglés *Wrap Reinforcement - Sika*. Se usó el tejido unidireccional de SIKA S.A.U. Sika® Wrap®-230 C y la resina Tipo 1. Se tomaron 3 vigas para ser reforzadas con el refuerzo WR-S. (Figura 2.22).



**Figura 2.22.** Fotografía de una viga con el refuerzo WR-S.

### **WR-D-U**

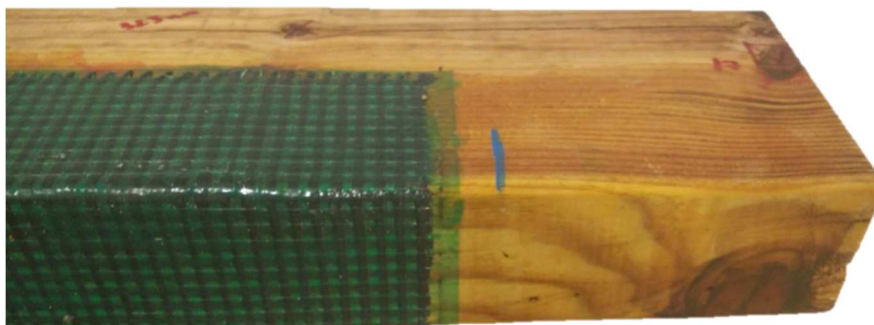
Este tipo de refuerzo toma su nombre del inglés *Wrap Reinforcement - Drizoro - Unidirectional*. En los refuerzos WR-D-U se utilizó tejido unidireccional DRIZORO® WRAP 200 y la resina Tipo 4. Se reforzaron 3 vigas con este tejido unidireccional de DRIZORO S.A.U. En la Figura 2.23 aparece una de ellas.



**Figura 2.23.** Fotografía de una viga con el refuerzo WR-D-U.

### **WR-D-B**

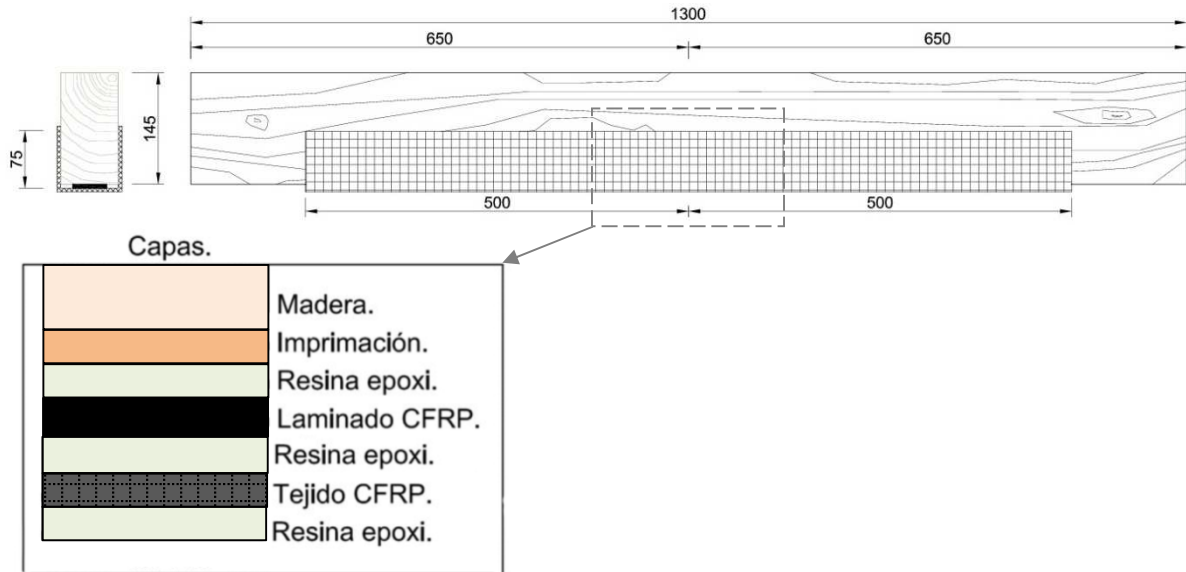
Por sus siglas en inglés *Wrap Reinforcement - Drizoro - Bidirectional*. Para este refuerzo se utilizó el tejido bidireccional DRIZORO® CARBOMESH 210 y la resina Tipo 4. Se configuraron 3 vigas con este refuerzo. En la Figura 2.24 se ve una viga con el refuerzo WR-D-B.



**Figura 2.24.** Fotografía de una viga con el refuerzo WR-D-B.

- **Refuerzo mixto. Laminado con tejido.**

En este tipo de refuerzos se usó tanto un laminado de fibra de carbono como un tejido. Es una mezcla de los tipos de refuerzo anteriormente explicados. En él el laminado se adhiere a la viga de madera, que es posteriormente envuelta por el tejido. La disposición del tejido sigue manteniendo la forma de U de los refuerzos que sólo llevan tejido. En todo momento se mantuvo la relación entre los materiales de la misma casa comercial, es decir no se hicieron refuerzos con laminados y tejidos de diferentes procedencias comerciales. El ancho del laminado inferior en este tipo de refuerzos fue el ancho parcial de 45mm. La disposición de este refuerzo se puede observar en la Figura 2.25.



**Figura 2.25.** Disposición de los refuerzos mixtos. (Medidas en milímetros).

Con esta configuración se obtienen tres grupos.

### WLR-S

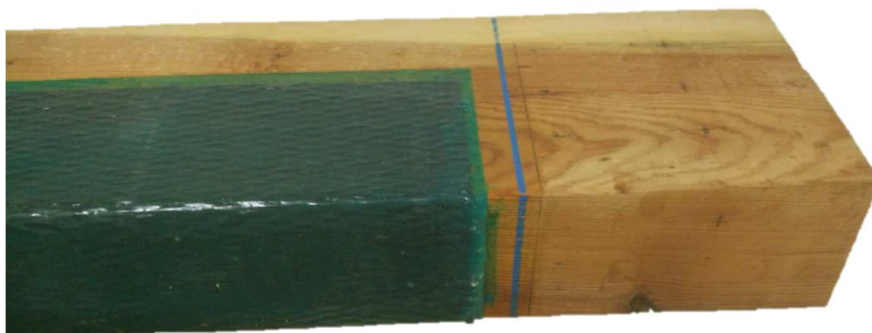
Por sus siglas en inglés *Wrap and Longitudinal Reinforcement - Sika*. Para este tipo de refuerzo se usaron los siguientes materiales: Sika® CarboDur® E-512 como laminado. Sika® Wrap®-230 C como tejido y resina Tipo 1. Se reforzaron 3 vigas WLR-S. En la Figura 2.26 se observa un ejemplo.



**Figura 2.26.** Fotografía de una viga con el refuerzo WLR-S.

### **WLR-D-U**

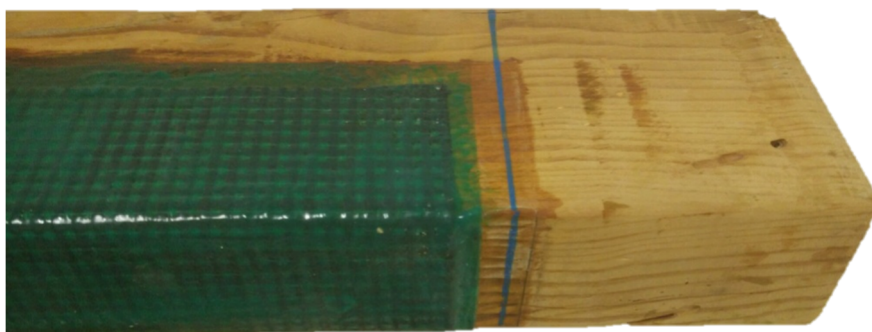
De sus siglas en inglés *Wrap and Longitudinal Reinforcement - Drizoro - Unidirectional*. Se conformó a base de un laminado DRIZORO® COMPOSITE 1405 y el tejido unidireccional DRIZORO® WRAP 200. Todo ello adherido con resina Tipo 4. De este tipo de refuerzo también se hicieron 3 vigas. En la Figura 2.27 aparece una de ellas.



**Figura 2.27.** Fotografía de una viga con el refuerzo WLR-D-U.

### **WLR-D-B**

Por sus siglas en inglés *Wrap and Longitudinal Reinforcement - Drizoro - Bidirectional*. En este refuerzo se usó un laminado DRIZORO® COMPOSITE 1405 y el tejido bidireccional DRIZORO® CARBOMESH 210. La resina utilizada fue la Tipo 2. Se conformaron 3 vigas con esta disposición. En la Figura se 2.28 muestra una de ellas.



**Figura 2.28.** Fotografía de una viga con el refuerzo WR-D-B.

Finalmente, la Tabla 2.15 resume las características y nomenclatura de los tipos de refuerzo utilizados, recordando que todos los grupos, a excepción del no reforzado, llevan una capa de la imprimación.

Reinforcement	CFRP	Description	Type of resin
NR	No.	Non Reinforced	-
LR-S-P	Sika® Carbodur® E-512 (45 mm).	Longitudinal Reinforcement - Sika - Partial width.	1
LR-S-F	Sika® Carbodur® E-812 (75 mm).	Longitudinal Reinforcement - Sika - Full width.	1
LR-D-P	DRIZORO® COMPOSITE 1405 (45 mm).	Longitudinal Reinforcement - Drizoro - Partial width.	4
LR-D-F	DRIZORO® COMPOSITE 1410 (75 mm).	Longitudinal Reinforcement - Drizoro - Full width.	4
WLR-S	Sika® Carbodur® E-512 (45 mm) + SIKA WRAP 230-C.	Wrap and Longitudinal Reinforcement - Sika.	1
WLR-D-U	DRIZORO® COMPOSITE + DRIZORO WRAP 200.	Wrap and Longitudinal Reinforcement - Drizoro - Unidirectional.	4
WLR-D-B	DRIZORO® COMPOSITE 1405 + DRIZORO® CARBOMESH 210.	Wrap and Longitudinal Reinforcement - Drizoro - Bidirectional.	4
WR-S	Sika® Wrap® 230-C.	Wrap Reinforcement - Sika.	1
WR-D-U	DRIZORO® WRAP 200.	Wrap Reinforcement - Drizoro - Unidirectional.	4
WR-D-B	DRIZORO® CARBOMESH 210.	Wrap Reinforcement - Drizoro - Bidirectional.	4

Tabla 2.15. Características y nomenclatura de los tipos de refuerzo.

### 2.3.2. Asignación de los refuerzos a las vigas

Se asignó un tipo de refuerzo aleatoriamente a las vigas. Se tuvo en cuenta que cada grupo de refuerzo contuviera un mínimo de 3 vigas, pudiendo ampliarse ese número,

según los resultados. También se procuró que en cada grupo hubiera tanto vigas catalogadas como rechazo y como MEG. En la Tabla 2.16 se muestra la asignación de cada viga a un tipo de refuerzo. Se puede observar la antigua nomenclatura (Nº de viga) proveniente de la catalogación, y la nueva nomenclatura, en la cual se ha añadido un número al nombre del grupo dependiendo del lugar que ocupe la viga en él.

	Nombre actual	Nº de viga según la catalogación
NR	NR-1	6R
	NR-2	2R
	NR-3	1
	NR-4	45R
LR-S-P	LR-S-P-1	12
	LR-S-P-2	22R
	LR-S-P-3	23R
	LR-S-P-4	53R
LR-S-F	LR-S-F-1	11R
	LR-S-F-2	4
	LR-S-F-3	9R
LR-D-P	LR-D-P-1	7
	LR-D-P-2	21R
	LR-D-P-3	60
LR-D-F	LR-D-F-1	5
	LR-D-F-2	52R
	LR-D-F-3	24R
WLR-S	WLR-S-1	37R
	WLR-S-2	49R
	WLR-S-3	32
WLR-D-U	WLR-D-U-1	44R
	WLR-D-U-2	39R
	WLR-D-U-3	46
WLR-D-B	WLR-D-B-1	41
	WLR-D-B-2	38R
	WLR-D-B-3	43R
WR-S	WR-S-1	15
	WR-S-2	31R
	WR-S-3	25R
WR-D-U	WR-D-U-1	17
	WR-D-U-2	29R
	WR-D-U-3	26R
WR-D-B	WR-D-B-1	18
	WR-D-B-2	30R
	WR-D-B-3	28R

**Tabla 2.16.** Asignación de los refuerzos a las vigas.

### 2.3.3. Fecha del refuerzo y fecha del ensayo

La elaboración del refuerzo de la viga se lleva a cabo en un día y tras un mínimo de 14 días de curado, la viga puede ser ensayada. La Tabla 2.17 refleja tanto la fecha en la que se realizó el refuerzo, como la fecha en la que se realizó el ensayo.

	Nombre	Día del refuerzo	Día del ensayo
NR	NR-1	-	14/09/2015
	NR-2	-	04/05/2015
	NR-3	-	16/09/2015
	NR-4	-	14/10/2015
LR-S-P	LR-S-P-1	09/10/2015	29/10/2015
	LR-S-P-2	09/10/2015	18/11/2015
	LR-S-P-3	09/10/2015	30/10/2015
	LR-S-P-4	12/01/2016	27/01/2016
LR-S-F	LR-S-F-1	11/09/2015	29/09/2015
	LR-S-F-2	11/09/2015	02/10/2015
	LR-S-F-3	11/01/2016	25/01/2016
LR-D-P	LR-D-P-1	02/10/2015	19/10/2015
	LR-D-P-2	02/10/2015	20/10/2015
	LR-D-P-3	23/05/2016	08/06/2016
LR-D-F	LR-D-F-1	17/07/2015	20/10/2015
	LR-D-F-2	17/07/2015	27/01/2016
	LR-D-F-3	17/07/2015	27/10/2015
WLR-S	WLR-S-1	12/11/2015	24/11/2015
	WLR-S-2	12/11/2015	13/05/2016
	WLR-S-3	11/11/2015	25/11/2015
WLR-D-U	WLR-D-U-1	19/11/2015	02/12/2015
	WLR-D-U-2	07/12/2015	21/01/2016
	WLR-D-U-3	19/11/2015	02/12/2015
WLR-D-B	WLR-D-B-1	18/11/2015	01/12/2015
	WLR-D-B-2	8/12/2015	25/01/2016
	WLR-D-B-3	18/11/2015	01/12/2015
WR-S	WR-S-1	11/09/2015	26/10/2015
	WR-S-2	11/09/2015	25/01/2016
	WR-S-3	11/09/2015	26/10/2015
WR-D-U	WR-D-U-1	25/09/2015	27/10/2015
	WR-D-U-2	25/09/2015	20/01/2016
	WR-D-U-3	25/09/2015	17/11/2015
WR-D-B	WR-D-B-1	14/10/2015	17/11/2015
	WR-D-B-2	14/10/2015	21/01/2016
	WR-D-B-3	14/10/2015	18/11/2015

Tabla 2.17. Fecha de refuerzo y de ensayo de cada viga.



## 2.4. Elaboración

En esta sección se explica la elaboración en sí de los especímenes ensayados, desde su acopio en el almacén hasta su estado reforzado. En primer lugar se explicará el procedimiento común aplicado a todas las vigas. Posteriormente se describe el proceso específico para cada tipo de refuerzo.

En primer lugar, las vigas acopiadas tuvieron que ser aserradas para que todas tuvieran aproximadamente la misma longitud. Posteriormente fueron trasladadas a la ETSIE de la Universidad de Granada, lugar donde se realizaron los refuerzos y los ensayos del Proyecto. Una vez se llevó a cabo la catalogación y numeración de cada viga, se eligió el tipo de refuerzo que llevaría cada una. Tras un lijado, las vigas estuvieron listas para comenzar su refuerzo.

Para la realización de los refuerzos se siguieron las recomendaciones de las casas comerciales SIKA S.A.U. y DRIZORO S.A.U., a fin de evitar fallos tales como burbujas o contactos insuficientes entre materiales.

### 2.4.1. Elaboración de los refuerzos con laminado

La metodología seguida para la realización de los refuerzos con laminado fue la siguiente. Una vez la viga estaba lijada y preparada para su refuerzo, se eligió la cara más idónea para reforzar. Se marcó la longitud del refuerzo, y con cinta de carroceros se cercó su perímetro. A continuación se le dio una capa de imprimación, siguiendo las pautas marcadas por el fabricante. Dicha imprimación consta de un agente principal y un endurecedor, que fueron dosificados según las recomendaciones usando una báscula digital con precisión de 1 gramo. Los dos componentes fueron mezclados en un recipiente limpio, con batidora a baja revolución. Una vez concluido el tiempo de curado (de 3 a 5 días), la pieza estaba lista para la colocación del refuerzo.

El primer paso para realizar el refuerzo fue aplicar una capa de resina, que al igual que la imprimación, es bicomponente. La mezcla también se realizó a bajas revoluciones y en un recipiente limpio, siempre siguiendo la dosificación recomendada en las fichas técnicas y consiguiendo una mezcla homogénea y una cantidad necesaria para el refuerzo. La capa de resina se aplicó usando herramientas que facilitaran su uniforme esparcimiento. En la Figura 2.29 se puede ver esta capa de resina ya esparcida.



**Figura 2.29.** Fotografía de una viga a la cual se le ha aplicado la primera capa de resina.



El paso siguiente fue la colocación del laminado de CFRP, que previamente había sido cortado a medida. En el laminado se impregnó una capa continua de resina. Para esto, se utilizó un dosificador recomendado por el fabricante, que se puede ver en la Figura 2.30.



**Figura 2.30.** Dosificador usado para impregnar de resina el laminado.

Posteriormente, el laminado se colocó en la cara de la viga donde se había aplicado la capa de resina. En este proceso había que asegurarse de conseguir un buen centrado del laminado, y de ejercer una presión suficiente, pero no excesiva, para así lograr la mejor adherencia. Por último, se retiró el sobrante de resina con la ayuda de una espátula, y se llevó la viga reforzada a una sala limpia para que allí pasara los días de curado recomendados en las fichas técnicas.

#### **2.4.2. Elaboración de los refuerzos con tejido**

La elaboración de los refuerzos con tejido tiene en común muchos de los pasos a seguir con los refuerzos de laminado. Primero se eligió la cara a reforzar, se marcó donde iría el refuerzo y se dio imprimación. La mezcla de la imprimación se hizo de la misma manera, ya que era el mismo material. La diferencia era que las vigas reforzadas mediante tejido requirieron algo más de cantidad, puesto que como el refuerzo sube por los laterales, estos han de ser imprimados también hasta la mitad. La dosificación de la capa de resina también es la misma, y de igual manera, esta capa ha de subir también por los laterales hasta la mitad del lado. Una vez se obtuvo una capa uniforme de resina sobre la pieza, se colocó el tejido con mucho cuidado para no dejar arrugas que pudieran comprometer a la efectividad del refuerzo. En la Figura 2.31 se aprecia el momento de la colocación del tejido de CFRP sobre una de las vigas.



**Figura 2.31.** Colocación de tejido unidireccional de SIKA S.A.U sobre una de las vigas.

Una vez colocado el tejido en su sitio, se aplicó una presión suficiente pero no excesiva para su correcta adherencia. Por último, se añadió una nueva capa uniforme de resina sobre el tejido, usando herramientas adecuadas según su densidad. Se retiraron los pequeños excesos de resina con la ayuda de una espátula, y se llevó la pieza a la sala limpia de curado.

### **2.4.3. Elaboración de soluciones mixtas**

Para realizar un refuerzo mixto, es decir, con laminado y tejido, primero se han de seguir los pasos descritos para realizar un refuerzo con laminado. A la hora de aplicar la imprimación también se han de tener en cuenta los laterales, puesto que ahí llegará el tejido. Tras la colocación del laminado, se dispuso encima una capa uniforme de resina. La capa de tejido se colocó siguiendo un procedimiento similar a los refuerzos con tejido, aplicando presión sobre éste. Por último, se extendió una capa uniforme de resina que cubrió todo el tejido. Después, la pieza fue llevada a una sala limpia para su curado.

En el esquema de la Figura 2.32 se describe el proceso de la ejecución de los refuerzos llevados a cabo.



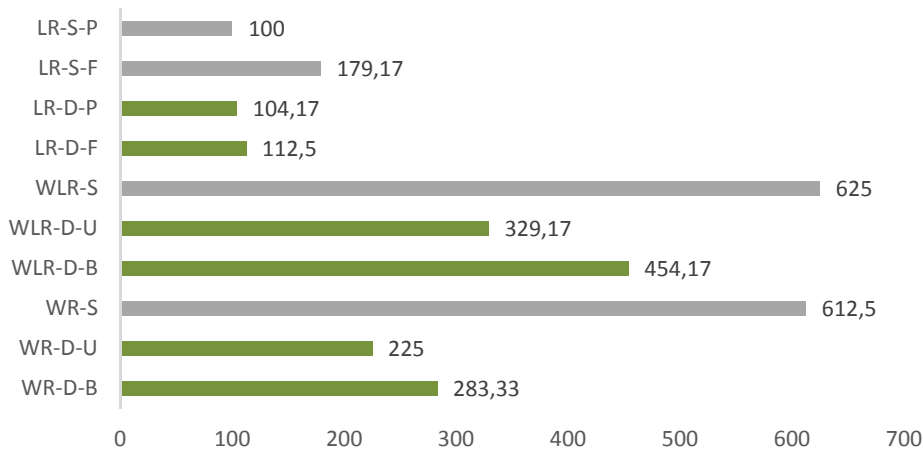
**Figura 2.32.** Proceso de elaboración de los refuerzos con CFRP

#### 2.4.4. Tiempos de elaboración

Durante la elaboración, se obtuvieron datos en cuanto al tiempo invertido por los operarios a la hora de elaborar cada tipo de refuerzo, haciendo una media entre todos los especímenes del mismo grupo. Estos datos se han reflejado mediante porcentajes, asignando el 100% al primer grupo reforzado; el LR-S-P. En la Tabla 2.18 aparecen estos datos de tiempo. En el gráfico de la Figura 2.33 se aprecia de una forma más visual la relación entre los tiempos de los distintos grupos

Tipo de refuerzo	Tiempo medio en %
LR-S-P	100,00
LR-S-F	179,17
LR-D-P	104,17
LR-D-F	112,50
WLR-S	625,00
WLR-D-U	329,17
WLR-D-B	454,17
WR-S	612,50
WR-D-U	225,00
WR-D-B	283,33

**Tabla 2.18.** Tiempos de elaboración de cada refuerzo en porcentaje, normalizados al refuerzo LR-S-P.



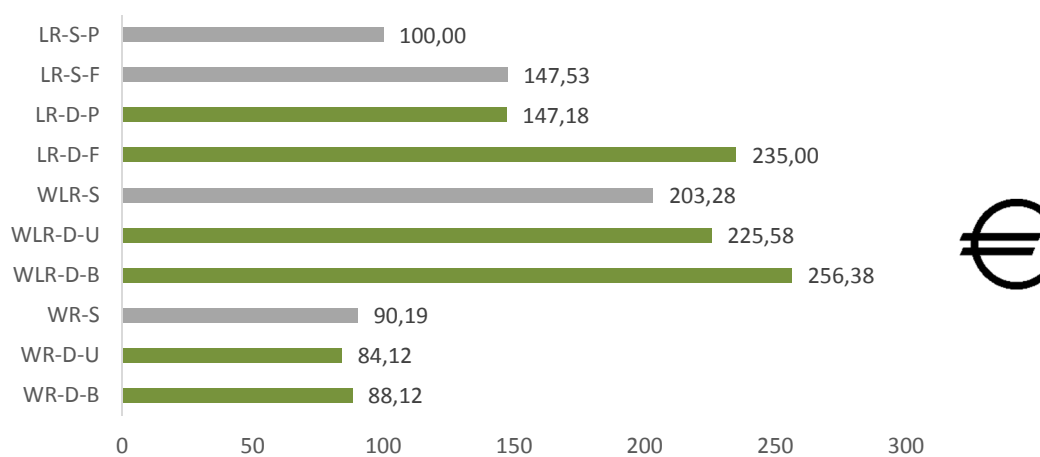
**Figura 2.33.** Gráfico de tiempos de elaboración de los tipos de refuerzo en tanto por ciento, normalizados al refuerzo LR-S-P.

### 2.4.5. Datos económicos de elaboración

En este apartado se reflejan los datos económicos obtenidos atendiendo al coste medio de resina usada en cada tipo de refuerzos. La Tabla 2.19 muestra los resultados medios obtenidos, en tantos por ciento, y tomando el grupo LR-S-P como el 100%. El gráfico de la Figura 2.34 muestra la relación entre los costes de los distintos refuerzos.

Tipo de refuerzo	Coste medio de resina [%]	Coste medio de CFRP [%]	Coste total de los materiales [%]
LR-S-P	100,00	100,00	100
LR-S-F	105,16	150,99	147,53
LR-D-P	146,72	147,22	147,18
LR-D-F	276,28	231,63	235,00
WLR-S	971,58	140,48	203,28
WLR-D-U	583,12	196,35	225,58
WLR-D-B	722,34	218,29	256,38
WR-S	698,30	40,48	90,19
WR-D-U	512,15	49,13	84,12
WR-D-B	296,64	71,07	88,12

**Tabla 2.19.** Coste medio de los materiales empleados en la elaboración de cada refuerzo en porcentaje, normalizados al refuerzo LR-S-P.



**Figura 2.34.** Gráfico del coste de los materiales empleados en la elaboración de cada grupo en tantos por ciento, normalizados al refuerzo LR-S-P.



## Capítulo 3. Descripción del ensayo e instrumentación

En este capítulo se presenta la instrumentación usada en los ensayos realizados en este PFG, así como la metodología seguida.

Los ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación de la Universidad de Granada.

### 3.1. Equipos y maquinaria para los ensayos

Para realizar los ensayos fue necesario hacer uso de tres equipos simultáneamente; una prensa eléctrica o máquina multiensayos, un equipo de extensometría y cámaras de grabación. A continuación se desarrolla cada elemento.

La prensa eléctrica es el modelo S-110 del grupo EP Ingeniería de Instrumentación y Control S.A., capaz de ejercer una fuerza máxima de 100 kN y un límite de desplazamiento de 650 mm. Está conectada a un ordenador que registra datos de fuerza, tiempo y desplazamiento con una frecuencia de 1 Hz usando el software específico PA/MPC-2, de ICC S.A. el mismo grupo que la prensa.

El equipo de extensometría se usó para obtener los datos de las deformaciones sufridas en la viga durante el ensayo. El equipo usado fue el modelo P70 de la casa italiana CONTROLS, que proporcionó datos con una frecuencia de 0,25 Hz. En el Apartado 3.2 se profundizará un poco más acerca de la instrumentación extensométrica.

Se dispusieron dos cámaras de vídeo modelo HANDYCAM EXMOR R. de la marca SONY capaces de grabar en HD, y dos trípodes con el tamaño suficiente para alojar las cámaras cerca del ensayo y a la misma altura que la viga. Se decidió usar cámaras durante el ensayo porque así, además de tener un registro fiable sobre el desarrollo de éste, se puede tener una visión muy cercana del ensayo, sin que ningún operario corra peligro debido a las astillas o restos de resina que pueden salir despedidas. Además, ver las imágenes a cámara lenta permite apreciar sucesos ocurridos durante el ensayo, que a simple vista pasarían desapercibidos. En la Figura 3.1 se puede identificar cada uno de los elementos descritos en este apartado.



Figura 3.1. Montaje completo antes de un ensayo a flexión de una viga reforzada.

El equipo de extensimetría, la prensa, y el ordenador están conectados entre sí durante el ensayo. En el esquema de la Figura 3.2 se muestra la interrelación de los elementos del ensayo.

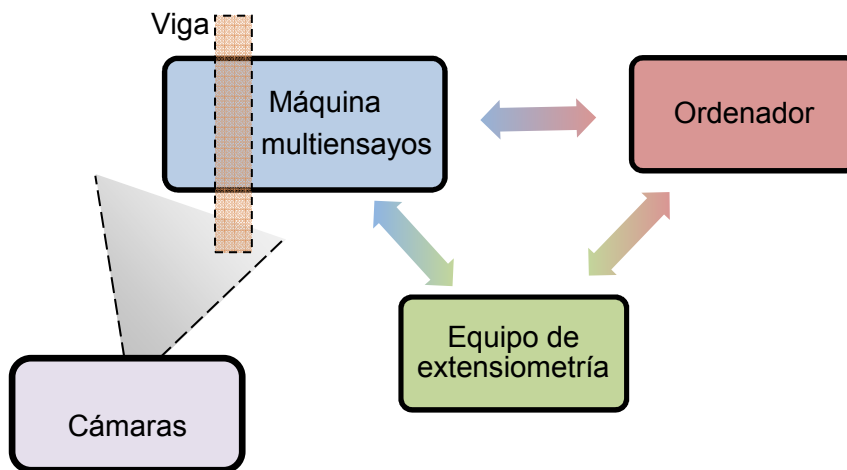


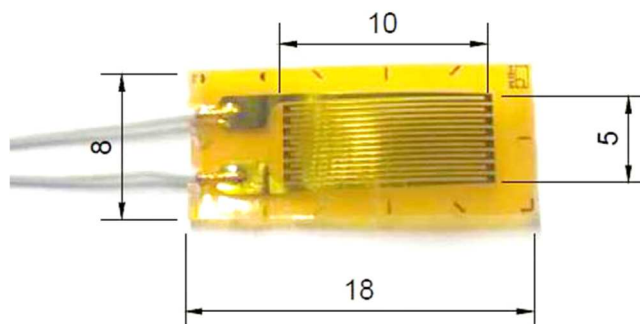
Figura 3.2. Esquema de la relación entre los distintos equipos para la realización de los ensayos.

### 3.2. Instrumentación con galgas extensométricas.

Una vez que las vigas estuvieron reforzadas y curadas, se le adhirieron unas galgas extensométricas para conectarlas al equipo de extensimetría y así poder medir las deformaciones sufridas durante el ensayo. Las galgas extensométricas no son más que unos sensores resistivos sensibles a la elongación. Pueden ser de tipo metálico, por resistencia, por capacitancia, semiconductoras y fotoeléctricas. Para este Proyecto se usaron galgas formadas por un circuito metálico y una pieza plástica denominada soporte. La deformación de este circuito provoca un cambio en la longitud y la sección del mismo, lo que crea una variación en la resistencia total del sensor, que es lo que registra el aparato



de extensimetría, traduciéndolo en deformaciones. En la Figura 3.3 aparece una de las galgas del modelo 10/120 LY41-2L-0,5M de HBM, que fueron las usadas en este Proyecto.



**Figura 3.3.** Modelo de galga de extensimetría 10/120 LY41-2L-0,5M de HBM usada en este Proyecto. Cotas en mm.

Una de las características que definen las galgas extensométricas es el llamado factor K. Este factor de galga determina la sensibilidad de la resistencia del sensor a los cambios en la temperatura. El factor K viene dado por el fabricante en la ficha técnica de las galgas. En este caso, el distribuidor al que se le adquirieron las galgas fue la empresa HBM, siendo el factor de galga de las utilizadas  $K=2,06 \pm 1,0\%$ . En la Tabla 3.1 se muestran otras características relevantes de las galgas que se usaron.

Resistencia	Factor K	Sensibilidad Transversal	Coefficiente de temperatura del factor K	Compensación de temperatura: con acero	Tensión máxima de alimentación
<b>120 <math>\Omega</math></b> <b><math>\pm 1,0\%</math></b>	2,06 $\pm 1,0\%$	0,2 %	$93 \pm 10 [10^{-6} /K]$ (-10°C ... +45°C)	$\alpha = 10,8 [10^{-6} /K]$	13,0 V

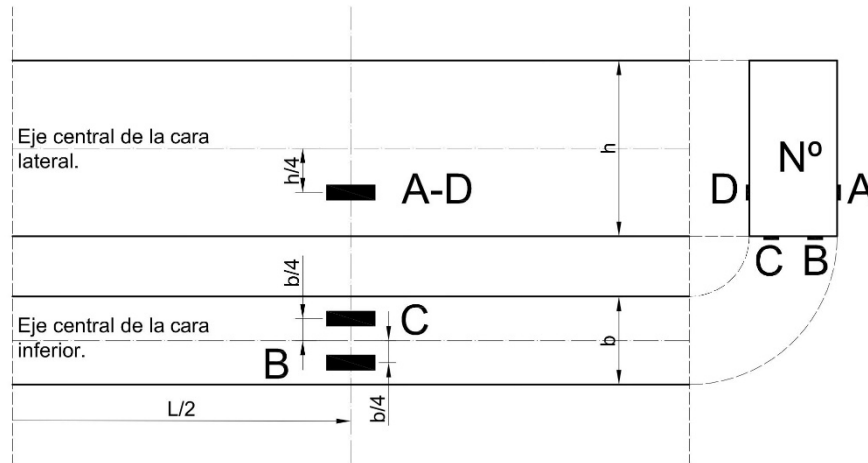
**Tabla 3.1.** Características de las galgas de extensimetría 10/120 LY41-2L-0,5M de HBM usadas [26].

La expresión que relaciona el factor K con la deformación y la resistencia de una galga es:

$$R_g = R_0(1 + K \cdot \epsilon),$$

donde  $R_g$  es la resistencia medida de la galga,  $R_0$  es la resistencia nominal, K el factor de galga y  $\epsilon$  la deformación.

Cada viga se equipó con 4 galgas antes del ensayo. A las galgas se les denominó con los nombres A, B, C y D. Las galgas A y D fueron colocadas en los laterales, mientras que las B y C se adhirieron en la base. Todas las galgas se colocaron a 1/4 del centro de su respectiva cara. Todas las galgas se encontraban bajo la fibra neutra, registrando por tanto tracciones. La Figura 3.4 muestra la disposición de las galgas en una viga. En la Figura 3.5 se puede ver el equipo de extensimetría usado.



**Figura 3.4.** Esquema de la disposición de las galgas en la sección central de una viga para ensayar. Donde  $L$  es la longitud de la viga,  $b$  el ancho de la base, y  $h$  la altura.



**Figura 3.5.** Equipo de extensimetría CONTROLS P70 (Milan-Italia). Izquierda: frontal. Derecha: parte trasera.

El proceso de pegado de las galgas a los especímenes se realizó de forma precisa y minuciosa, para evitar errores en la toma de datos, o que la galga se desprenda de la pieza, por esto ha de hacerse por personal experimentado. Tras lijar ligeramente la superficie donde sería colocada la galga, esta se fijó mediante un adhesivo bicomponente modelo 1 - X60 de la casa comercial HBM.

### 3.3. Descripción del ensayo

Todas las probetas descritas en el Capítulo 2 se ensayaron siguiendo la misma metodología. Se realizó un ensayo a flexión a tres puntos, donde los dos puntos inferiores eran los apoyos, y el punto central superior era el punto de aplicación de la carga, tal y como se ve en la Figura 3.6. Los apoyos inferiores estaban separados entre sí 1000 mm. Para conseguir que en el ensayo a tres puntos no se repartiera la carga en exceso, los apoyos eran piezas de acero semicirculares (Figura 3.7). Con el fin de evitar el hundimiento de los puntos de apoyo en la pieza, se recubrieron con protectores de caucho. Además, en la zona de contacto del apoyo superior y la viga, se colocó en cada ensayo un pequeño recorte rectangular de CFRP, que disminuyó considerablemente el hundimiento (Figura 3.7). En este modelo de prensa, descrito en el Apartado 3.1, el apoyo superior se quedó fijo, mientras que fueron la viga junto con los apoyos inferiores, los que ascendieron. Las flechas en rojo de la Figura 3.6 representan el movimiento ascendente realizado por los apoyos inferiores.

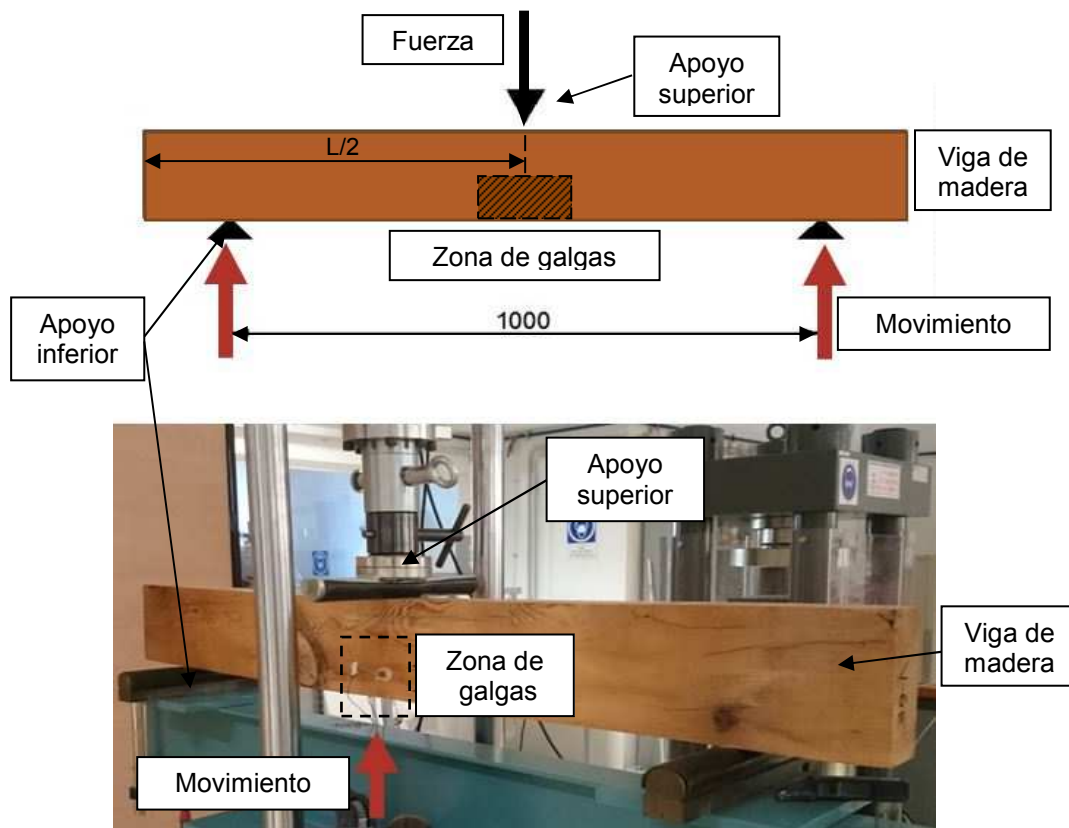


Figura 3.6. Esquema de la disposición del ensayo. Distancias en mm.



Figura 3.7. Izquierda: fotografía del apoyo central entre los apoyos laterales inferiores desmontados de la prensa. Derecha: esquema de un apoyo inferior y la protección contra hundimiento.

El software de la prensa ofrecía la posibilidad de realizar el ensayo por control de fuerza o por posición. Los ensayos se realizaron por posición, manteniendo una velocidad constante de 1,5 mm/min. Se eligió esta velocidad tras la lectura de varias publicaciones en las que se tomaba como velocidad adecuada para este tipo de ensayos con madera.

El desarrollo del ensayo fue el siguiente. Se colocó la pieza centrada en todos los ejes y se aplicó una pequeña carga (precarga) para comprobar que todos los elementos se quedaban en su lugar y que no existían excentricidades. Una vez comprobado, comenzaba la toma de datos de todos los dispositivos. Se le aplicaba la carga a la velocidad constante y se llevaba la probeta hasta el colapso. Una vez la pieza no podía seguir aumentando su carga, se paraba la prensa en esa posición. A esto se le denominó rampa. A continuación, se aplicó una descarga a una velocidad constante de 15 mm/min. Aunque la mayor

importancia a la hora de tomar datos sea el tramo hasta carga máxima, el intervalo de rampa y el proceso de descarga también se monitorizaron

## Capítulo 4. Resultados y análisis

En este Capítulo se exponen los resultados obtenidos de los ensayos realizados, y explicados en el Capítulo 3.

El capítulo se ha estructurado en cuatro Apartados atendiendo al siguiente criterio. En primer lugar, en el Apartado 4.1 se explican los parámetros que se sometieron al análisis y comparación. En el Apartado 4.2 se muestran los resultados pormenorizados de cada viga. A continuación, se realiza una comparación y discusión por grupos de vigas en el Apartado 4.3, siendo la agrupación de estas según su tipo de refuerzo. Por último, se hizo una comparación entre distintos grupos en el Apartado 4.4.

### 4.1. Parámetros analizados en cada viga

**Carga máxima o carga de rotura:** es el valor máximo de carga que la muestra llega a soportar. Este dato fue obtenido directamente de la prensa hidráulica o multiensayos.

**Tensión máxima o módulo de rotura (MOR):** la tensión se define como la fuerza aplicada por unidad de área en la que se aplica y produce una deformación. La tensión se puede descomponer como la suma vectorial de una fuerza paralela a las fibras de la madera, y otra normal a éstas. En los ensayos a flexión simple, como son los de este proyecto, estas tensiones serán de compresión en la parte superior de la pieza, y de tracción en la parte inferior, tal y como se muestra en la Figura 4.1.

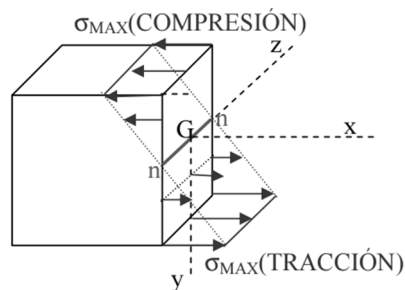


Figura 4.1. Distribución de tensiones en una sección rectangular a flexión simple.

También se generan esfuerzos de cortante debido a las tensiones tangenciales. éstas, al contrario que las normales, se hacen máximas en la fibra neutra de la viga. Estas tensiones pueden provocar el fallo por cortadura, donde las fibras se cortan transversalmente, o fallo por deslizamiento que se produce por el desplazamiento de unas fibras con respecto a otras en la dirección longitudinal. En la Figura 4.2 se pueden ver gráficamente estos dos tipos de fallo por esfuerzo cortante.



Figura 4.2. Esquemas de cortante de cortadura (a la izquierda), y cortante de deslizamiento (a la derecha).

La tensión máxima sufrida en la viga durante el ensayo es la tensión en la sección central, en el instante de máxima carga. Se calcula mediante la expresión

$$\sigma_{\max} = \frac{M_z \cdot y}{I}, \quad (1)$$

donde  $M_z$  es el momento máximo alrededor del eje Z calculado según la expresión

$$M_z = \frac{P \cdot L}{4}, \quad (2)$$

siendo  $y$  es la distancia desde la fibra neutra al extremo de la sección, e  $I$  el momento de inercia de la sección, que en este caso es rectangular, y se calcula como un doceavo de la base por la altura al cubo, tal y como se ve en la expresión

$$I_{\text{rectangular}} = \frac{b \cdot h^3}{12}. \quad (3)$$

De la combinación de las Ecuaciones 1, 2 y 3 se obtiene la fórmula que permite calcular el MOR (*Modulus of rupture*), que se define como la tensión máxima que un espécimen rectangular puede soportar hasta que se rompe, expresado en N/mm<sup>2</sup> o MPa. Su expresión es

$$\text{MOR} = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2}, \quad (4)$$

donde  $P$  es la fuerza aplicada,  $L$  la longitud entre apoyos,  $b$  la base y  $h$  la altura.

**Módulo de Young (MOE):** en el Apartado 2.1.4 se introdujo el módulo de elasticidad o módulo de Young, junto con los distintos modelos elástico-plásticos aceptados. A continuación se explica cómo se ha calculado el módulo de Young en las vigas ensayadas o *Modulus of Elasticity* (MOE).

Una vez obtenidas las tensiones y las deformaciones se tomaron los valores comprendidos en el rango de 30% al 50% de la tensión máxima y deformaciones. Este intervalo define el tramo elástico de mayor estabilidad. El cálculo del MOE se realizó aplicando la fórmula

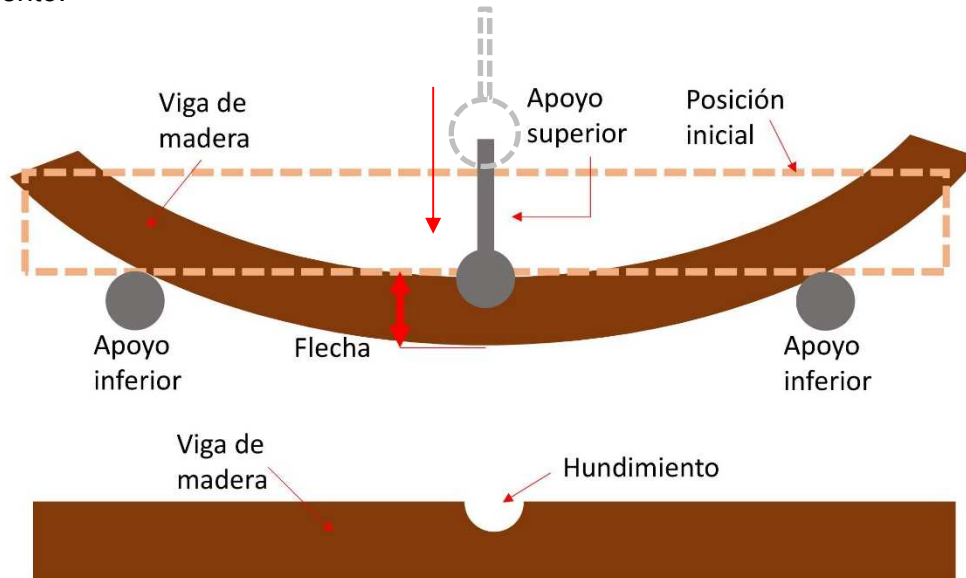
$$\text{MOE} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{30\%}}{\epsilon_{50\%} - \epsilon_{30\%}}. \quad (5)$$

Dicho cálculo se realizó con los datos correspondientes a las galgas B y C (situadas en la cara de mayor tracción). Usando los datos de las galgas A y D (en las caras laterales) también se calculó el módulo de elasticidad, para comprobar cómo la rigidez varía con la distancia a la fibra neutra.

**Flecha máxima:** la flecha es la deformación experimentada por la viga debido a la carga que soporta, lo que origina un descenso, siendo este descenso máximo en el centro de la viga en un ensayo a tres puntos.

En este Proyecto se ha calculado la flecha utilizando los datos de desplazamiento de la máquina multiensayos, y restándole el hundimiento que se produjo en el apoyo central. El apoyo central tenía una pequeña libertad de movimiento u holgura, por lo que le permitió adaptarse perfectamente a la forma de las vigas. Debido a la heterogeneidad de la madera y a defectos como nudos o presencia de carcoma, a veces el hundimiento fue diferente en

las dos caras laterales de las vigas. Por ello, se midió el hundimiento en cada cara y se calculó la media aritmética, usando una regla enrasada en la parte superior de la viga, haciéndola pasar sobre el hundimiento, y midiendo el hueco con un calibre. Descontando el hundimiento obtenido a los datos de desplazamiento máximo, se obtuvo la flecha de cada viga. En la Figura 4.3 se puede observar gráficamente el concepto de flecha y de hundimiento.



**Figura 4.3.** Esquema de flecha y del hundimiento producido tras un ensayo a flexión a tres puntos.

**Modos de fallo:** tras los ensayos, se realizó una inspección visual de cada viga, pudiéndose catalogar los tipos de rotura. Aunque la mayoría de las probetas rompieron por cortante y/o tracción de las fibras inferiores, se tomaron 7 modelos de fallo diferentes (Figura 4.4) [3].



**Figura 4.4.** Modelos de fallo de las vigas ensayadas [3].

Además, en cada rotura, se hizo referencia al material que había fallado, viendo si había roturas en el CFRP o deslaminaciones.

