



**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**

**IMPLANTACIÓN DE CFRP
COMO REFUERZO DE
MADERA ANTIGUA
ESTRUCTURAL**

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE
EDIFICACIÓN
UNIVERSIDAD DE GRANADA**

FRANCISCO JAVIER BENÍTEZ CORRAL
PROYECTO FINAL DE GRADO
SEPTIEMBRE 2017



UNIVERSIDAD
DE GRANADA



Implantación de CFRP como refuerzo de madera antigua estructural

Proyecto Final de Grado

Realizado por

Francisco Javier Benítez Corral

Tutores

Francisco José Rescalvo Fernández

Departamento de Física Aplicada

Antolino Gallego Molina

Departamento de Física Aplicada

Ignacio Valverde Palacios

Departamento de Construcciones Arquitectónicas

Granada, Septiembre 2017

D. Francisco José Rescalvo Fernández, Investigador del Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Granada, D. Antolino Gallego Molina, Catedrático del Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Granada y D. Ignacio Valverde Palacios, Profesor del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la Universidad de Granada, como tutores del Proyecto Fin de Grado de D. Francisco Javier Benítez Corral.

Informan:

Que el presente trabajo titulado:

“Implantación de CFRP como refuerzo de madera antigua estructural”

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

Granada, a 5 de Septiembre de 2017

Fdo.

Francisco José Rescalvo Fernández

Antolino Gallego Molina

Ignacio Valverde Palacios

Resumen

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

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

Para la realización de este estudio se ha contado con la colaboración de las empresas DÁVILA RESTAURACIÓN DE MONUMENTOS S.L. y DRIZORO S.A.U. El trabajo presenta la aplicación de fibra de carbono para refuerzos de vigas de madera antigua de pequeña y gran escuadría con una nueva configuración específica basada en un trenzado discontinuo de tejido sobre un laminado de carbono, denominada BR (*Braided Reinforcement*). El objetivo es mejorar y/o recuperar la capacidad de carga de las vigas para posteriormente llevar a cabo una rehabilitación real. Se describe la metodología usada durante el proceso de refuerzo en laboratorio y en obra, y se realiza una comparación de tiempos entre cada uno de los casos. Los resultados de las vigas ensayadas a flexión muestran las notables mejoras en resistencia que experimentan las vigas que han sido reforzadas con fibras de carbono, así como los principales modos de fallo que se producen en las mismas.

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a mis tutores Francisco José Rescalvo Jiménez por su implicación con este trabajo y su paciencia durante toda la elaboración, Ignacio Valverde por habernos ayudado con todo el material para los ensayos y Antolino Gallego Molina por haberme dado la posibilidad de realizar este Proyecto Fin de Grado.

A todos los compañeros del grupo ADIME, Chihab y Elisabet en particular. Gracias por recibirme con tanto compañerismo.

A mis familiares y amigos, sobre todo a mi padre, por creer en mí y ofrecerme ayuda en esta etapa de mi vida.

Finalmente dar las gracias a Ana e Inma por su incondicional apoyo y ánimo para terminar este trabajo.

Índice

Índice de Figuras	v
Índice de Tablas.....	ix
Capítulo 1 Introducción	1
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
Capítulo 2 Catalogación y caracterización de la madera.....	5
2.1. Introducción general de la madera	5
2.1.1. Estructura de la madera	5
2.1.2. Propiedades físico-químicas y mecánicas de la madera	9
2.1.3. Normativa de aplicación.....	17
2.2. Caracterización y catalogación de vigas de madera	17
2.2.1. Vigas de pequeña escuadría – 1,30m.....	19
2.2.2. Vigas de gran escuadría – 4,50m.....	20
Capítulo 3 Materiales compuestos	23
3.1. Materiales compuestos: FRP.....	23
3.1.1. Características de los distintos tipos de fibras	24
3.1.2. Características de la matriz	26
3.1.3. Cargas y aditivos usados en los polímeros compuestos	27
3.2. Materiales Compuestos: CFRP y GFRP	28
3.2.1. Características de las fibras de carbono.....	29
3.2.2. Tipos de fibra de carbono y su fabricación.....	30
3.2.3. Características de las fibras de vidrio	31
3.2.4. Tipos de fibra de vidrio y su fabricación.....	31
3.3. Caracterización de materiales de refuerzo utilizados en este Proyecto.....	32
3.3.1. Laminado CFRP	32
3.3.2. Tejido CFRP	33
3.3.3. Varillas corrugadas GFRP	33