**Gráficas carga-tiempo y tensión-deformación:** gracias a que la prensa usada es eléctrica y presenta células de carga de 10 t, se han podido representar gráficas carga-desplazamiento de cada viga. La gráfica que relaciona la tensión con la deformación se realizó empleando los datos obtenidos por la extensometría, y los cálculos de tensión realizados en hojas de cálculo. De esta forma se obtuvo una gráfica en la que se puede observar la deformación de cada una de las cuatro galgas a lo largo del ensayo, hasta llegar al momento de carga máxima.

## 4.2. Resultados individualizados de cada viga

En este Apartado se muestran los resultados pormenorizados de los parámetros indicados en el Apartado 4.1 para cada una de las vigas ensayadas.

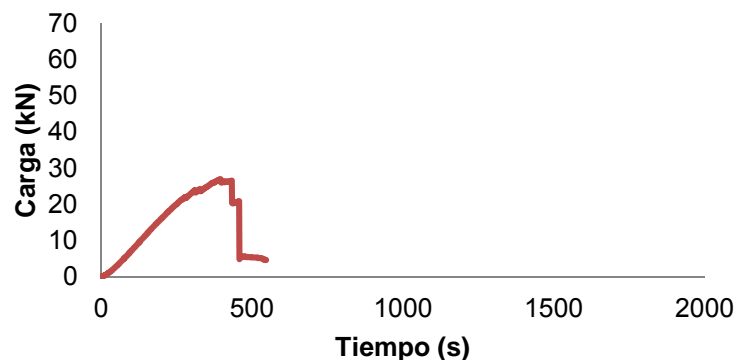
### 4.2.1. NR

A continuación se recogen los resultados obtenidos para las vigas sin refuerzo o *Non Reinforced*. En las Tablas 4.1 a 4.4 se muestran los resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación. De la Figura 4.5 a la 4.13 se muestran las gráficas carga-tiempo y tensión-deformación obtenidas para estas vigas, así como su modo de fallo.

- NR-1

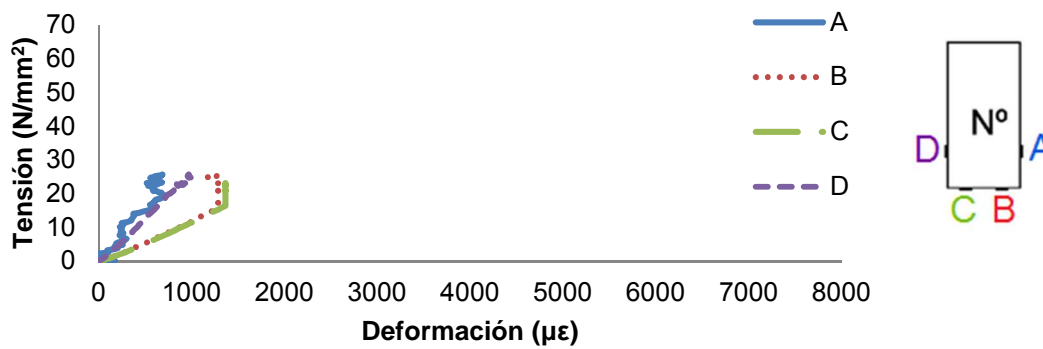
Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
27,06	25,74	13410,55	10,39	3	692,17	Rechazo

**Tabla 4.1.** Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para la viga NR-1.



**Figura 4.5.** Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga NR-1.





**Figura 4.6.** Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga NR-1. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D.

Como se aprecia, la viga NR-1 dio un MOR de  $25,74 \text{ N/mm}^2$  con una carga máxima de  $27,06 \text{ kN}$  y un MOE de  $13410,55 \text{ N/mm}^2$ . Esto, junto con las demás vigas sin reforzar, otorgó unos valores iniciales de referencia. En la Figura 4.6 se observa que la medición de la galga A fue un tanto inestable. Tras su inspección posterior se determinó que esta galga había realizado esta medición errónea debido a que estaba ligeramente despegada. En la Figura 4.7 se muestra la rotura de la viga NR-1. Se puede ver que su rotura se ajustó al modo de fallo 3, por tracción.



**Figura 4.7.** Rotura de la viga NR-1.

- **NR-2**

De esta viga sólo se obtuvieron los datos reflejados en la Tabla 4.2.

Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
20,90	19,88	-	-	6	514,57	Rechazo

**Tabla 4.2.** Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para la viga NR-2.

En la foto de la rotura (Figura 4.8) se aprecia como el fallo se produjo por cortante (modo de fallo 6). También se puede observar que en la parte inferior la pieza muestra claros síntomas de haber sido atacada por insectos xilófagos, en este caso carcoma.



Figura 4.8. Rotura de la viga NR-2.

• NR-3

Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flexión máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
34,56	32,88	7508,31	15,21	5	639,57	MEG

Tabla 4.3. Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para la viga NR-3.

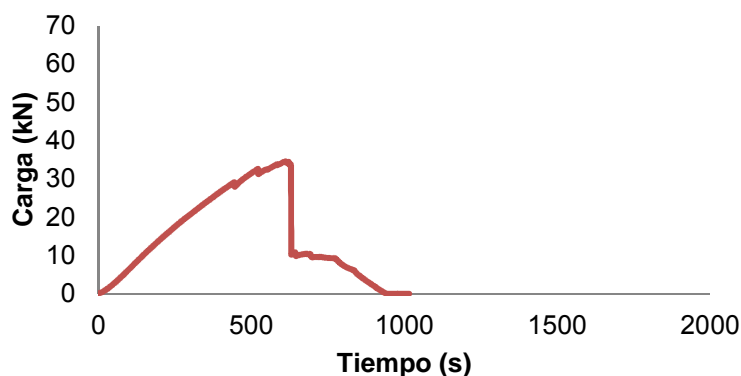


Figura 4.9. Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga NR-3.

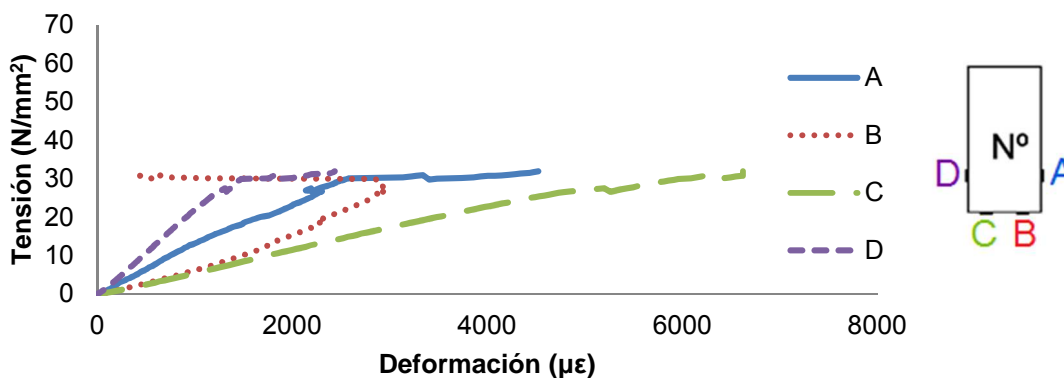


Figura 4.10. Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga NR-3. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D.

Como se observa, se obtuvo un notable aumento de la capacidad de carga, frente a las vigas NR-1 y NR-2. Esto se debe principalmente a que la viga tenía una densidad

considerablemente alta y estaba catalogada como MEG, por lo cual era menos susceptible de fallar por defectos en la misma, tales como nudos o fendas. Su MOE fue más bajo que el de las anteriores ( $7508,31 \text{ N/mm}^2$ ). En la imagen de la Figura 4.11 aparece la rotura de esta viga, que como se aprecia, fue de acuerdo al modelo de fallo 5 (por cortante).



Figura 4.11. Rotura de la viga NR-3.

- NR-4

Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
31,59	30,05	-	13,26	6	642,54	Rechazo

Tabla 4.4. Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para la viga NR-4.

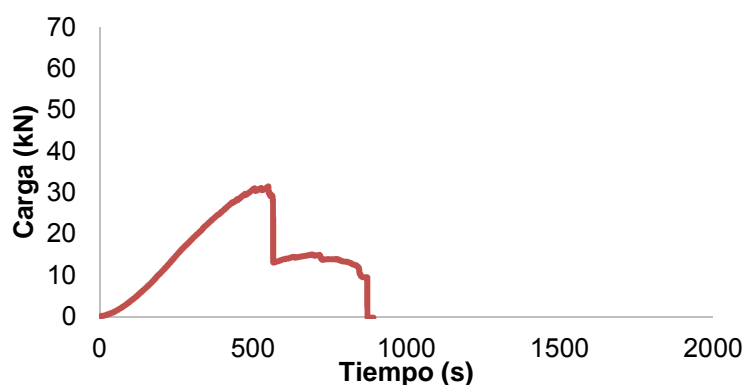


Figura 4.12. Gráfica Carga- Tiempo del ensayo de la viga NR-4.

De la viga NR-4 no se obtuvieron valores de extensometría. A pesar de ello los datos obtenidos en los cuatro primeros especímenes, sirvieron de referencia para los próximos ensayos de las vigas reforzadas con diferentes disposiciones. El modo de fallo por cortante de esta viga fue de acuerdo al modelo 6, tal y como se ve en la imagen de la Figura 4.13.



Figura 4.13. Rotura de la viga NR-4.

### 4.2.2. LR-S-P

En este Apartado se muestran los resultados obtenidos para las vigas con refuerzo longitudinal parcial de la casa SIKA S.A.U. (*Longitudinal Reinforcement - SIKA - Partial width*). De la Tabla 4.5 a la 4.8 se muestran los resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación. De la Figura 4.14 a la 4.22 aparecen las gráficas carga-tiempo y tensión-deformación obtenidas para las vigas LR-S-P y sus respectivas fotos de la rotura.

- LR-S-P-1

Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
61,06	58,09	15057,61	22,07	6	621,78	MEG

Tabla 4.5. Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para la viga LR-S-P-1.

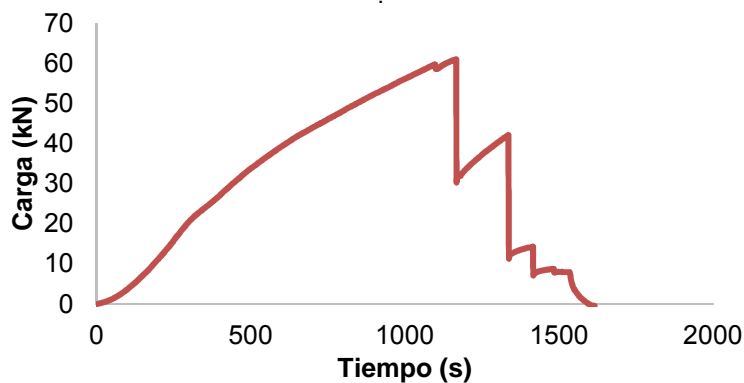
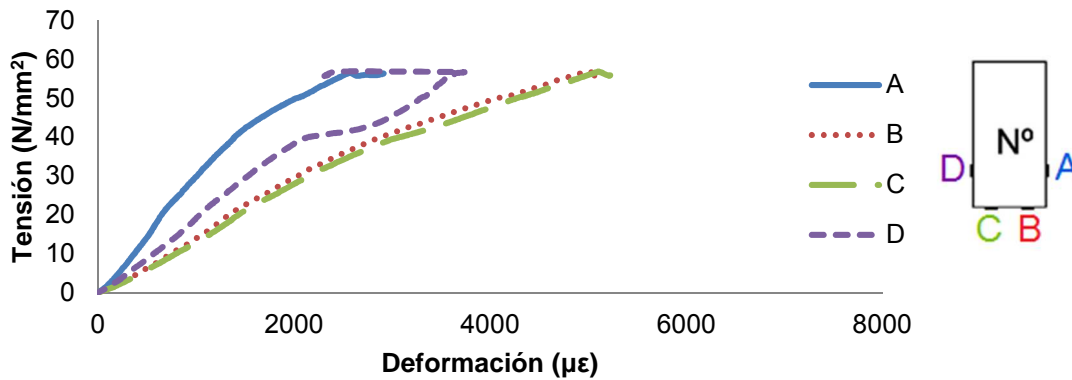


Figura 4.14. Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga LR-S-P-1.



**Figura 4.15.** Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga LR-S-P-1. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D.

Tras el ensayo de esta viga se observó que la carga máxima sufrió un aumento notable. De hecho, esta viga soportó 61,06 kN frente a los 28,53 kN de carga media que se obtuvieron en las vigas sin refuerzo, lo que se traduce en un aumento del 114,03% de la carga soportada. También hay que tener en cuenta que esta viga tenía una densidad elevada y la catalogación de MEG. Atendiendo a la gráfica que relaciona la tensión y las deformaciones (Figura 4.11) se observa como las galgas inferiores, B y C, describieron una trayectoria prácticamente idéntica. Las galgas laterales, A y D, siguieron una tendencia similar, por lo que se puede decir que las deformaciones en este ensayo fueron bastante estables. La rotura fue por cortante (modelo 6) y se observó también una deslaminación parcial del refuerzo en el momento de la rotura (Figura 4.16).



**Figura 4.16.** Rotura de la viga LR-S-P-1.

#### • LR-S-P-2

Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
33,02	31,28	11823,97	13,77	6	485,85	Rechazo

**Tabla 4.6.** Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para la viga LR-S-P-2.

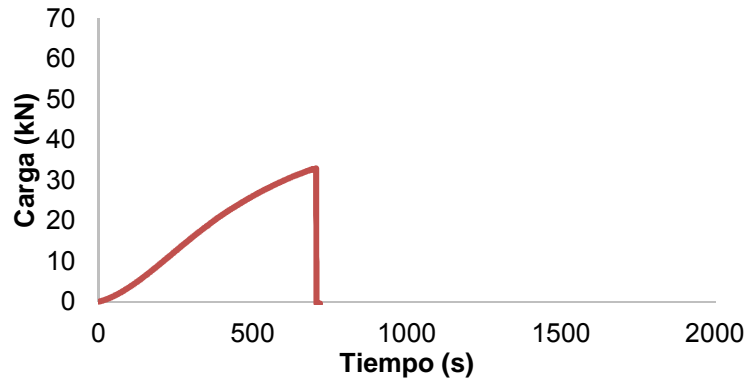


Figura 4.17. Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga LR-S-P-2.

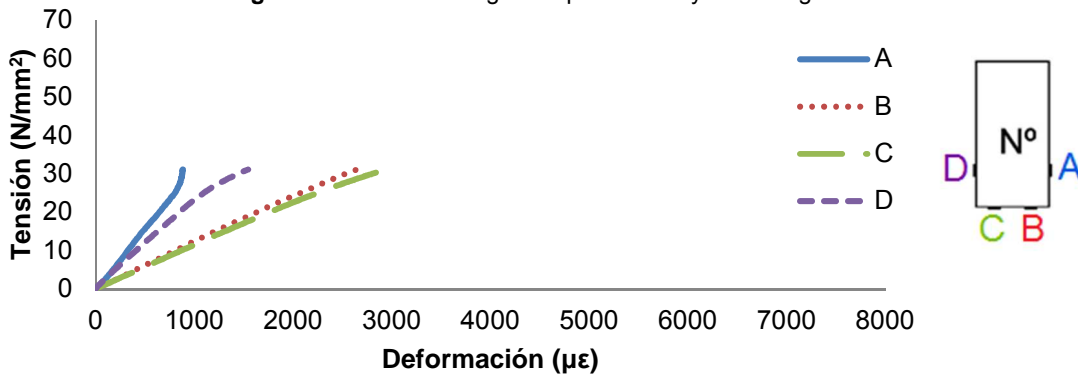


Figura 4.18. Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga LR-S-P-2. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D.

La viga LR-S-P-2 soportó una fuerza de 33,02 kN y tuvo un MOR de 31,28 N/mm<sup>2</sup>. Puede parecer algo más baja de lo esperado si la comparamos con los resultados obtenidos en la LR-S-P-1, pero tras ver que su densidad era baja, que estaba catalogada como Rechazo y que se encontraba afectada por carcoma, es un resultado bastante aceptable. Además, sus deformaciones siguieron manteniéndose muy estables (Figura 4.18) y su MOE fue de 11823,97 N/mm<sup>2</sup>, superando ligeramente el MOE medio de las vigas sin refuerzo. El modo de fallo fue por cortante (modelo 6), partiendo la viga en dos, tal y como se muestra en la foto de su rotura (Figura 4.19).

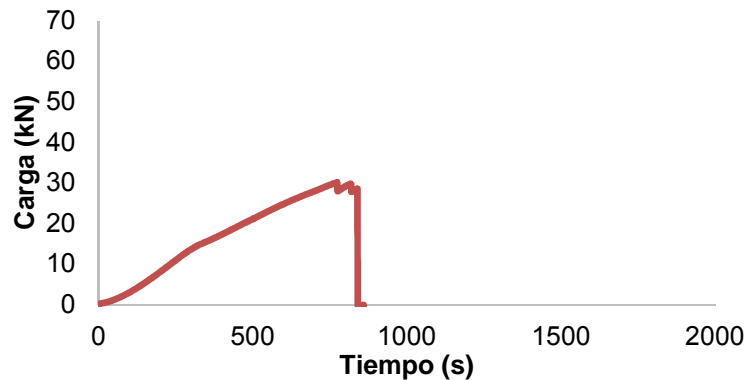


Figura 4.19. Rotura de la viga LR-S-P-2.

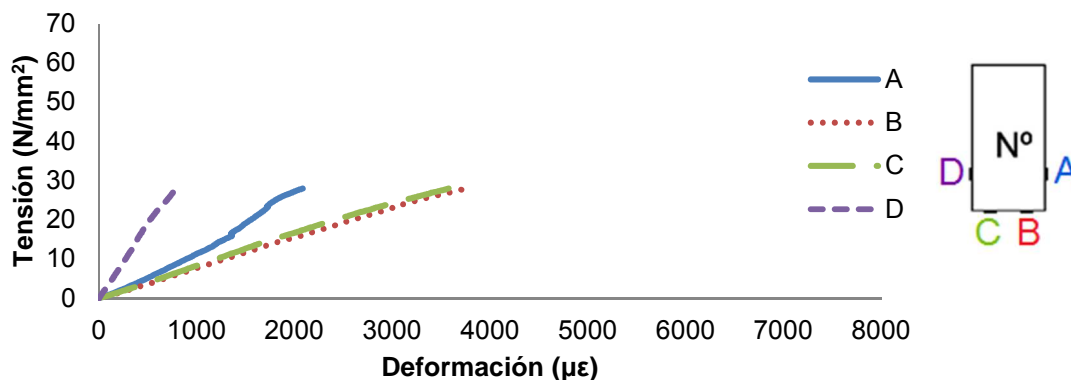
- LR-S-P-3

Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
30,16	28,69	8417,06	15,71	6	475,80	Rechazo

**Tabla 4.7.** Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para la viga LR-S-P-3.



**Figura 4.20.** Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga LR-S-P-3.



**Figura 4.21.** Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga LR-S-P-3. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D.

La viga LR-S-P-3 soportó 30,16 kN con un MOR de 28,69 N/mm<sup>2</sup> antes de romperse. Al igual que la LR-S-P-2, esta viga tenía una densidad baja, y también estaba catalogada como rechazo, por tener grandes nudos pasantes, estando uno de ellos en la zona central. Pese a esto, se volvieron a obtener unas deformaciones muy estables, sobre todo en las galgas inferiores (B y C) y un MOE inferior al de las vigas sin reforzar. La rotura se produjo por cortante (modelo 6), sin producirse deslaminación, como se puede ver en la Figura 4.19. La viga LR-S-P-3 también se encontraba afectada por carcinoma, al igual que la LR-S-P-2, lo cual también influyó en su pérdida de resistencia. A pesar de ello su resistencia fue de un 5,71% superior a la media de las vigas sin refuerzo.



Figura 4.22. Rotura de la viga LR-S-P-3.

• LR-S-P-4

Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
32,33	30,76	14911,98	10,07	6	475,80	Rechazo

Tabla 4.8. Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para la viga LR-S-P-4.

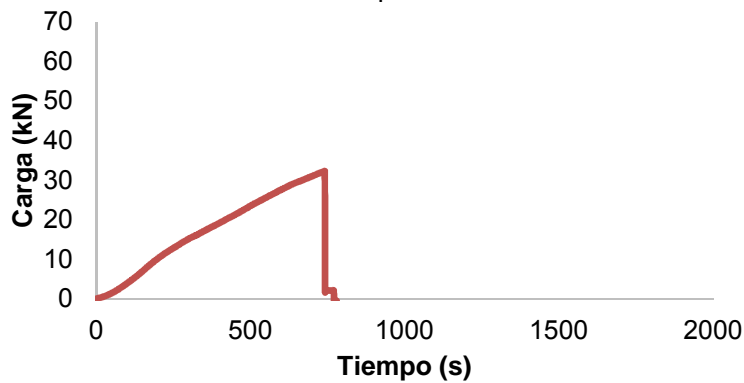


Figura 4.23. Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga LR-S-P-4.

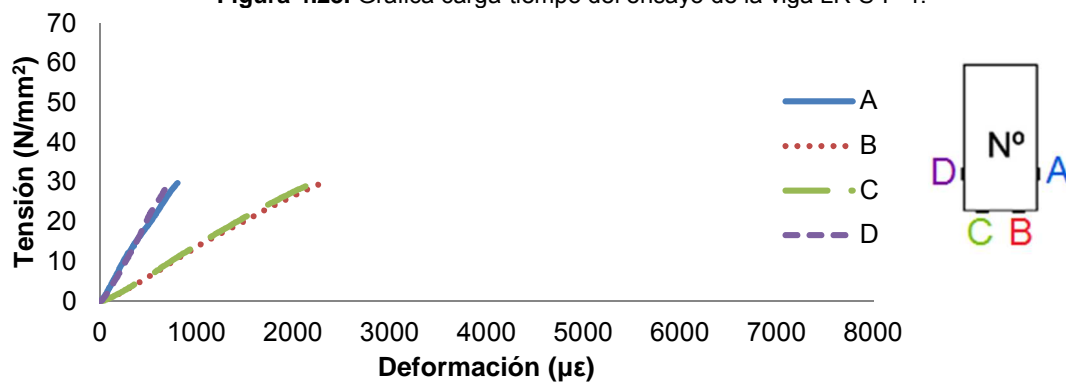


Figura 4.24. Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga LR-S-P-4. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D.

La viga LR-S-P-4 fue la última de este grupo ensayada. Se decidió añadirla a las tres anteriores muestras para intentar obtener unos resultados más homogéneos, ya que dos de las vigas ensayadas de este tipo contenían carcoma. Así los resultados serían de mayor relevancia. Esta viga soportó 32,33 kN y tuvo un MOR de 30,76 N/mm<sup>2</sup> antes de romper



también por cortante (modo 6), lo que representa una mejora del 13% de la capacidad portante frente a la media de las vigas sin refuerzo. Su densidad era baja y también estaba catalogada como rechazo. En cuanto a las deformaciones, en la Figura 4.24 se aprecia que fueron muy estables, y con una tendencia casi idéntica. Su MOE fue de 14911,98 N/mm<sup>2</sup>, superando los 10459,43 N/mm<sup>2</sup> de MOE medio que obtuvieron las vigas sin refuerzo. En la imagen de la Figura 4.25 se puede ver la rotura de la viga LR-S-P-4, la cual prácticamente seccionó la viga en dos (modo de fallo 6).

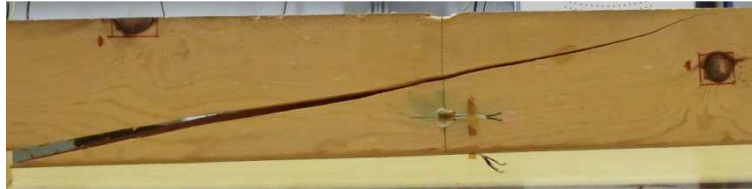


Figura 4.25. Rotura de la viga LR-S-P-4.

### 4.2.3. LR-S-F

Los resultados obtenidos para las vigas con refuerzo longitudinal de ancho completo de la casa SIKA S.A.U. (*Longitudinal Reinforcement - SIKA - Full width*) se muestran en este Apartado. De la Tabla 4.9 a la 4.11 aparecen los resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación. De la Figura 4.26 a la 4.34 aparecen las gráficas carga-tiempo y tensión-deformación obtenidas para las vigas LR-S-F y sus respectivas fotos de la rotura.

- LR-S-F-1

Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
47,23	44,93	14016,97	14,46	5	588,21	Rechazo

Tabla 4.9. Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para la viga LR-S-F-1.

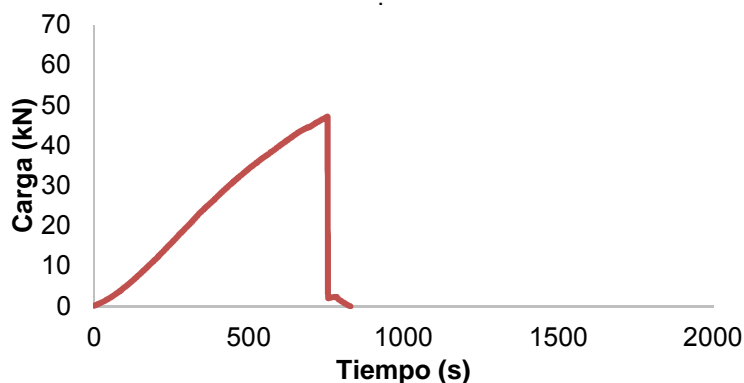
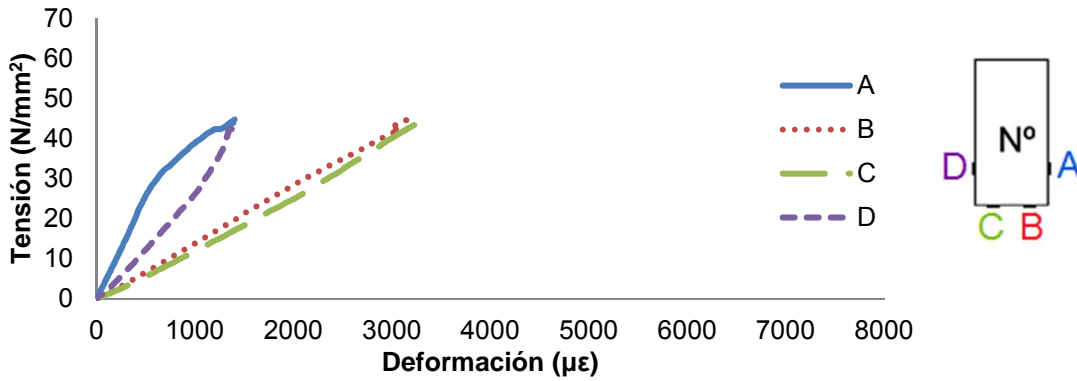


Figura 4.26. Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga LR-S-F-1.



**Figura 4.27.** Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga LR-S-F-1. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D.

La viga LR-S-F-1 obtuvo un resultado de carga máxima de 47,23 kN y un MOR de 44,93 con una densidad de 588,21 kg/m<sup>3</sup> y habiendo sido catalogada como Rechazo. Estos resultados suponen un aumento del 65,55% de la capacidad de carga frente a la media de las vigas sin reforzar. Como se puede ver en la fotografía (Figura 4.28) su rotura se produjo por cortante, de acuerdo al modelo de fallo 5. También se observó, tras una inspección visual posterior, que se produjo una deslaminación parcial entre el laminado y la resina. En cuanto a las deformaciones, en esta viga se presentaron bastante estables, aunque la tendencia de las laterales (D y A) comenzó a adquirir una pendiente mayor, alejándose de las inferiores (Figura 4.27).



**Figura 4.28.** Rotura de la viga LR-S-F-1.

• **LR-S-F-2**

Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
52,52	49,91	16890,07	17,97	5	593,83	MEG

**Tabla 4.10.** Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para la viga LR-S-F-2.

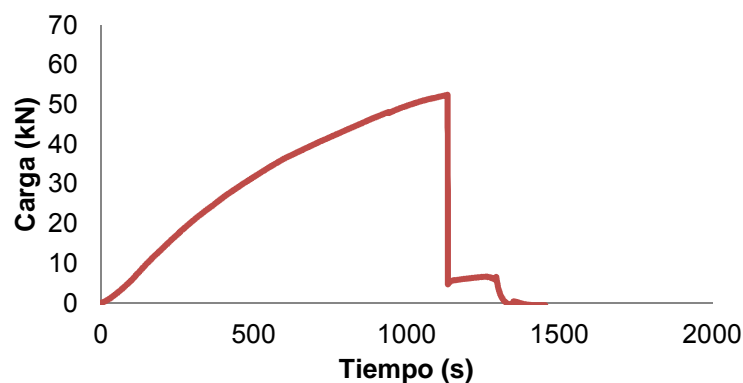


Figura 4.29. Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga LR-S-F-2.

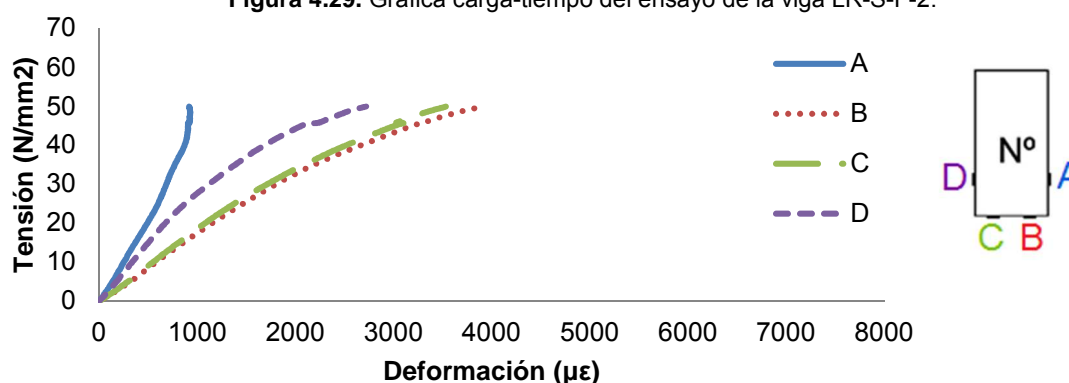


Figura 4.30. Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga LR-S-F-2. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D.

La viga LR-S-F-2 alcanzó 52,52 kN de carga máxima, con un MOR de 49,91 N/mm<sup>2</sup>, lo que supone un aumento de la capacidad de carga de un 82,84%. Pese a que presentaba varios defectos tales como agujeros pasantes u oquedades, tuvo una gran resistencia. Se ha de considerar también que fue catalogada como MEG y que su densidad era de 593,83 kg/m<sup>3</sup>, una densidad por encima de la media. En cuanto a su MOE fue muy superior de la media de las vigas sin refuerzo, con un valor de 16890,07 N/mm<sup>2</sup>. Se fracturó de acuerdo al modelo de fallo 5 de forma violenta. En la Figura 2.31 se puede apreciar tanto la rotura, como los defectos nombrados.

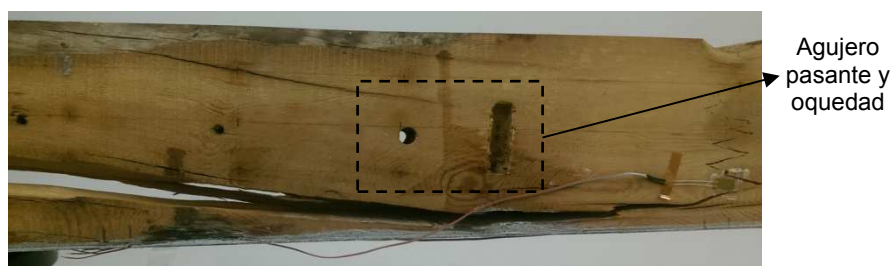
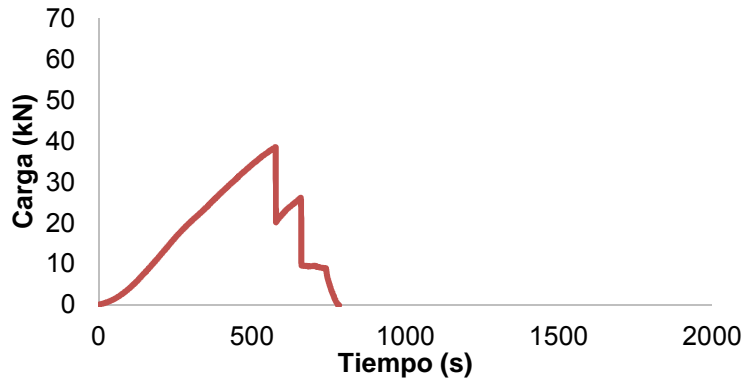


Figura 4.31. Rotura de la viga LR-S-F-2.

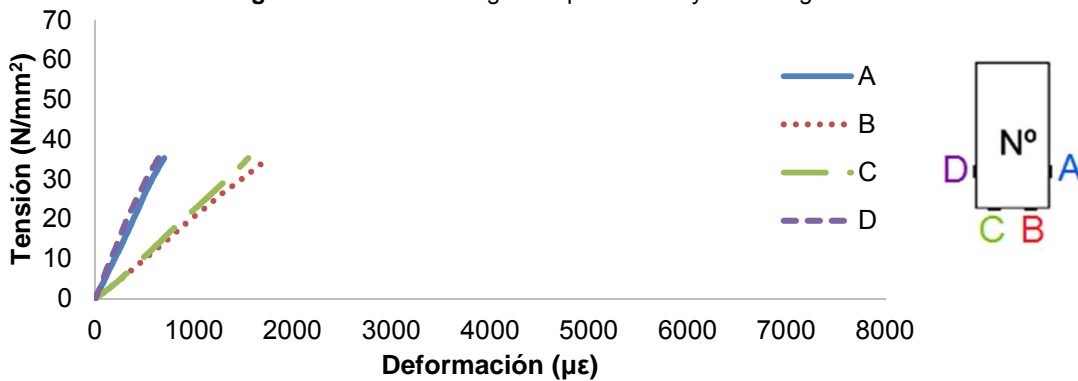
• LR-S-F-3

Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
38,60	36,72	22811,95	12,81	6	718,25	Rechazo

**Tabla 4.11.** Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para la viga LR-S-F-3.



**Figura 4.32.** Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga LR-S-F-3.



**Figura 4.33.** Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga LR-S-F-3. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D.

La rotura en la viga LR-S-F-3 tuvo lugar a los 38,60 kN de carga. La rotura se adecua al modelo de fallo 6, y se produjo de tal modo que atravesó la superficie en la que se encontraba pegada la galga D, que es la que aparece en la Figura 4.34. Fue catalogada como rechazo, y aunque su densidad fuera de las más altas entre las muestras, no se obtuvo una excesiva carga, pero superó a las vigas sin refuerzo. Durante la rotura tuvo varios desplomes, pero teniendo capacidad suficiente como para volver a incrementar la carga, siempre por debajo de la carga máxima alcanzada anteriormente reflejando un comportamiento dúctil (Figura 4.32). Su módulo de elasticidad a flexión MOE alcanzó un valor de 22811,95 N/mm<sup>2</sup>, más del doble que la media de las vigas sin refuerzo. Esto provocó que la viga no admitiera tantas deformaciones como el resto de su grupo antes de romperse. No obstante, como se aprecia en la Figura 4.33, las deformaciones fueron muy estables y casi idénticas en cada pareja de galgas (inferiores y laterales).



Figura 4.34. Rotura de la viga LR-S-F-3.

#### 4.2.4. LR-D-P

En este Apartado se muestran los resultados obtenidos para las vigas con refuerzo longitudinal parcial de la casa DRIZORO S.A.U. (*Longitudinal Reinforcement - DRIZORO - Partial width*). De la Tabla 4.12 a la 4.14 se muestran los resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación. De la Figura 4.35 a la 4.43 aparecen las gráficas carga-tiempo y tensión-deformación obtenidas para las vigas LR-D-P así como su modo de fallo y su rotura.

- LR-D-P-1

Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
34,63	32,95	14095,95	16,39	5	520,95	MEG

Tabla 4.12. Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para la viga LR-D-P-1.

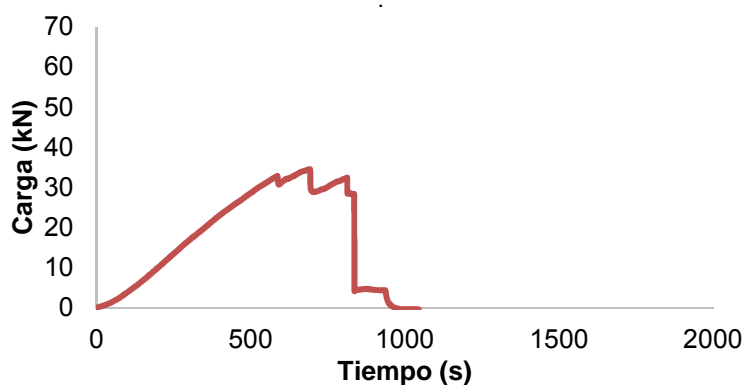
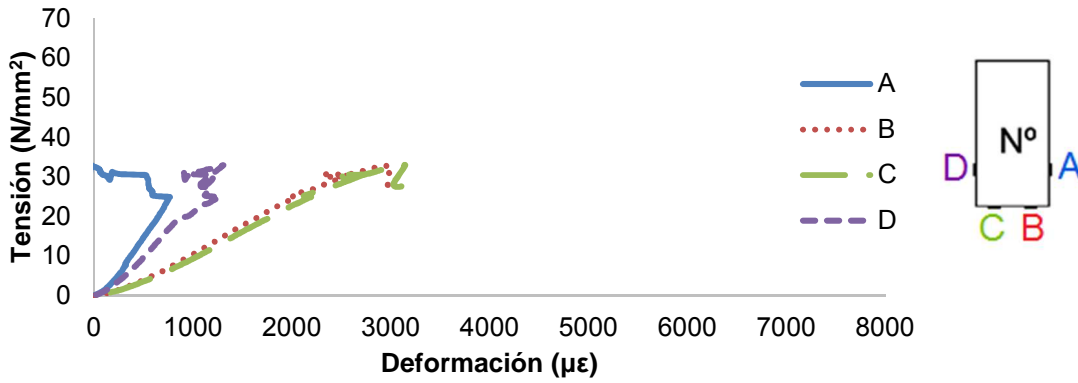
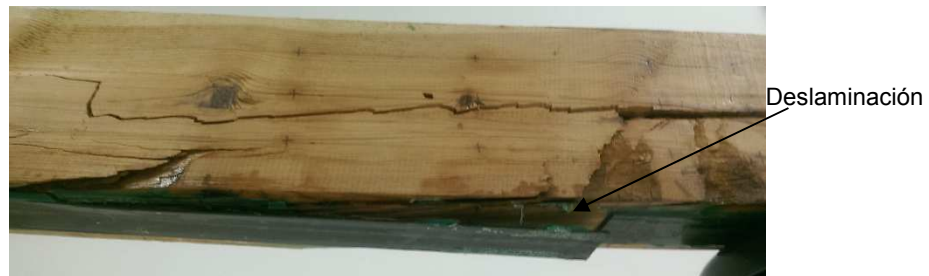


Figura 4.35. Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga LR-D-P-1.



**Figura 4.36.** Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga LR-P-D-1. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D.

La viga LR-D-P-1 soportó una carga máxima de 34,63 kN y un MOR de 32,95 N/mm<sup>2</sup>, superando en un 21,41% el MOR medio de las vigas sin reforzar. En la Figura 4.36 se observa que las galgas A y D tuvieron un comportamiento anómalo. Tras una inspección visual de la pieza ensayada se vio que la galga A se encontraba pegada en una zona oscura de la madera (cercana a nudos) y la rotura se produjo por debajo y cerca de esta. En cuanto a la galga D, estaba pegada muy cerca de una pequeña zona hueca que existía en la viga. Aun así, el resultado del cálculo del módulo de elasticidad a flexión se mantuvo en un valor dentro del intervalo a esperar para este tipo de refuerzo (14095,95 N/mm<sup>2</sup>). En la Figura 4.37 se puede apreciar que el modo de fallo fue por cortante (modo de fallo 5), apreciándose una cierta ductilidad en el momento de su rotura (Figura 4.35), ya que se pueden observar varios aumentos de carga tras alcanzar la carga máxima. También se produjo una deslaminación parcial entre la madera y la resina en uno de los extremos (deslaminación).



**Figura 4.37.** Rotura de la viga LR-D-P-1.

• **LR-D-P-2**

Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
54,32	51,67	12281,32	20,94	6	694,63	Rechazo

**Tabla 4.13.** Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para la viga LR-D-P-2.

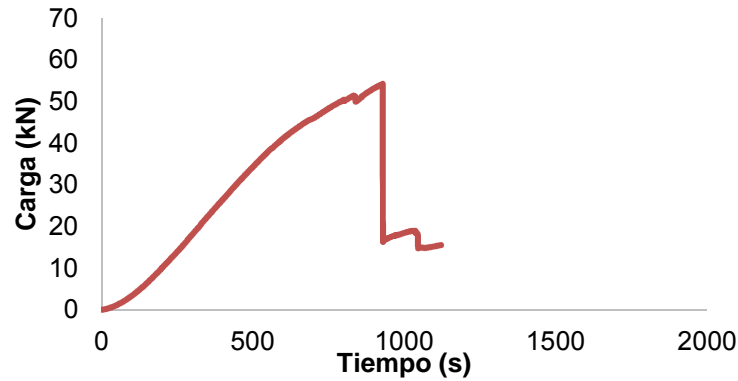


Figura 4.38. Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga LR-D-P-2.

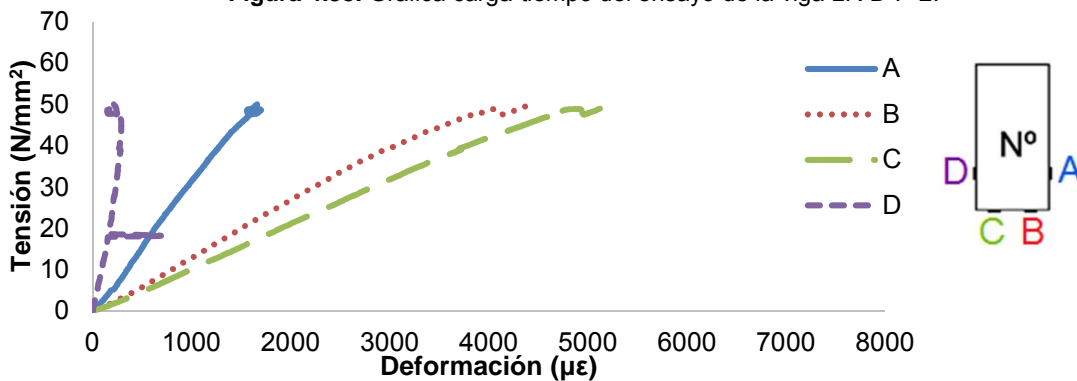


Figura 4.39. Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga LR-P-D-2. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D.

La viga LR-D-P-2 fue catalogada como rechazo debido a la cantidad de nudos y el tamaño de los mismos. Asimismo, su densidad era alta ( $694,63 \text{ kg/m}^3$ ), alcanzando una carga máxima de  $54,32 \text{ kN}$  y un MOR de  $51,67 \text{ N/mm}^2$ , lo cual supera a los resultados medios de las vigas sin refuerzo en un  $90,39\%$  de la capacidad de carga. La rotura se produjo por cortante (modo de fallo 6), generándose alrededor de un gran nudo, tal y como se observa en la Figura 4.40, aunque también mostró signos de fallo por compresión en la parte superior de la viga. En la Figura 4.38 se puede observar como tras alcanzar la carga máxima, la viga todavía conservaba una capacidad de carga de alrededor de  $19 \text{ kN}$ . A su vez se produjo una deslaminación parcial entre el laminado y la resina. Su MOE fue de  $12281,32 \text{ N/mm}^2$ , y obtuvo unas deformaciones elevadas en las galgas inferiores, tal y como se muestra en la Figura 4.39. No obstante, las galgas laterales no sufrieron una deformación tan acusada, debido probablemente a la existencia de un gran nudo cercano a la zona de pegado, el cual se puede ver en el extremo izquierdo de la Figura 4.40.

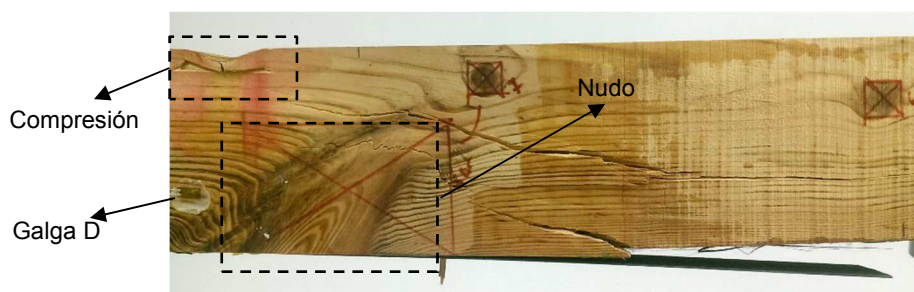


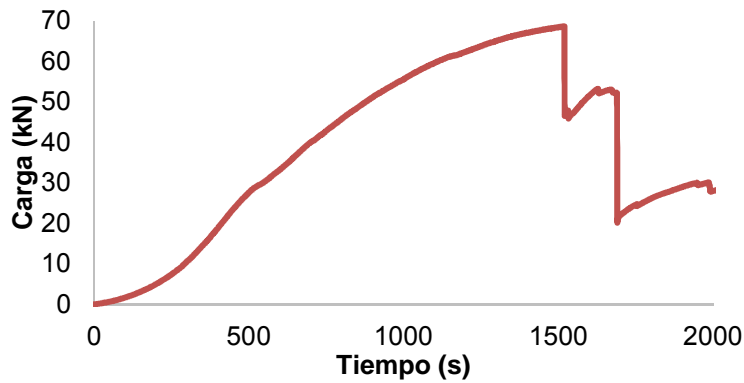
Figura 4.40. Rotura de la viga LR-D-P-2.



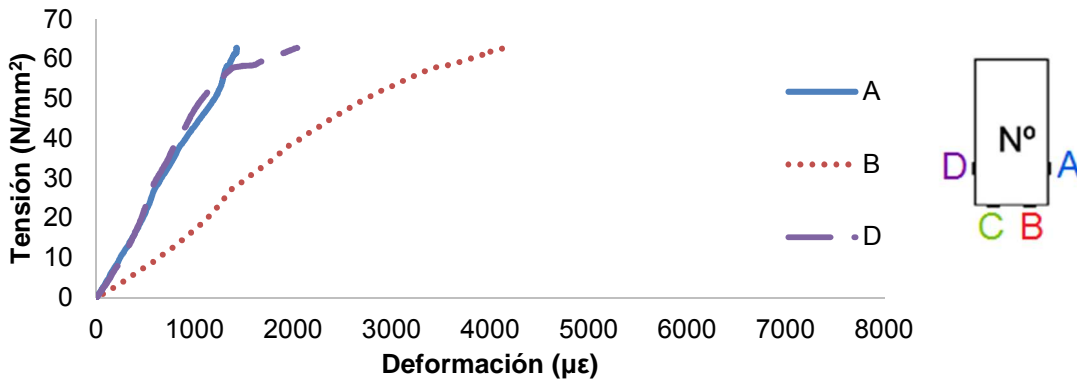
• LR-D-P-3

Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
68,71	65,36	24397,03	16,05	5	780,95	MEG

**Tabla 4.14.** Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para la viga LR-D-P-3.



**Figura 4.41.** Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga LR-D-P-3.



**Figura 4.42.** Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga LR-P-D-3. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D.

La viga LR-D-P-3 soportó 68,71 kN, un 140,83% más que la media de las vigas sin refuerzo. Alcanzó el MOR más alto de todos los ensayos (65,36 N/mm<sup>2</sup>). En la Figura 4.42 se aprecia cómo sólo se obtuvieron tres medidas de galgas extensométricas. Esto es debido a que la medición de la galga C falló. Aun así, se puede observar que las deformaciones de las galgas A y D fueron muy similares, y que como en los casos anteriores, la galga B, siendo una de las inferiores, alcanzó una mayor deformación. El modo de fallo de la viga LR-D-P-3 fue por cortante tipo 5. Su rotura fue similar a la de la viga LR-D-P-1 y la pérdida de la capacidad portante fue gradual tras alcanzar la carga máxima. En la Figura 4.43 se puede apreciar la fisura longitudinal generada por el cortante, no existiendo deslaminación alguna (modo de fallo 5).





Figura 4.43. Rotura de la viga LR-D-P-3.

#### 4.2.5. LR-D-F

Los resultados obtenidos para las vigas con refuerzo longitudinal de ancho completo de la casa DRIZORO S.A.U. (*Longitudinal Reinforcement - DRIZORO - Full width*) se muestran en este Apartado. Este grupo de vigas es el último de los reforzados exclusivamente con laminado. De la Tabla 4.15 a la 4.17 aparecen los resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación. De la Figura 4.44 a la 4.52 aparecen las gráficas carga-tiempo y tensión-deformación obtenidas para las vigas LR-D-F, sus respectivas fotos de la rotura y modo de fallo.

- LR-D-F-1

Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
48,41	46,05	13186,33	15,82	6	594,35	MEG

Tabla 4.15. Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para la viga LR-D-F-1.

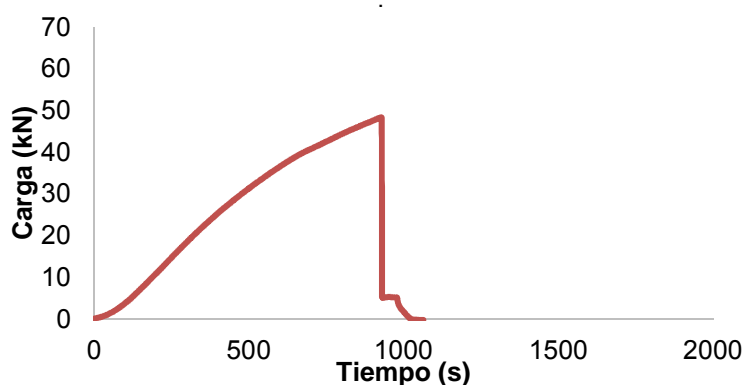
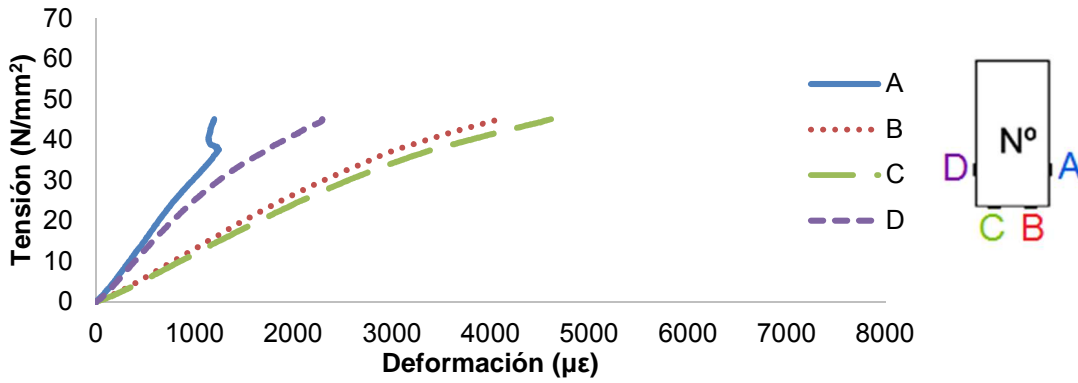
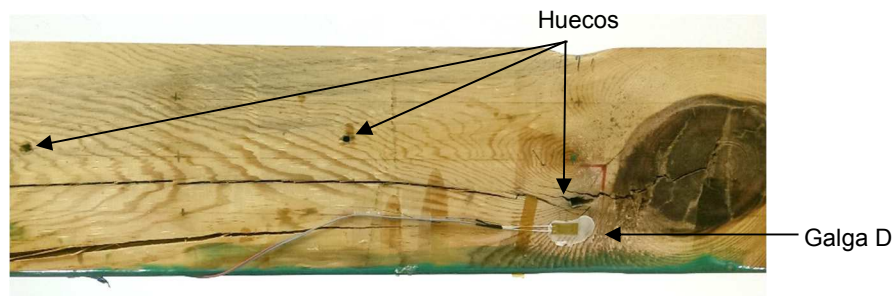


Figura 4.44. Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga LR-D-F-1.



**Figura 4.45.** Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga LR-D-F-1. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D.

El fallo en la viga LR-D-F-1 se produjo por cortante, a los 48,41 kN de fuerza, según el modo de fallo tipo 6. Como se aprecia en la Figura 4.43 la rotura se originó en el interior de un gran nudo pasante en la pieza, y a través de uno de los huecos de clavos que se encontraba muy próximo a este. A pesar de estos defectos, la mejora del MOR frente a la media de las vigas sin reforzar fue de un 69,68%. Aunque la galga D se encontraba pegada junto a estas dos imperfecciones de la viga (Figura 4.46), en la gráfica de la Figura 4.45 no se aprecia ningún comportamiento anómalo. Sin embargo, la galga A, pegada en una situación similar, muy cerca del nudo, sí que pudo verse afectada en los últimos tramos del ensayo. Probablemente debido a esto, alrededor de los 40 N/mm<sup>2</sup> de tensión a flexión, sus deformaciones disminuyeron (Figura 4.45), y acabó despegándose. El MOE calculado fue superior a todos los obtenidos en las vigas sin refuerzo.



**Figura 4.46.** Rotura de la viga LR-D-F-1.

• **LR-D-F-2**

Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
32,65	31,06	15616,87	12,99	6	535,60	Rechazo

**Tabla 4.16.** Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para la viga LR-D-F-2.

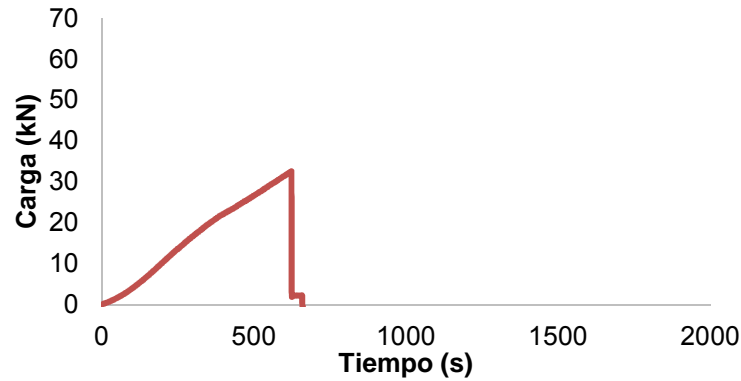


Figura 4.47. Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga LR-D-F-2.

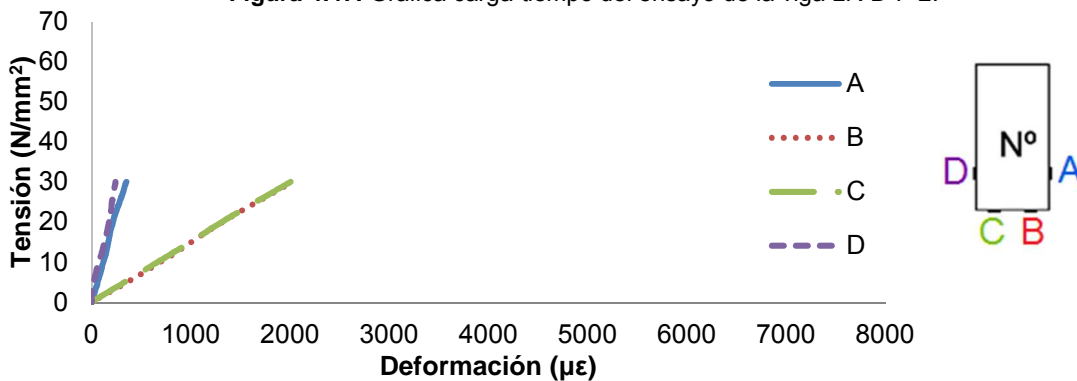


Figura 4.48. Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga LR-D-F-2. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D.

En la Figura 4.48 se puede ver que las deformaciones por parejas de galgas fueron bastante similares, o casi idénticas. Sin embargo, no se produjeron unas deformaciones muy elevadas, especialmente en el caso de las galgas laterales (D y A), en las que apenas se produjeron deformaciones. Su MOE fue de  $15616,87 \text{ N/mm}^2$ , el mayor del grupo y también mayor que los de las vigas sin refuerzo, como era de suponer. La fuerza soportada y el MOR tampoco fueron muy elevados en la viga LR-D-F-2 pero superó en un 14,44% la capacidad de carga media de las vigas sin refuerzo. Como se aprecia en la fotografía de la Figura 4.49 la rotura se dio por cortante (modelo de fallo 6), llegando hasta casi seccionar la pieza en dos. Tras la inspección visual posterior se observó una pequeña deslaminación resina-laminado, en uno de los extremos (esquina izquierda inferior de la Figura 4.49).

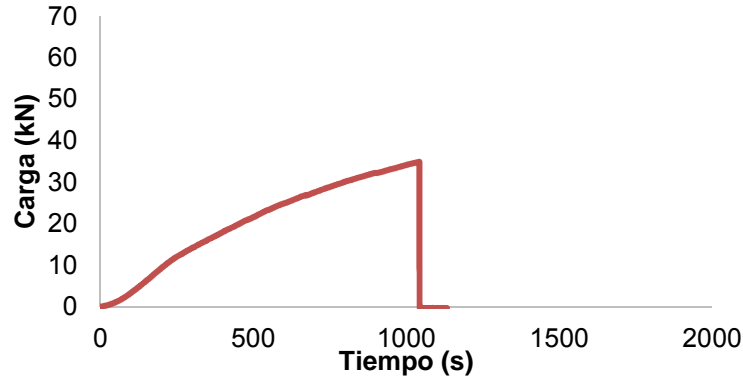


Figura 4.49. Rotura de la viga LR-D-F-2.

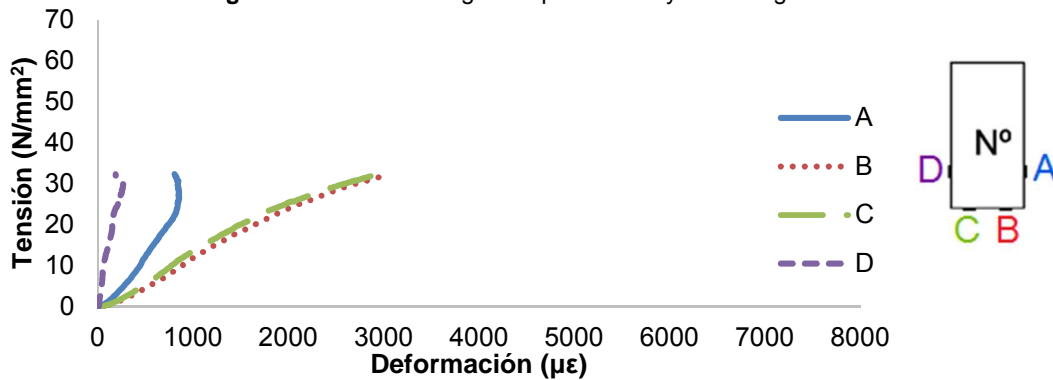
• LR-D-F-3

Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
34,99	33,28	14374,70	19,03	6	463,09	Rechazo

**Tabla 4.17.** Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para la viga LR-D-F-2.



**Figura 4.50.** Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga LR-D-F-3.



**Figura 4.51.** Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga LR-D-F-3. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D.

La viga LR-D-F-3 estaba catalogada como Rechazo debido a una gran fenda horizontal. Cuando rompió, lo hizo por este defecto y soportó una carga de 34,99 kN y un MOR de 33,28 N/mm<sup>2</sup>, mejorando los resultados medios de carga de las vigas sin refuerzo en un 22,64%. La viga LR-D-F-3 rompió de forma brusca (Figura 4.50). En la Figura 4.52 se puede apreciar que la rotura fue por cortante de acuerdo al modo de fallo 6, y que se generó debido a la fenda horizontal, que continúa por la parte derecha de la fotografía. En cuanto a la extensometría, (Figura 4.51) se ve que las galgas inferiores, B y C, tuvieron un comportamiento casi idéntico, mientras que las galgas laterales no. El comportamiento de las galgas A y D fue algo anormal, obteniéndose muy pocas deformaciones, e incluso existiendo una recesión al final del ensayo, sobre los 25 N/mm<sup>2</sup> de tensión. Lo cual indicó que la fibra neutra llegó a sobrepasar estas galgas.



**Figura 4.52.** Rotura de la viga LR-D-F-3.

Tras los ensayos realizados simplemente con refuerzo longitudinal de laminado, se incorporó el tejido. Los Apartados 4.2.6, 4.2.7, y 4.2.8 corresponden a los grupos de vigas con refuerzo de tipo mixto. Tras los resultados de los refuerzos con laminado se determinó que en los refuerzos mixtos se colocaría laminado de ancho parcial, y no total. Esto se debe a que se realizó una comparación entre ambos tipos, la cual se explicará con más detalle en el Apartado 4.4. Atendiendo a los resultados obtenidos por el equipo de extensometría se vio que aunque la diferencia entre resistencias no sea muy clara, en cuanto a deformaciones sí que lo es. Por eso se decidió este ancho, ya que admite mayor deformación antes de romper, acompañando a la de la propia madera.

#### 4.2.6. WLR-S

En este Apartado se van a mostrar los resultados obtenidos para el primer grupo de refuerzos mixtos (laminado y tejido), los refuerzos mixtos de SIKKA S.A.U. o WLR-S por sus siglas en inglés *Wrap and Longitudinal Reinforcement - SIKKA*. De la Tabla 4.18 a la 4.20 aparecen los resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación. De la Figura 4.53 a la 4.61 aparecen las gráficas carga-tiempo y tensión-deformación obtenidas para las vigas de este grupo y sus respectivas fotos de la rotura y modo de fallo.

- **WLR-S-1**

Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
48,89	46,51	14867,82	29,95	6	464,41	Rechazo

**Tabla 4.18.** Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para la viga WLR-S-1.

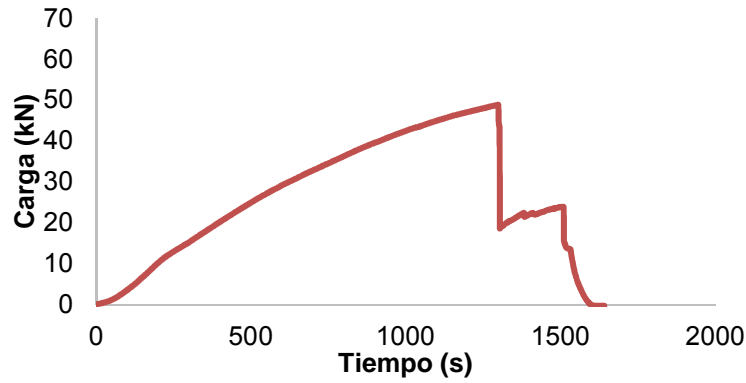


Figura 4.53. Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga WLR-S-1.

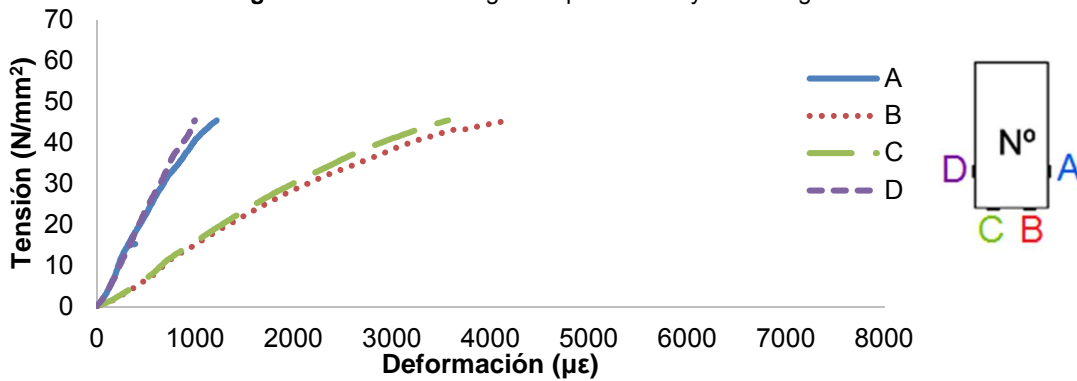


Figura 4.54. Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga WLR-S-1. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D.

A pesar de tener una densidad bastante baja y de haber sido catalogada como Rechazo, la viga WR-S-1 obtuvo un valor de carga máxima de 48,89 kN y un MOR de 46,51 N/mm<sup>2</sup> superando en un 71,36% a la media de carga de las vigas sin refuerzo. La rotura desquebrajó también el tejido, con lo cual se tuvo una prueba visible para determinar el modo de fallo, el cual fue por cortante de acuerdo al modelo de fallo 6, tal y como se ve en la Figura 4.55. Además en la gráfica podemos observar que tras la rotura principal, se produjo un nuevo aumento de la carga, lo cual refleja que fue una rotura dúctil. En los datos de extensometría (Figura 4.54) se puede apreciar como las deformaciones fueron muy estables, y casi idénticas en pares laterales e inferiores, también debido a que las galgas estaban pegadas sobre el tejido, lo cual homogenizó los datos de deformación obtenidos. Su MOE fue de 14867,82 N/mm<sup>2</sup>, superando notablemente a los de las vigas sin refuerzo.

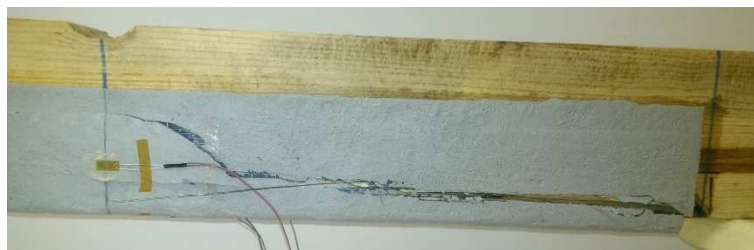
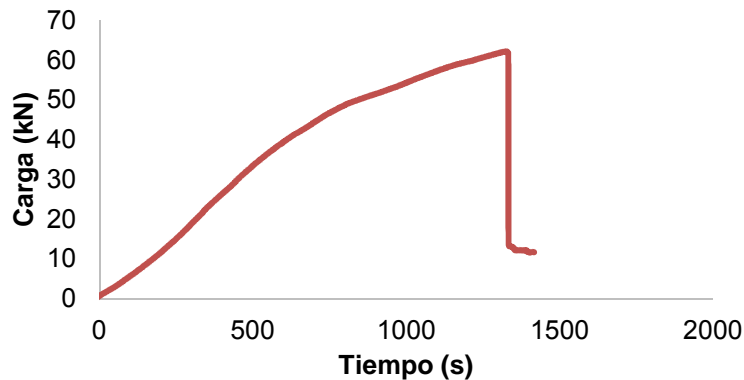


Figura 4.55. Rotura de la viga WLR-S-1.

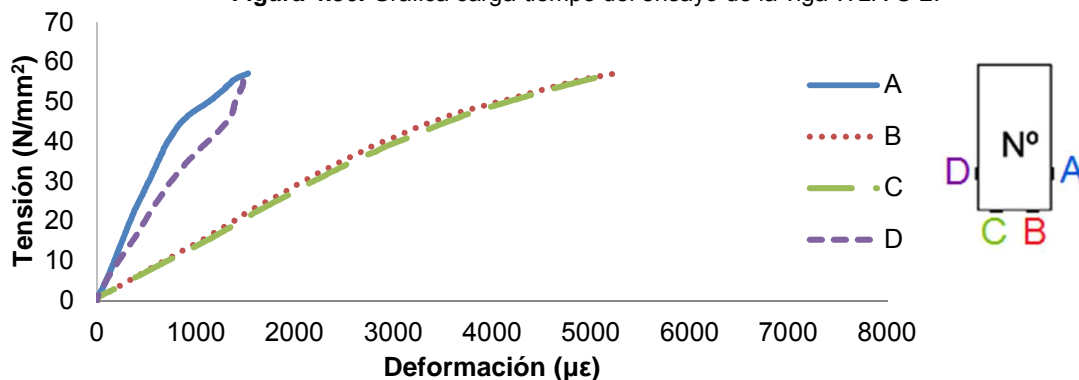
- **WLR-S-2**

Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
62,27	59,23	14215,19	16,69	6	464,41	Rechazo

**Tabla 4.19.** Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para la viga WLR-S-2.



**Figura 4.56.** Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga WLR-S-2.



**Figura 4.57.** Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga WLR-S-2. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D.

La viga WLR-S-2 presentaba una densidad baja, y estaba catalogada como Rechazo. Tras su refuerzo y ensayo, la viga soportó una carga máxima de 62,27 kN, obteniéndose por lo tanto un MOR de 59,23 N/mm<sup>2</sup>. El aumento de la carga con respecto a la media de las vigas sin reforzar fue de un 118,26%. Los datos de extensometría (Figura 4.57) reflejan que la viga llegó a un número de deformación y tensión elevado, manteniendo una pendiente mucho más igualada en las galgas inferiores que las laterales. Éstas, como se muestra en la Figura 4.57, comenzaron con unas pendientes divergentes, pero a medida que avanzó el ensayo, sus deformaciones se igualaron, hasta llegar prácticamente a la misma cantidad de deformaciones en el momento de la rotura. Su MOE fue muy similar al de la viga WLR-S-2 y ligeramente superior al mayor de los obtenidos en las vigas sin refuerzo. La rotura de la viga WLR-S-2 fue por cortante (modo 6) como muestra la Figura 4.58 y aunque fue brusca, mantuvo una capacidad portante superior a 10 kN tras alcanzar su carga máxima tal y como se ve en la Figura 4.56.





Figura 4.58. Rotura de la viga WLR-S-2.

• WLR-S-3

Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
61,97	58,95	13044,72	30,46	6	628,75	MEG

Tabla 4.20. Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para la viga WLR-S-3.

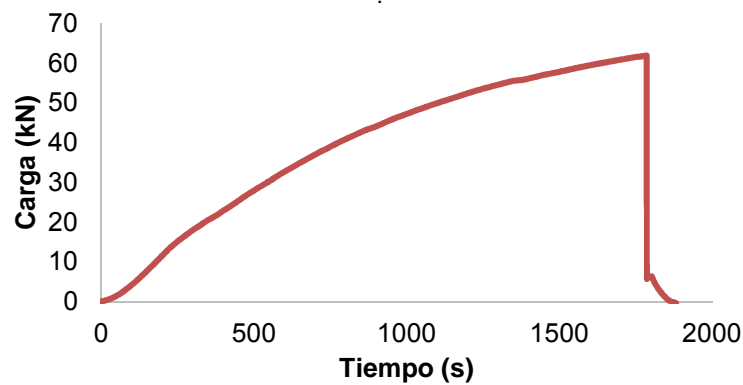


Figura 4.59. Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga WLR-S-3.

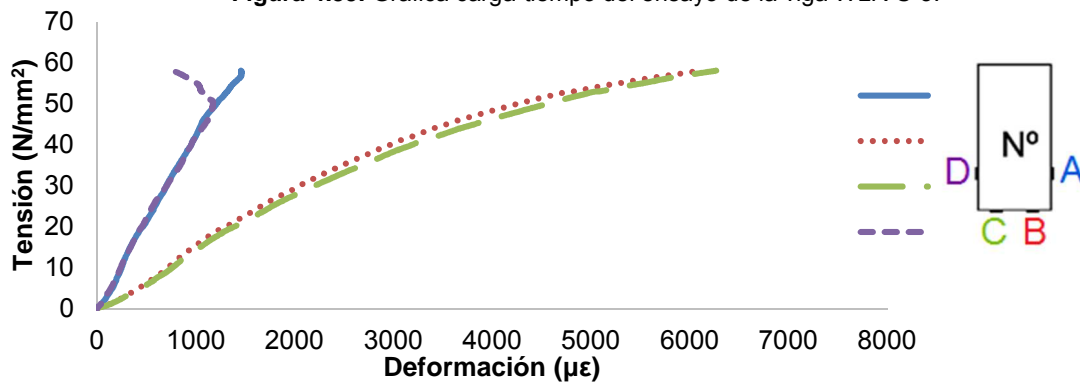


Figura 4.60. Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga WLR-S-3. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D.

La viga WLR-S-3 estaba catalogada como MEG lo cual hizo que junto al refuerzo y su densidad de 628,75 kg/m<sup>3</sup>, la muestra soportara una carga máxima de 61,97 kN antes de llegar a su colapso, superando en un 117,20% a la media de las vigas sin reforzar. Antes de romper alcanzó una flecha de 30,46 mm, el valor de flecha más elevado de todos los



especímenes ensayados. En la imagen de la Figura 4.61 se puede apreciar el acusado hundimiento que se produjo durante el ensayo debido a la gran carga que soportó. También se puede ver que el modo de fallo fue por cortante, de acuerdo al modelo de fallo 6. En los datos de extensometría se puede observar que las tensiones y las deformaciones fueron elevadas. Además, las deformaciones fueron muy estables y prácticamente idénticas en los pares (laterales e inferiores). Su MOE fue algo inferior al del resto del grupo, pero superior al de las vigas sin refuerzo.

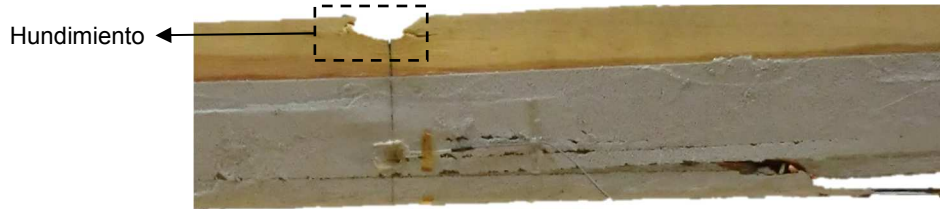


Figura 4.61. Rotura de la viga WLR-S-3.

#### 4.2.7. WLR-D-U

Los resultados obtenidos para las vigas reforzadas con laminado de DRIZORO S.A.U. y tejido unidireccional de DRIZORO S.A.U. o WLR-D-U por sus siglas en inglés *Wrap and Longitudinal Reinforcement – DRIZORO – Unidirectional*, se muestran en este Apartado. De la Tabla 4.21 a la 4.23 pueden verse los resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación. De la Figura 4.62 a la 4.70 se muestran las gráficas carga-tiempo y tensión-deformación obtenidas para las vigas de este grupo y sus respectivas fotos de la rotura.

- **WLR-D-U-1**

Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
48,88	43,64	11783,48	27,78	4	542,59	Rechazo

Tabla 4.21. Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para la viga WLR-D-U-1.

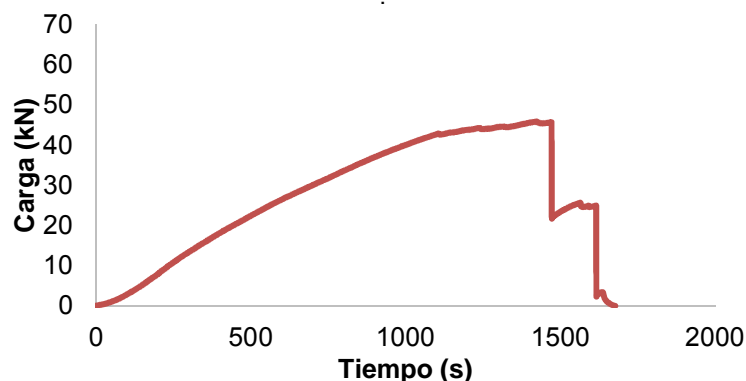
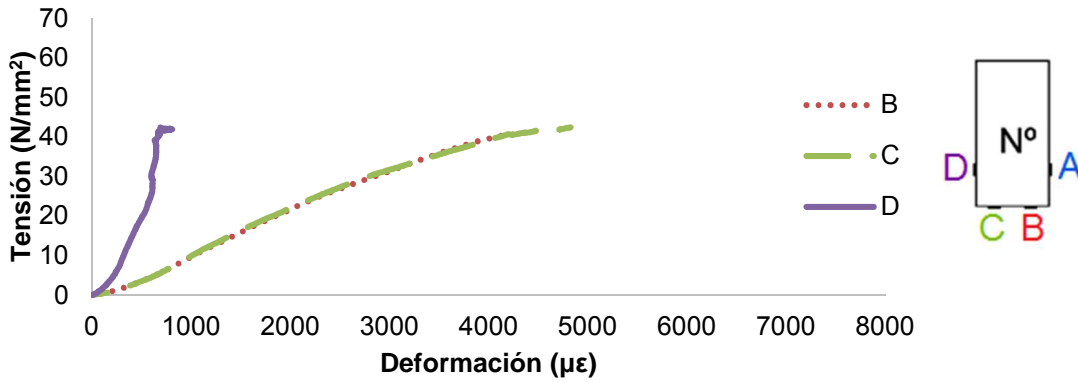
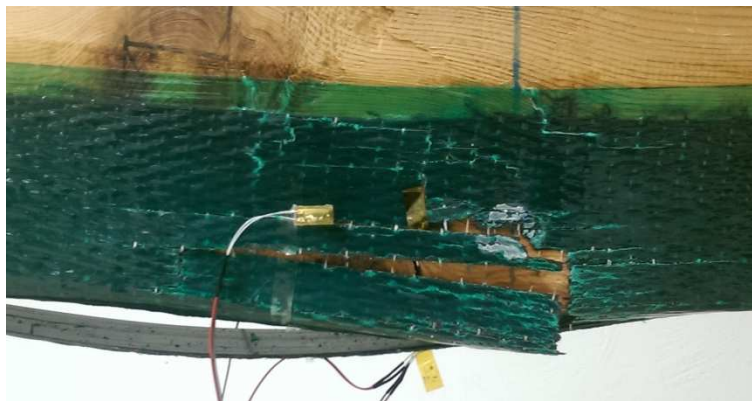


Figura 4.62. Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga WLR-D-U-1.



**Figura 4.63.** Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga WLR-D-U-1. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D.

La viga WLR-D-U-1 soportó 48,88 kN antes de romper y obtuvo un MOR de 43,64 N/mm<sup>2</sup>, lo cual se tradujo en un aumento de la capacidad portante del 71,32% con respecto a la media de las vigas sin refuerzo. Estaba catalogada como Rechazo y su densidad era intermedia en comparación al resto de vigas. El modo de fallo fue por cortante y tracción (tipo 4). Esto se debe principalmente a que en la zona central inferior, la zona de mayor tracción, existía un nudo alrededor del cual se generó la fractura. Además, durante la rotura se produjo una deslaminación laminado-resina en esa zona, y un desgarramiento del tejido, tal y como se muestra en la Figura 4.64. Tras la rotura principal la viga tuvo un comportamiento dúctil sufriendo un nuevo aumento de la carga antes de agotar por completo su capacidad portante. En cuanto a la extensometría, se puede apreciar en la Figura 4.63 que las deformaciones inferiores fueron muy estables y similares. Las laterales, al contrario, tienen un comportamiento algo irregular, sobre todo al final del ensayo, como se ve en la galga D. La galga A realizó una lectura errónea, debido a que existió un despegue entre la muestra y el tejido, en la zona de donde se encontraba pegada la galga. El MOE de la viga WLR-D-U-1 fue de 11783,48 N/mm<sup>2</sup>, siendo muy similar al MOE medio de las vigas sin refuerzo (10459,43 N/mm<sup>2</sup>).

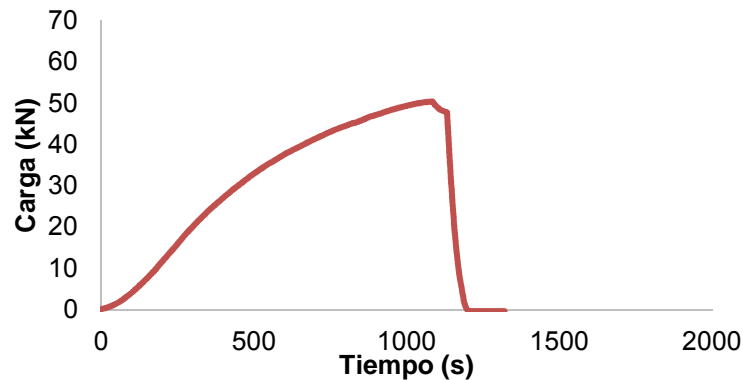


**Figura 4.64.** Rotura de la viga WLR-D-U-1.

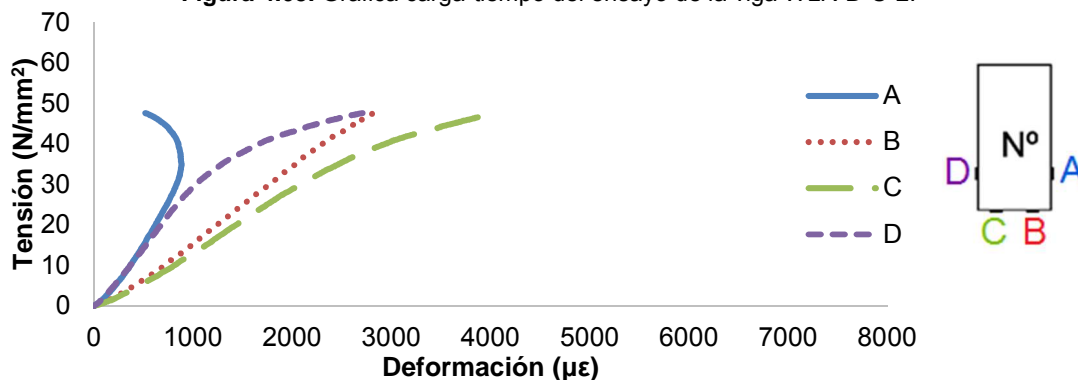
- **WLR-D-U-2**

Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
50,44	47,98	17715,23	22,15	2	694,86	Rechazo

**Tabla 4.22.** Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para la viga WLR-D-U-2.



**Figura 4.65.** Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga WLR-D-U-2.



**Figura 4.66.** Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga WLR-D-U-2. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D.

La viga WLR-D-U-2 alcanzó los 50,44 kN antes de su rotura y obtuvo un MOR de 47,98 N/mm<sup>2</sup>. Con respecto a la media de las vigas sin refuerzo, esta viga soportó un 76,79% más de carga. Aunque su densidad era alta, estaba catalogada como Rechazo debido a tener síntomas de carcoma. Esto influyó en la merma de la resistencia que se esperaba para una viga con tan alta densidad. En cuanto a la extensometría, en la Figura 4.66 se aprecia como las deformaciones de las galgas laterales y las de las inferiores adquirieron una pendiente con menos similitud que en otros ensayos. Si se observa la galga A se aprecia que alrededor de los 30 N/mm<sup>2</sup> de tensión, las deformaciones comenzaron a descender. Probablemente existiera una desolidarización del tejido y la viga en ese punto, con lo cual el tejido no se siguió traccionando, sino que comenzó a plegarse. El MOE de esta viga era superior al de la media y su modo de fallo fue el 2 por compresión. (Figura 4.67).

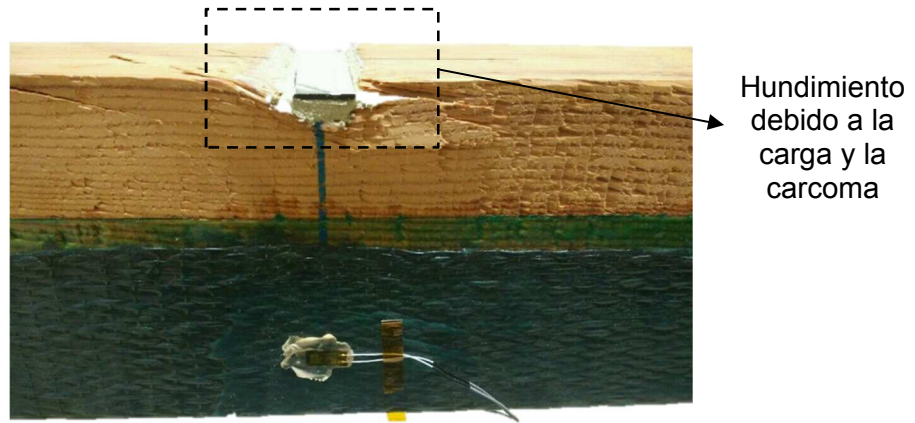


Figura 4.67. Rotura de la viga WLR-D-U-2.

• WLR-D-U-3

Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
57,83	55,01	15939,62	18,02	6	685,90	MEG

Tabla 4.23. Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para la viga WLR-D-U-3.

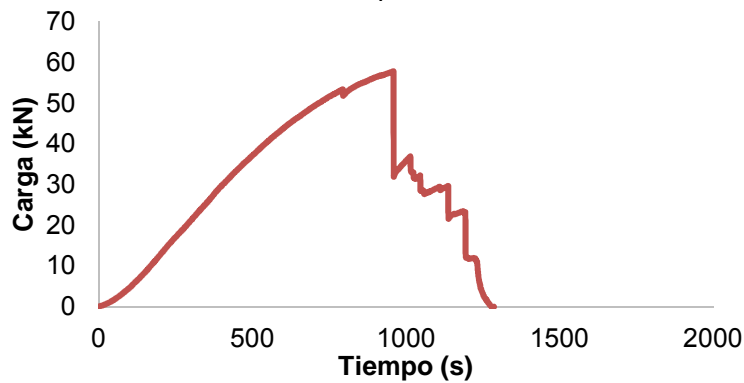


Figura 4.68. Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga WLR-D-U-3.

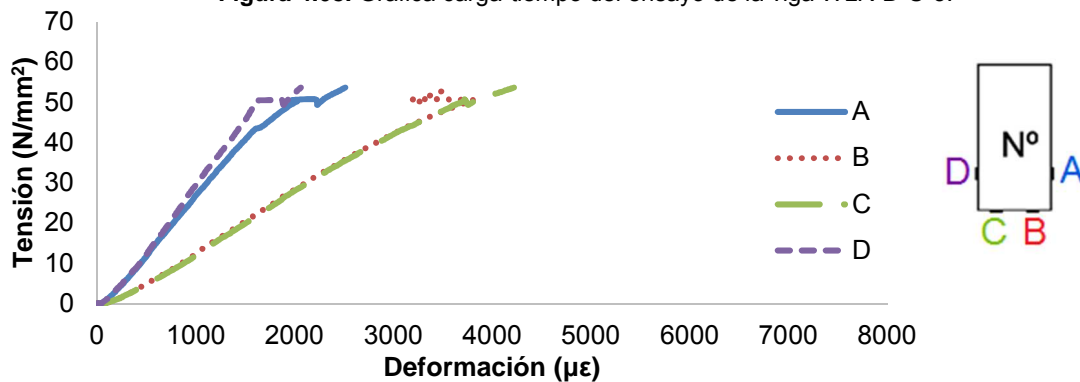


Figura 4.69. Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga WLR-D-U-3. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D.

La viga WLR-D-U-3 estaba catalogada como MEG, y su densidad también era alta. Así que alcanzó una carga de rotura de 57,83 kN mejorando la media de las vigas sin refuerzo en un 102,69% y llegando a un MOR de 55,01 N/mm<sup>2</sup>. En la Figura 4.68 se observa que al llegar a los 50 kN aproximadamente, la carga sufrió un pequeño descenso para luego seguir ascendiendo hasta la carga máxima. Este pequeño salto originó los cambios repentinos que se pueden ver en la gráfica de la extensometría (Figura 4.69) pasados los 50 N/mm<sup>2</sup>. También se puede ver que la rotura no fue violenta, si no que se produjeron varias caídas y ascensos consecutivos, reflejando el comportamiento más dúctil de las vigas vistas hasta ahora. Se puede apreciar que las galgas laterales experimentaron un salto repentino debido a este primer fallo de la viga. La galga B sin embargo, al estar colocada en la cara inferior, sufrió una disminución instantánea de las deformaciones. Como se muestra en la gráfica de la Figura 4.69, las deformaciones fueron bastante notables incluso en las galgas laterales además de muy homogéneas. En la Figura 4.70 se aprecia como el modelo de rotura fue por cortante tipo 6, aunque también mostró signos de fallo por compresión. El desgarrar y desprendimiento del tejido en la zona de la rotura tras el fallo permitieron observar el tipo de fractura.

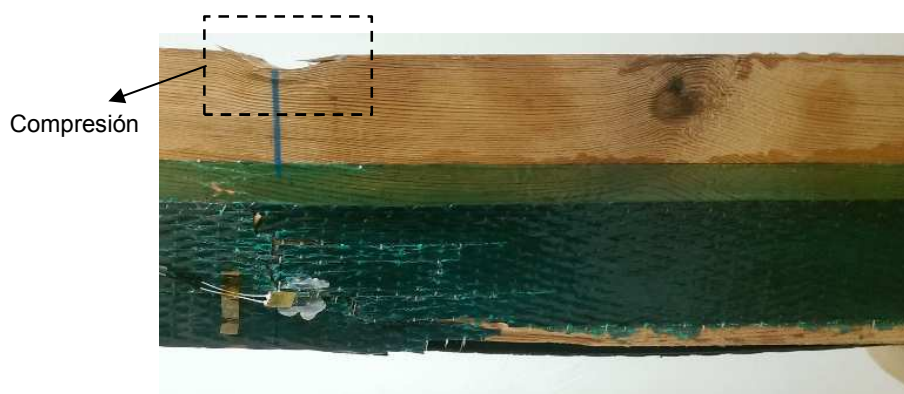


Figura 4.70. Rotura de la viga WLR-D-U-3.

#### 4.2.8. WLR-D-B

Los resultados obtenidos para las vigas reforzadas con laminado de DRIZORO S.A.U. y tejido bidireccional de DRIZORO S.A.U. o WLR-D-B por sus siglas en inglés *Wrap and Longitudinal Reinforcement – DRIZORO – Unidirectional*, se muestran en este Apartado. De la Tabla 4.24 a la 4.26 pueden verse los resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación. De la Figura 4.71 a la 4.79 aparecen las gráficas carga-tiempo y tensión-deformación obtenidas para las vigas de este grupo y sus respectivas fotos de la rotura.

- **WLR-D-B-1**

Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
61,69	58,68	12993,80	22,84	6	521,57	MEG

Tabla 4.24. Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para la viga WLR-D-B-1.

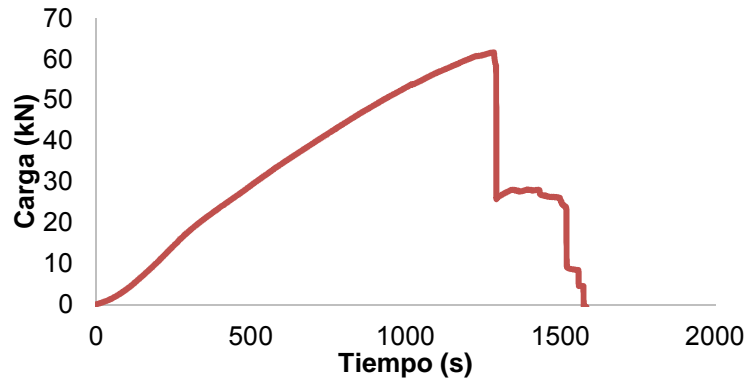


Figura 4.71. Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga WLR-D-B-1.

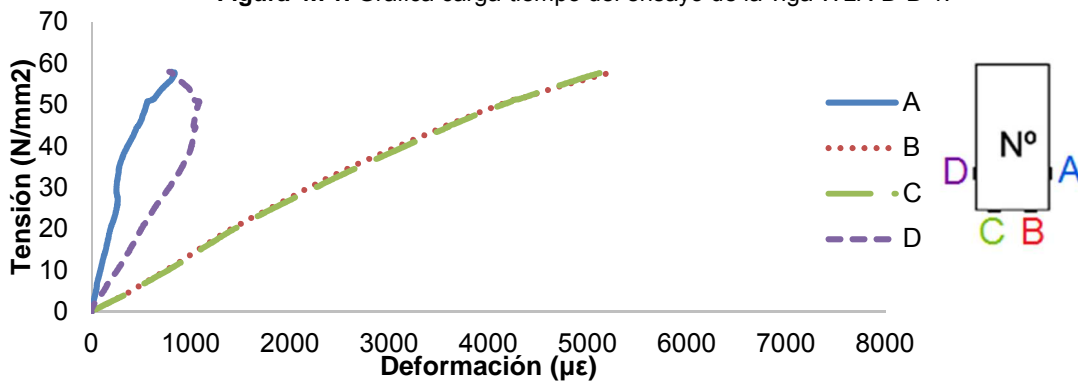


Figura 4.72. Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga WLR-D-B-1. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D.

La viga WLR-D-B-1 fue la primera viga con tejido bidireccional y laminado ensayada. Alcanzó los 61,69 kN de carga antes de romper y un MOR de 58,68 N/mm<sup>2</sup>. El aumento de la capacidad de carga con respecto a las vigas sin refuerzo fue del 116,22%. Estaba catalogada como MEG, pero aun así sigue siendo un resultado de carga máxima bastante alto. En la Figura 4.71 se puede observar como la rotura no fue violenta, si no que fue escalonada, manteniendo algo de carga tras cada descenso de la misma. Las deformaciones inferiores fueron mucho más estables e iguales que las laterales, además de mucho mayores, como era de esperar (Figura 4.73). Su MOE fue de 12993,80 N/mm<sup>2</sup>, mayor que la media de MOE obtenido en las vigas sin refuerzo, pero considerablemente menor que el MOE medio obtenido en el grupo de vigas con el mismo tipo de refuerzo pero tejido unidireccional, que fue de 15146,11 N/mm<sup>2</sup>. Tras la rotura no existió un desgarro del tejido a través del cual se pudiera observar el modelo de fallo que tuvo la viga. No obstante, el tejido bidireccional de DRIZORO S.A.U. junto con la resina, se tornan de un tono blanquecino al verse sometidos a una excesiva tensión. De esta manera se pudo atisbar que el modo de fallo de esta viga fue por cortante de acuerdo al modelo 6 (Figura 4.73).

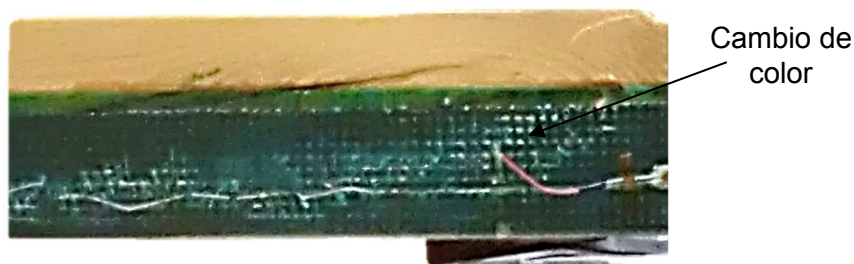


Figura 4.73. Rotura de la viga WLR-D-B-1.

• WLR-D-B-2

Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
47,26	44,96	17746,36	20,69	5	514,03	MEG

Tabla 4.25. Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para la viga WLR-D-B-2.

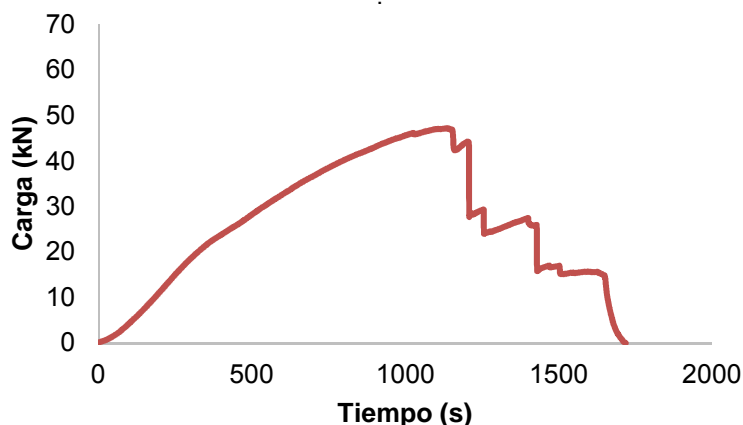


Figura 4.74. Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga WLR-D-B-2.