3.3.4. Resina	35
3.3.5. Imprimación.....	38
Capítulo 4 Refuerzo trenzado (BR).....	41
4.1. Elaboración.....	41
4.1.1. Replanteo del refuerzo sobre la viga.....	41
4.1.2. Aplicación de la imprimación	42
4.1.3. Aplicación de la resina	42
4.1.4. Colocación del laminado de CFRP	43
4.1.5. Colocación del tejido de CFRP	44
4.2. Comparativa entre los distintos tipos de vigas	45
Capítulo 5 Ensayos a flexión	47
5.1. Matrices de ensayo	47
5.1.1. Vigas de pequeña escuadría – 1,30m.....	47
5.1.2. Vigas de gran escuadría sin rotura previa – 4,50m	50
5.1.3. Vigas de gran escuadría con rotura previa – 4,50m.....	53
5.2. Descripción de ensayos e instrumentación	54
5.2.1. Vigas de pequeña escuadría – 1,30m.....	54
5.2.2. Vigas de gran escuadría – 4,50m.....	57
Capítulo 6 Resultados y análisis	60
6.1. Parámetros analizados	60
6.2. Vigas de pequeña escuadría – 1,30m.....	63
6.2.1. Vigas sin refuerzo NR.....	63
6.2.2. Vigas con refuerzo BR-U	64
6.2.3. Vigas con refuerzo BR-B	70
6.3. Vigas de gran escuadría sin rotura previa– 4,50m.....	76
6.3.1. Vigas sin refuerzo NR.....	76
6.3.2. Vigas con refuerzo BR.....	77
6.4. Vigas de gran escuadría con rotura previa – 4,50m.....	83
Capítulo 7 Actuación de refuerzo “in situ”	95
7.1. Desarrollo de la actuación.....	95
7.2. Ensayos <i>Pull-Out</i>	95
7.2.1. Elaboración	95

7.2.2. Descripción del ensayo	101
7.2.3. Resultados	102
7.3. Ejecución del refuerzo.....	105
7.3.1. Elaboración	106
7.3.2. Comparativa tiempos de ejecución.....	111
Capítulo 8 Conclusiones.....	114
Bibliografía	116