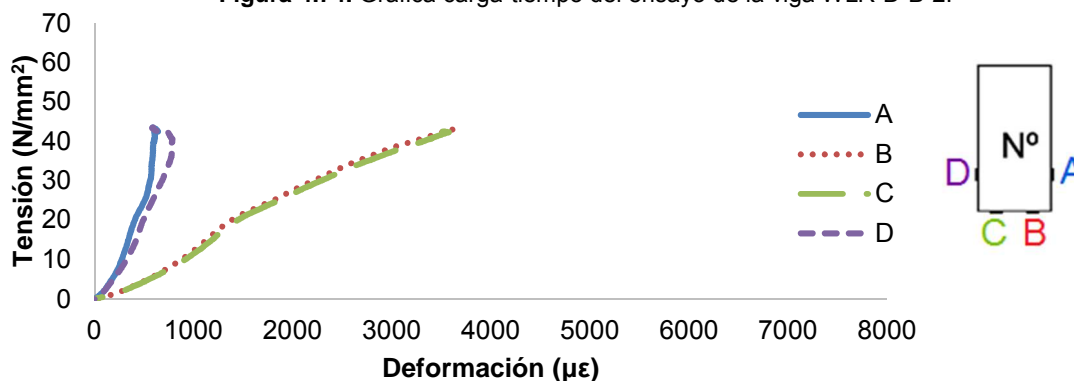


Figura 4.75. Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga WLR-D-B-2. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D.



La viga WLR-D-B-2 alcanzó su carga máxima de 47,26 kN a los 1138 s de ensayo, superando en capacidad portante en un 65,65% a la media de las vigas sin reforzar. A partir de ese momento, tuvo varias caídas y aumentos progresivos de carga, pero sin llegar a superar nunca este valor, dejando ver la gran ductilidad de este tipo de refuerzo (Figura 4.74). Todas las deformaciones tuvieron algún cambio de pendiente tal y como se ve en la Figura 4.75. La trayectoria de las galgas inferiores fue casi idéntica. Las trayectorias de las laterales también fueron muy parecidas. Su MOE era de 17746,36 N/mm<sup>2</sup>, un valor superior a la media de todos los calculados. El modelo de fallo fue por cortante tipo 5. Esto se pudo determinar gracias a que, tal y como se ve en la Figura 4.76, parte de la rotura se produjo por encima del refuerzo. Nuevamente se puede apreciar como el tejido se vuelve de un color más blanco bajo grandes tensiones.



Figura 4.76. Rotura de la viga WLR-D-U-2.

• **WLR-D-B-3**

Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
41,49	39,47	12888,52	15,30	4	524,59	Rechazo

Tabla 4.26. Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para la viga WLR-D-B-3.

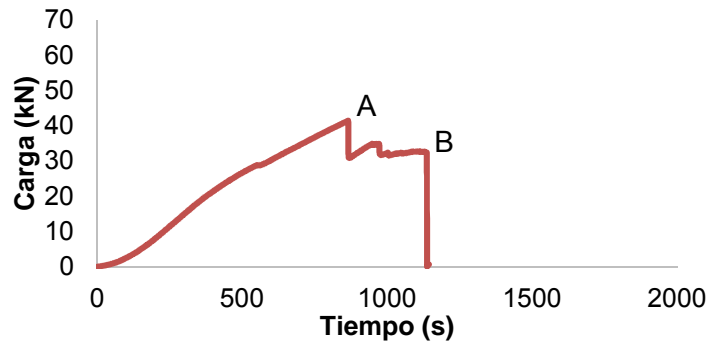
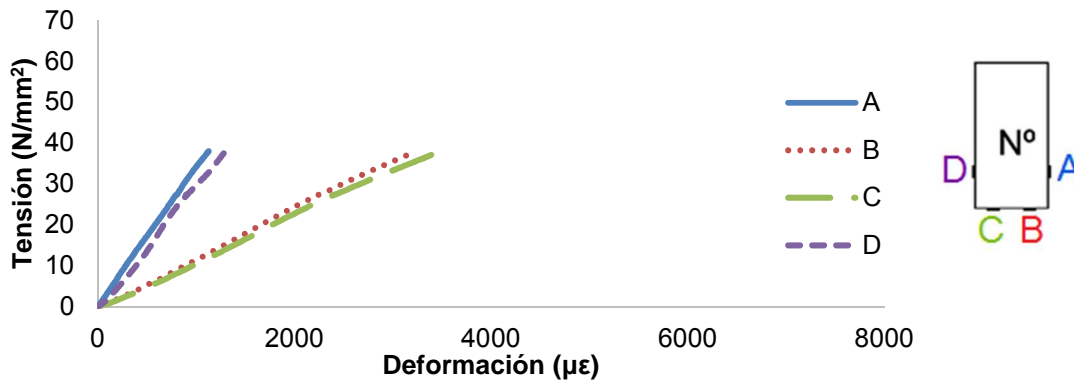


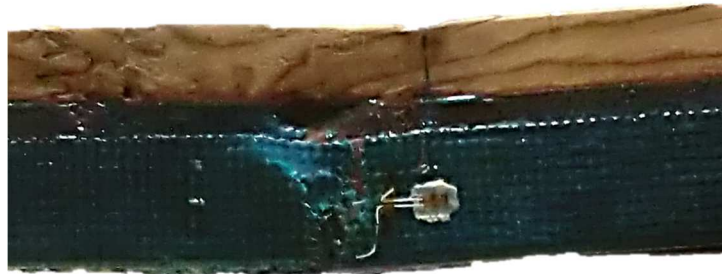
Figura 4.77. Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga WLR-D-B-3.





**Figura 4.78.** Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga WLR-D-B-3. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D.

La viga WLR-D-B-3, catalogada como Rechazo, con muestras de carcoma y con una densidad media con respecto a las demás vigas, soportó 41,49 kN de carga máxima antes de su rotura. Esto supone una mejora del 45,42% con respecto a la media de las vigas sin refuerzo, y generó un MOR de 39,47 N/mm<sup>2</sup>. La rotura fue dúctil y tras alcanzar el punto A, la carga cae y llega hasta el punto B, un valor considerablemente alto para haber alcanzado ya su carga máxima (Figura 4.77). Las deformaciones hasta el momento del fallo mantuvieron una pendiente muy estable, tal y como se muestra en la gráfica de la Figura 4.78. Las trayectorias descritas por las parejas de galgas (inferiores y laterales) son prácticamente líneas rectas superpuestas. En la Figura 4.79 se ve una foto de la rotura de la viga WLR-D-B-3. Tras la inspección posterior al ensayo, y gracias al desgarramiento del tejido en la zona de la rotura, se pudo determinar que esta fue por tracción y cortante, según el modelo de fallo 4.



**Figura 4.79.** Rotura de la viga WLR-D-U-3.

En general este tipo de refuerzo presentó las mejores características dúctiles.

Tras los ensayos con las vigas de refuerzo mixto, se pasaron a ensayar las vigas reforzadas únicamente con tejido. En los Apartados 4.2.9 y 4.2.10 aparecen los resultados de los ensayos con muestras reforzadas con tejido unidireccional. En el Apartado 4.2.11 se muestran los resultados para las vigas reforzadas con tejido bidireccional.

#### 4.2.9. WR-S

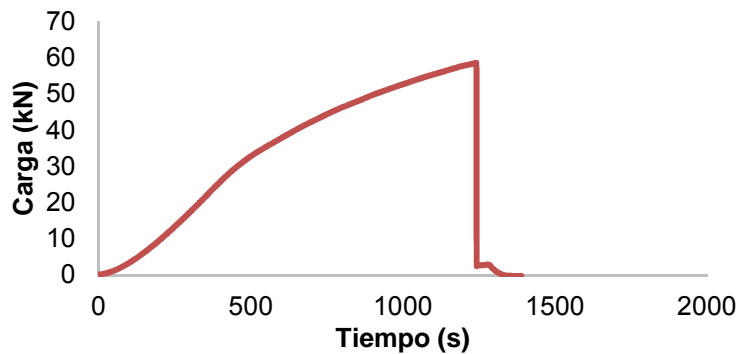
En este Apartado se muestran los resultados obtenidos para las vigas reforzadas con tejido unidireccional de SIK A S.A.U. (*Wrap Reinforcement – SIK A*) De la Tabla 4.27 a la 4.29 pueden verse los resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a

flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación. De la Figura 4.80 a la 4.88 aparecen las gráficas carga-tiempo y tensión-deformación obtenidas para las vigas de este grupo y sus respectivas fotos de la rotura.

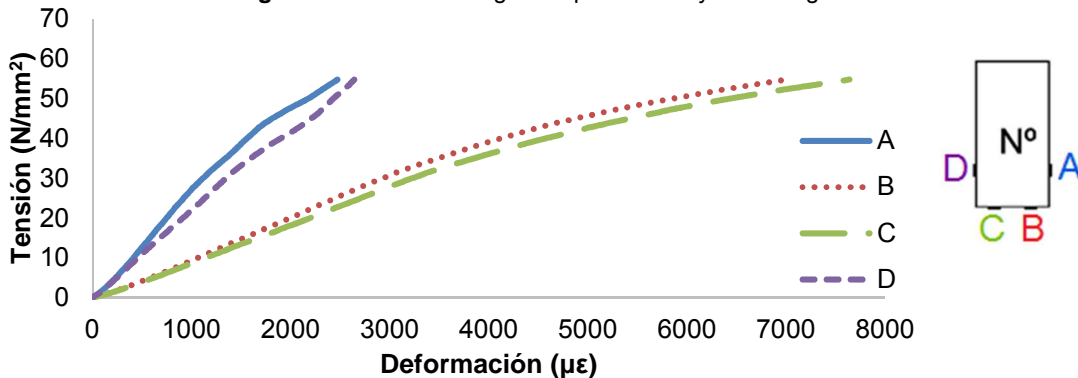
• **WR-S-1**

Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
58,59	55,73	10351,21	25,83	6	538,45	MEG

**Tabla 4.27.** Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para la viga WR-S-1.



**Figura 4.80.** Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga WR-S-1.



**Figura 4.81.** Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga WR-S-1. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D.

El refuerzo con tejido unidireccional de SIKKA S.A.U. permitió a la viga WR-S-1 alcanzar una carga máxima de 58,59 kN, manteniendo su MOE en 10351,21 N/mm<sup>2</sup>, muy similar a la media de las vigas sin refuerzo. La capacidad portante mejoró a la de las vigas sin refuerzo en un 105,34%. La viga alcanzó unas grandes deformaciones, como se puede ver en la Figura 4.81. La pendiente de las galgas laterales fue bastante diferente de las inferiores, como era de esperar. Las parejas de galgas mantuvieron un comportamiento muy similar, llegando las inferiores alrededor de las 7000 µε con una progresión de pendiente casi idéntica. El modo de fallo de la viga WR-S-1 fue de tipo 6 (por cortante) y su rotura fue brusca. En la Figura 4.82 se puede observar como la rotura rasgó el tejido, y como existió una deslaminación del tejido y la resina, en el extremo izquierdo de la cara inferior.



Figura 4.82. Rotura de la viga WR-S-1.

• **WR-S-2**

Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
38,40	36,53	11525,73	26,50	6	546,68	Rechazo

Tabla 4.28. Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para la viga WR-S-2.

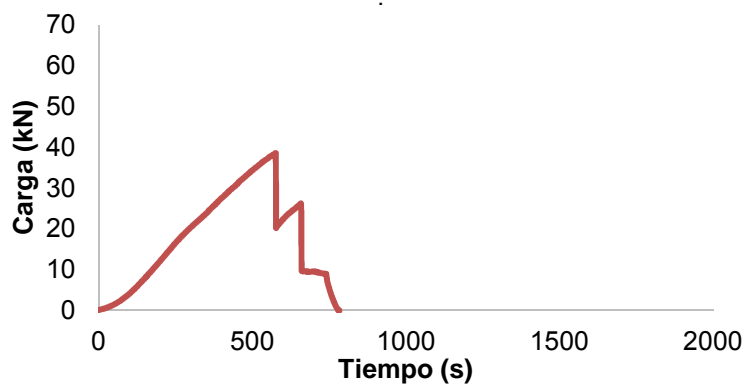


Figura 4.83. Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga WR-S-2.

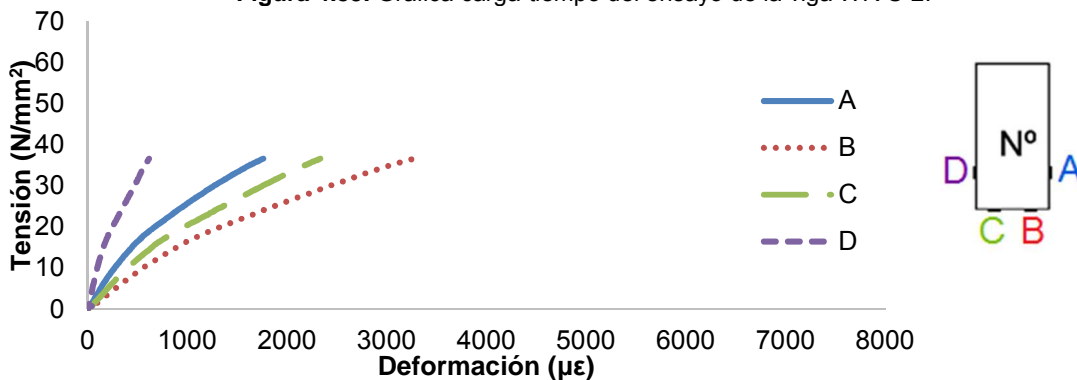


Figura 4.84. Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga WR-S-2. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D.

La viga WR-S-2 soportó 38,40 kN antes de romper. En la Figura 4.83 se aprecia que durante el proceso de carga existieron varios “saltos”, no superándose en los ascensos de carga posteriores el primer pico, que fue la carga máxima, es decir, aporta ductilidad a la rotura. La capacidad portante mejoró en un 34,60% con respecto a la media de las vigas sin refuerzo. En la Figura 4.84 se observa que todas las galgas tuvieron diferentes

pendientes. La pendiente inicial sufrió una variación similar en todas ellas, viéndose reducida entre los 10 y 20 N/mm<sup>2</sup> de tensión. Observando la Figura 4.84 se puede apreciar como la deformación en la galga B fue mayor que la de C, y la de A mayor que la de D. Al estudiar los datos tomados en la medida del hundimiento se vio que éste era diferente en ambas caras, con lo cual esta diferencia de deformaciones en las galgas confirma que se produjo un ligero alabeo de la viga durante el ensayo. Su MOE fue bajo y similar al de la WR-S-1. El modo de fallo de la viga WR-S-2 se ajustó al modelo de fallo 6.

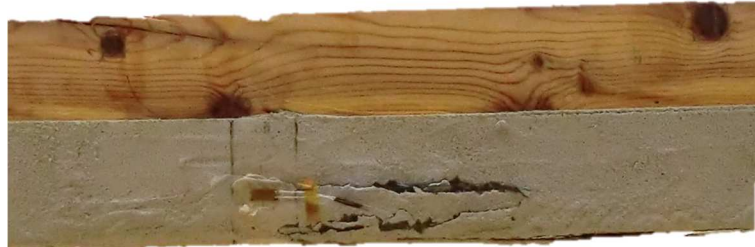


Figura 4.85. Rotura de la viga WR-S-2.

• **WR-S-3**

Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
42,04	39,99	11474,00	19,02	6	539,19	Rechazo

Tabla 4.29. Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para la viga WR-S-3.

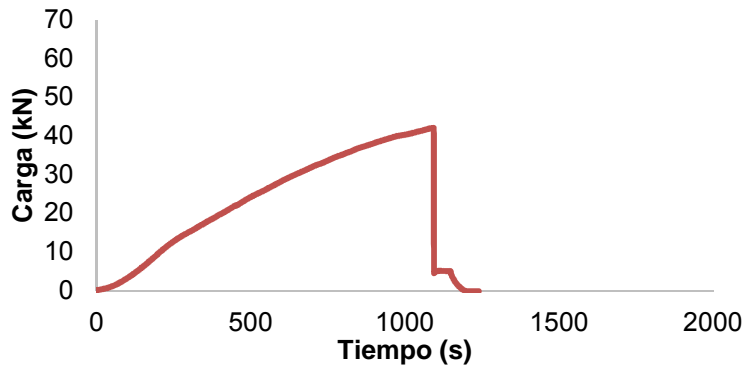


Figura 4.86. Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga WR-S-3.

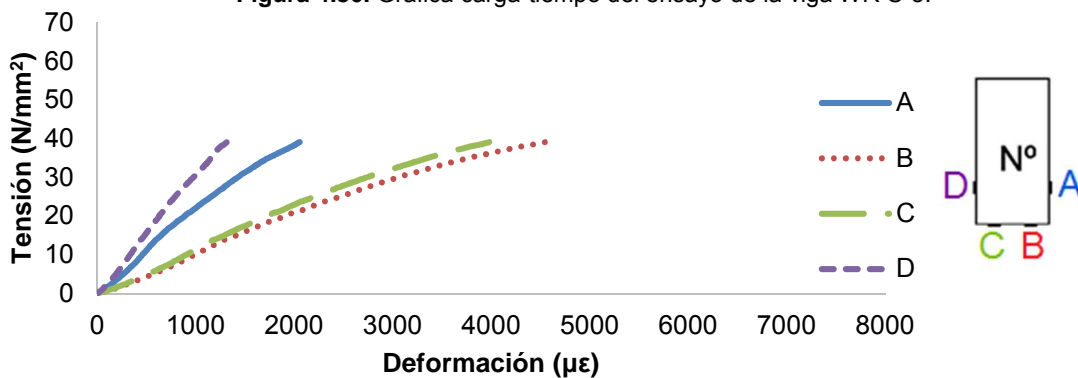


Figura 4.87. Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga WR-S-3. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D.

Al llegar a los 42,04 kN de carga máxima, la viga WR-S-3 cesó su capacidad portante de forma drástica (Figura 4.86). Mejoró en un 47,35% la carga máxima media soportada por las vigas sin refuerzo. En la Figura 4.84 se puede ver que las deformaciones laterales tuvieron una pendiente dispar. Las inferiores por el contrario tuvieron un comportamiento mucho más similar entre ellas. Su MOE fue bajo y similar al del resto del grupo. El modo de fallo de la viga WR-S-3 fue por cortante de acuerdo al modelo 6, tal y como se puede apreciar en la Figura 4.88 gracias al desgarró que sufrió el tejido a lo largo de la fisura.

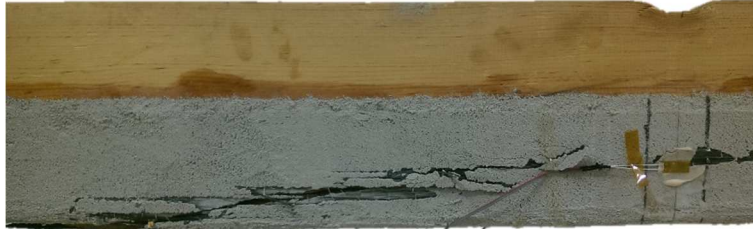


Figura 4.88. Rotura de la viga WR-S-3.

#### 4.2.10. WR-D-U

En este Apartado se muestran los resultados obtenidos para las vigas reforzadas con tejido unidireccional de DRIZORO S.A.U. (*Wrap Reinforcement – DRIZORO - Unidirectional*) De la Tabla 4.30 a la 4.32 pueden verse los resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación. De Figura 4.89 a la 4.97 aparecen las gráficas carga-tiempo y tensión-deformación obtenidas para las vigas de este grupo y sus respectivas fotos de la rotura.

- WR-D-U-1

Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
50,73	48,25	10373,60	27,78	6	552,62	MEG

Tabla 4.30. Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para la viga WR-D-U-1.

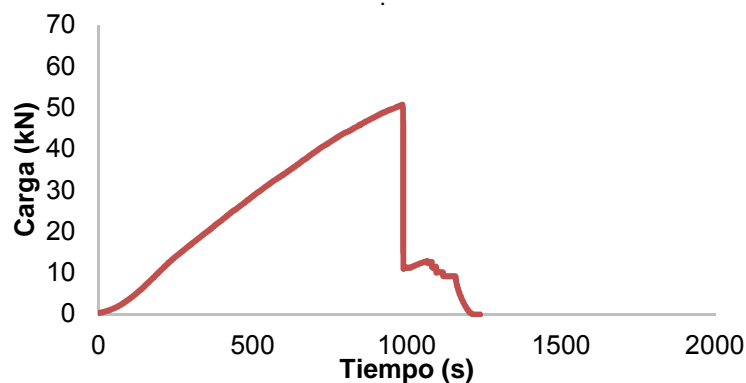
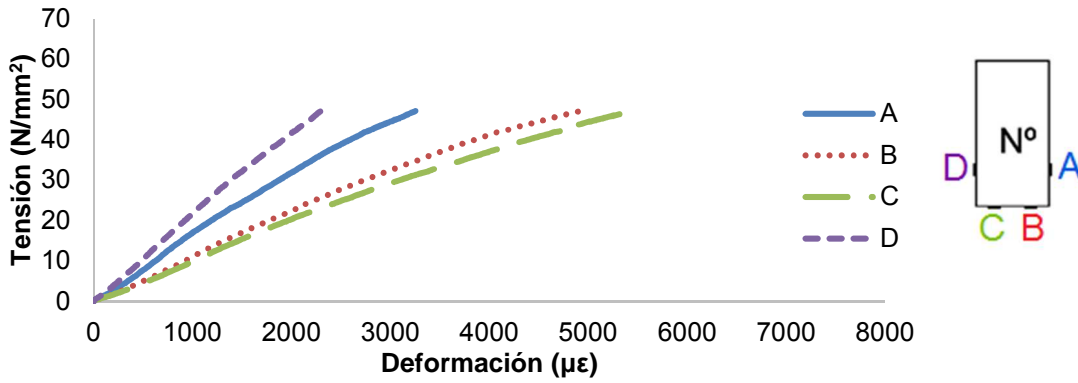
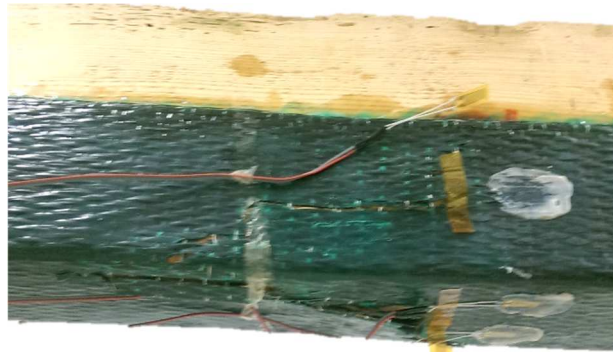


Figura 4.89. Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga WR-D-U-1.



**Figura 4.90.** Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga WR-D-U-1. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D.

La viga WR-D-U-1 fue la primera viga con refuerzo únicamente de tejido unidireccional de DRIZORO ensayada. Soportó una carga de 50,73 kN de fuerza y un MOR de 48,25 N/mm<sup>2</sup>, mejorando la capacidad portante frente a las vigas sin refuerzo en un 77,81%. Tras la rotura, la viga pudo mantener una carga de alrededor de 10 kN, e incluso aumentarla levemente antes del fallo final (Figura 4.89). Su módulo de elasticidad fue de 10373,60 N/mm<sup>2</sup> y tanto su flecha como sus deformaciones fueron bastante acusadas. En la gráfica de la Figura 4.90 se puede apreciar cómo la pendiente de la galga A se vio afectada por estar pegada en una zona entre dos nudos agrupados. Debido a esto su pendiente se aleja de la pendiente de la galga D, en cuya zona no existían anomalías. El comportamiento de las galgas B y C es prácticamente idéntico. El modo de fallo de la viga WR-D-U-1 fue por cortante tipo 6. Esto se determinó tras una inspección visual de la probeta, observando las fisuras y desgarros que se originaron en el tejido (Figura 4.91).



**Figura 4.91.** Rotura de la viga WR-D-U-1.

• **WR-D-U-2**

Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
59,88	56,97	13294,00	21,06	6	606,37	Rechazo

**Tabla 4.31.** Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para la viga WR-D-U-2.

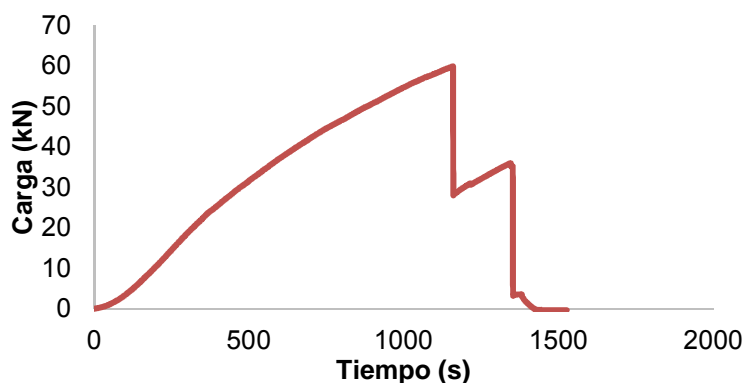


Figura 4.92. Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga WR-D-U-2.

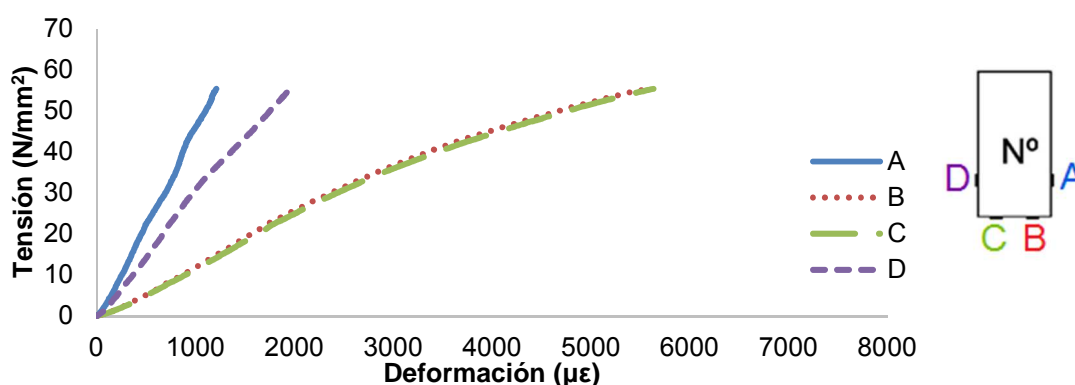


Figura 4.93. Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga WR-D-U-2. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D.

Pese a tener una densidad elevada, la viga WR-D-U-2 fue catalogada como Rechazo debido a la presencia de varias fendas. Estos defectos influyeron en la rotura de la viga, la cual se produjo al llegar a los 59,88 kN, superando la carga media de las vigas sin refuerzo en un 109,88% y llegando a un MOR de 56,97N/mm<sup>2</sup>. En este instante la capacidad de carga se desplomó hasta los 28,09 kN, y fue aumentando de nuevo hasta llegar a los 35,24 kN tras los cuales se produjo la fractura final (Figura 4.92). Esto quiere decir que la ductilidad de la viga no sólo permitió que la rotura no fuera drástica, si no que además después de esta, pudiera seguir admitiendo más carga. En cuanto a las deformaciones, en la Figura 4.93 se muestran unas deformaciones de las galgas inferiores muy acusadas y prácticamente idénticas. Las galgas laterales tuvieron un comportamiento algo más dispar, teniendo entre ellas pendientes diferentes, y llegando a deformaciones menores de 2000 µε. Su MOE fue de 13294,00 N/mm<sup>2</sup>, por lo tanto por encima de la media. El modo de fallo fue por cortante, ajustándose al modelo 6. En la Figura 4.94 se aprecia como se generaron varias fracturas, que rasgaron el tejido, en incluso llegaron a hacer que algunas zonas se desprendieran totalmente.



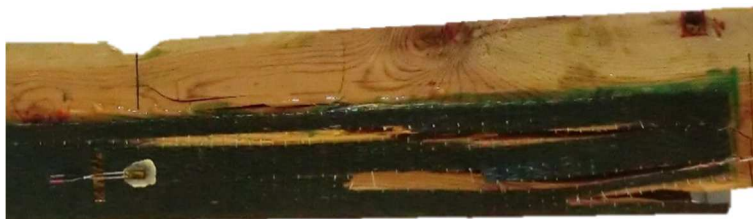


Figura 4.94. Rotura de la viga WR-D-U-2.

• WR-D-U-3

Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
55,04	52,36	13482,09	21,11	6	539,59	Rechazo

Tabla 4.32. Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para la viga WR-D-U-3.

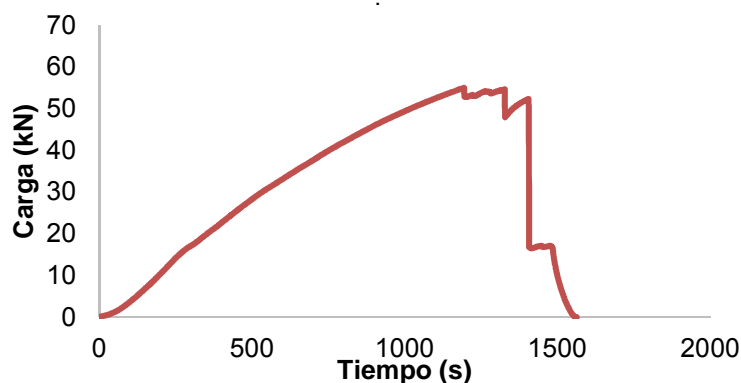


Figura 4.95. Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga WR-D-U-3.

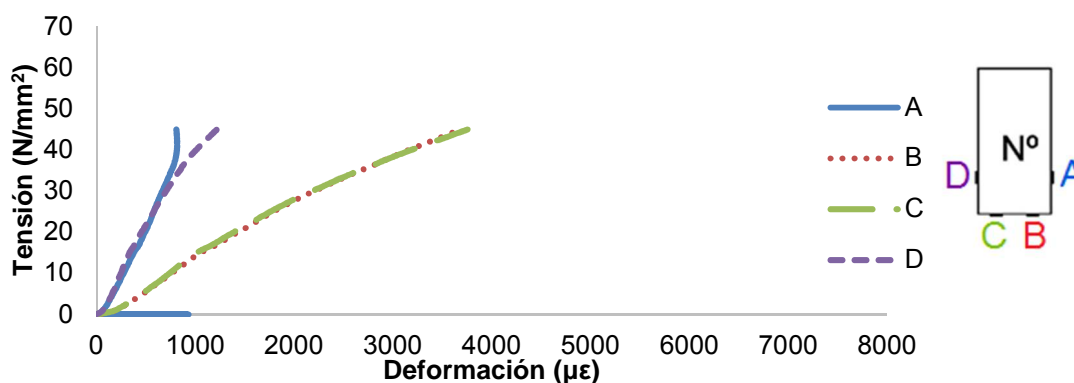


Figura 4.96. Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga WR-D-U-3. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D.

La viga WRD-U-3 fue la última con tejido unidireccional ensayada. Soportó una carga máxima de 55,04 kN, lo cual fue una mejora de la carga máxima de un 92,92% con respecto a las vigas sin refuerzo. Tras alcanzar esa carga, la viga sufrió varios ascensos graduales y desplomes repentinos de carga, no llegando a superar nunca ese valor (Figura



4.95). En cuanto a los datos de la extensometría, en la Figura 4.96 se observa como las galgas inferiores llegaron casi a las 4000  $\mu\epsilon$  describiendo trayectorias superpuestas. Las galgas laterales (A y D) comenzaron con una tendencia similar, pero acabaron divergiendo a partir de los 30 N/mm<sup>2</sup> de tensión (Figura 4.96). Su módulo de elasticidad fue prácticamente idéntico al de la viga WR-D-U-2. El modo de fallo fue por cortante (modelo 6). En la Figura 4.97 se puede observar como la rotura de la viga seccionó el tejido, y provocó una deslaminación (Figura 4.97).

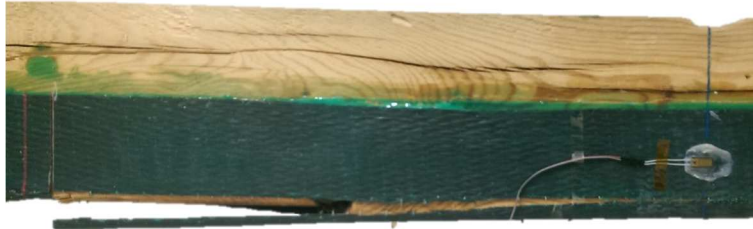


Figura 4.97. Rotura de la viga WR-D-U-3.

#### 4.2.11. WR-D-B

En este Apartado se muestran los resultados obtenidos para las vigas reforzadas con tejido bidireccional de DRIZORO S.A.U. (*Wrap Reinforcement – DRIZORO - Bidireccional*). De la Tabla 4.33 a la 4.35 pueden verse los resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación. De la Figura 4.98 a la 4.106 aparecen las gráficas carga-tiempo y tensión-deformación obtenidas para las vigas de este grupo y sus respectivas fotos de la rotura.

- WR-D-B-1

Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
36,32	34,55	13502,70	13,14	6	671,20	MEG

Tabla 4.33. Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para la viga WR-D-B-1.

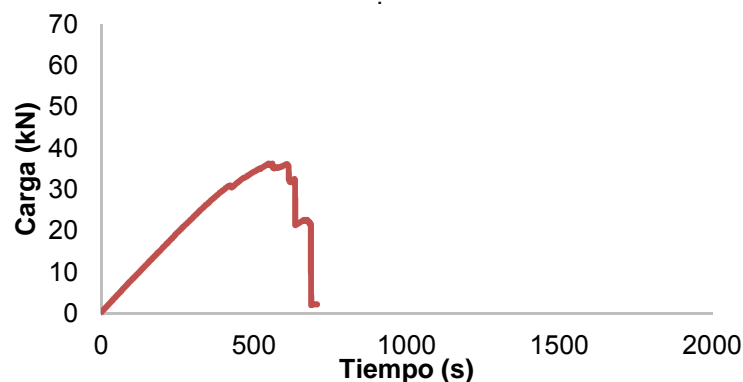
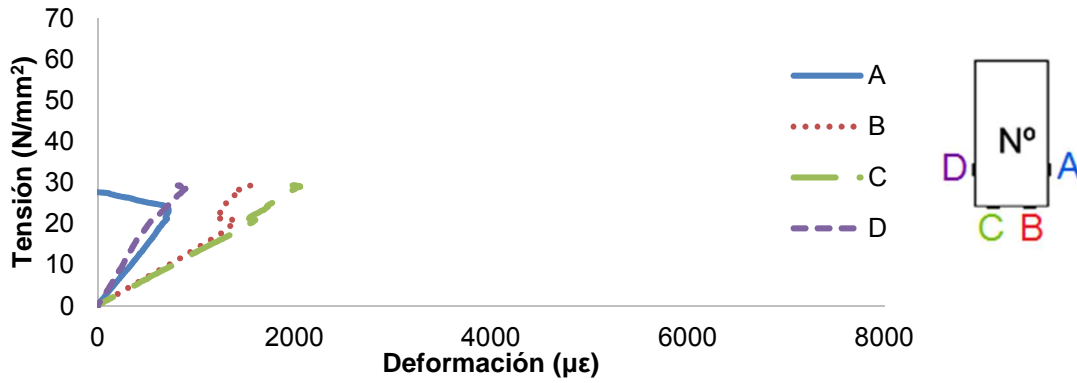
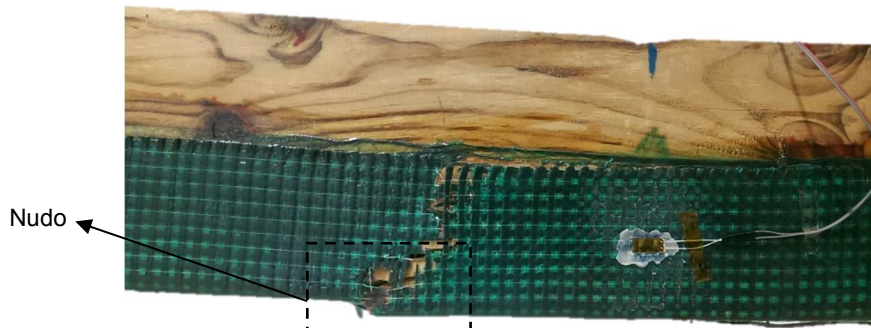


Figura 4.98. Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga WR-D-B-1.



**Figura 4.99.** Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga WR-D-B-1. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D.

La primera viga reforzada únicamente con tejido bidireccional de DRIZORO estaba catalogada como MEG y tenía una densidad alta ( $671,20 \text{ kg/m}^3$ ). Aun así, la carga máxima que soportó fue de  $36,32 \text{ kN}$ , menos de lo esperado. En la Figura 4.98 se observa que antes de perder toda su capacidad resistente, la viga fue perdiendo carga de forma escalonada, rompiéndose cada vez un poco más. Cuando falló finalmente, lo hizo de acuerdo al modelo de fallo 6. El cortante hizo que la fisura se originara alrededor de un nudo existente en una arista de la cara inferior tal y como se ve en la Figura 4.100. En la gráfica de la Figura 4.99 se aprecia como las deformaciones sufren variaciones debidas a la rotura intermitente de la viga, llegando incluso a registrarse compresiones en los últimos instantes del ensayo (galga A). Además, las deformaciones en general fueron bajas. Su MOE fue de  $13502,70 \text{ N/mm}^2$ , algo superior al obtenido en las vigas sin refuerzo.



**Figura 4.100.** Rotura de la viga WR-D-B-1.

• **WR-D-B-2**

Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
36,85	35,05	10300,78	14,10	6	471,19	Rechazo

**Tabla 4.34.** Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para la viga WR-D-B-2.

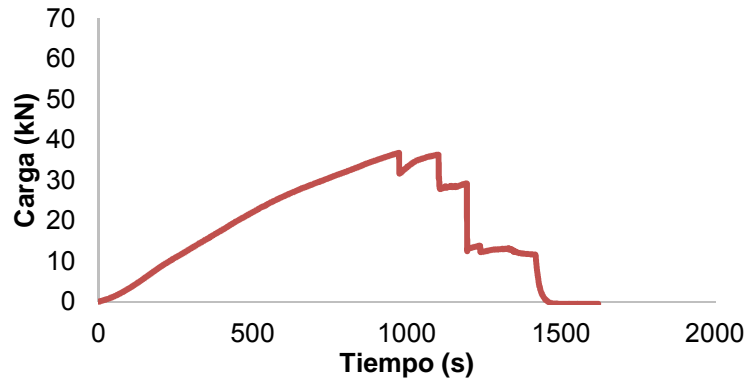


Figura 4.101. Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga WR-D-B-2.

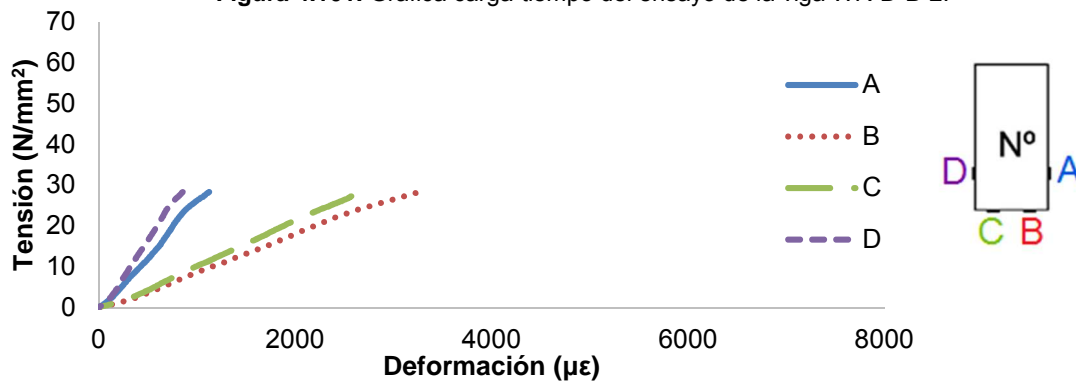


Figura 4.102. Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga WR-D-B-2. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D.

La segunda viga ensayada con refuerzo de tejido bidireccional ensayada (WR-D-B-2) estaba catalogada como Rechazo, y soportó una carga máxima de 36,85 kN con un MOR de 35,05 N/mm<sup>2</sup>, suponiendo una mejora de la carga máxima con respecto a las vigas sin refuerzo de un 26,16%. Nuevamente existió un desplome gradual de la carga, con ascensiones discontinuas en las cuales nunca se superó la carga máxima (Figura 4.101). Fue una de las roturas más dúctiles de los ensayos. En la extensometría (Figura 4.102) se puede ver como las deformaciones no fueron muy acusadas, y el comportamiento de las galgas fue bastante heterogéneo entre ellas. Su MOE fue bajo (10300,78 N/mm<sup>2</sup>) y muy similar al MOE medio de las vigas sin refuerzo. El modo de rotura fue por cortante tipo 6, el cual se determinó tras una inspección visual posterior. Aunque el tejido no dejara ver la fisura, sí que permitió adivinar por donde se había producido, ya que el comportamiento de este tejido bidireccional ante altas tensiones es tornarse de un tono blanquecino (Figura 4.103).

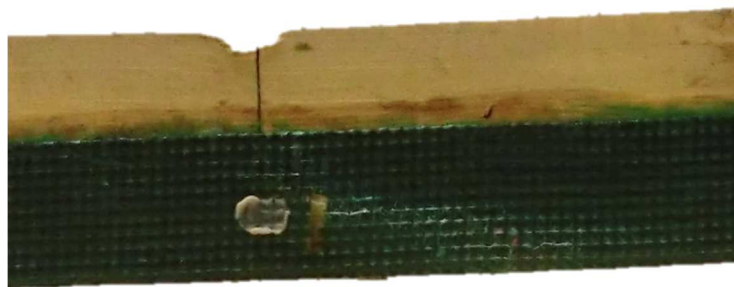
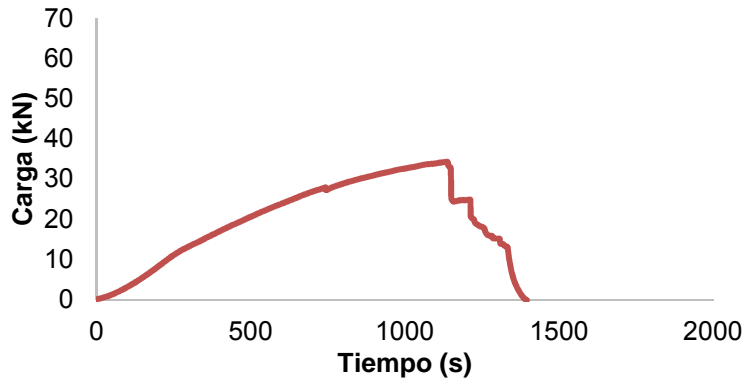


Figura 4.103. Rotura de la viga WR-D-B-2.

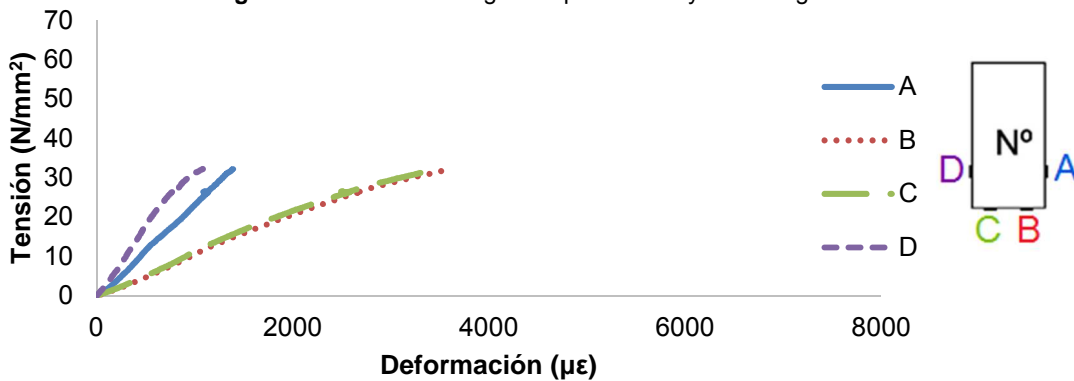
• **WR-D-B-3**

Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
34,36	32,69	11261,17	18,22	4	456,91	Rechazo

**Tabla 4.35.** Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para la viga WR-D-B-3.



**Figura 4.104.** Gráfica carga-tiempo del ensayo de la viga WR-D-B-3.



**Figura 4.105.** Izquierda: tensión frente a la deformación del ensayo a flexión de la viga WR-D-B-3. Derecha: disposición de las galgas en la pieza. Azul: galga A. Rojo: galga B. Verde: galga C. Morado: galga D.

La viga WR-D-B-3 fue la última en ser ensayada. Estaba catalogada como Rechazo por tener una gran cantidad de fendas a lo largo de toda la viga. Estas fendas eran tan acusadas que durante el ensayo se abrieron hasta el punto de poderse observar a través de la viga. Fueron un claro hándicap en la resistencia de la viga, la cual llegó a 34,36 kN de fuerza antes de romper. La pérdida de carga fue gradual, pero a partir del primer descenso, el cual se ve en la Figura 4.104, la carga no volvió prácticamente a aumentar. Sólo se mantenía y descendía. Las deformaciones inferiores fueron muy similares, tal y como se muestra en la Figura 4.105. Al contrario, la tendencia de las laterales es divergente en todo momento, debido principalmente a la existencia de las fendas laterales, las cuales se manifestaban de manera diferente en cada cara. Su MOE fue de 11261,17 N/mm<sup>2</sup>, algo por encima de la media de las vigas sin reforzar. El modo de fallo de esta viga no se pudo apreciar claramente debido al tejido. Pero observando la dirección de las fendas, y el color blanquecino que se genera en el tejido bajo tensión, se pudo catalogar el modo de fallo como tracción y cortante (modo 4). En la Figura 4.106 se pueden ver las fendas existentes en la viga y el emblanquecimiento del tejido en la zona de la rotura.



Figura 4.106. Rotura de la viga WR-D-B-3.

### 4.3. Comparación y discusión por grupos

En este Apartado se hace una recopilación de los datos de cada grupo de vigas a modo de resumen, así como un análisis de los resultados por grupos.

#### 4.3.1. NR

El resumen de los datos obtenidos para las vigas sin refuerzo se muestra en la Tabla 4.36, añadiéndose además los datos medios del grupo.

Nº	Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
1	27,06	25,74	13410,55	10,39	3	692,17	Rechazo
2	20,90	19,88	-	-	6	514,57	Rechazo
3	34,56	32,88	7508,31	15,21	5	639,57	MEG
4	31,59	30,05	-	13,26	6	642,54	Rechazo
<b>Promedio</b>	28,53	27,14	10459,43*	12,95*		622,21	

Tabla 4.36. Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para las vigas NR, y sus valores medios.

(\*) Imposibilidad de realizar el promedio con todas las vigas.

Estos resultados fueron la referencia para comparar con el resto de grupos. Para tener suficientes datos, se tomaron 4 vigas, ya que para algunas de las que ya se habían ensayado no se monitorizaron completamente. Además se aprecia que la viga NR-3, la única del grupo catalogada como MEG, fue la que más carga soportó, tal y como era de esperar, sabiendo que no existía demasiada dispersión tampoco entre densidades. Este grupo también dio un intervalo y un valor medio en cuanto a módulo de elasticidad a flexión MOE para tomar de referencia. Por último, en cuanto a los modos de fallo, se pudo apreciar que en las 4 vigas se obtuvieron 3 modos de fallo diferentes. Esto será relevante a la hora de estudiar si el refuerzo puede ayudar a prever el tipo de fallo.

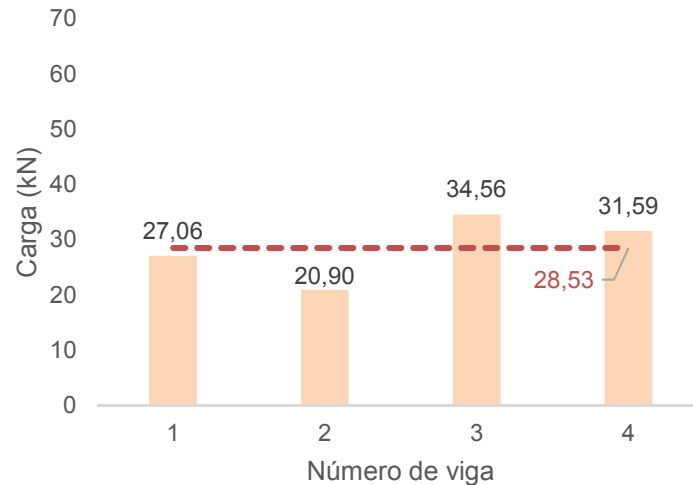


Figura 4.107. Carga máxima de las vigas NR. Línea roja discontinua: valor medio.

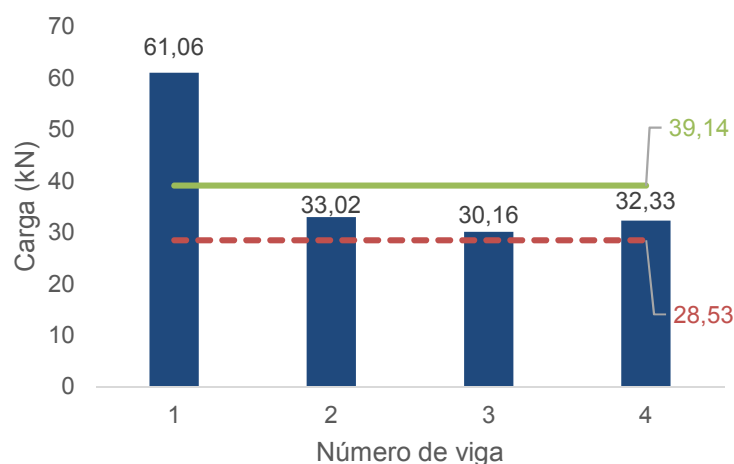
### 4.3.2. LR-S-P

La Tabla 4.37 presenta los datos obtenidos para el primer grupo de vigas reforzado (LR-S-P), así como un promedio de los valores obtenidos

Nº	Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
1	61,06	58,09	15057,61	22,07	6	621,78	MEG
2	33,02	31,28	11823,97	13,77	6	485,85	Rechazo
3	30,16	28,69	8417,06	15,71	6	475,80	Rechazo
4	32,33	30,76	14911,98	10,07	6	475,80	Rechazo
<b>Promedio</b>	39,14	37,21	12552,66	15,41		514,81	
<b>Mejora con respecto a la media de NR [%]</b>	37,19	37,10	20,01	19,00		-17,26	

Tabla 4.37. Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para las vigas LR-S-P y sus valores medios.

En la Tabla 4.37 se ve que este grupo también presentaba 4 vigas. Esto fue debido a que una de ellas (LR-S-P-1) produce un resultado que se aleja mucho de las otras, también por estar catalogada como MEG y tener una densidad muy superior. Por tanto, a fin de homogeneizar los resultados, se añadió una cuarta viga al grupo LR-S-P. En la Figura 1.108 aparecen los resultados de carga de este grupo de vigas junto con su valor medio. El MOR se vio mejorado en un 37,10% con respecto al MOR medio de las NR, pese a que la media de densidad era del 17,26% menor que en las vigas sin refuerzo. La flecha máxima y el MOE también mejoraron a los de las vigas sin refuerzo en un 19,00% y 20% respectivamente.



**Figura 4.108.** Carga máxima de las vigas LR-S-P. Línea verde continua: valor medio del grupo. Línea roja discontinua: valor medio de las vigas sin refuerzo.

Tal y como se observa en la Tabla 4.37 todos los modos de fallo fueron de Tipo 6. Los datos de elasticidad, densidad y flecha obtenidos sirvieron para realizar una comparación entre tipos de refuerzos, y estudiar la rigidez que aportaba cada refuerzo a la pieza (Apartado 4.4.3).

### 4.3.3. LR-S-F

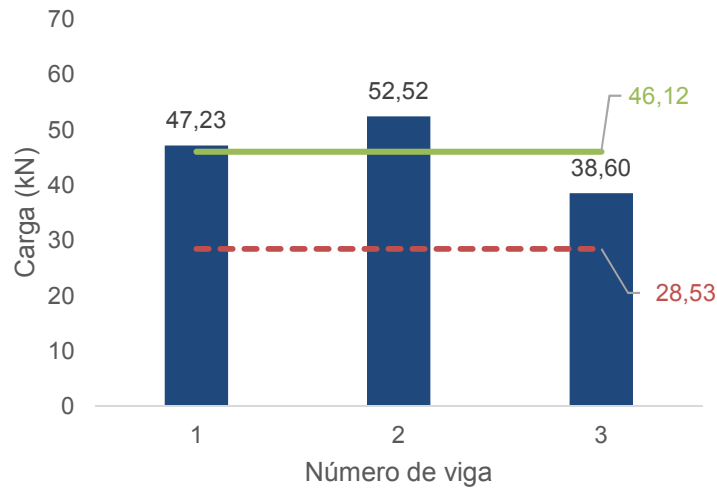
Los resultados obtenidos para las vigas LR-S-F aparecen a modo de resumen en la Tabla 4.38 junto con sus valores medios.

Nº	Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
1	47,23	44,93	14016,97	14,46	5	588,21	Rechazo
2	52,52	49,91	16890,07	17,97	5	593,83	MEG
3	38,60	36,72	22811,95	12,81	6	718,25	Rechazo
<b>Promedio</b>	46,12	43,85	17906,33	15,08		633,43	
<b>Mejora con respecto a la media de NR [%]</b>	61,65	61,57	71,20	16,45		1,80	

**Tabla 4.38.** Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para las vigas LR-S-F y sus valores medios.

En este grupo se puede ver cómo a veces la catalogación de una viga afecta a su resistencia, ya que la viga catalogada como MEG (LR-S-F-2), es la que más carga soportó. A su vez, la LR-S-F-3, pese a tener una densidad mucho más alta, fue la que menos carga soportó del grupo. En la Figura 4.109 se ven las resistencias alcanzadas por cada una de las vigas, así como su valor medio. Con este tipo de refuerzo el MOR obtuvo una mejora del 61,57% frente a la media de las vigas sin reforzar. El MOE sufrió también un gran

aumento con respecto a éstas (71,20%), y aunque la media de las densidades sólo fue del 1,80% superior en las LR-S-P, la flecha superó en un 16,45% los datos obtenidos en las vigas sin refuerzo.



**Figura 4.109.** Carga máxima de las vigas LR-S-F. Línea verde continua: valor medio del grupo. Línea roja discontinua: valor medio de las vigas sin refuerzo.

El valor medio de carga máxima de este grupo aumentó en un 61,65% con respecto al valor medio de las vigas sin reforzar. Todas las vigas fallaron por cortante, siendo el modo de fallo de dos de ellas de tipo 5 y una de tipo 6.

#### 4.3.4. LR-D-P

Los datos de todas las vigas LR-D-P ensayadas junto con un promedio de los valores obtenidos se muestran en la Tabla 4.39.

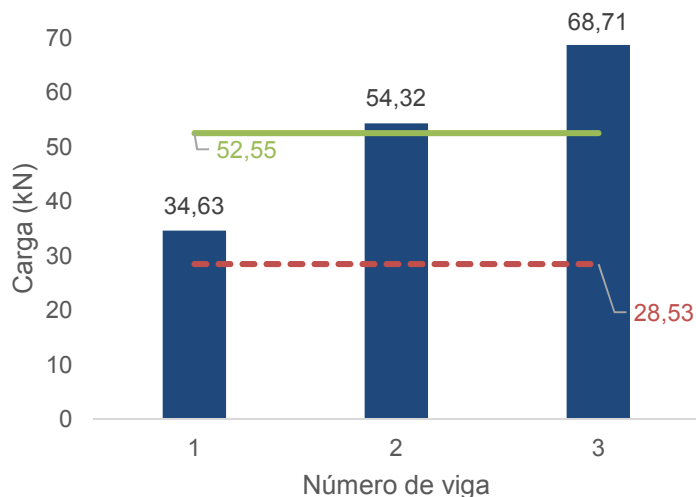
Nº	Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
1	34,63	32,95	14095,95	16,39	5	520,95	MEG
2	54,32	51,67	12281,32	20,94	6	694,63	Rechazo
3	68,71	65,36	24397,03	16,05	5	780,95	MEG
<b>Promedio</b>	52,55	49,99	16924,77	17,79		665,51	
<b>Mejora con respecto a la media de NR [%]</b>	84,19	84,19	61,81	37,37		6,96	

**Tabla 4.39.** Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para las vigas LR-D-P y sus valores medios.

La viga LR-D-P-1 era la que más baja densidad tenía dentro del grupo, catalogada como MEG, pero su resistencia fue baja en comparación con las otras dos. La viga LR-D-P-2 y LR-D-P-3 tenían alta densidad, y obtuvieron altos valores de carga. En concreto la viga



LR-D-P-3 obtuvo el mejor valor del grupo, también porque su densidad estaba muy por encima de la media, y estaba catalogada como MEG. El aumento porcentual de la media de MOR de este grupo con respecto a las vigas sin reforzar fue de un 84,19%. En la gráfica de la Figura 4.110 se muestran los resultados de carga media, y de cada viga. Este grupo de vigas tenía una densidad alta. Un 6,96% superior al de la media de las vigas sin refuerzo. Su MOE superó al de éstas en un 61,81% y llegaron a alcanzar una flecha media un 37,37% superior.



**Figura 4.110.** Carga máxima de las vigas LR-D-P. Línea verde continua: valor medio del grupo. Línea roja discontinua: valor medio de las vigas sin refuerzo.

El modo de fallo fue por cortante en todas las vigas, dándose el modelo 5 en las catalogadas como MEG, y el modelo 6 en la catalogada como Rechazo.

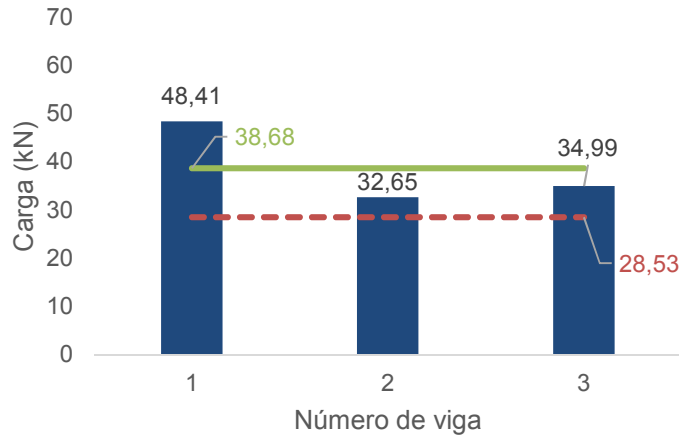
#### 4.3.5. LR-D-F

En la Tabla 4.40 se muestran los resultados obtenidos para este grupo de vigas y un valor medio de todos los obtenidos.

Nº	Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
1	48,41	46,05	13186,33	15,82	6	594,35	MEG
2	32,65	31,06	15616,87	12,99	6	535,60	Rechazo
3	34,99	33,28	14374,70	19,03	6	463,09	Rechazo
<b>Promedio</b>	38,68	36,80	14392,63	15,95		531,01	
<b>Mejora con respecto a la media de NR [%]</b>	35,58	35,59	37,60	23,17		-11,51	

**Tabla 4.40.** Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para las vigas LR-D-F y sus valores medios.

La primera viga de este grupo se catalogó como MEG, y tenía una densidad superior al resto del grupo, lo que se tradujo en que su valor de carga máxima fuera superior al de las otras dos, tal y como se ve en la Tabla 4.40. La media de MOR de este grupo superó en un 35,59% la media de MOR de las vigas sin refuerzo. En la Figura 4.111 se pueden ver las resistencias de las vigas LR-D-F con respecto a la media del grupo. La media de la densidad era más baja que la media de las vigas sin refuerzo en un 11,51%. Su MOE sufrió un incremento con respecto a éstas del 37,60% y su flecha sufrió una mejora considerable respecto a la media de las vigas sin reforzar (23,17%). Aun así más baja que en las LR-D-P.



**Figura 4.111.** Carga máxima de las vigas LR-D-F. Línea verde continua: valor medio del grupo. Línea roja discontinua: valor medio de las vigas sin refuerzo.

En este grupo de vigas hubo unanimidad en el modo de rotura, siendo todas por cortante de acuerdo al modelo 6.

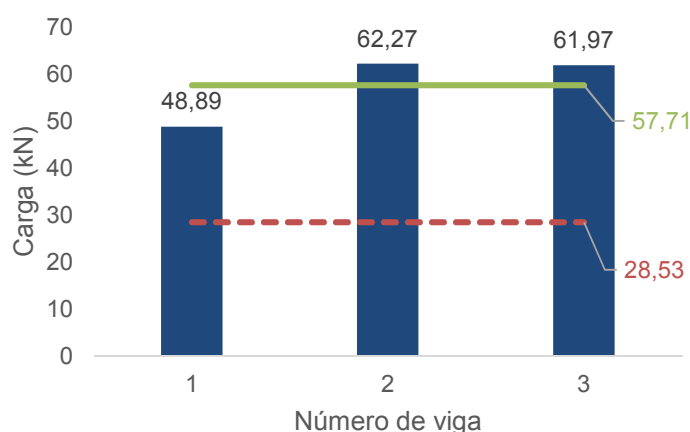
#### 4.3.6. WLR-S

Los resultados del primer grupo con tejido y laminado ensayado (WLR-S) se presentan en la Tabla 4.41.

Nº	Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
1	48,89	46,51	14867,82	29,95	6	464,41	Rechazo
2	62,27	59,23	14215,19	16,69	6	464,41	Rechazo
3	61,97	58,95	13044,72	30,46	6	628,75	MEG
<b>Promedio</b>	57,71	54,90	14042,58	25,7		519,19	
<b>Mejora con respecto a la media de NR [%]</b>	102,28	102,28	34,26	98,46		-16,56	

**Tabla 4.41.** Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para las vigas WLR-S y sus valores medios.

En este grupo se observó que las vigas WLR-S-2 y 3 obtuvieron valores de carga máxima muy elevados y similares, pese a tener densidades diferentes, y ser la WLR-S-3 la catalogada como MEG. Sin embargo, las deformaciones sí que fueron diferentes, teniendo la viga WLR-S-3 una flecha máxima mucho más elevada que la WLR-S-2, y un módulo de elasticidad a flexión menor (Tabla 4.41). La media de las resistencias obtenidas mejoró en un 102,28% a la media de las vigas sin refuerzo, lo que es una gran ganancia de capacidad portante, pese a que la densidad media del grupo era 16,56% menor. El MOE sufrió un aumento medio dentro de los grupos analizados hasta ahora. La flecha máxima no obstante, sufrió un gran aumento frente a las vigas sin reforzar (98,46%). En la Figura 4.112 aparecen las resistencias de cada viga junto al valor medio del grupo.



**Figura 4.112.** Carga máxima de las vigas WLR-S. Línea verde continua: valor medio del grupo. Línea roja discontinua: valor medio de las vigas sin refuerzo.

Todas las vigas del grupo WLR-S fallaron por cortante, ajustándose al modelo de fallo 6.

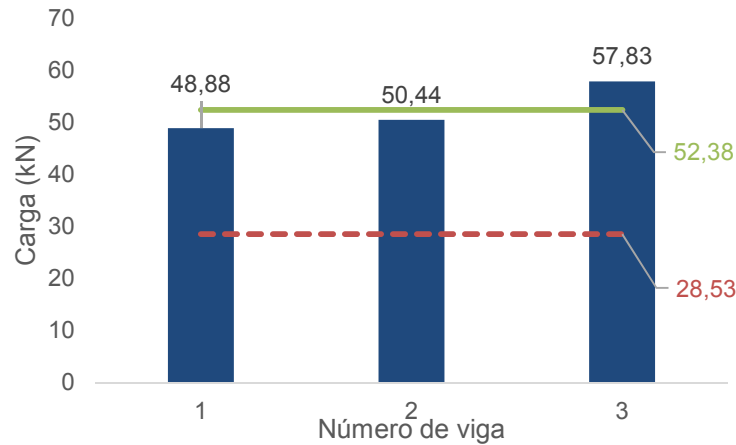
#### 4.3.7. WLR-D-U

La Tabla 4.42 refleja los datos obtenidos para el grupo de vigas WLR-D-U, así como los valores medios de cada parámetro para este grupo.

Nº	Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
1	48,88	43,64	11783,48	27,78	4	542,59	Rechazo
2	50,44	47,98	17715,23	22,15	2	694,86	Rechazo
3	57,83	55,01	15939,62	18,02	6	685,90	MEG
<b>Promedio</b>	52,38	48,88	15146,11	22,65		641,12	
<b>Mejora con respecto a la media de NR [%]</b>	83,60	80,10	44,81	74,90		3,04	

**Tabla 4.42.** Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para las vigas WLR-D-U y sus valores medios.

La tercera viga de este grupo fue la que mayor valor de carga máxima alcanzó, pese a no ser la que mayor densidad del grupo tenía, siendo catalogada como MEG. La media de densidad de este grupo era un 3,04% mayor a la de las sin refuerzo, así como el valor medio de MOE que se obtuvo, el cual fue un 44,81% superior. En cuanto a resistencias, se superó en un 80,10% el valor de MOR medio de las vigas sin reforzar obtenido. En la Figura 4.113 se pueden ver las resistencias de las vigas de este grupo en relación con la media de la resistencia del propio grupo. La flecha máxima también sufrió un aumento considerable frente a las vigas sin reforzar (74,90%).



**Figura 4.113.** Gráfica de carga de las vigas WLR-D-U. Verde: valor medio del grupo. Rojo: valor medio de las vigas sin refuerzo.

En las roturas de las vigas de este grupo aparecieron fallos por tracción, por cortante y por compresión.

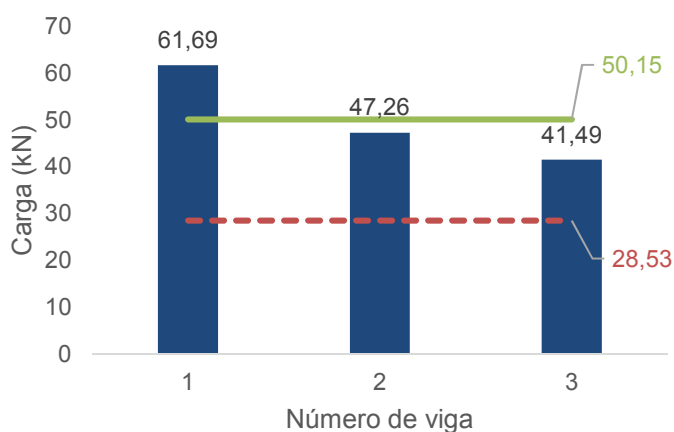
#### 4.3.8. WLR-D-B

Los resultados para el grupo con tejido bidireccional y laminado (WLR-D-B) se muestran a modo de resumen en la Tabla 4.43.

Nº	Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
1	61,69	58,68	12993,80	22,84	6	521,57	MEG
2	47,26	44,96	17746,36	20,69	5	514,03	MEG
3	41,49	39,47	12888,52	15,30	4	524,59	Rechazo
<b>Promedio</b>	50,15	47,70	14542,89	19,61		520,06	
<b>Mejora con respecto a la media de NR [%]</b>	75,78	75,76	39,04	51,43		-16,01	

**Tabla 4.43.** Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para las vigas WLR-D-B y sus valores medios.

Las dos primeras vigas de este grupo (WLR-D-B-1 y 2) estaban catalogadas como MEG, y tenían una densidad similar. Ambas fallaron por cortante, pero de modo diferente, como se aprecia en la Tabla 4.43. También hubo disparidad en cuanto a resistencias, ya que la WLR-D-B-1 alcanzó una resistencia considerablemente mayor que el resto del grupo. La viga WLR-D-B-3 era la única catalogada como Rechazo, pero su resistencia se asemejó a la obtenida en la segunda viga. Los valores de carga máxima de cada viga y el promedio del grupo se pueden ver en la Figura 4.114. La viga WLR-D-3 se vio afectada también por tracciones, en el momento de su rotura (modo de fallo 3). La media de MOR obtenido en este grupo fue un 75,76% mayor que el obtenido en el grupo de vigas sin reforzar. La media de densidad era bastante inferior a las vigas sin reforzar (16,01% menos), pero aun así, el MOE y la flecha máxima superaron al de éstas en un 39,04% y 51,43% respectivamente.



**Figura 4.114.** Carga máxima de las vigas WLR-D-B. Línea verde continua: valor medio del grupo. Línea roja discontinua: valor medio de las vigas sin reforzar.

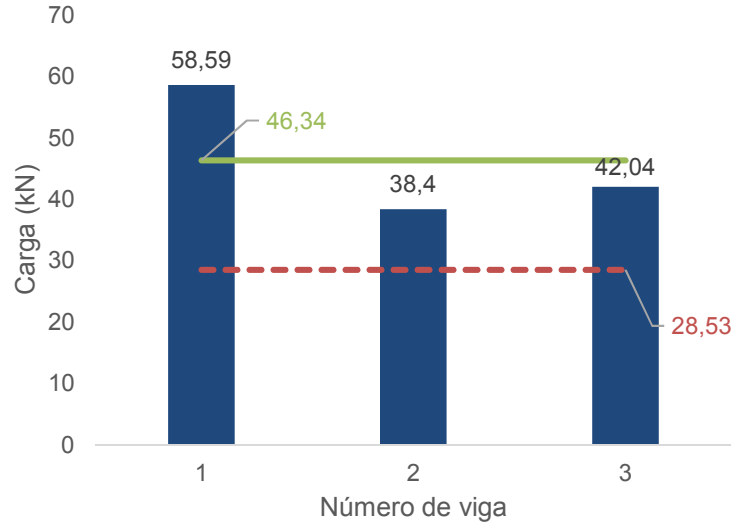
#### 4.3.9. WR-S

Los resultados obtenidos para el primer grupo de refuerzo con tejido ensayado, aparecen en la Tabla 4.44.

Nº	Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
1	58,59	55,73	10351,21	25,83	6	538,45	MEG
2	38,40	36,53	11525,73	26,50	6	546,68	Rechazo
3	42,04	39,99	11474,00	19,02	6	539,19	Rechazo
<b>Promedio</b>	46,34	44,08	11116,98	23,78		541,44	
<b>Mejora con respecto a la media de NR [%]</b>	62,43	62,42	6,29	83,63		-12,98	

**Tabla 4.44.** Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para las vigas WR-S y sus valores medios.

Las tres vigas de este grupo tenían densidades muy similares, estando su media un 12,98% por debajo de las vigas sin reforzar. La viga WR-S-1, catalogada como MEG, obtuvo la mayor carga máxima. La mejora del MOR medio de este grupo con respecto al grupo de las vigas sin refuerzo fue de un 62,42%. En la Figura 4.115 se observa la carga máxima de cada una de las vigas WR-S, así como su valor medio. El MOE medio se asemejó bastante al de las vigas sin reforzar, siendo sólo un 6,29% superior en las WR-S, pero la media de la flecha máxima mejoró en un 83,63%, algo importante para los estados límite de servicio.



**Figura 4.115.** Carga máxima de las vigas WR-S. Línea verde continua: valor medio del grupo. Línea roja discontinua: valor medio de las vigas sin refuerzo.

El modo de fallo en todas las muestras de este grupo fue por cortante, asemejándose al modelo de fallo 6.

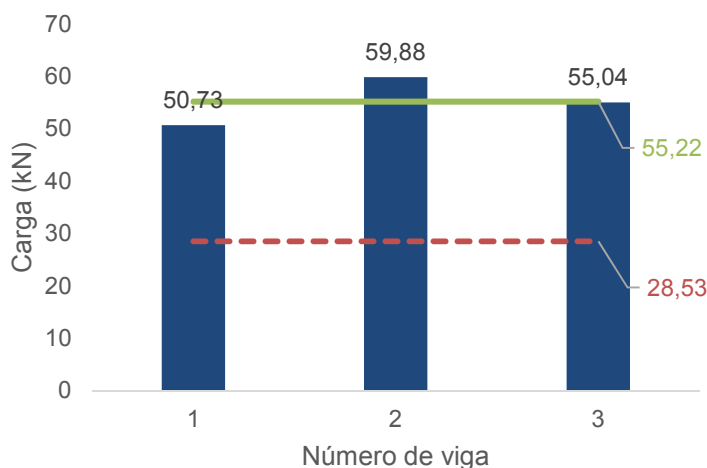
#### 4.3.10. WR-D-U

En la Tabla 4.45 se muestra un resumen de los resultados obtenidos para las vigas WR-D-U y los resultados medios del grupo.

Nº	Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
1	50,73	48,25	10373,60	27,78	6	552,62	MEG
2	59,88	56,97	13294,00	21,06	6	606,37	Rechazo
3	55,04	52,36	13482,09	21,11	6	539,59	Rechazo
<b>Promedio</b>	55,22	52,53	12383,23	23,32		566,19	
<b>Mejora con respecto a la media de NR [%]</b>	93,55	93,55	18,39	80,08		-9,00	

**Tabla 4.45.** Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para las vigas WR-D-U y sus valores medios.

En este grupo fue la viga con mayor densidad (WR-D-U-2) la que alcanzó un valor de carga máxima más alto, estando catalogada como Rechazo. El comportamiento de esta viga fue muy similar al de la WR-D-U-3. En la Tabla 4.45 se puede ver que tanto la resistencia, como la flecha y el módulo de elasticidad a flexión fueron parecidos. La carga máxima para las vigas de este grupo aparece en la Figura 4.116 junto con la representación del valor medio de carga del grupo. Aunque la densidad era del 9,00% menor a la media de las vigas sin refuerzo, el MOR medio alcanzado por las vigas WR-D-U mejoró en un 93,55%. El aumento del MOE se mantuvo por debajo de la media, superando en un 18,39% a las vigas sin reforzar. La flecha máxima sin embargo, sufrió unas de las mayores mejoras, llegando a superar a las vigas sin reforzar en un 80,08% de media.



**Figura 4.116.** Carga máxima de las vigas WR-D-U. Línea verde continua: valor medio del grupo. Línea roja discontinua: valor medio de las vigas sin refuerzo.

Todas las vigas WR-D-U fallaron por cortante de acuerdo al modo 6.

#### 4.3.11. WR-D-B

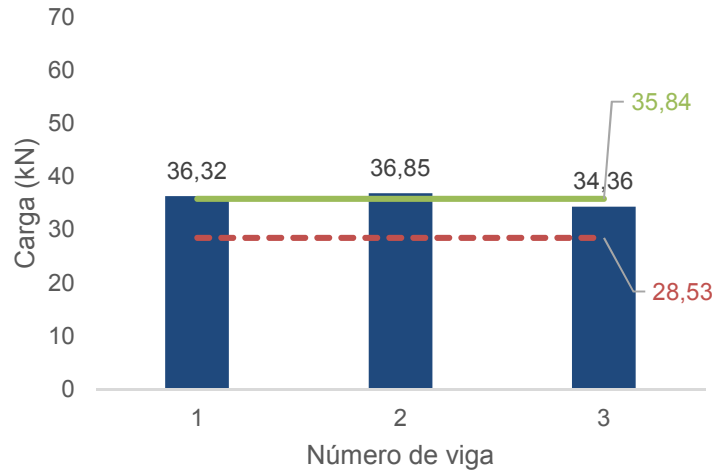
Los datos referentes al último grupo de vigas ensayado (WR-D-B) se muestran en la Tabla 4.46 a modo de resumen, junto a los valores promedio.

Nº	Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Modo de fallo [1-7]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Catalogación Según norma UNE 56545
1	36,32	34,55	13502,70	13,14	6	671,20	MEG
2	36,85	35,05	10300,78	14,10	6	471,19	Rechazo
3	34,36	32,69	11261,17	18,22	4	456,91	Rechazo
<b>Promedio</b>	35,84	34,10	11688,22	15,15		533,10	
<b>Mejora con respecto a la media de NR [%]</b>	25,62	25,64	11,75	16,99		-14,32	

**Tabla 4.46.** Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación obtenidos para las vigas WR-D-B y sus valores medios.

La densidad pareció no ser un factor determinante en este grupo de vigas, en las que se obtuvieron unos valores de carga máxima con muy poca dispersión. La viga WR-D-B-1 era la catalogada como MEG, y su densidad era muy superior a la de las otras dos. Sin

embargo, la carga máxima que soportó estuvo muy a la par de la obtenida por las otras dos, viéndose incluso superada por la viga WR-D-B-2. Los resultados de carga máxima de las vigas de este grupo junto con su carga máxima media se muestran en la Figura 4.117. El promedio de MOR del grupo de vigas WR-D-B fue un 25,64% mayor al obtenido con las vigas sin reforzar. La media de densidades fue inferior (14,32% menos), pero tanto el MOE como la flecha máxima superaron la media de las vigas sin reforzar (en un 11,75% y un 16,99% respectivamente).



**Figura 4.117.** Gráfica de carga de las vigas WR-D-B. Verde: valor medio del grupo. Rojo: valor medio de las vigas sin reforzo.

El modo predominante de fallo fue por cortante (modelo 6), aunque la tercera viga también se vio afectada por las tracciones a la hora del fallo (modelo 4).

#### 4.4. Comparación y discusión entre distintos grupos

En este Apartado se comparan los resultados obtenidos entre los distintos grupos de vigas. Se comienza por un resumen de los datos medios de cada grupo en el Apartado 4.4.1, y un resumen de los modos de fallo obtenidos en todos los ensayos en el Apartado 4.4.2. Por último se hace una comparación atendiendo a los datos de la extensometría (Apartado 4.4.3) y una comparación final entre todas las cargas y resistencias máximas obtenidas en el Apartado 4.4.4.



#### 4.4.1. Resumen de resultados promedios por grupo


La Tabla 4.47 recoge todos los datos medios obtenidos en los distintos grupos de vigas ensayadas.

Grupo	Carga máxima [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	Flecha máxima [mm]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]
NR	28,53	27,14	10459,43*	12,95*	622,21
LR-S-P	39,14	37,21	12552,66	15,41	514,81
LR-S-F	46,12	43,85	17906,33	15,08	633,43
LR-D-P	52,55	49,99	16924,77	17,79	665,51
LR-D-F	38,68	36,80	14392,63	15,95	531,01
WLR-S	57,71	54,90	14042,58	25,70	519,19
WLR-D-U	52,38	48,88	15146,11	22,65	641,12
WLR-D-B	50,15	47,70	14542,89	19,61	520,06
WR-S	46,34	44,08	11116,98	23,78	541,44
WR-D-U	55,22	52,53	12383,23	23,32	566,19
WR-D-B	35,84	34,10	11688,22	15,15	533,10

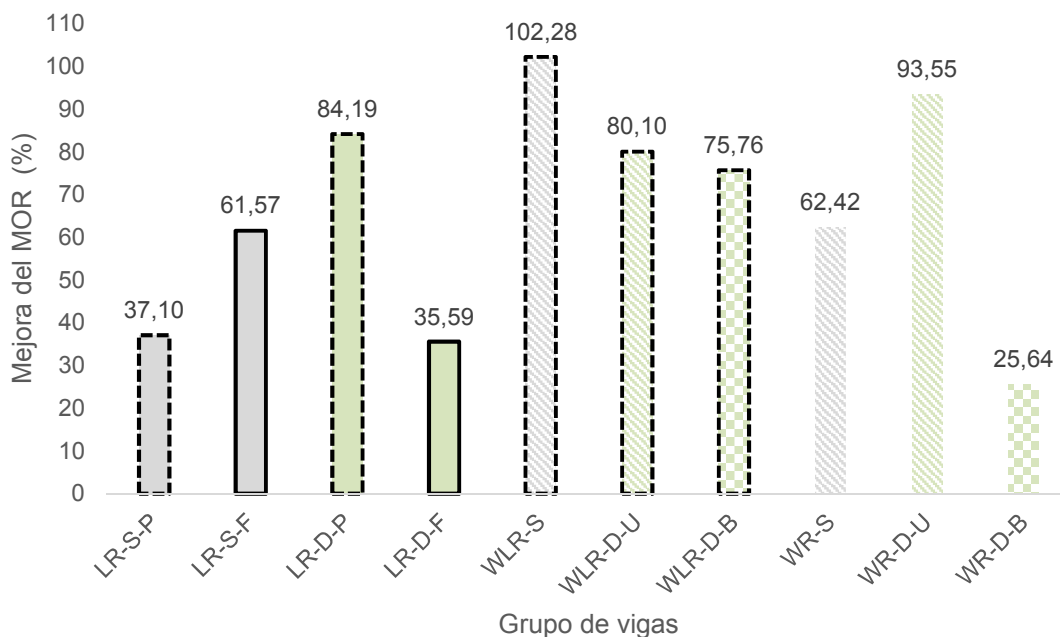
**Tabla 4.47.** Resultados medios de todos los grupos de vigas ensayados. (\*) Imposibilidad de realizar la media con todas las vigas del grupo.

En el Apartado 4.3 se habló del porcentaje de mejora que cada grupo de vigas había conseguido con respecto a las vigas sin reforzar. En la Tabla 4.48 se recogen todos los porcentajes de mejora, pudiéndose apreciar que siempre son positivos. En la Figura 4.118 se puede ver la mejora en MOR de forma gráfica.

Mejora frente a la media de las vigas sin refuerzo [%]				
Grupo	Carga máxima	MOR	MOE	Flecha máxima
LR-S-P	37,19	37,10	20,01	19,00
LR-S-F	61,65	61,57	71,20	16,45
LR-D-P	84,19	84,19	61,81	37,37
LR-D-F	35,58	35,59	37,60	23,17
WLR-S	102,28	102,28	34,26	98,46
WLR-D-U	83,60	80,10	44,81	74,90
WLR-D-B	75,78	75,76	39,04	51,43
WR-S	62,43	62,42	6,29	83,63
WR-D-U	93,55	93,55	18,39	80,08
WR-D-B	25,62	25,64	11,75	16,99



**Tabla 4.48.** Porcentaje de mejora en carga máxima, MOR, MOE, flecha máxima y densidad de la media de cada grupo frente a la media de las vigas sin refuerzo. Rojo: menores mejoras. Verde: mayores mejoras.



**Figura 4.118.** Porcentaje de mejora del MOR de cada grupo de vigas con respecto a la media de la carga máxima de las vigas sin reforzar. Gris: SIKA S.A.U. Verde: DRIZORO S.A.U. Contorno negro continuo: laminado completo. Contorno negro discontinuo: laminado parcial. Trama rayada: tejido unidireccional. Trama a cuadros: tejido bidireccional.

#### 4.4.2. Resumen de modos de fallo

En este Apartado se recogen las roturas de todas las vigas, asociando a cada una un modelo de fallo, vistos en el Apartado 4.1.

Grupo	Viga	Modelo de fallo						
		1	2	3	4	5	6	7
NR	1			X				
	2						X	
	3					X	X	
	4						X	
LR-S-P	1						DX	
	2						X	
	3						X	
	4						X	
LR-S-F	1					DX		
	2					X		
	3						DX	
LR-D-P	1					DX		
	2						DX	
	3					X		
LR-D-F	1						X	
	2						DX	
	3						X	
WLR-S	1						DX	
	2						DX	
	3						DX	
WLR-D-U	1				DX			
	2		X					
	3						DX	

<b>WLR-D-B</b>	1					X	X	
	2					X		
	3				X			
<b>WR-S</b>	1						DX	
	2						X	
	3						X	
<b>WR-D-U</b>	1						X	
	2						X	
	3						DX	
<b>WR-D-B</b>	1						X	
	2						X	
	3				X			

**Tabla 4.49.** Resultados medios de todos los grupos de vigas ensayados. X: sin deslaminación. DX: con deslaminación.

Como se observa en la Tabla 4.49, el modo de fallo predominante en las vigas reforzadas fue por cortante. Concretamente, la mayoría de las roturas se produjeron de acuerdo al modelo de fallo número 6, Lo cual, comparándolo con las vigas sin reforzar en las cuales se obtuvieron 3 modos de fallo diferentes, es un indicador de que el refuerzo disminuye las probabilidades de la viga a fallar por tracción, limitando prácticamente su fallo al cortante, o en algunos casos, cortante junto a tracción o compresión.

#### 4.4.3. Comparación de deformaciones

En este Apartado se COMPARA el comportamiento elástico de cada grupo ensayado. En primer lugar, en la Tabla 4.50 se estudia el MOE en cada grupo, así COMO EL aumento porcentual del mismo con respecto a las vigas sin refuerzo.

Grupo	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	En relación a NR [%]
<b>NR</b>	10459,43*	
<b>LR-S-P</b>	12552,66	20,01
<b>LR-S-F</b>	17906,33	71,20
<b>LR-D-P</b>	16924,77	61,81
<b>LR-D-F</b>	14392,63	37,60
<b>WLR-S</b>	14042,58	34,26
<b>WLR-D-U</b>	15146,11	44,81
<b>WLR-D-B</b>	14542,89	39,04
<b>WR-S</b>	11116,98	6,29
<b>WR-D-U</b>	12383,23	18,39
<b>WR-D-B</b>	11688,22	11,75

**Tabla 4.50.** Resultados medios de MOE de los grupos de vigas. (\*) Imposibilidad de realizar la media con todas las vigas del grupo.

Como se aprecia en la Tabla 4.50, se HAN SEPARADO los grupos de vigas en: laminado inferior, mixto y tejido para estudiar de forma global el MOE. Se puede apreciar que los refuerzos que menos incremento de MOE obtuvieron fueron los elaborados simplemente con tejido. Los demás grupos se mantienen en torno a unos valores medios de entre un

20 y un 45% de mejora, a excepción de dos grupos en los cuales el porcentaje de aumento sobresale. Dichos grupos son el LR-S-F Y el LR-D-P con una mejora del 71,20% y 61,81% respectivamente.

En el grupo de los laminados inferiores se realizó un análisis más exhaustivo, ya que los resultados de los ensayos de esos grupos determinaron si en los refuerzos mixtos, las muestras llevarían laminado parcial o completo. Se determinó que no existían diferencias relevantes en cuanto a resistencias entre los refuerzos elaborados con laminado de ancho completo o parcial. No obstante, sí que existía una diferencia en cuanto a deformaciones, flecha y módulo de elasticidad. Se eligió por tanto el laminado de ancho parcial para seguir con la elaboración de los refuerzos mixtos, ya que admitía un número mayor de deformaciones antes de romper. Se decidió que estas deformaciones acompañaban más a la deformación propia de la madera, y que sería negativo rigidizar la viga en exceso. La Figura 4.119 y la 4.120, muestran una comparación en cuanto a deformaciones en la galga C entre una viga sin refuerzo (NR-3) y los dos tipos de refuerzo inferior, para cada casa comercial.

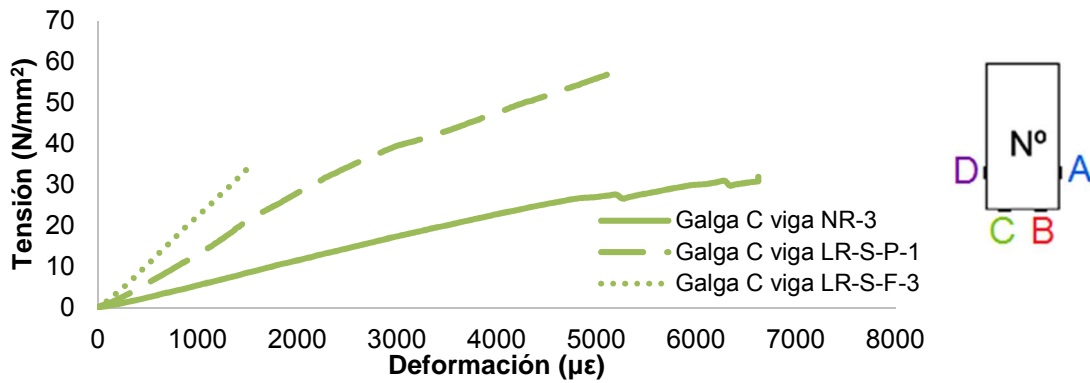


Figura 4.119. Comparación entre la galga C de una viga sin refuerzo, una con laminado de ancho parcial y otra con laminado de ancho completo de la casa SIKKA S.A.U.

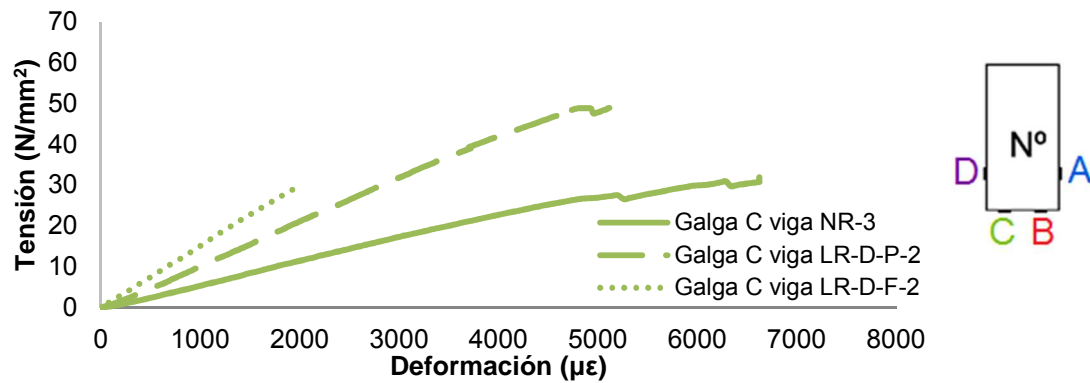


Figura 4.120. Comparación entre la galga C de una viga sin refuerzo, una con laminado de ancho parcial y otra con laminado de ancho completo de la casa DRIZORO S.A.U.

Para concluir, se estudiaron las flechas medias calculadas en cada grupo. Se analizó junto a la densidad de cada grupo y al porcentaje de mejora con respecto a las vigas sin refuerzo. Como se ve en la Tabla 4.50, no se pudo establecer una relación clara entre la densidad y la flecha máxima.

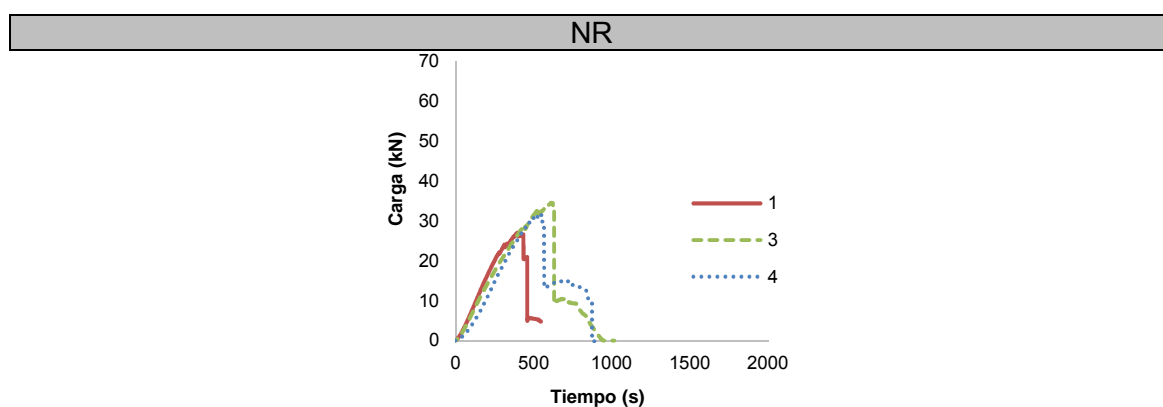
Grupo	Flecha máxima [mm]	Flecha máxima con respecto a NR [%]
NR	12,95*	-
LR-S-P	15,41	19,00
LR-S-F	15,08	16,45
LR-D-P	17,79	37,37
LR-D-F	15,95	23,17
WLR-S	25,70	98,46
WLR-D-U	22,65	74,90
WLR-D-B	19,61	51,43
WR-S	23,78	83,63
WR-D-U	23,32	80,08
WR-D-B	15,15	16,99

**Tabla 4.51.** Resultados medios de flecha máxima de los grupos de vigas. (\*) Imposibilidad de realizar la media con todas las vigas del grupo.

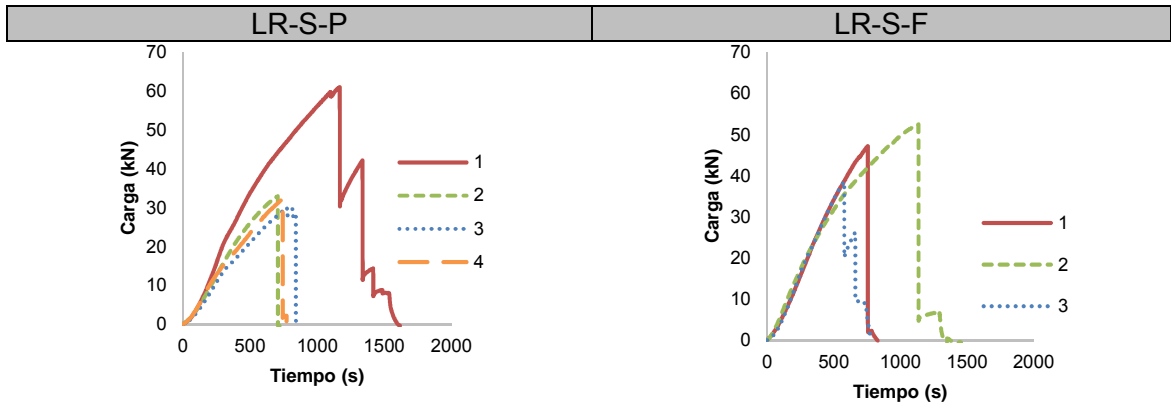
Sin embargo, si se apreció que los refuerzos con tejido alcanzaban una flecha superior, siendo ésta muy superior a la media en los tejidos unidireccionales.

#### 4.4.4. Comparación de la ductilidad

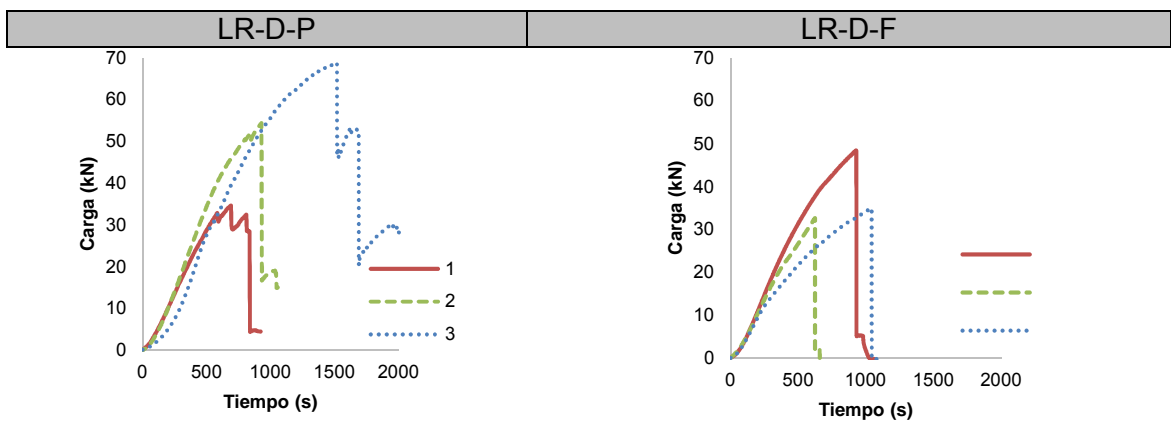
En este Apartado se compararán las gráficas carga-tiempo de todos los grupos de vigas ensayadas, a fin de determinar si el refuerzo ayuda a la hora de que la rotura de la viga sea dúctil y en caso afirmativo, ver qué tipo de refuerzos otorgan más ductilidad.