Índice de Figuras

Figura 2.1 Estructura sub-microscópica, microscópica y macroscópica de la madera.....	5
Figura 2.2 Diagrama de la estructura de la pared celular de las traqueidas.....	6
Figura 2.3 Sección transversal de un árbol. Anillos de crecimiento y radios leñosos.	7
Figura 2.4 Planos principales de la madera.....	7
Figura 2.5 Estructura del tronco de árbol.....	8
Figura 2.6 Principales propiedades físico-químicas de la madera.....	10
Figura 2.7 Principales propiedades físico-mecánicas de la madera.	14
Figura 2.8 Relación entre tensión y deformación en compresión y tracción paralelas a la fibra, en madera libre de defectos. Línea azul: Tracción. Línea roja: Compresión.....	15
Figura 2.9 Compresiones y tracciones en viga flexionada.....	16
Figura 2.10 Tensiones tangenciales en la madera. Izquierda: cortadura. Centro: deslizamiento. Derecha: rodadura.....	16
Figura 2.11 Marcado de las vigas extraídas de la cubierta de la Facultad de Derecho.....	17
Figura 2.12 Dimensiones y origen de coordenadas de las vigas. L: longitud. h: altura. b: ancho.	18
Figura 2.13 Principales defectos en la madera.....	18
Figura 2.14 Numeración de la testa derecha de una viga pequeña.	19
Figura 3.1 Diferentes tipos de fibras. Negro: fibra de carbono. Amarillo: fibra de aramida. Blanco: fibra de vidrio.....	25
Figura 3.2 Relación tensión-deformación de los diferentes tipos de fibras.....	25
Figura 3.3 Laminado DRIZORO® COMPOSITE 1410.....	32
Figura 3.4 Tejido CFRP bidireccional DRIZORO® CARBOMESH 210.....	33
Figura 3.5 Varillas corrugadas de fibra de vidrio.....	34
Figura 3.6 Resina Tipo 4.	35
Figura 3.7 Resina Tipo 5 INDEX MOVISE.....	36
Figura 3.8 Resina Tipo 6 CTS® EPO 150® y endurecedor CTS® K 151®.....	38
Figura 3.9 Componentes de la imprimación MAXPRIMER® C-S.....	39
Figura 4.1 Diagrama del proceso de elaboración del refuerzo trenzado BR [2].	41
Figura 4.2 Cepillado de la viga para su regularización.....	42
Figura 4.3 Aplicación de la imprimación sobre viga de gran escuadría.....	42
Figura 4.4 Aplicación de la resina sobre viga de gran escuadría.....	43
Figura 4.5 Dosificador de resina para el laminado CFRP.....	43
Figura 4.6 Colocación del tejido CFRP sobre una viga de pequeña escuadría.....	44
Figura 5.1 Arriba: representación de una viga con los extremos empotrados. Abajo: disposición del refuerzo con respecto a la longitud de la viga.....	47
Figura 5.2 Fotografía de una viga de pequeña escuadría sin reforzar.....	48
Figura 5.3 Disposición de los refuerzos mixtos trenzados en vigas de pequeña escuadría. Cotas en mm.	49
Figura 5.4 Fotografía de una viga de pequeña escuadría con el refuerzo BR-U.....	49
Figura 5.5 Fotografía de una viga de pequeña escuadría con el refuerzo BR-B.	50
Figura 5.6 Fotografía de las vigas de gran escuadría acopiadas y sin reforzar.....	51
Figura 5.7 Disposición de los refuerzos mixtos trenzados en vigas de gran escuadría. Cotas en mm.....	52
Figura 5.8 Fotografía de una viga de gran escuadría con el refuerzo BR.....	52
Figura 5.9 Izquierda: grieta de una viga rota. Derecha: colocación de viga rota en su posición original.	53
Figura 5.10 Montaje completo de un ensayo a flexión de una viga de pequeña escuadría [2].....	54
Figura 5.11 Esquema de interrelación entre los equipos utilizados para el ensayo de vigas de pequeña escuadría [2].	55
Figura 5.12 Modelo de galga extensiométrica 10/120 LY41-2L-0,5M de HBM [2]. Cotas en mm.	55
Figura 5.13 Esquema de colocación de galgas extensiométricas en vigas de pequeña escuadría [2].	55
Figura 5.14 Esquema de la disposición del ensayo en vigas de pequeña escuadría [2]. Cotas en mm.	56
Figura 5.15 Máquina de ensayos modelo CH4-ST-100 de SERVOSIS S.L.....	57