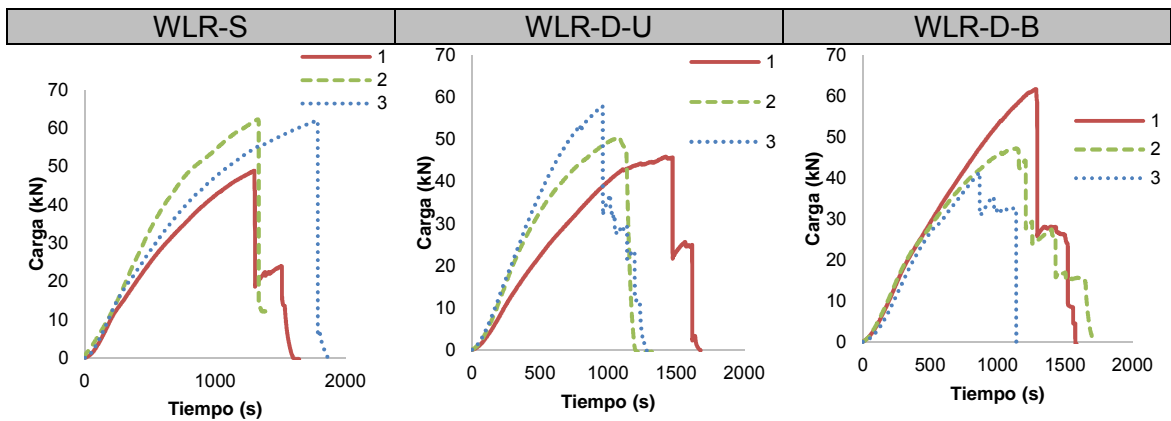
**Tabla 4.52.** Gráficas carga-tiempo de todas las vigas NR.



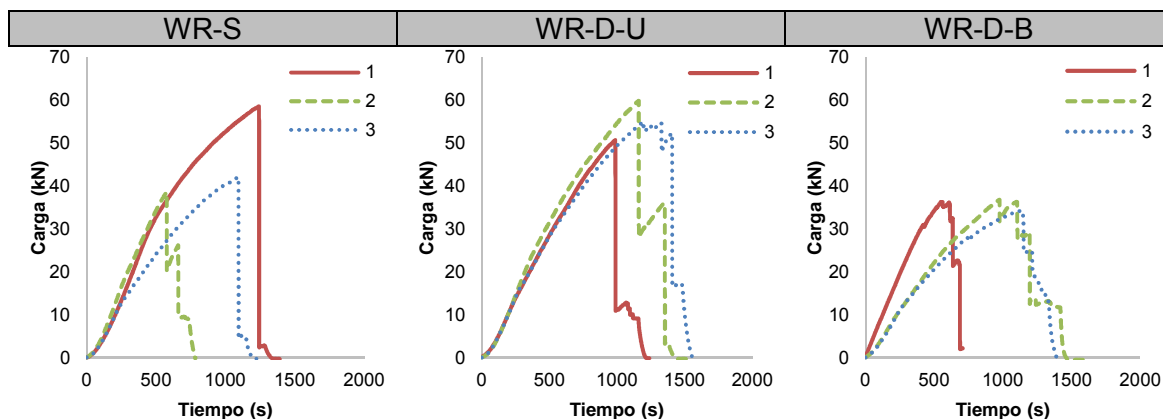
**Tabla 4.53.** Gráficas carga-tiempo de todas las vigas reforzadas sólo con laminado de SIKA S.A.U..



**Tabla 4.54.** Gráficas carga-tiempo de todas las vigas reforzadas sólo con laminado de DRIZORO S.A.U.



**Tabla 4.55.** Gráficas carga-tiempo de todas las vigas con refuerzos mixtos.



**Tabla 4.56.** Gráficas carga-tiempo de todas las vigas reforzadas sólo con tejido.

Con las gráficas de las Tablas 4.52 a 4.56 se estudió la ductilidad que cada tipo de refuerzo aportaba a la viga en el momento de la rotura. Se pudo determinar que los refuerzos con tejido eran los que producían una rotura más dúctil. Entre estos, los pertenecientes a la casa comercial DRIZORO S.A.U. fueron los que destacaron en cuanto a ductilidad. Siendo los refuerzos menos dúctiles en la rotura los elaborados con refuerzo de laminado inferior, a excepción del LR-D-P, en el cual se pudo observar bastante ductilidad.

#### 4.4.5. Comparación de los resultados de carga y tensión por vigas

Para concluir, los resultados de carga y MOR obtenidos se agruparon (Tabla 4.57) y se realizó una gráfica con todos los valores de MOR, para poder tener una visión global y completa de todos los resultados de carga obtenidos (Figura 4.121).

Grupo	Viga	Carga máxima [kN]	Carga máxima media [kN]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOR medio [N/mm <sup>2</sup> ]
NR	1	27,06	28,53	25,74	27,14
	2	20,90		19,88	
	3	34,56		32,88	
	4	31,59		30,05	
LR-S-P	1	61,06	39,14	58,09	37,21
	2	33,02		31,28	
	3	30,16		28,69	
	4	32,33		30,76	
LR-S-F	1	47,23	46,12	44,93	43,85
	2	52,52		49,91	
	3	38,60		36,72	
LR-D-P	1	34,63	52,55	32,95	49,99
	2	54,32		51,67	
	3	68,71		65,36	
LR-D-F	1	48,41	38,68	46,05	36,80
	2	32,65		31,06	
	3	34,99		33,28	
WLR-S	1	48,89	57,71	46,51	54,90
	2	62,27		59,23	
	3	61,97		58,95	
WLR-D-U	1	48,88	52,38	43,64	48,88
	2	50,44		47,98	

	3	57,83		55,01	
<b>WLR-D-B</b>	1	61,69	50,15	58,68	47,70
	2	47,26		44,96	
	3	41,49		39,47	
<b>WR-S</b>	1	58,59	46,34	55,73	44,08
	2	38,40		36,53	
	3	42,04		39,99	
<b>WR-D-U</b>	1	50,73	55,22	48,25	52,53
	2	59,88		56,97	
	3	55,04		52,36	
<b>WR-D-B</b>	1	36,32	35,84	34,55	34,10
	2	36,85		35,05	
	3	34,36		32,69	

Tabla 4.57. Resultados de carga máxima de todas las vigas ensayadas y carga máxima media por grupos.

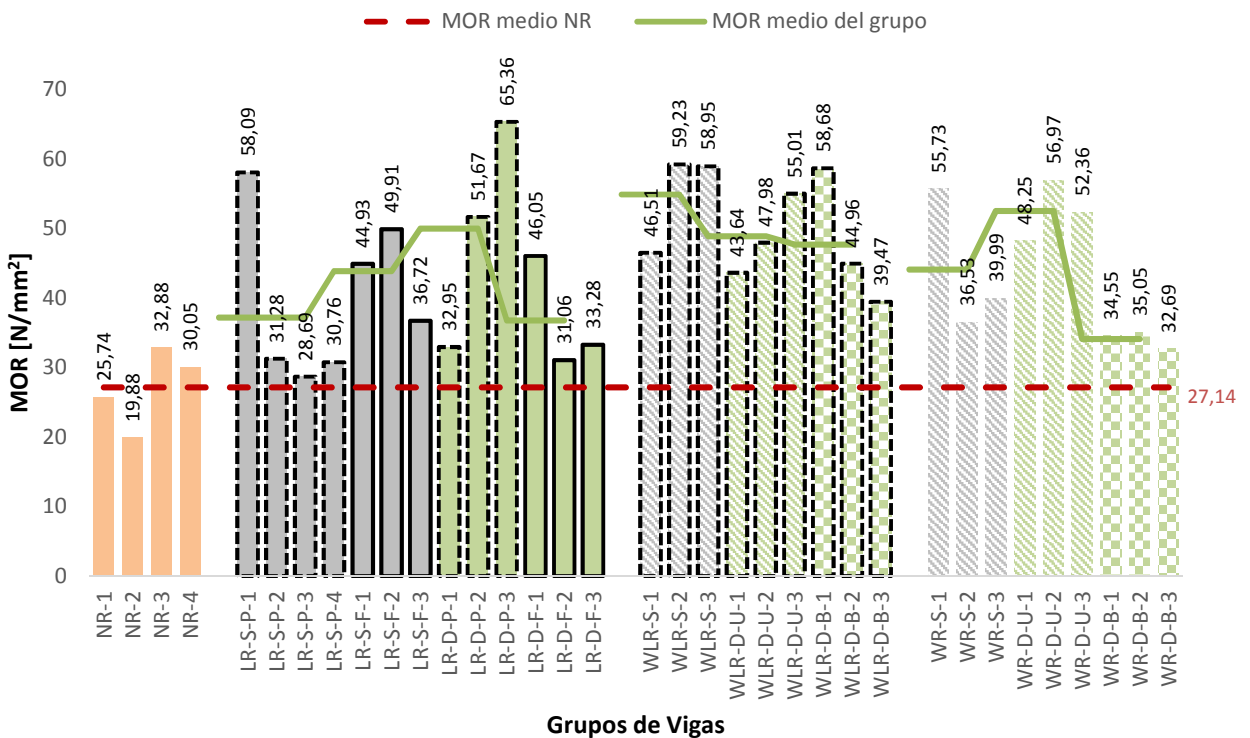


Figura 4.121. Gráfico de resultados de MOR de todas las vigas ensayadas y MOR medio por grupos en kN. Gris: SIKA S.A.U. Verde: DRIZORO S.A.U. Contorno negro continuo: laminado completo. Contorno negro discontinuo: laminado parcial. Trama rayada: tejido unidireccional. Trama a cuadros: tejido bidireccional.

Como se aprecia en la Figura 4.121 todas las vigas reforzadas superaron el valor medio de MOR de las vigas sin refuerzo. La viga que mayor mejora obtuvo (LR-D-P-3) obtuvo un MOR un 140,83% superior al de las vigas sin reforzar. De 31 vigas reforzadas ensayadas, 10 mejoraron el MOR medio de las NR en un 90%, 14 en un 70%, 19 de las vigas lo superaron en un 50% y 22 obtuvieron una mejora del 30%. Esto corrobora el aumento en la capacidad portante que otorga el refuerzo de CFRP a las vigas. En los resultados destaca la mayor homogeneidad de mejoras elevadas en los grupos WLR. Además se aprecia la escasa mejora que otorgan los refuerzos bidireccionales WR-D-B por sí solos.



## Capítulo 5. Conclusiones

Tras realizar todos los ensayos con los diferentes tipos de refuerzo, se ha observado claramente que todos los refuerzos aumentan la capacidad resistente de las vigas de madera. El porcentaje de mejora de la resistencia media (MOR) va desde un 25,64% correspondiente a los refuerzos con únicamente tejido bidireccional de DRIZORO S.A.U. hasta un 102,28% en los refuerzos con laminado y tejido unidireccional de SIKA S.A.U.

La madera es un material muy heterogéneo, en el cual es muy complicado prever un comportamiento bajo carga. La incorporación de cualquier refuerzo de CFRP de este Proyecto limita los modos de fallo a prácticamente el cortante y/o compresión (en pocos casos), reduciendo a un porcentaje muy bajo un fallo muy común en vigas de madera como es el fallo por tracción.

Se ha visto que el refuerzo hace que la rotura de la viga sea más dúctil que sin él, llegando a veces a seguir admitiendo carga tras la rotura. Los refuerzos con tejido son los que mayor ductilidad aportan, especialmente los pertenecientes a DRIZORO S.A.U. La ductilidad que otorga el refuerzo es un aspecto clave sobre todo en términos de seguridad y previsión en caso de actuación debido al fallo del elemento. Por causas propias o accidentales, aumento de peso, o sismo.

No se apreciaron diferencias notables en cuanto a resistencia a la hora de usar los productos de DRIZORO S.A.U. o de SIKA S.A.U. La diferencia más clara entre los productos de las casas comerciales fue la viscosidad de las resinas usadas (Tipo 1 y Tipo 4). Ambas resinas tienen diferentes modos de aplicación, debido a su densidad. Esta diferencia genera ventajas y desventajas en ambos tipos, siendo la aplicación de la resina Tipo 4 más rápida debido a su fluidez y obteniendo la resina Tipo 1 ventaja en la aplicación en vertical o caras inferiores debido a su consistencia.

En los refuerzos mixtos de DRIZORO S.A.U. con laminado y tejido existió una diferencia considerable en la carga máxima soportada y MOR entre los refuerzos que contenían tejido unidireccional y los que tenían bidireccional.

Se puede observar en los refuerzos con solo tejido que el aumento de la resistencia del tejido unidireccional es mayor que la del bidireccional.

Se observó que la resina Tipo 4 se comporta de una forma particular bajo altas tensiones, tornándose de un color blanquecino en la zona más tensionada, lo que puede ser un indicador visual para prever una rotura.

Se ha comprobado que es mejor colocar un laminado parcial tanto en los refuerzos de laminado longitudinal inferior como en los mixtos, ya que no existe un aumento de resistencia claro al usar un laminado de ancho completo o al usar un ancho parcial. Sin embargo, sí que existe una diferencia relevante en cuanto a deformaciones, admitiendo los refuerzos con laminado parcial un número de deformaciones superior, lo cual es beneficioso puesto que acompaña más a las deformaciones propias de la madera.

Por otro lado, la incorporación de un laminado en el refuerzo añade más rigidez a la viga que la incorporación del tejido, lo cual afecta directamente al MOE y a su comportamiento mecánico.

Los refuerzos del tipo WLR (con laminado y tejido) son los que presentan una mayor homogeneidad en mejoras elevadas.

El tiempo invertido en cada tipo de refuerzo aumenta según la complejidad del refuerzo en este orden; refuerzo longitudinal ancho parcial, refuerzo longitudinal ancho completo, refuerzo con tejido y refuerzo mixto. El tiempo en realizar un refuerzo se ve cuantiosamente incrementado si el refuerzo lleva tejido, tardándose hasta 6 veces más si es tejido y resina de SIKA S.A.U. o hasta 4 veces más si es tejido y resina de DRIZORO S.A.U. en comparación con un refuerzo longitudinal de ancho parcial.

El coste económico de cada refuerzo se ve incrementado nuevamente por la complejidad del refuerzo; principalmente por el coste de la mano de obra que aumenta proporcionalmente al tiempo y al material invertido. De este modo, un refuerzo mixto puede llegar a costar hasta un 256,38% más que un refuerzo con laminado inferior parcial. La variedad de refuerzos estudiados servirá para optimizar la relación entre las prestaciones y el precio del elemento a reforzar.

Se ha comprobado que el tipo de refuerzo a usar depende altamente de los defectos de las vigas, es decir, debe adaptarse a las casuísticas reales que se pueden presentar.

Como conclusión final, queda claro que el CFRP es un material muy a tener en cuenta, debido a su bajo peso y el aporte de prestaciones mecánicas que dota al elemento de madera a reforzar. El impacto económico de esta opción, frente a una sustitución, puede ser mucho menor. Los resultados de este proyecto serán de gran utilidad en la realización de guías de aplicación del CFRP en madera.

## 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] Moreno Bazán, A. (2015). Caracterización y adherencia entre madera antigua y fibra de carbono para refuerzo estructural: Resultados preliminares.
- [3] García, R. (2013). Análisis de elementos de madera reforzados con materiales compuestos (*Doctoral dissertation*, Edificación).
- [4] González Bravo, C. (2007). Recuperación de la capacidad mecánica en piezas de madera solicitadas a flexión en estructuras tradicionales operando por la cara superior mediante refuerzos y prótesis mecánicas (*Doctoral dissertation*, Arquitectura).
- [5] Meier, U., Deuring, M., Meier, H., & Schwegler, G. (1993). CFRP bonded sheets (pp. 423-434). *Elsevier Science*, Amsterdam.
- [6] Van de Kuilen, J. W. G. (1991). *Theoretical and experimental research on glass fibre reinforced laminated timber beams*. In *Proceedings of the international timber engineering conference, London, England* (Vol. 3, pp. 226-33).
- [7] Linderger, R. F. (2000). *A nonlinear stochastic model for the analysis of reinforced glulam beams in bending* PhD. *Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Maine*, Ocono, ME.
- [8] Brunner, M., & Schnueriger, M. (2005, December). *Timber beams strengthened by attaching prestressed carbon FRP laminates with a gradiented anchoring device*. In *Proceedings of the international symposium on bond behaviour of FRP in structures (BBFS 2005)* (pp. 465-471).
- [9] Abdel-Magid, B., Scholsky, K., Shaler, S., Dagher, H., & Kimball, T. (1996, January). *Interfacial bonding between phenolic matrix composites and wood*. In *First International Conference on Composites in Infrastructure*.
- [10] Sonti, S. S., & GangaRao, H. V. S. (1995, January). *Strength and stiffness evaluations of wood laminates with composite wraps*. In *50th Annual Conference, Composites Institute, The Society of the Plastics Industry, Inc.*
- [11] Dhager, H. J. (2000). *Performance Wood composite for construction*. EBRAMEM, Brasil.
- [12] Fiorelli, J., & Dias, A. A. (2003). *Analysis of the strength and stiffness of timber beams reinforced with carbon fiber and glass fiber*. *Materials Research*, 6(2), 193-202.

- [13] Triantafillou, T. C., & Deskovic, N. (1992). *Prestressed FRP sheets as external reinforcement of wood members*. *Journal of Structural Engineering*, 118(5), 1270-1284.
- [14] Argüelles, A., & Arriaga, F. (1996). *Estimation and design of wooden structures*. AITIM, Madrid.
- [15] CNR-DT 201/2005. *Guidelines for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures*.
- [16] Madsen, B., Janzen, W., & Zwaagstra, J. (1980). *Moisture effects in lumber (No. 27)*. University of British Columbia, Department of Civil Engineering.
- [17] UNE-EN 338:2010. Madera estructural. Clases resistentes. Madrid. Asociación Española de Normalización (AENOR).
- [18] UNE 56544:2011. Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas. Madrid. Asociación Española de Normalización (AENOR).
- [19] UNE-EN 1912:2012. Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de calidades visuales y especies. Madrid. Asociación Española de Normalización (AENOR).
- [20] UNE-ENV 1995-1-1:1997. EUROCÓDIGO 5: Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación. Madrid. Asociación Española de Normalización (AENOR).
- [21] Código Técnico de la Edificación. Documento Básico. Seguridad Estructural. (2009). Ministerio de Fomento.
- [22] Miravete, A. (2012). *Materiales compuestos (Tomo 1)*. Reverté.
- [23] Reifsnider, K. L., & Case, S. W. (2002). *Damage tolerance and durability of material systems. Damage Tolerance and Durability of Systems, by Kenneth L. Reifsnider, Scott W. Case*.
- [24] [www.drizoro.com](http://www.drizoro.com) (19/09/2016).
- [25] [www.sika.com](http://www.sika.com) (19/09/2016).
- [26] [www.hbm.com](http://www.hbm.com) (19/09/2016).

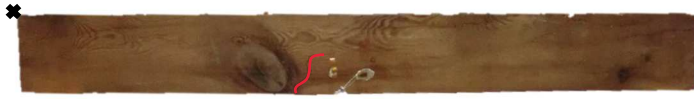
# **ANEXO I**

**FICHAS TÉCNICAS  
DE  
VIGAS ENSAYADAS**

# Viga NR-1

## Inspección visual

Cara derecha (galga A)



Cara superior



Cara izquierda (galga D)



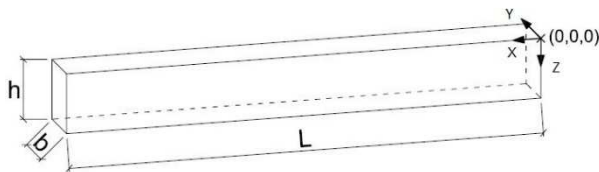
Cara inferior (galgas B y C)



Testa trasera

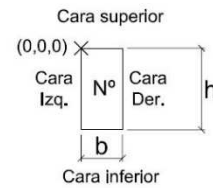


Testa frontal



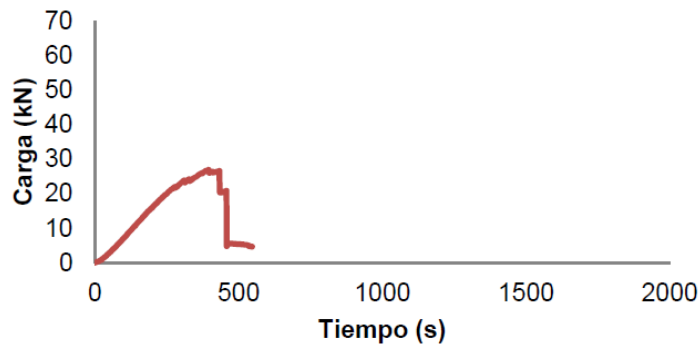
## Datos de la viga

Dimensiones hxbxL [mm]	146 x 76 x 1289
Peso [kg]	9,90
Densidad [kg/m³]	692,17
Catalogación según norma UNE 56545	Rechazo
Características del refuerzo	
Tipo	-
Laminado	-
Tejido	-
Gramaje [g/m²]	-
Datos del ensayo	
Fecha [dd/mm/aa]	14/09/15
Velocidad de carga [mm/min]	1,5
Velocidad de descarga [mm/min]	15
Carga máxima [kN]	27,06
MOR [N/mm²]	25,74
MOE [N/mm²]	13410,55
Flecha máxima [mm]	10,39
Modo de fallo [1-7]	3

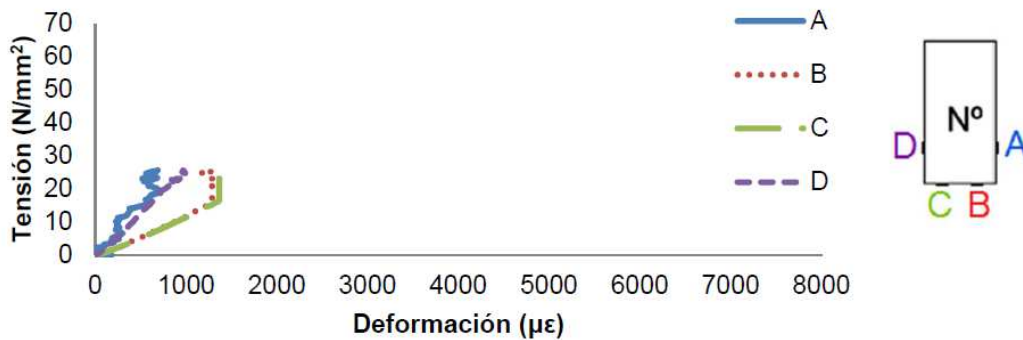


## Resultados mecánicos

Gráfica carga-tiempo



Gráfica tensión-deformación



# Viga NR-2

## Inspección visual

Cara derecha (galga A)



Cara superior



Cara izquierda (galga D)



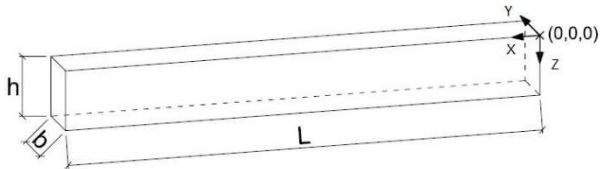
Cara inferior (galgas B y C)



Testa trasera

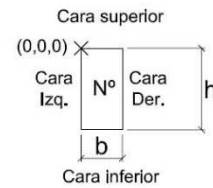


Testa frontal



## Datos de la viga

Dimensiones hxbxL [mm]	145 x 75 x 1288
Peso [kg]	7,2
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	514,57
Catalogación según norma UNE 56545	MEG
<b>Características del refuerzo</b>	
Tipo	-
Laminado	-
Tejido	-
Gramaje [g/m <sup>2</sup> ]	-
<b>Datos del ensayo</b>	
Fecha [dd/mm/aa]	04/05/15
Velocidad de carga [mm/min]	1,5
Velocidad de descarga [mm/min]	15
Carga máxima [kN]	20,90
MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	19,88
MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	-
Flecha máxima [mm]	-
Modo de fallo [1-7]	6



# Viga NR-3

## Inspección visual

Cara derecha (galga A)



Cara superior



Cara izquierda (galga D)



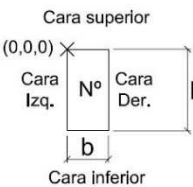
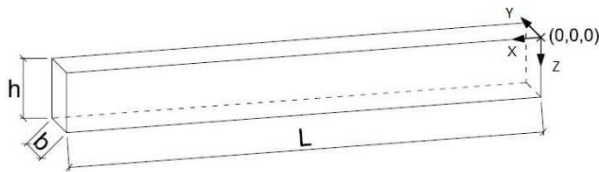
Cara inferior (galgas B y C)



Testa trasera



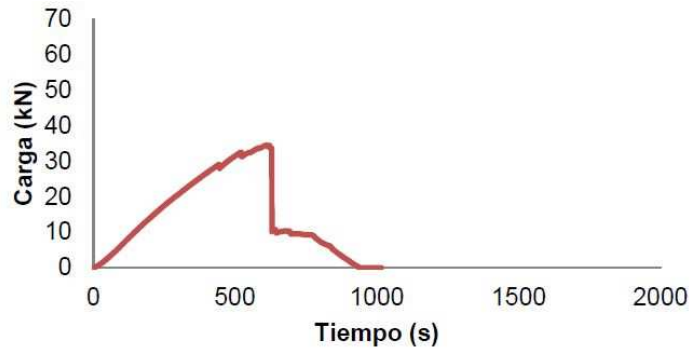
Testa frontal



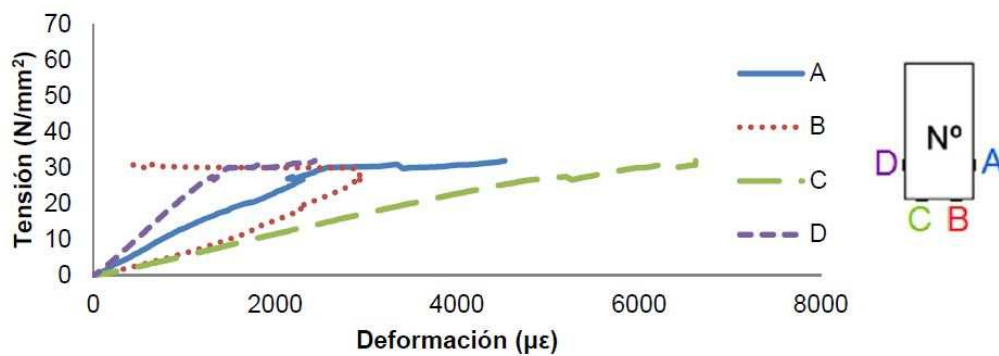
Datos de la viga	
Dimensiones hxbxL [mm]	146 x 74 x 1288
Peso [kg]	8,90
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	639,57
Catalogación según norma UNE 56545	MEG
Características del refuerzo	
Tipo	-
Laminado	-
Tejido	-
Gramaje [g/m <sup>2</sup> ]	-
Datos del ensayo	
Fecha [dd/mm/aa]	16/09/15
Velocidad de carga [mm/min]	1,5
Velocidad de descarga [mm/min]	15
Carga máxima [kN]	34,56
MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	32,88
MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	7508,31
Flecha máxima [mm]	15,21
Modo de fallo [1-7]	5

## Resultados mecánicos

Gráfica carga-tiempo



Gráfica tensión-deformación





# Viga NR-4

## Inspección visual

Cara derecha (galga A)



Cara superior



Cara izquierda (galga D)



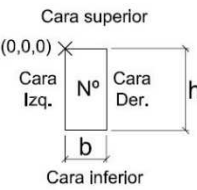
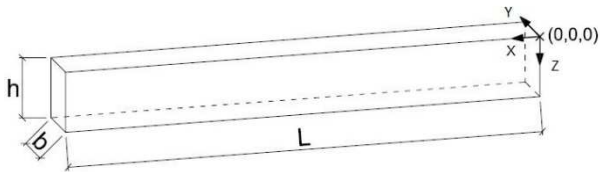
Cara inferior (galgas B y C)



Testa trasera



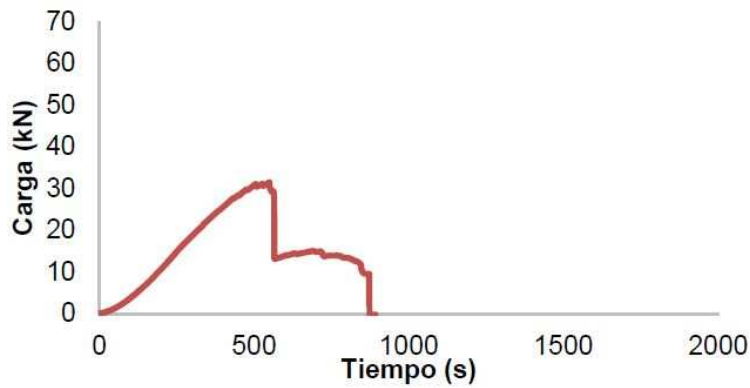
Testa frontal



Datos de la viga	
Dimensiones hxbxL [mm]	145 x 75 x1288
Peso [kg]	9,00
Densidad [kg/m³]	642,54
Catalogación según norma UNE 56545	Rechazo
Características del refuerzo	
Tipo	-
Laminado	-
Tejido	-
Gramaje [g/m²]	-
Datos del ensayo	
Fecha [dd/mm/aa]	14/10/15
Velocidad de carga [mm/min]	1,5
Velocidad de descarga [mm/min]	15
Carga máxima [kN]	31,59
MOR [N/mm²]	30,05
MOE [N/mm²]	-
Flecha máxima [mm]	13,26
Modo de fallo [1-7]	6

## Resultados mecánicos

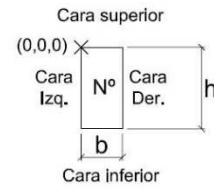
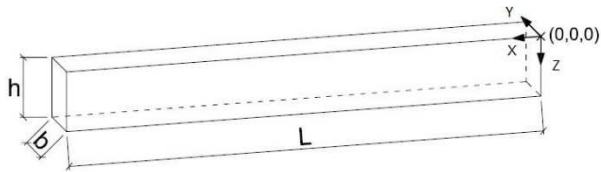
Gráfica carga-tiempo



# Viga LR-S-P-1

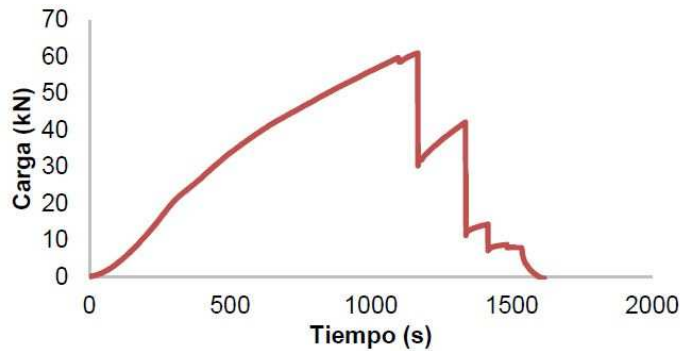


Datos de la viga	
Dimensiones hxbxL [mm]	146 x 76 x 1290
Peso [kg]	8,90
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	621,78
Catalogación según norma UNE 56545	MEG
Características del refuerzo	
Tipo	LR-S-P
Laminado	Sika CarboDur E-512
Tejido	-
Contenido vol. De fibra [%]	≥70
Datos del ensayo	
Fecha [dd/mm/aa]	29/10/15
Velocidad de carga [mm/min]	1,5
Velocidad de descarga [mm/min]	15
Carga máxima [kN]	61,06
MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	58,09
MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	15057,61
Flecha máxima [mm]	22,07
Modo de fallo [1-7]	6

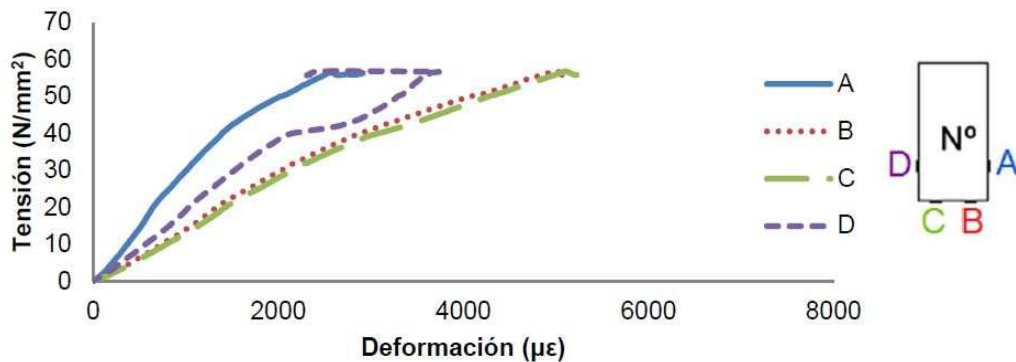


**Resultados mecánicos**

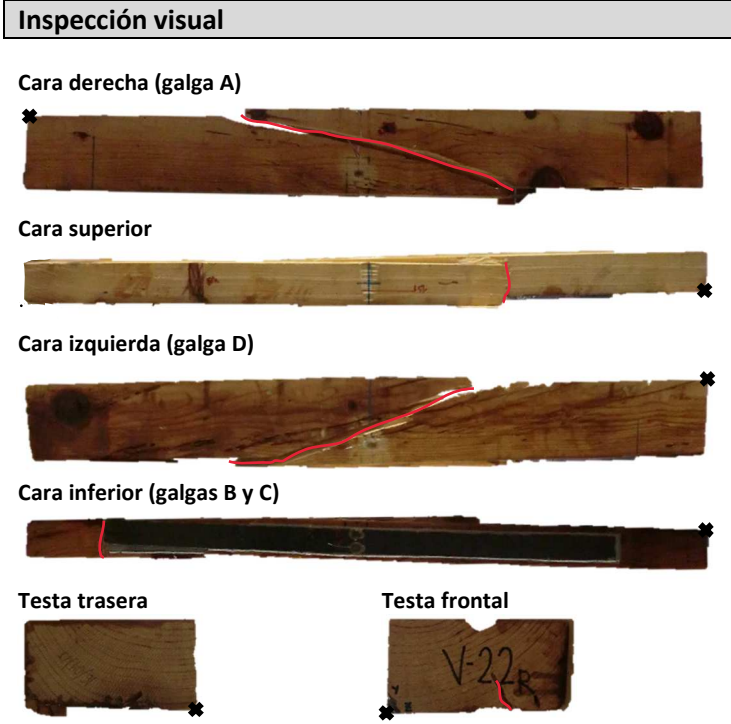
Gráfica carga-tiempo



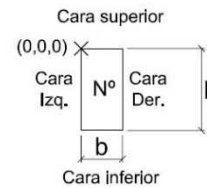
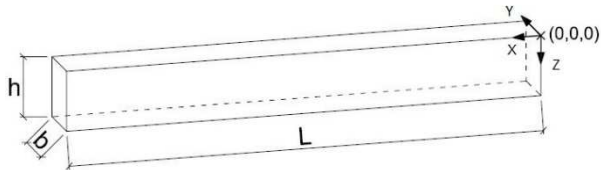
Gráfica tensión-deformación



# Viga LR-S-P-2

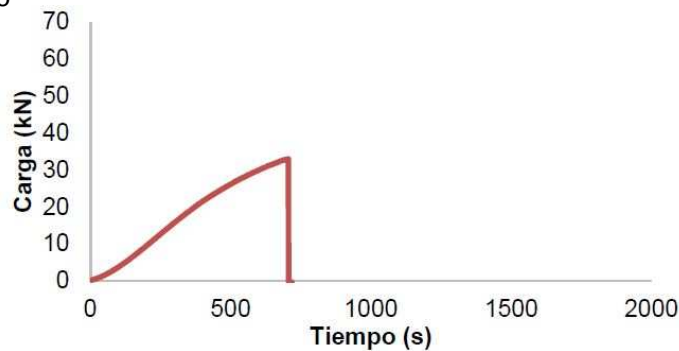


Datos de la viga	
Dimensiones hxbxL [mm]	145 x 75 x 1287
Peso [kg]	6,80
Densidad [kg/m³]	485,85
Catalogación según norma UNE 56545	Rechazo
Características del refuerzo	
Tipo	LR-S-P
Laminado	Sika CarboDur E-512
Tejido	-
Contenido vol. de fibra [%]	≥70
Datos del ensayo	
Fecha [dd/mm/aa]	18/11/15
Velocidad de carga [mm/min]	1,5
Velocidad de descarga [mm/min]	15
Carga máxima [kN]	33,02
MOR [N/mm²]	31,28
MOE [N/mm²]	11823,97
Flecha máxima [mm]	13,77
Modo de fallo [1-7]	6

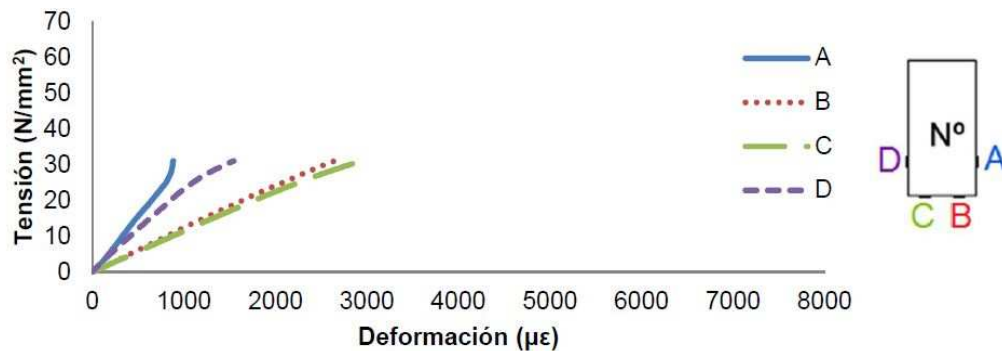


**Resultados mecánicos**

Gráfica carga-tiempo



Gráfica tensión-deformación



# Viga LR-S-P-3

## Inspección visual

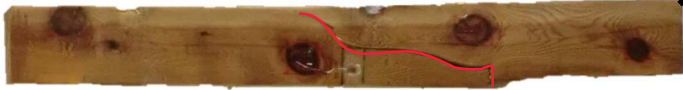
Cara derecha (galga A)



Cara superior



Cara izquierda (galga D)



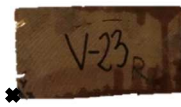
Cara inferior (galgas B y C)



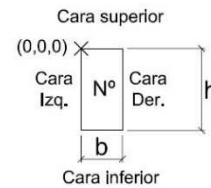
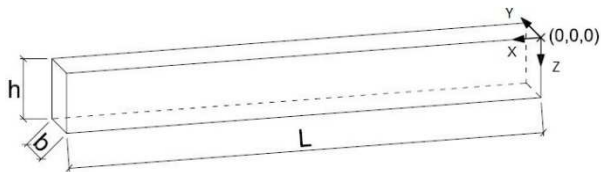
Testa trasera



Testa frontal

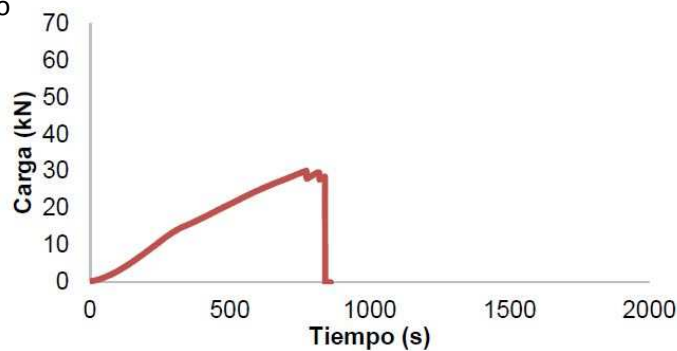


Datos de la viga	
Dimensiones hxbxL [mm]	146 x 76 x 1288
Peso [kg]	6,80
Densidad [kg/m³]	475,80
Catalogación según norma UNE 56545	Rechazo
Características del refuerzo	
Tipo	LR-S-P
Laminado	Sika Carbodur E-512
Tejido	-
Contenido vol. de fibra [%]	≥70
Datos del ensayo	
Fecha [dd/mm/aa]	30/10/15
Velocidad de carga [mm/min]	1,5
Velocidad de descarga [mm/min]	15
Carga máxima [kN]	30,16
MOR [N/mm²]	28,69
MOE [N/mm²]	8417,06
Flecha máxima [mm]	15,71
Modo de fallo [1-7]	6

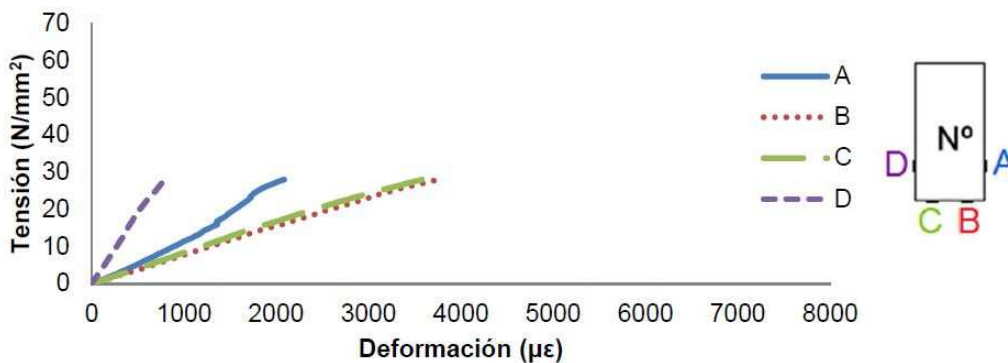


## Resultados mecánicos

Gráfica carga-tiempo



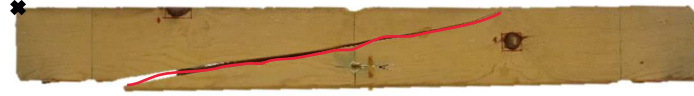
Gráfica tensión-deformación



# Viga LR-S-P-4

## Inspección visual

Cara derecha (galga A)



Cara superior



Cara izquierda (galga D)



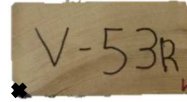
Cara inferior (galgas B y C)



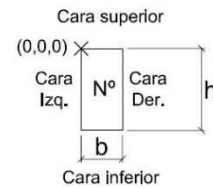
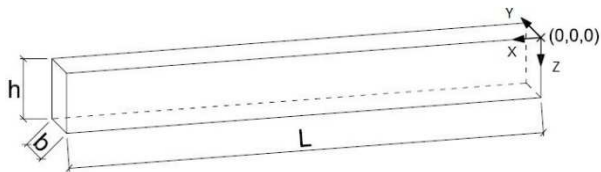
Testa trasera



Testa frontal

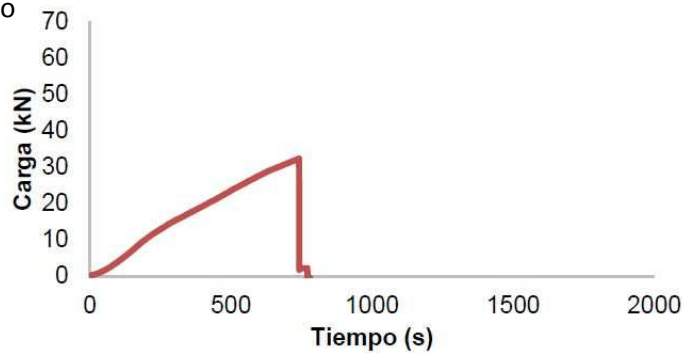


Datos de la viga	
Dimensiones hxbxL [mm]	145 x 75 x 1300
Peso [kg]	11,06
Densidad [kg/m³]	780,95
Catalogación según norma UNE 56545	Rechazo
Características del refuerzo	
Tipo	LR-S-P
Laminado	Sika CarboDur E-512
Tejido	-
Contenido vol. de fibra [%]	≥70
Datos del ensayo	
Fecha [dd/mm/aa]	27/01/16
Velocidad de carga [mm/min]	1,5
Velocidad de descarga [mm/min]	15
Carga máxima [kN]	32,33
MOR [N/mm²]	30,76
MOE [N/mm²]	14911,98
Flecha máxima [mm]	10,07
Modo de fallo [1-7]	6

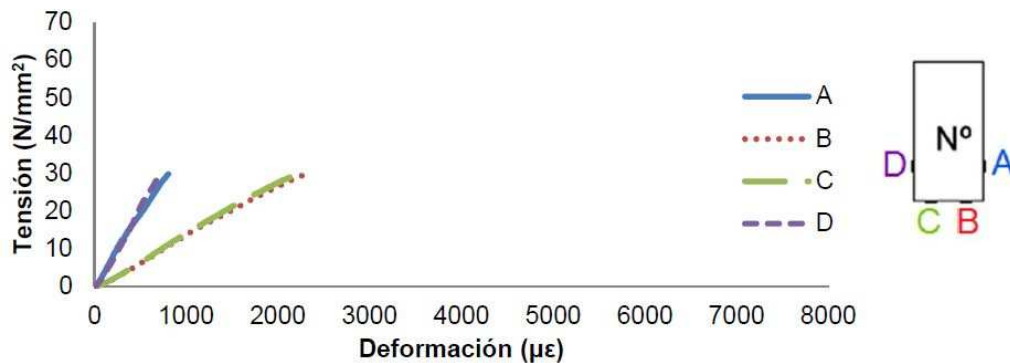


## Resultados mecánicos

Gráfica carga-tiempo



Gráfica tensión-deformación





# Viga LR-S-F-1

## Inspección visual

Cara derecha (galga A)



Cara superior



Cara izquierda (galga D)



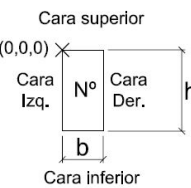
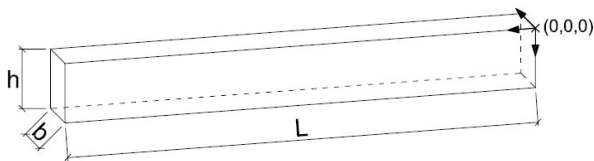
Cara inferior (galgas B y C)



Testa trasera



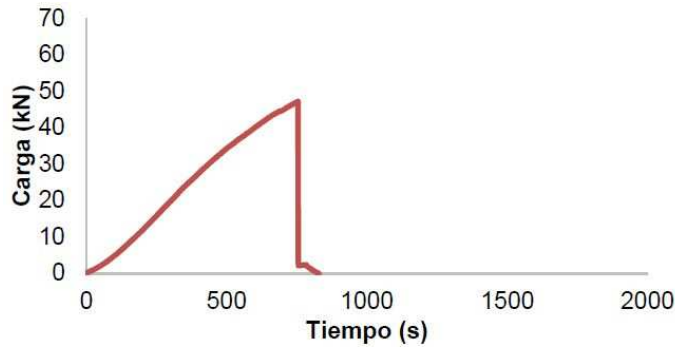
Testa frontal



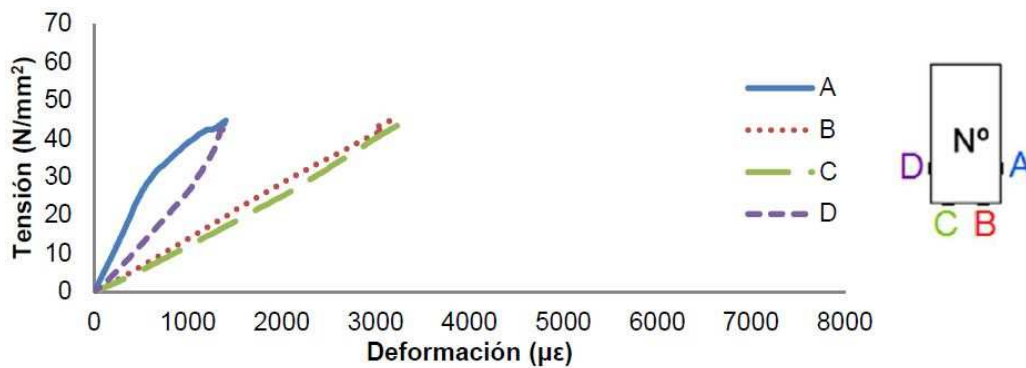
Datos de la viga	
Dimensiones hxbxL [mm]	146 x 76 x1287
Peso [kg]	8,40
Densidad [kg/m³]	588,21
Catalogación según norma UNE 56545	Rechazo
Características del refuerzo	
Tipo	LR-S-F
Laminado	Sika CarboDur E-812
Tejido	-
Contenido vol. de fibra [%]	≥70
Datos del ensayo	
Fecha [dd/mm/aa]	29/09/15
Velocidad de carga [mm/min]	1,5
Velocidad de descarga [mm/min]	15
Carga máxima [kN]	47,23
MOR [N/mm²]	44,93
MOE [N/mm²]	14016,97
Flecha máxima [mm]	14,46
Modo de fallo [1-7]	5

## Resultados mecánicos

Gráfica carga-tiempo



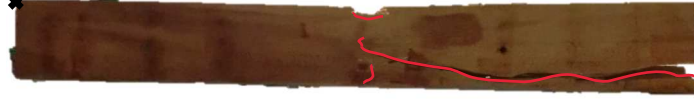
Gráfica tensión-deformación



# Viga LR-S-F-2

## Inspección visual

Cara derecha (galga A)



Cara superior



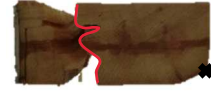
Cara izquierda (galga D)



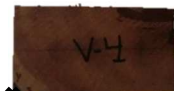
Cara inferior (galgas B y C)



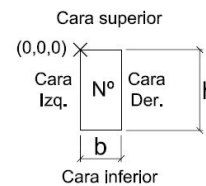
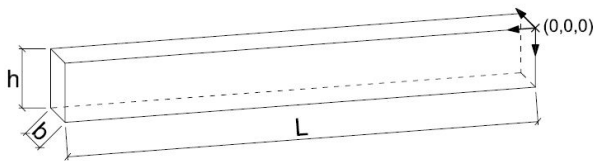
Testa trasera



Testa frontal

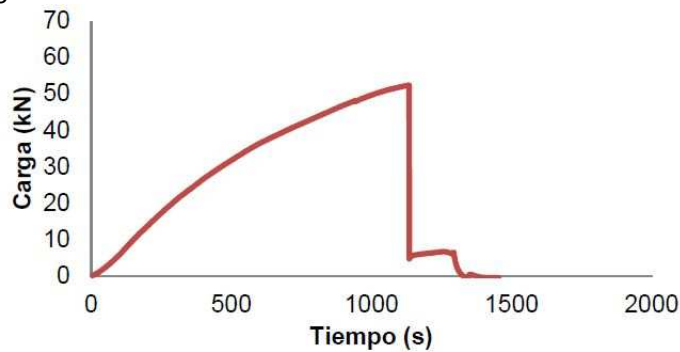


Datos de la viga	
Dimensiones hxbxL [mm]	146 x 76 x 1290
Peso [kg]	8,50
Densidad [kg/m³]	593,83
Catalogación según norma UNE 56545	MEG
Características del refuerzo	
Tipo	LR-S-F
Laminado	Sika CarboDur E-812
Tejido	-
Contenido vol. en fibra [%]	≥70
Datos del ensayo	
Fecha [dd/mm/aa]	02/10/15
Velocidad de carga [mm/min]	1,5
Velocidad de descarga [mm/min]	15
Carga máxima [kN]	52,52
MOR [N/mm²]	49,91
MOE [N/mm²]	16890,07
Flecha máxima [mm]	17,97
Modo de fallo [1-7]	5

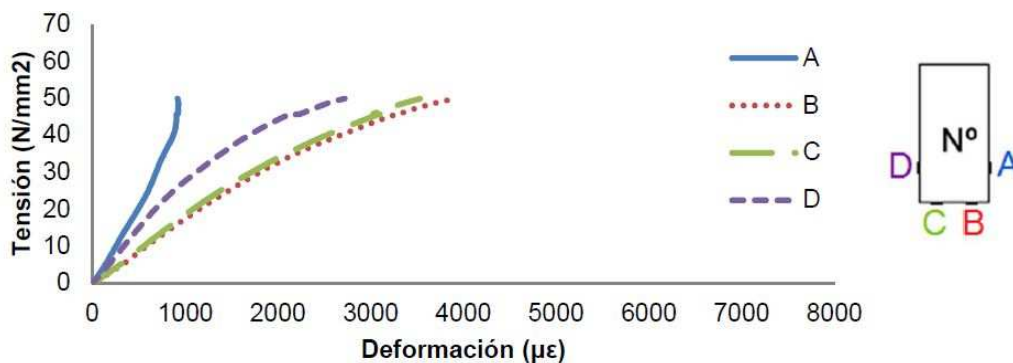


## Resultados mecánicos

Gráfica carga-tiempo



Gráfica tensión-deformación



# Viga LR-S-F-3

## Inspección visual

Cara derecha (galga A)



Cara superior



Cara izquierda (galga D)



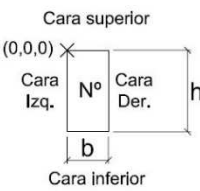
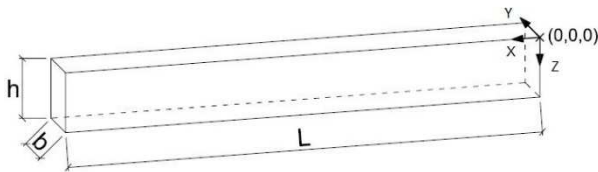
Cara inferior (galgas B y C)



Testa trasera



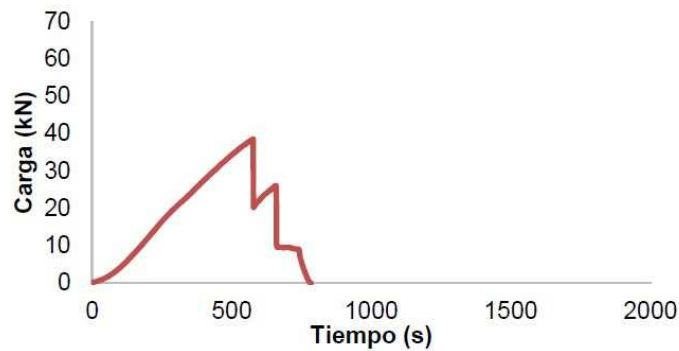
Testa frontal



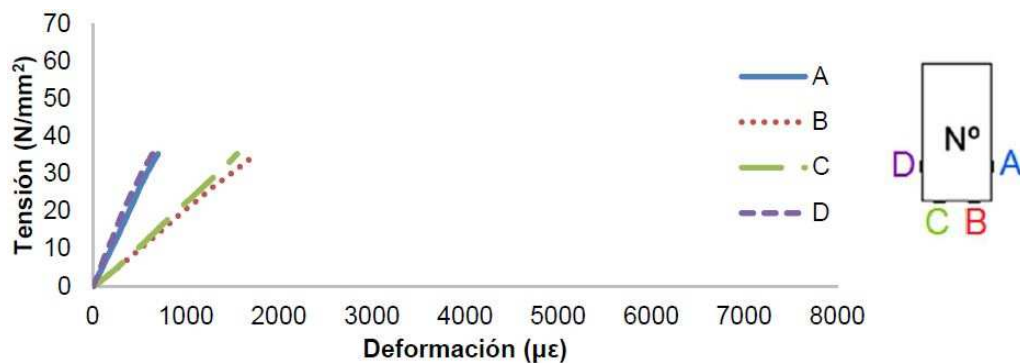
Datos de la viga	
Dimensiones hxbxL [mm]	146 x 77 x 1288
Peso [kg]	10,40
Densidad [kg/m³]	718,25
Catalogación según norma UNE 56545	Rechazo
Características del refuerzo	
Tipo	LR-S-F
Laminado	Sika CarboDur E-812
Tejido	-
Contenido vol. de fibra [%]	≥70
Datos del ensayo	
Fecha [dd/mm/aa]	25/01/16
Velocidad de carga [mm/min]	1,5
Velocidad de descarga [mm/min]	15
Carga máxima [kN]	38,60
MOR [N/mm²]	36,72
MOE [N/mm²]	22811,95
Flecha máxima [mm]	12,81
Modo de fallo [1-7]	6

## Resultados mecánicos

Gráfica carga-tiempo



Gráfica tensión-deformación





# Viga LR-D-P-1

## Inspección visual

Cara derecha (galga A)



Cara superior



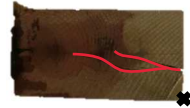
Cara izquierda (galga D)



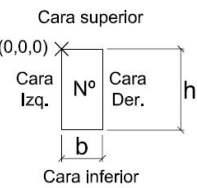
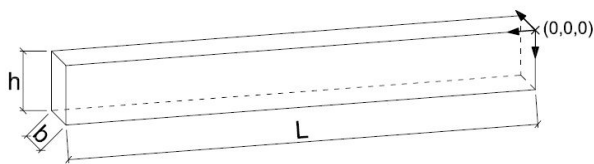
Cara inferior (galgas B y C)



Testa trasera



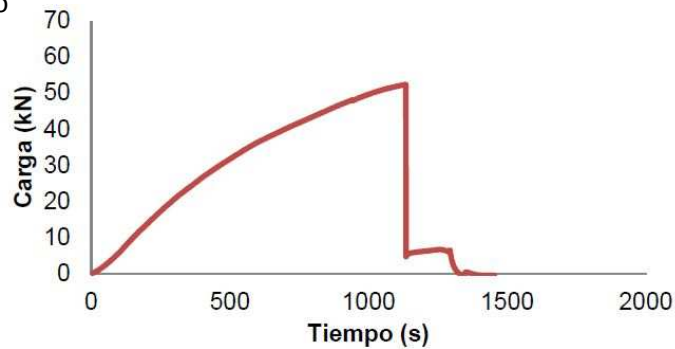
Testa frontal



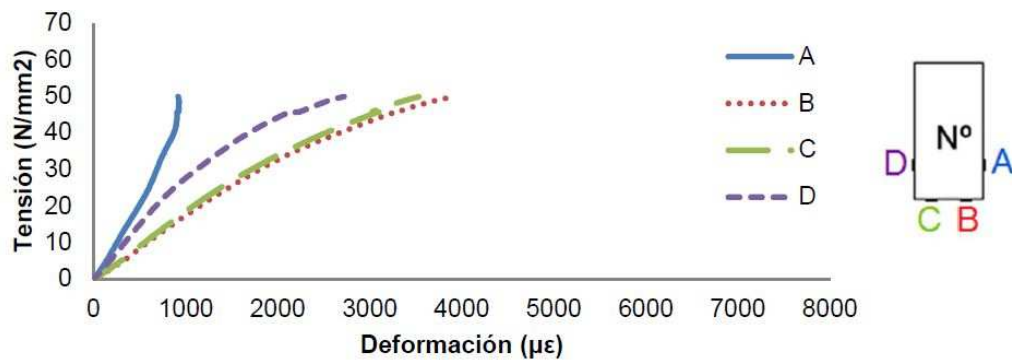
Datos de la viga	
Dimensiones hxbxL [mm]	145 x 76 x 1289
Peso [kg]	7,40
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	520,95
Catalogación según norma UNE 56545	MEG
Características del refuerzo	
Tipo	LR-D-P
Laminado	Drizoro Composite 1405
Tejido	-
Concentración vol. de fibra [%]	68
Datos del ensayo	
Fecha [dd/mm/aa]	19/10/15
Velocidad de carga [mm/min]	1,5
Velocidad de descarga [mm/min]	15
Carga máxima [kN]	34,63
MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	32,95
MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	14095,95
Flecha máxima [mm]	16,39
Modo de fallo [1-7]	5

## Resultados mecánicos

Gráfica carga-tiempo



Gráfica tensión-deformación



# Viga LR-D-P-2

## Inspección visual

Cara derecha (galga A)



Cara superior



Cara izquierda (galga D)



Cara inferior (galgas B y C)



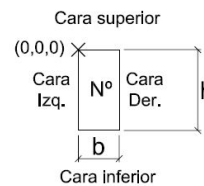
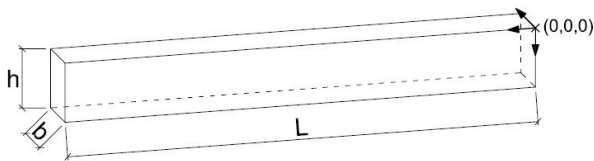
Testa trasera



Testa frontal

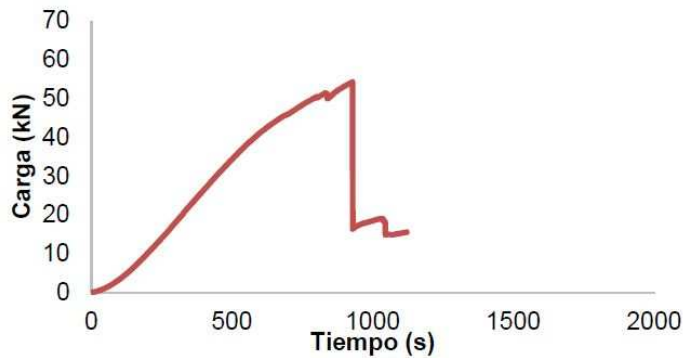


Datos de la viga	
Dimensiones hxbxL [mm]	145 x 74 x 1288
Peso [kg]	9,60
Densidad [kg/m³]	694,63
Catalogación según norma UNE 56545	Rechazo
Características del refuerzo	
Tipo	LR-D-P
Laminado	Drizoro Composite 1405
Tejido	-
Contenido vol. de fibra [%]	68
Datos del ensayo	
Fecha [dd/mm/aa]	20/10/15
Velocidad de carga [mm/min]	1,5
Velocidad de descarga [mm/min]	15
Carga máxima [kN]	54,32
MOR [N/mm²]	51,67
MOE [N/mm²]	12281,32
Flecha máxima [mm]	20,94
Modo de fallo [1-7]	6

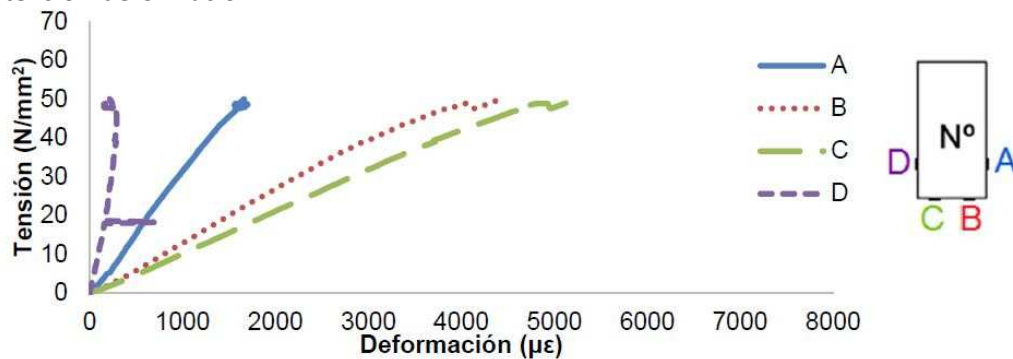


## Resultados mecánicos

Gráfica carga-tiempo



Gráfica tensión-deformación



# Viga LR-D-P-3

## Inspección visual

Cara derecha (galga A)



Cara superior



Cara izquierda (galga D)



Cara inferior (galgas B y C)



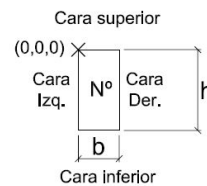
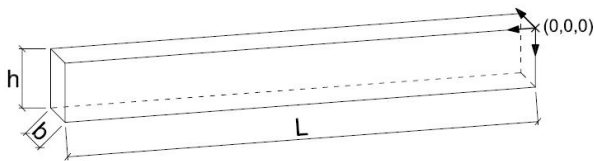
Testa trasera



Testa frontal

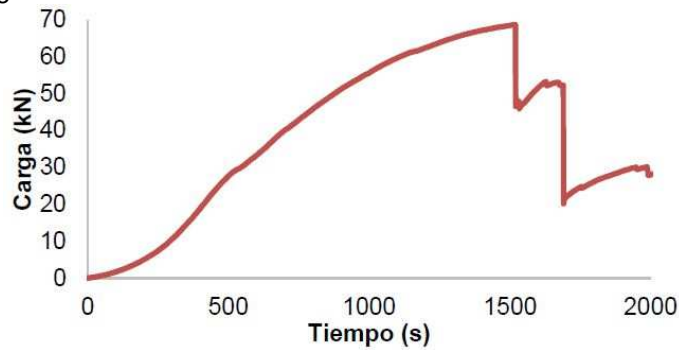


Datos de la viga	
Dimensiones hxbxL [mm]	75 x 145 x 1300
Peso [kg]	11,06
Densidad [kg/m³]	780,95
Catalogación según norma UNE 56545	MEG
Características del refuerzo	
Tipo	LR-D-P
Laminado	Drizoro Composite 1405
Tejido	-
Concentración vol. de fibra [%]	68
Datos del ensayo	
Fecha [dd/mm/aa]	08/06/16
Velocidad de carga [mm/min]	1,5
Velocidad de descarga [mm/min]	15
Carga máxima [kN]	68,71
MOR [N/mm²]	65,36
MOE [N/mm²]	24397,03
Flecha máxima [mm]	16,05
Modo de fallo [1-7]	5

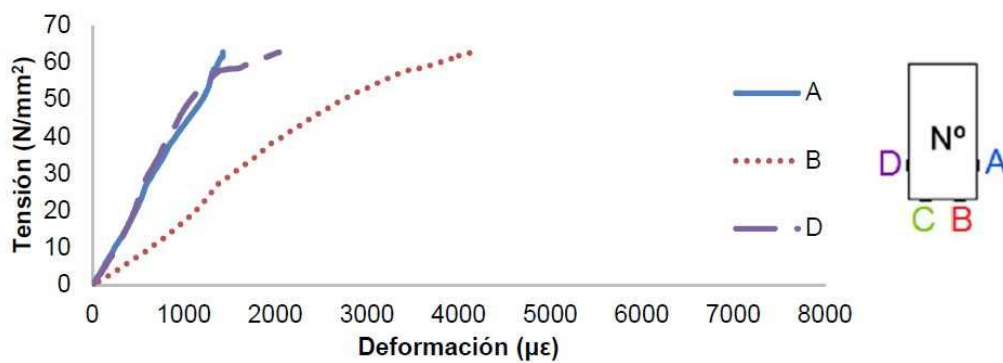


## Resultados mecánicos

Gráfica carga-tiempo



Gráfica tensión-deformación



# Viga LR-D-F-1

## Inspección visual

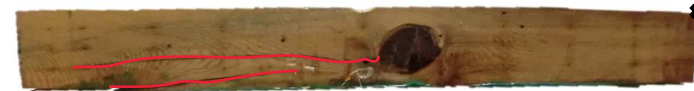
Cara derecha (galga A)



Cara superior



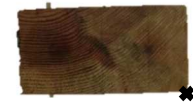
Cara izquierda (galga D)



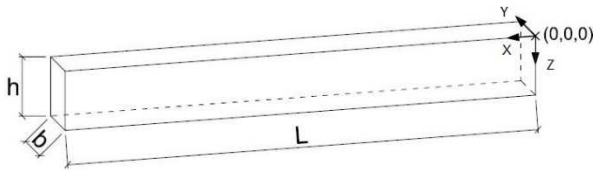
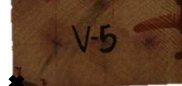
Cara inferior (galgas B y C)



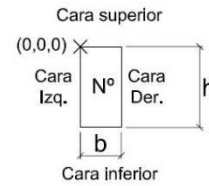
Testa trasera



Testa frontal

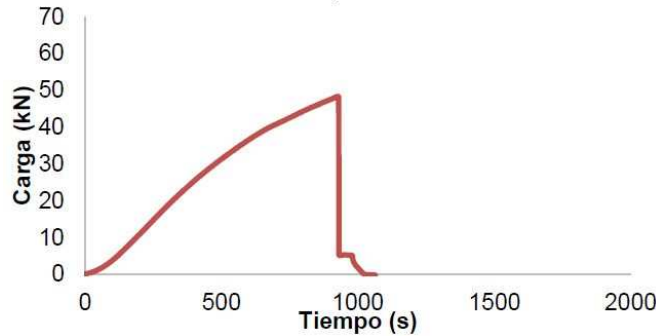


Datos de la viga	
Dimensiones hxbxL [mm]	146 x 76 x 1288
Peso [kg]	8,50
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	594,35
Catalogación según norma UNE 56545	MEG
Características del refuerzo	
Tipo	LR-D-F
Laminado	Drizoro Composite 1410
Tejido	-
Contenido vol. de fibra [%]	68
Datos del ensayo	
Fecha [dd/mm/aa]	20/10/15
Velocidad de carga [mm/min]	1,5
Velocidad de descarga [mm/min]	15
Carga máxima [kN]	48,41
MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	46,05
MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	13186,33
Flecha máxima [mm]	15,82
Modo de fallo [1-7]	6

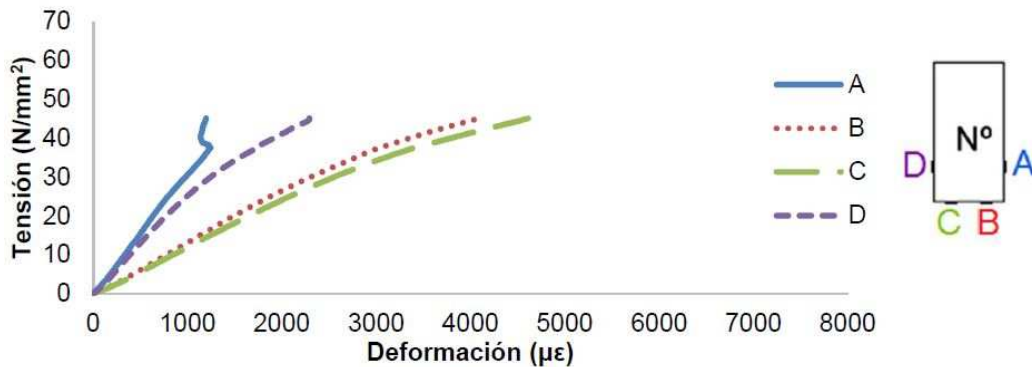


## Resultados mecánicos

Gráfica carga-tiempo



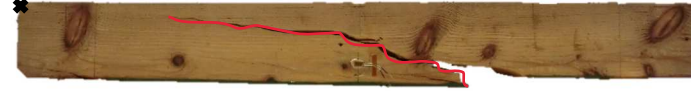
Gráfica tensión-deformación



# Viga LR-D-F-2

## Inspección visual

Cara derecha (galga A)



Cara superior



Cara izquierda (galga D)



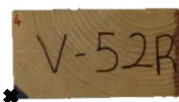
Cara inferior (galgas B y C)



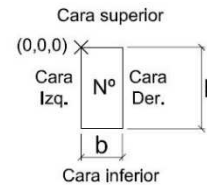
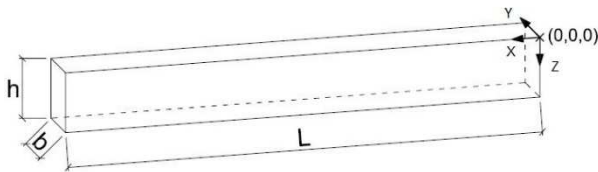
Testa trasera



Testa frontal

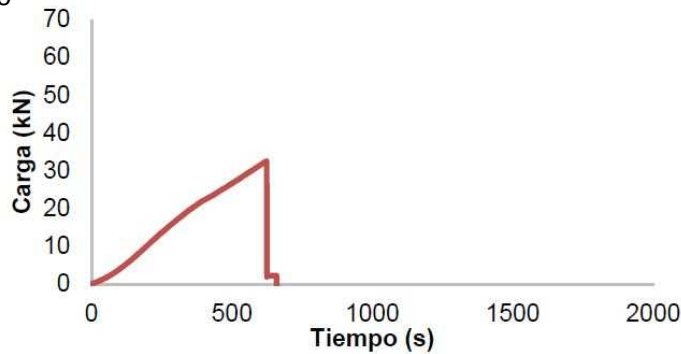


Datos de la viga	
Dimensiones hxbxL [mm]	145 x 75 x 1300
Peso [kg]	7,57
Densidad [kg/m³]	535,60
Catalogación según norma UNE 56545	Rechazo
Características del refuerzo	
Tipo	LR-D-F
Laminado	Drizoro Composite 1410
Tejido	-
Contenido vol. en fibra [%]	68
Datos del ensayo	
Fecha [dd/mm/aa]	27/01/16
Velocidad de carga [mm/min]	1,5
Velocidad de descarga [mm/min]	15
Carga máxima [kN]	32,65
MOR [N/mm²]	31,06
MOE [N/mm²]	15616,87
Flecha máxima [mm]	12,99
Modo de fallo [1-7]	6

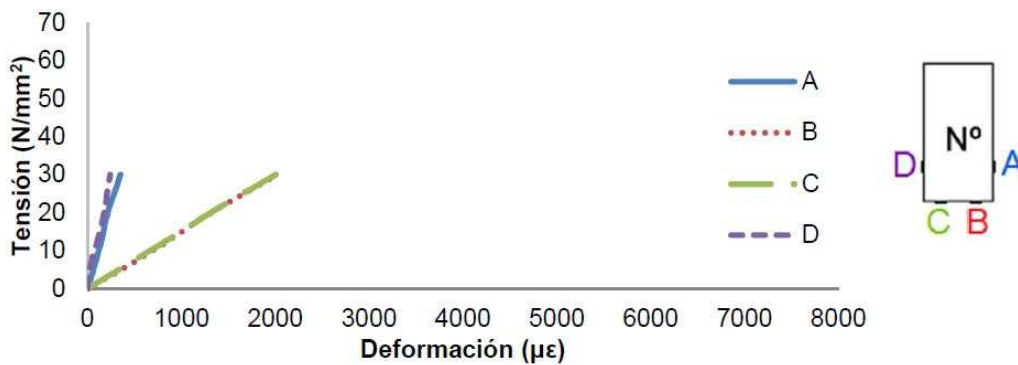


## Resultados mecánicos

Gráfica carga-tiempo



Gráfica tensión-deformación





# Viga LR-D-F-3

## Inspección visual

Cara derecha (galga A)



Cara superior



Cara izquierda (galga D)



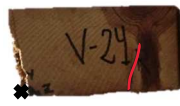
Cara inferior (galgas B y C)



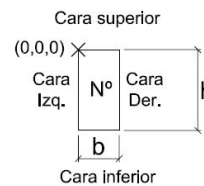
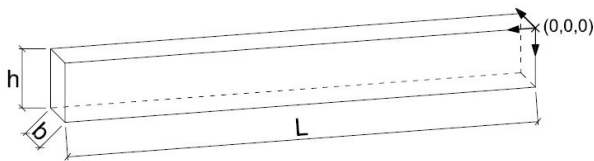
Testa trasera



Testa frontal

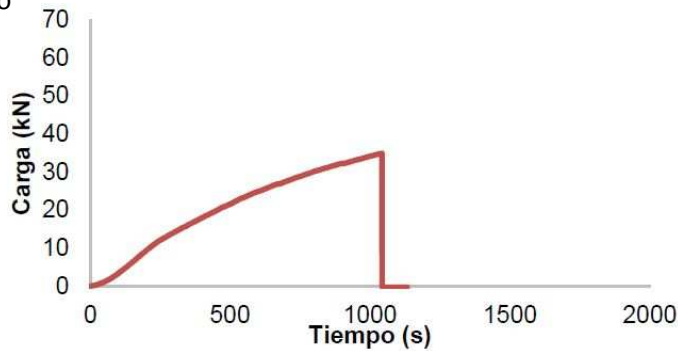


Datos de la viga	
Dimensiones hxbxL [mm]	145 x 74 x 1288
Peso [kg]	6,40
Densidad [kg/m³]	463,09
Catalogación según norma UNE 56545	MEG
Características del refuerzo	
Tipo	LR-D-F
Laminado	Drizoro Composite 1410
Tejido	-
Contenido vol. de fibra [%]	68
Datos del ensayo	
Fecha [dd/mm/aa]	27/10/15
Velocidad de carga [mm/min]	1,5
Velocidad de descarga [mm/min]	15
Carga máxima [kN]	34,99
MOR [N/mm²]	33,28
MOE [N/mm²]	14374,70
Flecha máxima [mm]	19,03
Modo de fallo [1-7]	6

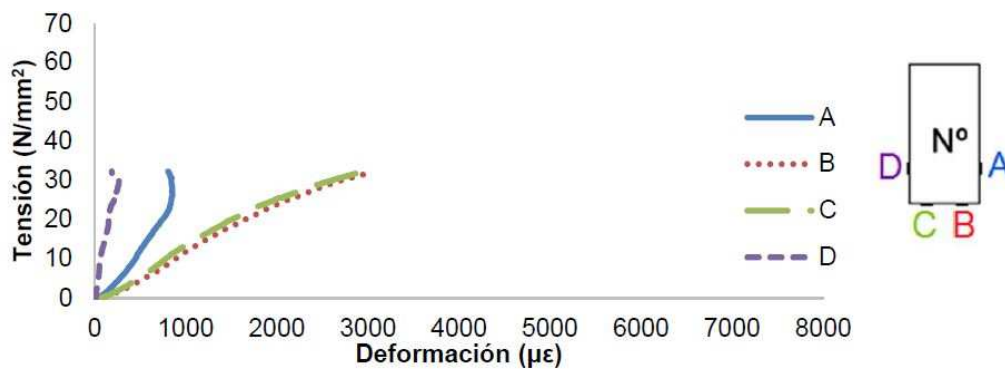


## Resultados mecánicos

Gráfica carga-tiempo



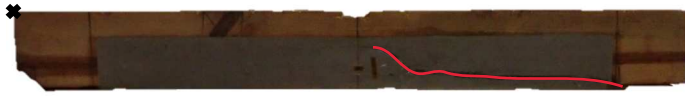
Gráfica tensión-deformación



# Viga WLR-S-1

## Inspección visual

Cara derecha (galga A)



Cara superior



Cara izquierda (galga D)



Cara inferior (galgas B y C)



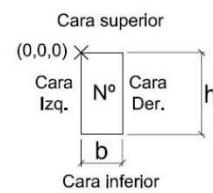
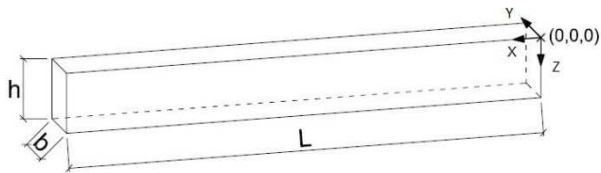
Testa trasera



Testa frontal

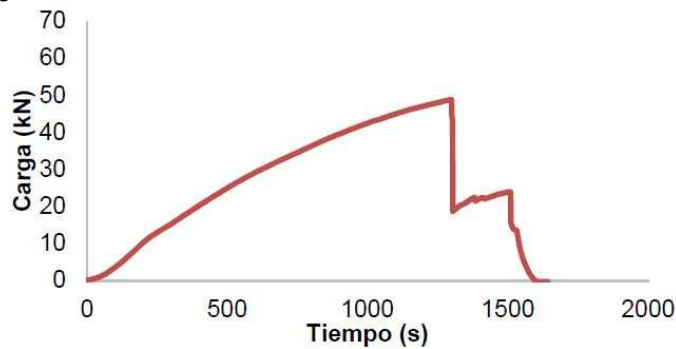


Datos de la viga	
Dimensiones hxbxL [mm]	145 x 75 x 1287
Peso [kg]	6,50
Densidad [kg/m³]	464,41
Catalogación según norma UNE 56545	Rechazo
Características del refuerzo	
Tipo	WLR-S
Laminado	Sika CarboDur E-512
Tejido	Sika Wrap 230-C
Gramaje [g/m²]	235 ± 10
Datos del ensayo	
Fecha [dd/mm/aa]	24/11/15
Velocidad de carga [mm/min]	1,5
Velocidad de descarga [mm/min]	15
Carga máxima [kN]	48,89
MOR [N/mm²]	46,51
MOE [N/mm²]	14867,82
Flecha máxima [mm]	29,95
Modo de fallo [1-7]	6

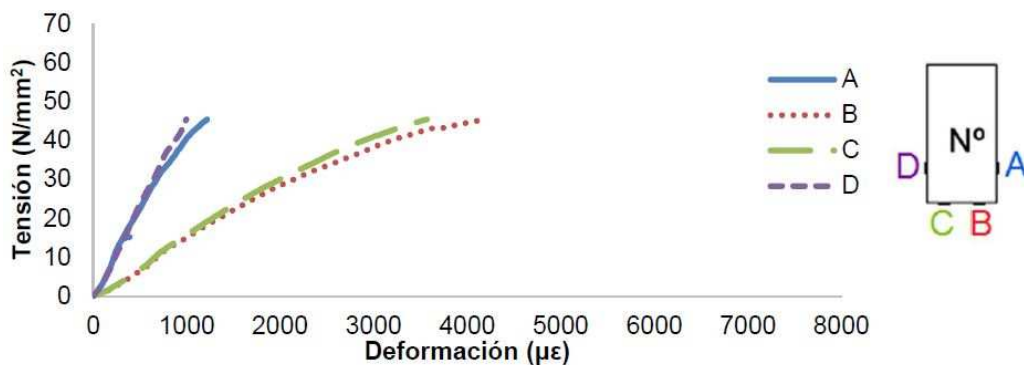


## Resultados mecánicos

Gráfica carga-tiempo



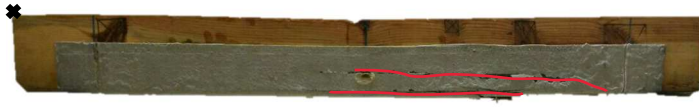
Gráfica tensión-deformación



# Viga WLR-S-2

## Inspección visual

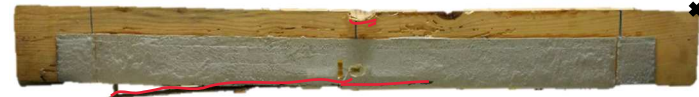
Cara derecha (galga A)



Cara superior



Cara izquierda (galga D)



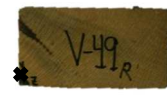
Cara inferior (galgas B y C)



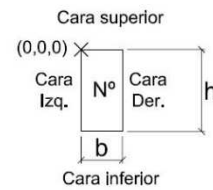
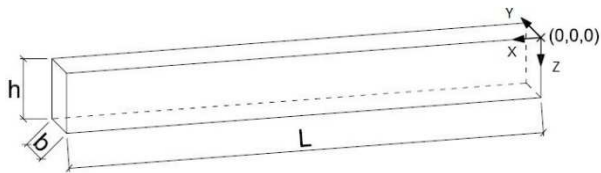
Testa trasera



Testa frontal

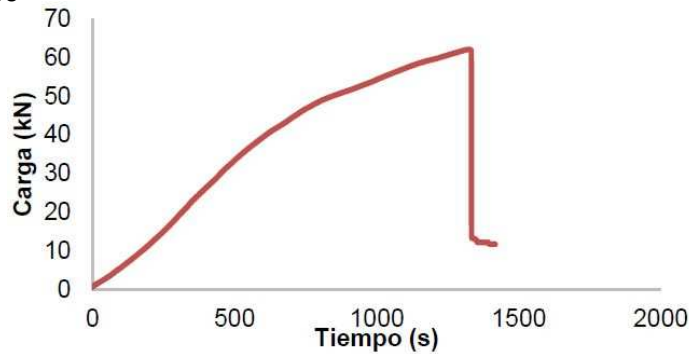


Datos de la viga	
Dimensiones hxbxL [mm]	145 x 75 x 1286
Peso [kg]	7,4
Densidad [kg/m³]	529,13
Catalogación según norma UNE 56545	Rechazo
Características del refuerzo	
Tipo	WLR-S
Laminado	Sika CarboDur E-512
Tejido	Sika Wrap 230-C
Gramaje [g/m²]	235 ± 10
Datos del ensayo	
Fecha [dd/mm/aa]	13/05/16
Velocidad de carga [mm/min]	1,5
Velocidad de descarga [mm/min]	15
Carga máxima [kN]	62,27
MOR [N/mm²]	59,23
MOE [N/mm²]	14215,19
Flecha máxima [mm]	16,69
Modo de fallo [1-7]	6

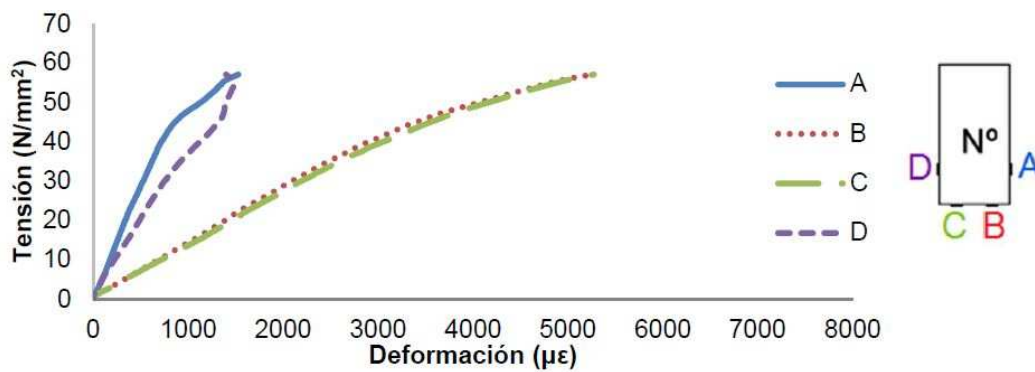


## Resultados mecánicos

Gráfica carga-tiempo



Gráfica tensión-deformación





# Viga WLR-S-3

## Inspección visual

Cara derecha (galga A)



Cara superior



Cara izquierda (galga D)



Cara inferior (galgas B y C)



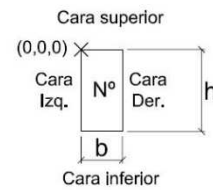
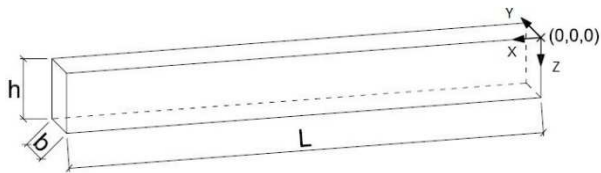
Testa trasera



Testa frontal

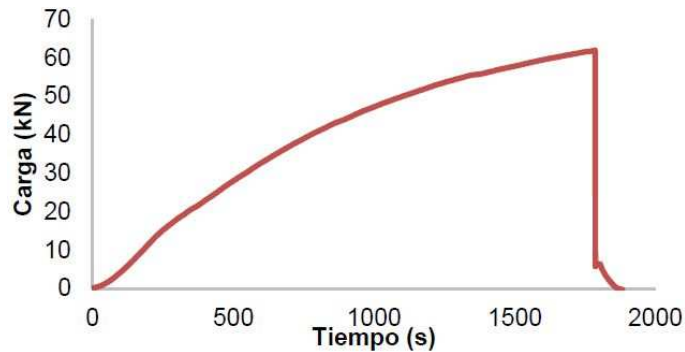


Datos de la viga	
Dimensiones hxbxL [mm]	145 x 74 x 1288
Peso [kg]	8,80
Densidad [kg/m³]	636,75
Catalogación según norma UNE 56545	MEG
Características del refuerzo	
Tipo	WLR-S
Laminado	Sika CarboDur E-512
Tejido	Sika Wrap 230-C
Gramaje [g/m²]	235 ± 10
Datos del ensayo	
Fecha [dd/mm/aa]	25/11/15
Velocidad de carga [mm/min]	1,5
Velocidad de descarga [mm/min]	15
Carga máxima [kN]	61,97
MOR [N/mm²]	58,95
MOE [N/mm²]	13044,72
Flecha máxima [mm]	30,46
Modo de fallo [1-7]	6

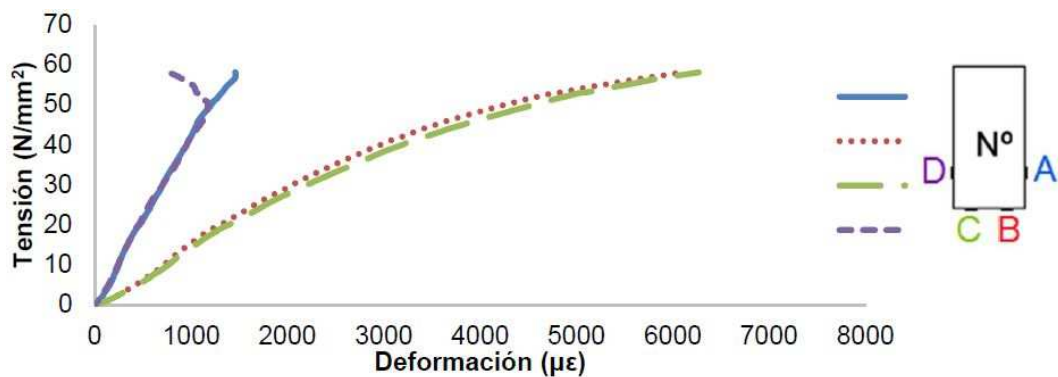


## Resultados mecánicos

Gráfica carga-tiempo



Gráfica tensión-deformación



# Viga WLR-D-U-1

## Inspección visual

Cara derecha (galga A)



Cara superior



Cara izquierda (galga D)



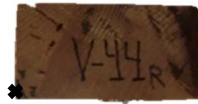
Cara inferior (galgas B y C)



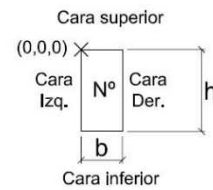
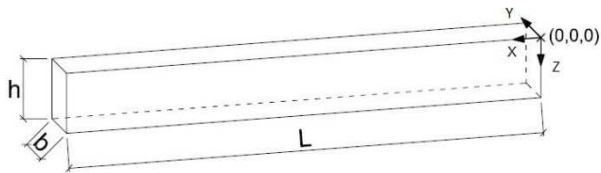
Testa trasera



Testa frontal

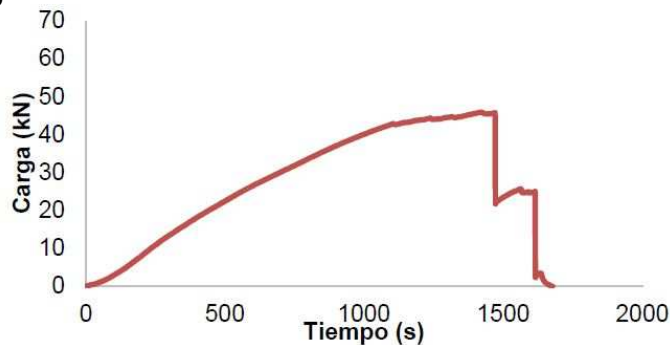


Datos de la viga	
Dimensiones hxbxL [mm]	145 x 75 x 1288
Peso [kg]	7,60
Densidad [kg/m³]	542,59
Catalogación según norma UNE 56545	Rechazo
Características del refuerzo	
Tipo	WLR-D-U
Laminado	Drizoro Composite 1405
Tejido	Drizoro Wrap 200
Gramaje [g/m²]	200 ± 5
Datos del ensayo	
Fecha [dd/mm/aa]	02/12/15
Velocidad de carga [mm/min]	1,5
Velocidad de descarga [mm/min]	15
Carga máxima [kN]	48,88
MOR [N/mm²]	43,64
MOE [N/mm²]	11783,48
Flecha máxima [mm]	27,78
Modo de fallo [1-7]	4

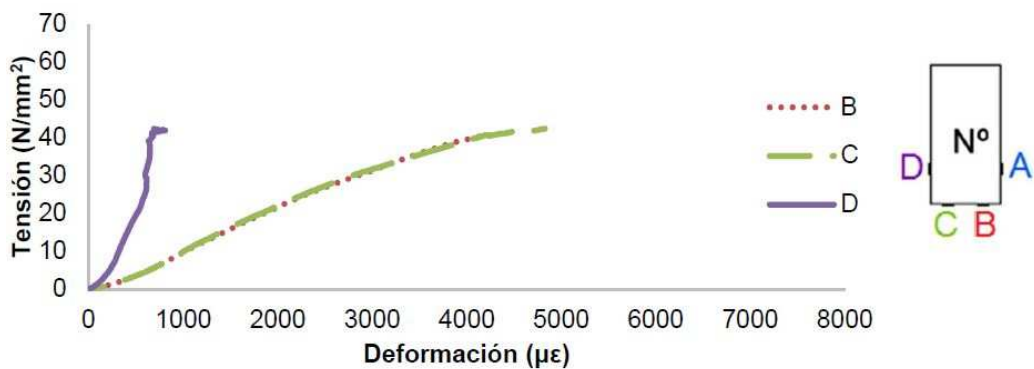


## Resultados mecánicos

Gráfica carga-tiempo



Gráfica tensión-deformación



# Viga WLR-D-U-1

## Inspección visual

Cara derecha (galga A)



Cara superior



Cara izquierda (galga D)



Cara inferior (galgas B y C)



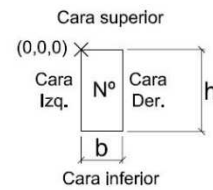
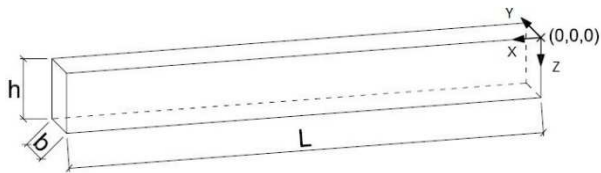
Testa trasera



Testa frontal

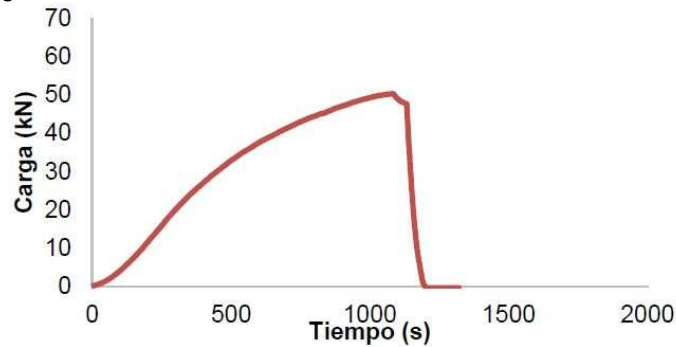


Datos de la viga	
Dimensiones hxbxL [mm]	146 x 75 x 1288
Peso [kg]	9,80
Densidad [kg/m³]	694,86
Catalogación según norma UNE 56545	Rechazo
Características del refuerzo	
Tipo	WLR-D-U
Laminado	Drizoro Composite 1405
Tejido	Drizoro Wrap 200
Gramaje [g/m²]	200 ± 5
Datos del ensayo	
Fecha [dd/mm/aa]	21/01/16
Velocidad de carga [mm/min]	1,5
Velocidad de descarga [mm/min]	15
Carga máxima [kN]	50,44
MOR [N/mm²]	47,98
MOE [N/mm²]	17715,23
Flecha máxima [mm]	22,15
Modo de fallo [1-7]	2

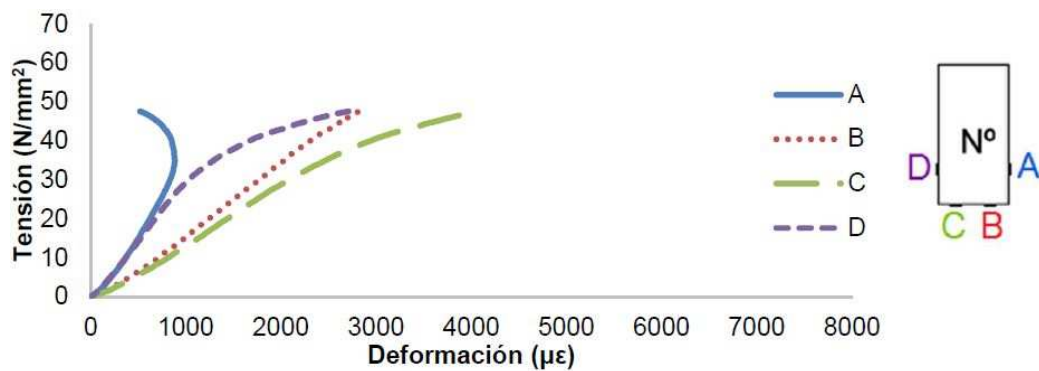


## Resultados mecánicos

Gráfica carga-tiempo



Gráfica tensión-deformación



# Viga WLR-D-U-3

## Inspección visual

Cara derecha (galga A)



Cara superior



Cara izquierda (galga D)



Cara inferior (galgas B y C)



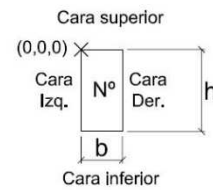
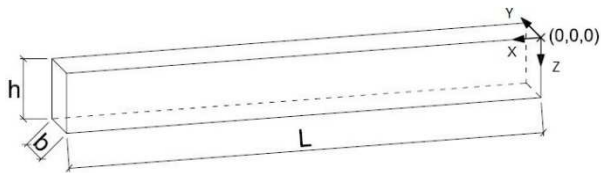
Testa trasera



Testa frontal

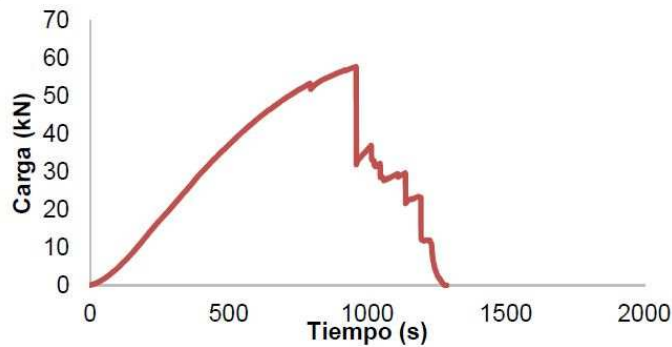


Datos de la viga	
Dimensiones hxbxL [mm]	145 x 75 x 1288
Peso [kg]	9,60
Densidad [kg/m³]	685,90
Catalogación según norma UNE 56545	MEG
Características del refuerzo	
Tipo	WLR-D-U
Laminado	Drizoro Composite 1405
Tejido	Drizoro Wrap 200
Gramaje [g/m²]	200 ± 5
Datos del ensayo	
Fecha [dd/mm/aa]	02/12/15
Velocidad de carga [mm/min]	1,5
Velocidad de descarga [mm/min]	15
Carga máxima [kN]	57,83
MOR [N/mm²]	55,01
MOE [N/mm²]	15939,62
Flecha máxima [mm]	18,02
Modo de fallo [1-7]	6

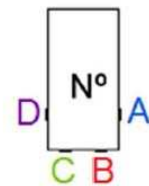
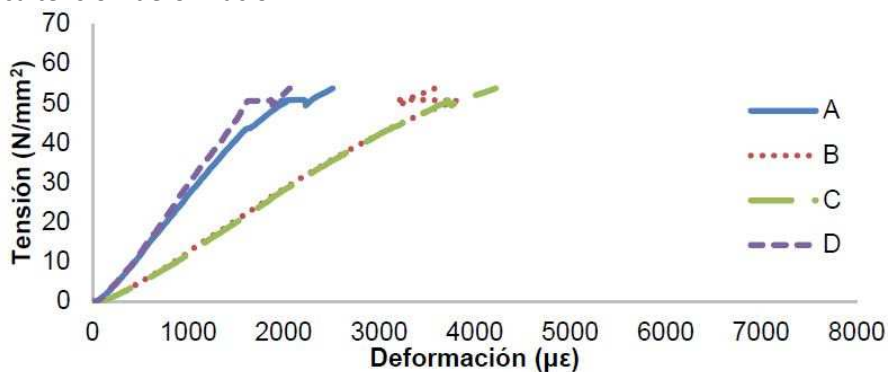


## Resultados mecánicos

Gráfica carga-tiempo

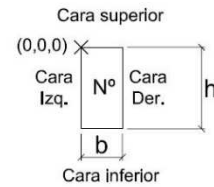
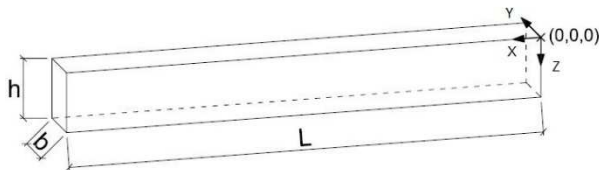


Gráfica tensión-deformación



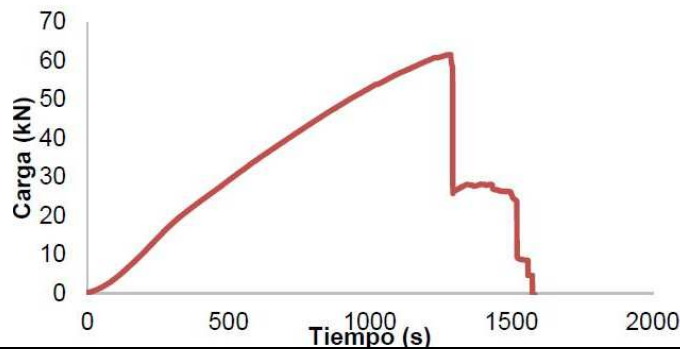
# Viga WLR-D-B-1

Inspección visual		Datos de la viga	
Cara derecha (galga A)		Dimensiones hxbxL [mm]	145 x 75 x 1287
Cara superior		Peso [kg]	7,30
Cara izquierda (galga D)		Densidad [kg/m³]	521,57
Cara inferior (galgas B y C)		Catalogación según norma UNE 56545	MEG
Testa trasera		Testa frontal	<b>Características del refuerzo</b>
		Tipo	WLR-D-B
		Laminado	Drizoro Composite 1405
		Tejido	Drizoro Carbomesh 210
		Gramaje [g/m²]	200 ± 5
		<b>Datos del ensayo</b>	
		Fecha [dd/mm/aa]	01/12/15
		Velocidad de carga [mm/min]	1,5
		Velocidad de descarga [mm/min]	15
		Carga máxima [kN]	61,69
		MOR [N/mm²]	58,68
		MOE [N/mm²]	12993,8
		Flecha máxima [mm]	22,84
		Modo de fallo [1-7]	6

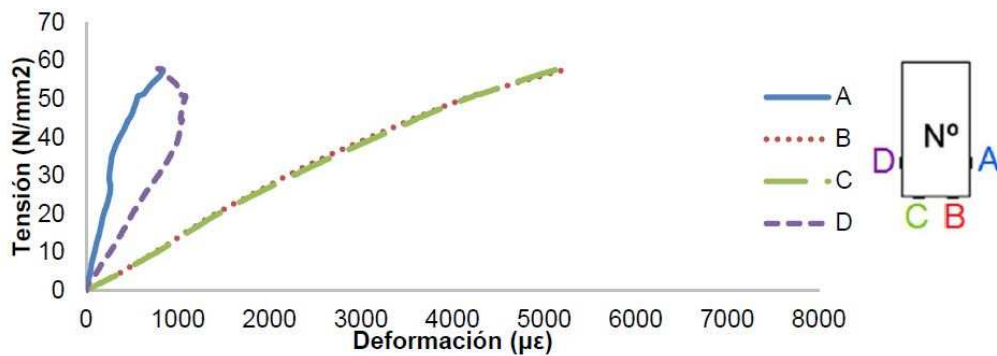


## Resultados mecánicos

Gráfica carga-tiempo



Gráfica tensión-deformación

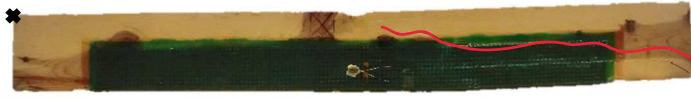




# Viga WLR-D-B-2

## Inspección visual

Cara derecha (galga A)



Cara superior



Cara izquierda (galga D)



Cara inferior (galgas B y C)



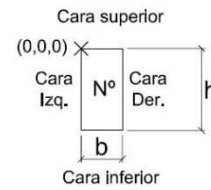
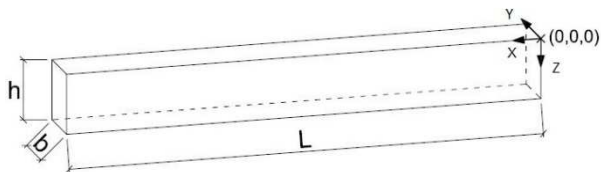
Testa trasera



Testa frontal

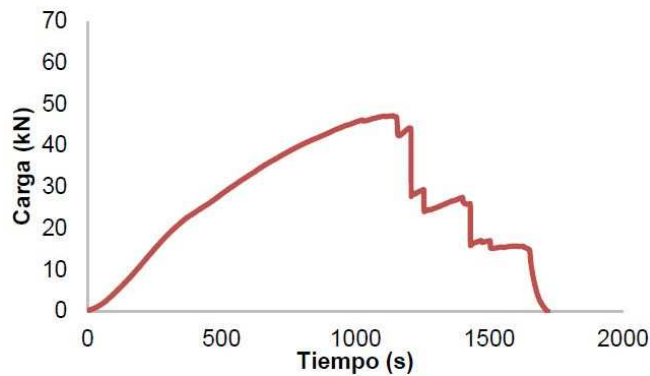


Datos de la viga	
Dimensiones hxbxL [mm]	145 x 75 x 1288
Peso [kg]	7,20
Densidad [kg/m³]	514,03
Catalogación según norma UNE 56545	MEG
Características del refuerzo	
Tipo	WLR-D-B
Laminado	Drizoro Composite 1405
Tejido	Drizoro Carbomesh 210
Gramaje [g/m²]	200 ± 5
Datos del ensayo	
Fecha [dd/mm/aa]	25/01/16
Velocidad de carga [mm/min]	1,5
Velocidad de descarga [mm/min]	15
Carga máxima [kN]	47,26
MOR [N/mm²]	44,96
MOE [N/mm²]	17746,36
Flecha máxima [mm]	20,69
Modo de fallo [1-7]	5

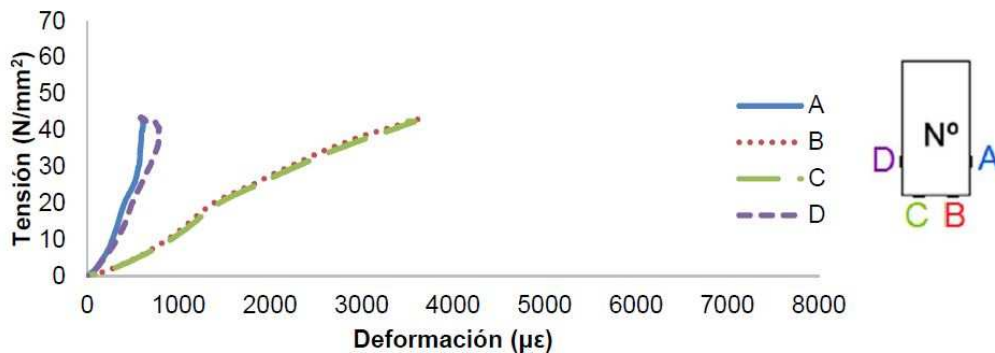


## Resultados mecánicos

Gráfica carga-tiempo



Gráfica tensión-deformación



# Viga WLR-D-B-3

## Inspección visual

Cara derecha (galga A)



Cara superior



Cara izquierda (galga D)



Cara inferior (galgas B y C)



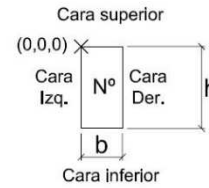
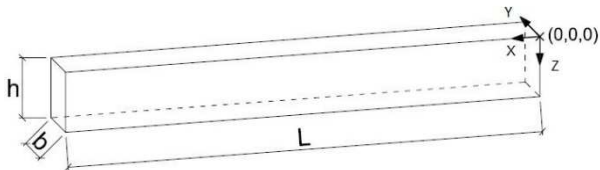
Testa trasera



Testa frontal

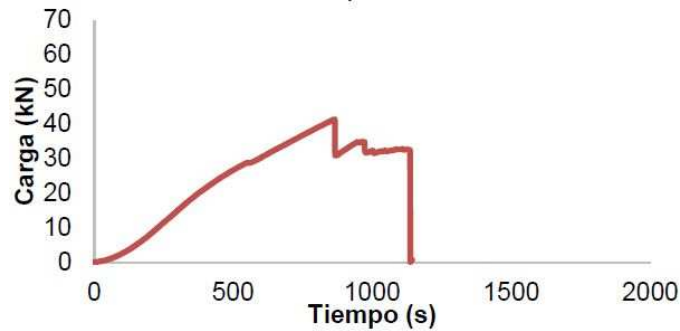


Datos de la viga	
Dimensiones hxbxL [mm]	144 x 74 x 1288
Peso [kg]	7,20
Densidad [kg/m³]	524,59
Catalogación según norma UNE 56545	Rechazo
Características del refuerzo	
Tipo	WLR-D-B
Laminado	Drizoro Composite 1405
Tejido	Drizoro Carbomesh 210
Gramaje [g/m²]	200 ± 5
Datos del ensayo	
Fecha [dd/mm/aa]	01/12/15
Velocidad de carga [mm/min]	1,5
Velocidad de descarga [mm/min]	15
Carga máxima [kN]	41,49
MOR [N/mm²]	39,47
MOE [N/mm²]	12888,52
Flecha máxima [mm]	15,30
Modo de fallo [1-7]	4

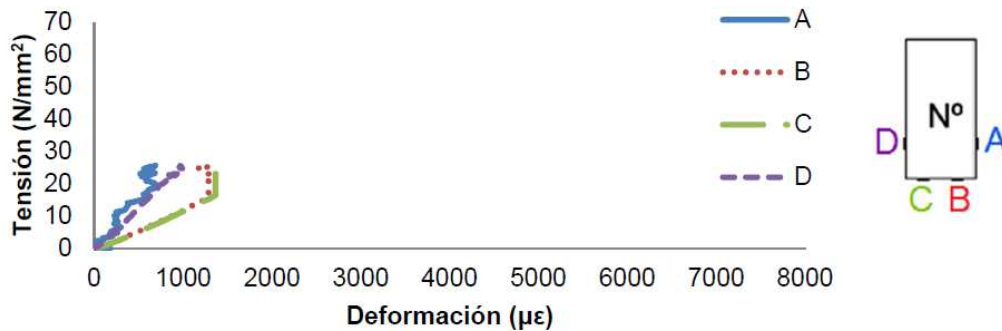


## Resultados mecánicos

Gráfica carga-tiempo



Gráfica tensión-deformación



# Viga WR-S-1

## Inspección visual

Cara derecha (galga A)



Cara superior



Cara izquierda (galga D)



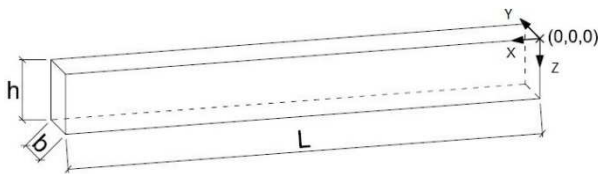
Cara inferior (galgas B y C)



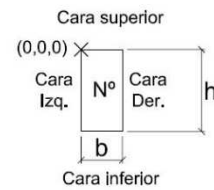
Testa trasera



Testa frontal

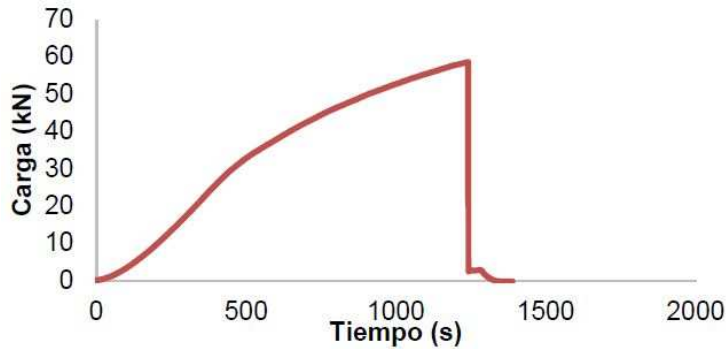


Datos de la viga	
Dimensiones hxbxL [mm]	146 x 75 x 1289
Peso [kg]	7,60
Densidad [kg/m³]	538,45
Catalogación según norma UNE 56545	MEG
Características del refuerzo	
Tipo	WR-S
Laminado	-
Tejido	Sika Wrap 230 C
Gramaje [g/m²]	235 ± 10
Datos del ensayo	
Fecha [dd/mm/aa]	26/10/15
Velocidad de carga [mm/min]	1,5
Velocidad de descarga [mm/min]	15
Carga máxima [kN]	58,59
MOR [N/mm²]	55,73
MOE [N/mm²]	10351,21
Flecha máxima [mm]	25,83
Modo de fallo [1-7]	6

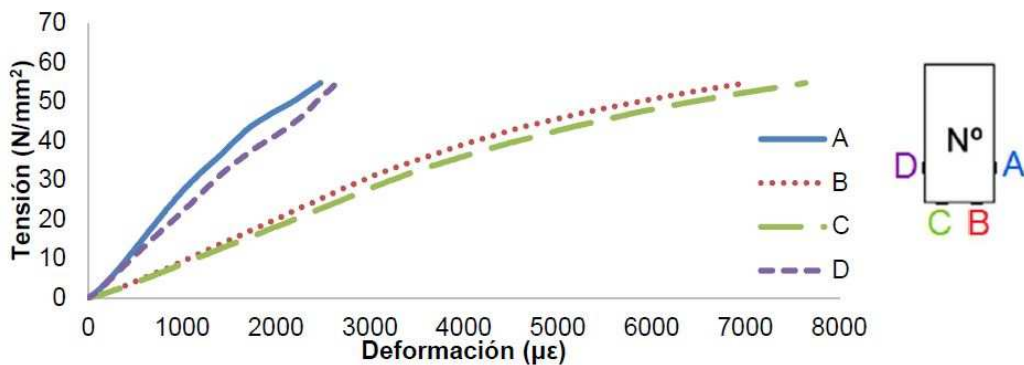


## Resultados mecánicos

Gráfica carga-tiempo



Gráfica tensión-deformación





# Viga WR-S-2

## Inspección visual

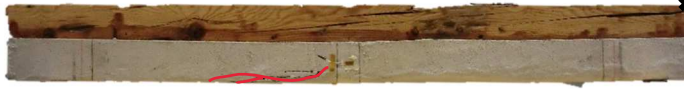
Cara derecha (galga A)



Cara superior



Cara izquierda (galga D)



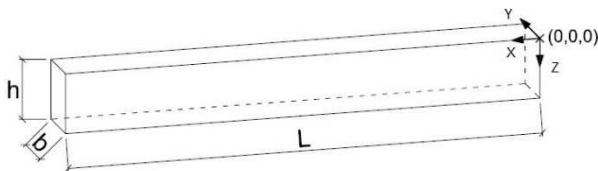
Cara inferior (galgas B y C)



Testa trasera

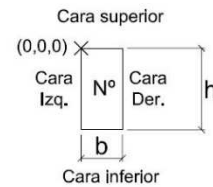


Testa frontal



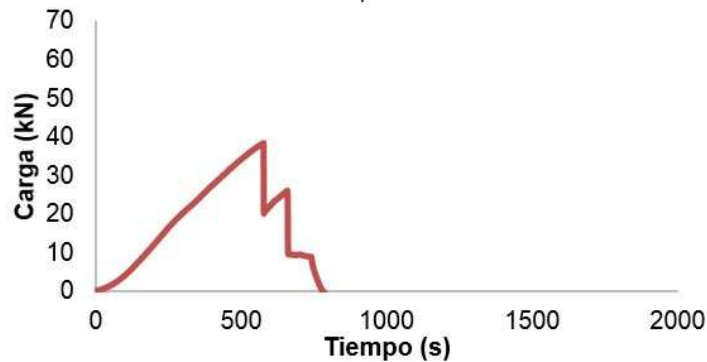
## Datos de la viga

Dimensiones hxbxL [mm]	144 x 76 x 1287
Peso [kg]	7,70
Densidad [kg/m³]	546,68
Catalogación según norma UNE 56545	Rechazo
Características del refuerzo	
Tipo	WR-S
Laminado	-
Tejido	Sika Wrap 230 C
Gramaje [g/m²]	235 ± 10
Datos del ensayo	
Fecha [dd/mm/aa]	25/01/16
Velocidad de carga [mm/min]	1,5
Velocidad de descarga [mm/min]	15
Carga máxima [kN]	38,40
MOR [N/mm²]	36,53
MOE [N/mm²]	11525,73
Flecha máxima [mm]	26,50
Modo de fallo [1-7]	6

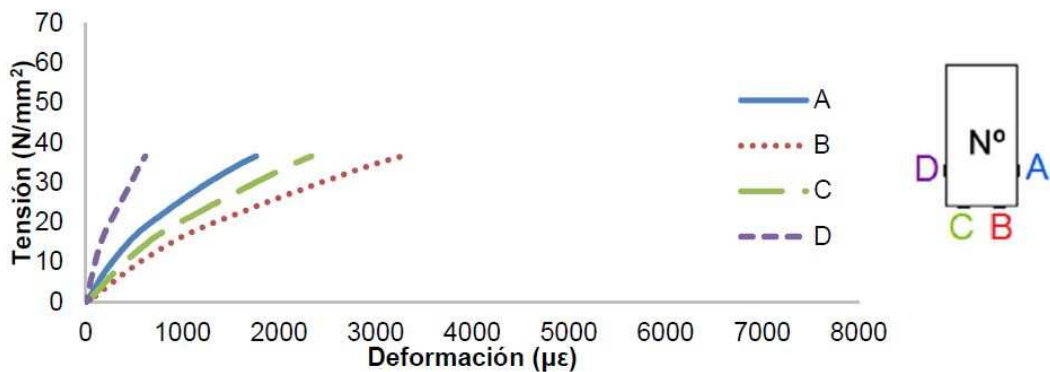


## Resultados mecánicos

Gráfica carga-tiempo



Gráfica tensión-deformación



# Viga WR-S-3

## Inspección visual

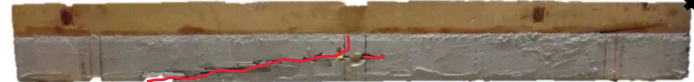
Cara derecha (galga A)



Cara superior



Cara izquierda (galga D)



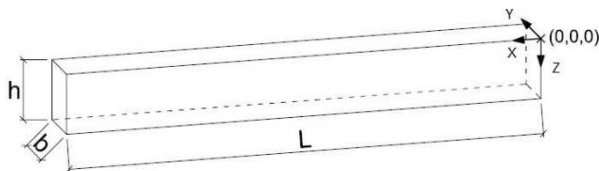
Cara inferior (galgas B y C)



Testa trasera

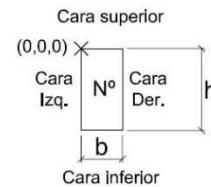


Testa frontal



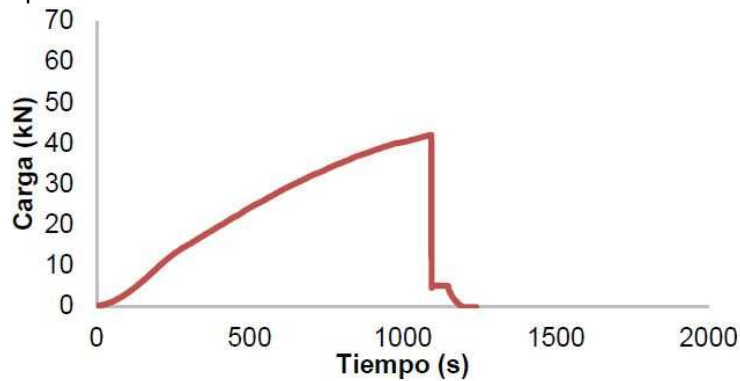
## Datos de la viga

Dimensiones hxbxL [mm]	146 x 75 x 1288
Peso [kg]	6,70
Densidad [kg/m³]	475,06
Catalogación según norma UNE 56545	Rechazo
Características del refuerzo	
Tipo	WR-S
Laminado	-
Tejido	Sika Wrap 230 C
Gramaje [g/m²]	235 ± 10
Datos del ensayo	
Fecha [dd/mm/aa]	26/10/15
Velocidad de carga [mm/min]	1,5
Velocidad de descarga [mm/min]	15
Carga máxima [kN]	42,04
MOR [N/mm²]	36,99
MOE [N/mm²]	11474,00
Flecha máxima [mm]	19,02
Modo de fallo [1-7]	6

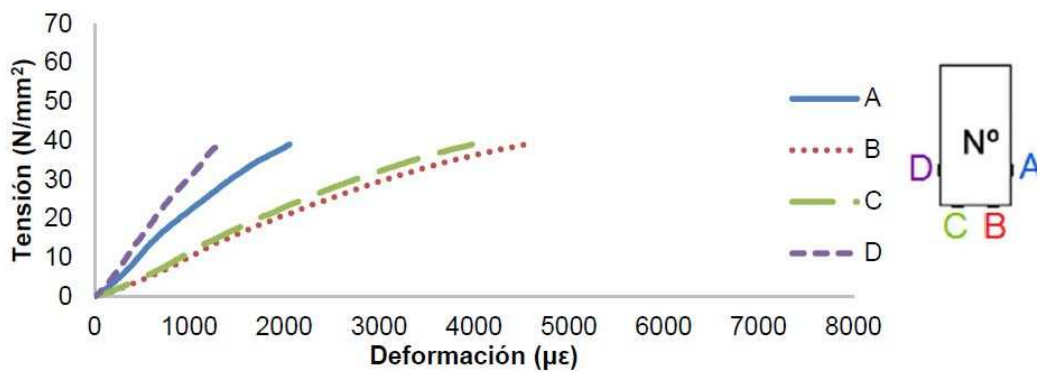


## Resultados mecánicos

Gráfica carga-tiempo



Gráfica tensión-deformación



# Viga WR-D-U-1

## Inspección visual

Cara derecha (galga A)



Cara superior



Cara izquierda (galga D)



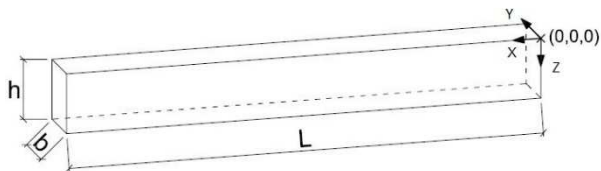
Cara inferior (galgas B y C)



Testa trasera

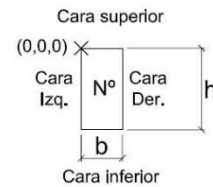


Testa frontal



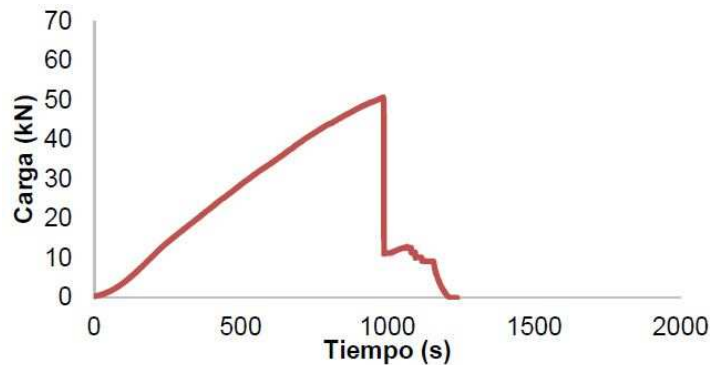
## Datos de la viga

Dimensiones hxbxL [mm]	146 x 75 x 1289
Peso [kg]	7,80
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	552,62
Catalogación según norma UNE 56545	MEG
Características del refuerzo	
Tipo	WR-D-U
Laminado	-
Tejido	Drizoro Wrap 200
Gramaje [g/m <sup>2</sup> ]	200 ± 5
Datos del ensayo	
Fecha [dd/mm/aa]	27/10/15
Velocidad de carga [mm/min]	1,5
Velocidad de descarga [mm/min]	15
Carga máxima [kN]	50,73
MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	48,25
MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	10373,60
Flecha máxima [mm]	27,78
Modo de fallo [1-7]	6

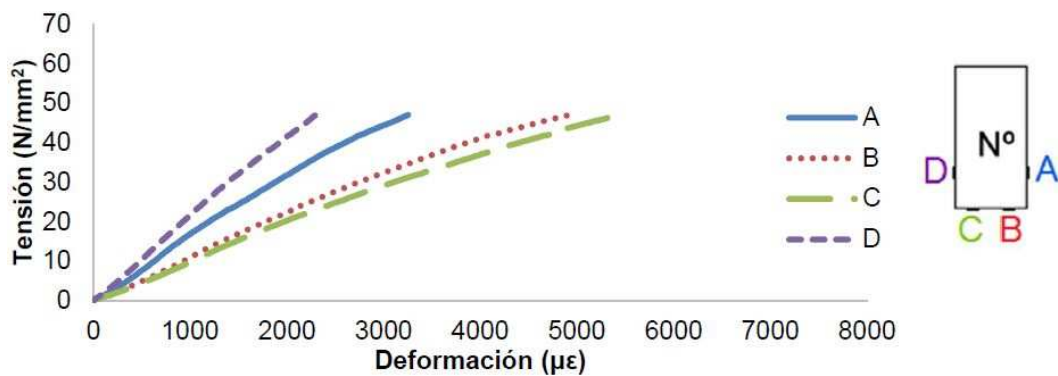


## Resultados mecánicos

Gráfica carga-tiempo



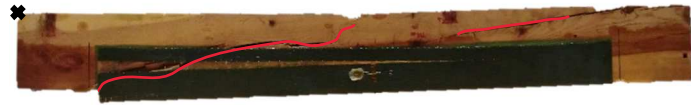
Gráfica tensión-deformación



# Viga WR-D-U-2

## Inspección visual

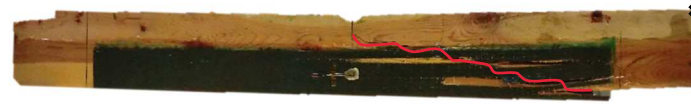
Cara derecha (galga A)



Cara superior



Cara izquierda (galga D)



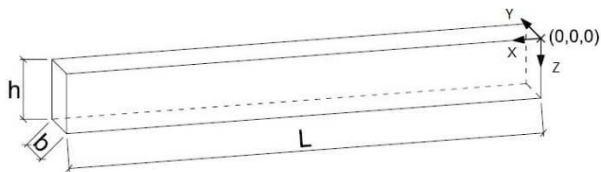
Cara inferior (galgas B y C)



Testa trasera

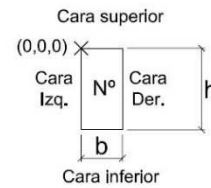


Testa frontal



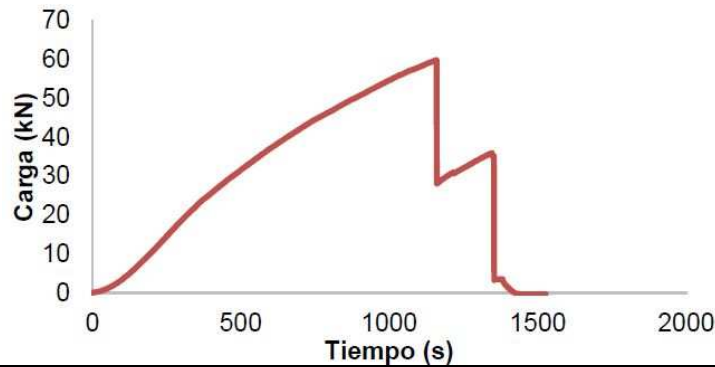
## Datos de la viga

Dimensiones hxbxL [mm]	145 x 75 x 1289
Peso [kg]	8,50
Densidad [kg/m³]	606,37
Catalogación según norma UNE 56545	Rechazo
Características del refuerzo	
Tipo	WR-D-U
Laminado	-
Tejido	Drizoro Wrap 200
Gramaje [g/m²]	200 ± 5
Datos del ensayo	
Fecha [dd/mm/aa]	20/01/16
Velocidad de carga [mm/min]	1,5
Velocidad de descarga [mm/min]	15
Carga máxima [kN]	59,88
MOR [N/mm²]	56,97
MOE [N/mm²]	13294,00
Flecha máxima [mm]	21,06
Modo de fallo [1-7]	6

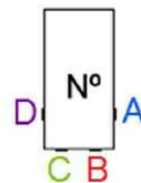
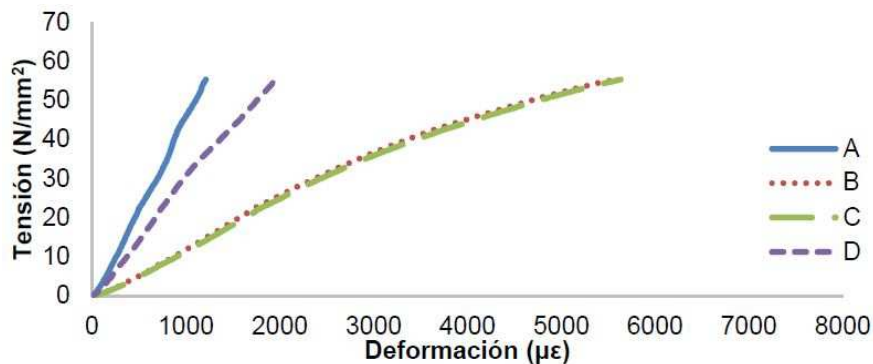


## Resultados mecánicos

Gráfica carga-tiempo



Gráfica tensión-deformación



# Viga WR-D-U-3

## Inspección visual

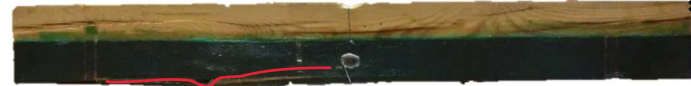
Cara derecha (galga A)



Cara superior



Cara izquierda (galga D)



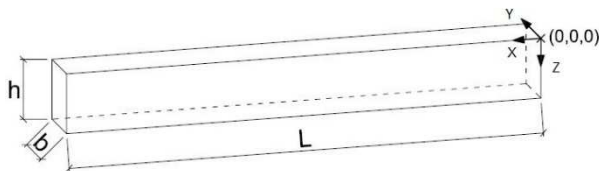
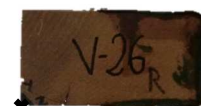
Cara inferior (galgas B y C)



Testa trasera

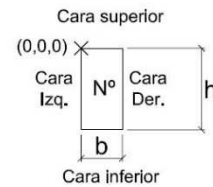


Testa frontal



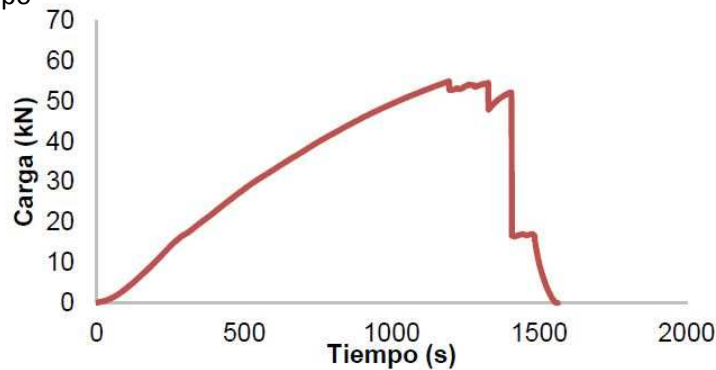
## Datos de la viga

Dimensiones hxbxL [mm]	146 x 76 x 1287
Peso [kg]	7,70
Densidad [kg/m³]	539,19
Catalogación según norma UNE 56545	Rechazo
Características del refuerzo	
Tipo	WR-D-U
Laminado	-
Tejido	Drizoro Wrap 200
Gramaje [g/m²]	200 ± 5
Datos del ensayo	
Fecha [dd/mm/aa]	17/11/15
Velocidad de carga [mm/min]	1,5
Velocidad de descarga [mm/min]	15
Carga máxima [kN]	55,04
MOR [N/mm²]	52,36
MOE [N/mm²]	13482,09
Flecha máxima [mm]	21,11
Modo de fallo [1-7]	6

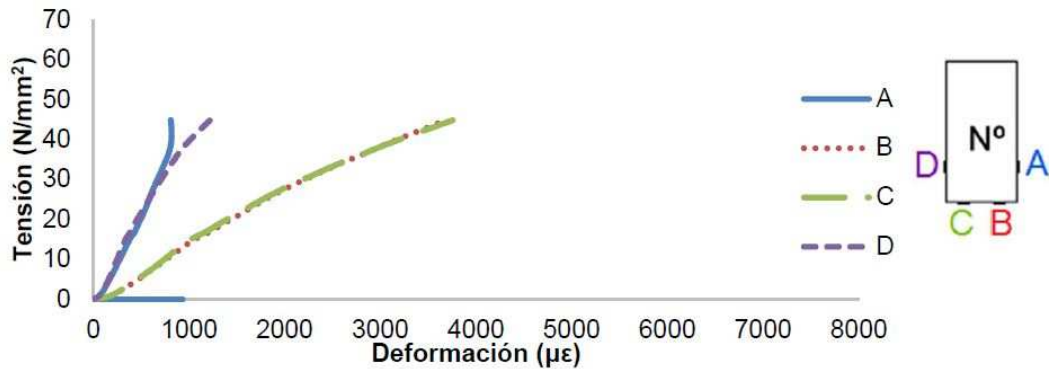


## Resultados mecánicos

Gráfica carga-tiempo



Gráfica tensión-deformación





# Viga WR-D-B-1

## Inspección visual

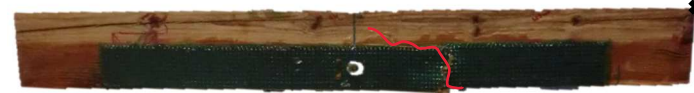
Cara derecha (galga A)



Cara superior



Cara izquierda (galga D)



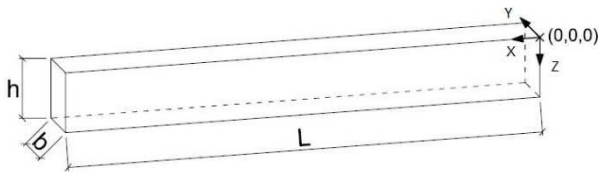
Cara inferior (galgas B y C)



Testa trasera

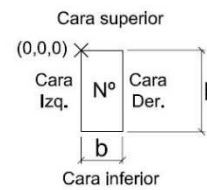


Testa frontal



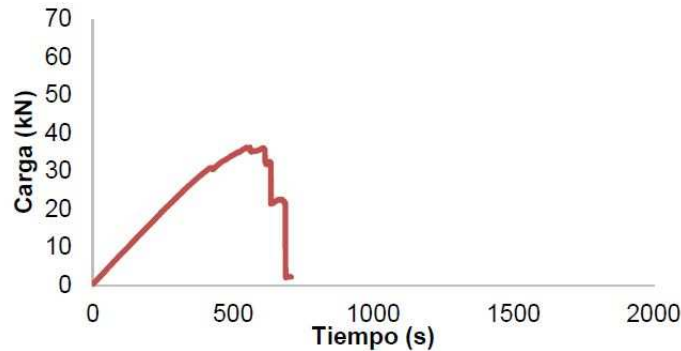
## Datos de la viga

Dimensiones hxbxL [mm]	146 x 76 x 1289
Peso [kg]	9,60
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	671,20
Catalogación según norma UNE 56545	MEG
Características del refuerzo	
Tipo	WR-D-B
Laminado	-
Tejido	Drizoro Carbomesh 210
Gramaje [g/m <sup>2</sup> ]	210 ± 5
Datos del ensayo	
Fecha [dd/mm/aa]	17/11/15
Velocidad de carga [mm/min]	1,5
Velocidad de descarga [mm/min]	15
Carga máxima [kN]	36,32
MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	34,55
MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	13502,70
Flecha máxima [mm]	13,14
Modo de fallo [1-7]	6



## Resultados mecánicos

Gráfica carga-tiempo



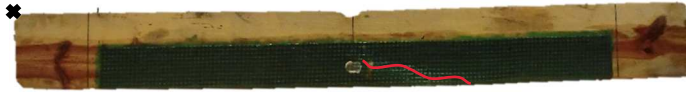
Gráfica tensión-deformación



# Viga WR-D-B-2

## Inspección visual

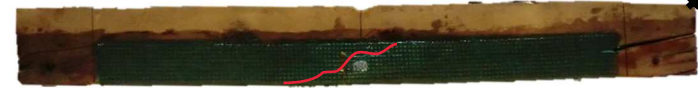
Cara derecha (galga A)



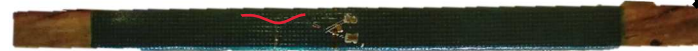
Cara superior



Cara izquierda (galga D)



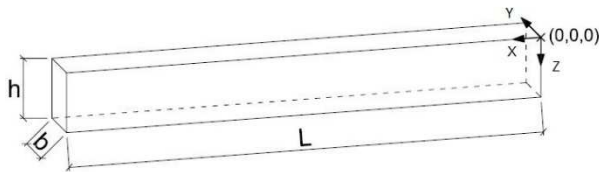
Cara inferior (galgas B y C)



Testa trasera

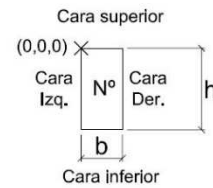


Testa frontal



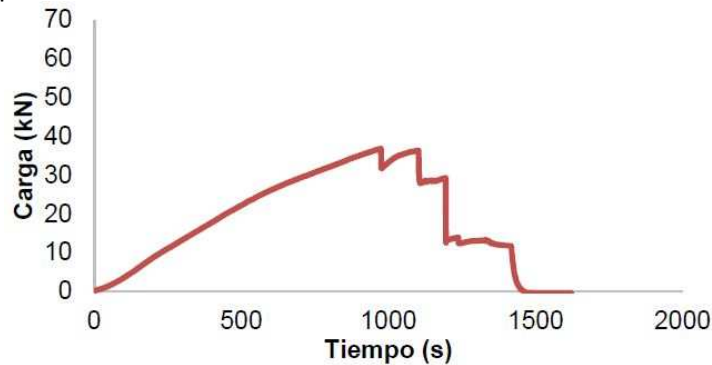
## Datos de la viga

Dimensiones hxbxL [mm]	145 x 75 x 1288
Peso [kg]	6,60
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	471,19
Catalogación según norma UNE 56545	Rechazo
Características del refuerzo	
Tipo	WR-D-B
Laminado	-
Tejido	Drizoro Carbomesh 210
Gramaje [g/m <sup>2</sup> ]	210 ± 5
Datos del ensayo	
Fecha [dd/mm/aa]	21/01/16
Velocidad de carga [mm/min]	1,5
Velocidad de descarga [mm/min]	15
Carga máxima [kN]	36,85
MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	35,05
MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	10300,78
Flecha máxima [mm]	14,10
Modo de fallo [1-7]	6

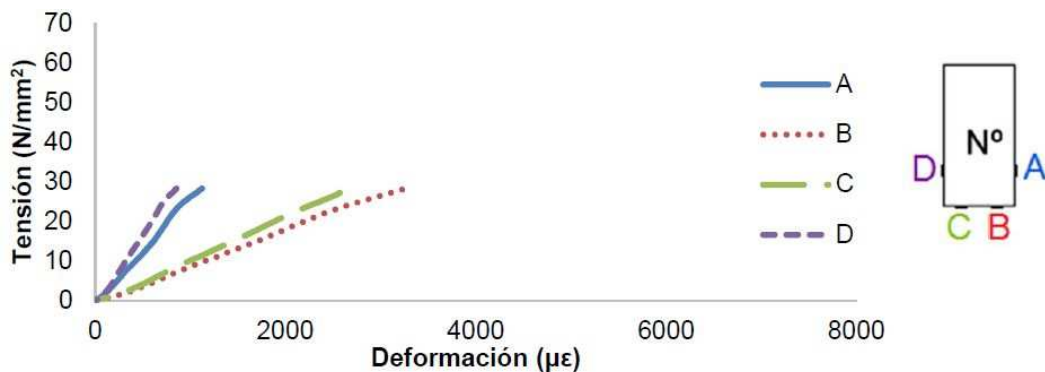


## Resultados mecánicos

Gráfica carga-tiempo



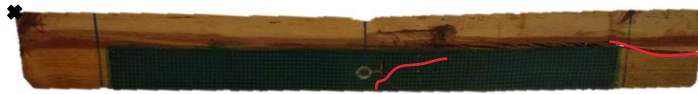
Gráfica tensión-deformación



# Viga WR-D-B-3

## Inspección visual

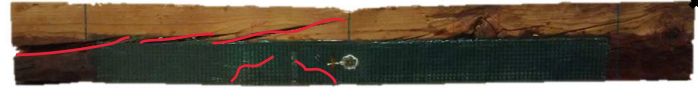
Cara derecha (galga A)



Cara superior



Cara izquierda (galga D)



Cara inferior (galgas B y C)



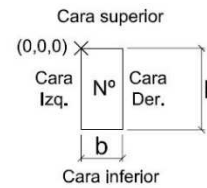
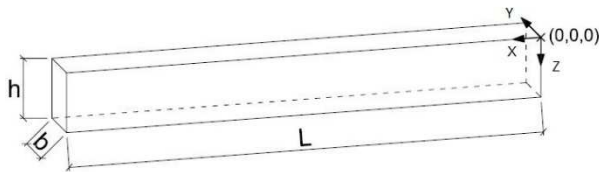
Testa trasera



Testa frontal

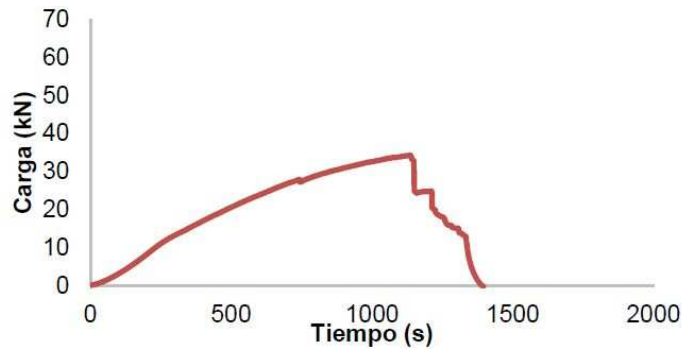


Datos de la viga	
Dimensiones hxbxL [mm]	145 x 75 x 1288
Peso [kg]	6,40
Densidad [kg/m³]	456,91
Catalogación según norma UNE 56545	Rechazo
Características del refuerzo	
Tipo	WR-D-B
Laminado	-
Tejido	Drizoro Carbpmesh 210
Gramaje [g/m²]	210 ± 5
Datos del ensayo	
Fecha [dd/mm/aa]	18/11/15
Velocidad de carga [mm/min]	1,5
Velocidad de descarga [mm/min]	15
Carga máxima [kN]	34,36
MOR [N/mm²]	32,69
MOE [N/mm²]	11261,17
Flecha máxima [mm]	18,22
Modo de fallo [1-7]	4



## Resultados mecánicos

Gráfica carga-tiempo



Gráfica tensión-deformación