Figura 5.16 Esquema de colocación de galgas extensiométricas en vigas de gran escuadría. Arriba: vigas de gran escuadría sin rotura previa. Abajo: vigas de gran escuadría con rotura previa. Izquierda: nomenclatura de galgas extensiométricas. Derecha: Grupos de galgas [3]. Cotas en mm.	58
Figura 5.17 Disposición de los LVDTs y galgas extensiométricas durante el ensayo [3].	58
Figura 5.18 Equipo de registro MX 840 B de HBM para galgas extensiométricas y LVDTs [3].	59
Figura 5.19 Esquema de la disposición del ensayo en vigas de gran escuadría [3]. Cotas en mm.	59
Figura 6.1 Distribución de tensiones en una sección transversal a flexión simple [2].	60
Figura 6.2 Esquema de flecha y hundimiento producido tras un ensayo a flexión en tres puntos [2].	61
Figura 6.3 Modelos de fallo para las diferentes roturas en los ensayos [4].	62
Figura 6.4 Carga máxima y MOR de las vigas NR. Línea roja: valor medio.	63
Figura 6.5 Gráfica carga-tiempo de la viga BR-U-1.	64
Figura 6.6 Izquierda: gráfica deformación-tiempo de la viga BR-U-1. Derecha: disposición de las galgas en la viga.	64
Figura 6.7 Gráfica tensión-deformación de la viga BR-U-1.	65
Figura 6.8 Fotografía de la rotura por cortante de la viga BR-U-1.	65
Figura 6.9 Gráfica carga-tiempo de la viga BR-U-2.	66
Figura 6.10 Izquierda: gráfica deformación-tiempo de la viga BR-U-2. Derecha: disposición de las galgas en la viga.	66
Figura 6.11 Gráfica tensión-deformación de la viga BR-U-2.	66
Figura 6.12 Fotografía de la rotura por tracción y cortante de la viga BR-U-2.	67
Figura 6.13 Gráfica carga-tiempo de la viga BR-U-3.	67
Figura 6.14 Izquierda: gráfica deformación-tiempo de la viga BR-U-3. Derecha: disposición de las galgas en la viga.	68
Figura 6.15 Gráfica tensión-deformación de la viga BR-U-3.	68
Figura 6.16 Fotografía de la rotura por tracción y cortante de la viga BR-U-3.	69
Figura 6.17 Carga máxima y MOR de las vigas BR-U. Línea roja: valor medio vigas NR. Línea discontinua: valor medio vigas BR-U.	69
Figura 6.18 Gráfica carga-tiempo de la viga BR-B-1.	70
Figura 6.19 Izquierda: gráfica deformación-tiempo de la viga BR-B-1. Derecha: disposición de las galgas en la viga.	70
Figura 6.20 Gráfica tensión-deformación de la viga BR-B-1.	70
Figura 6.21 Fotografía de la viga BR-B-1 rotando sobre su eje longitudinal en el ensayo.	71
Figura 6.22 Fotografía de la rotura por tracción de la viga BR-B-1.	71
Figura 6.23 Gráfica carga-tiempo de la viga BR-B-2.	72
Figura 6.24 Izquierda: gráfica deformación-tiempo de la viga BR-B-2. Derecha: disposición de las galgas en la viga.	72
Figura 6.25 Gráfica tensión-deformación de la viga BR-B-2.	72
Figura 6.26 Fotografía de la rotura por tracción y cortante de la viga BR-B-2.	73
Figura 6.27 Gráfica carga-tiempo de la viga BR-B-3.	73
Figura 6.28 Izquierda: gráfica deformación-tiempo de la viga BR-B-3. Derecha: disposición de las galgas en la viga.	74
Figura 6.29 Gráfica tensión-deformación de la viga BR-B-3.	74
Figura 6.30 Fotografía de la rotura por tracción de la viga BR-B-3.	74
Figura 6.31 Carga máxima y MOR de las vigas BR-B. Línea roja: valor medio vigas NR. Línea discontinua: valor medio vigas BR-U. Línea continua: valor medio vigas BR-B.	75
Figura 6.32 Gráfico comparativo de la carga máxima soportada por los grupos de vigas de 1,30 m.	75
Figura 6.33 Rotura por tracción y cortante de la viga NR-1.	76
Figura 6.34 Rotura por tracción de la viga NR-2.	77
Figura 6.35 Gráfica carga-tiempo de la viga BR-1.	77
Figura 6.36 Gráficas deformación-tiempo de la viga BR-1. Arriba izquierda: grupo de galgas 1. Arriba derecha: grupo de galgas 3. Abajo izquierda: grupo de galgas 2. Abajo derecha: disposición de las galgas en la viga.	78
Figura 6.37 Gráfica desplazamiento-tiempo de los LVDTs 1, 2 y 3 de la viga BR-1.	78

Figura 6.38 Izquierda: gráfica tensión-deformación del grupo 2 de galgas extensiométricas de la viga BR-1.....	79
Figura 6.39 Fotografía de la rotura por cortante de la viga BR-1.	79
Figura 6.40 Fotografía del desgarro sufrido por el tejido de CFRP de la viga BR-1.	80
Figura 6.41 Gráfica carga-tiempo de la viga BR-2.....	80
Figura 6.42 Gráficas deformación-tiempo de la viga BR-2. Arriba izquierda: grupo de galgas 1. Arriba derecha: grupo de galgas 3. Abajo izquierda: grupo de galgas 2. Abajo derecha: disposición de las galgas en la viga.	81
Figura 6.43 Gráfica desplazamiento-tiempo de los LVDTs 1, 2 y 3 de la viga BR-2.	81
Figura 6.44 Izquierda: gráfica tensión-deformación del grupo 2 de galgas extensiométricas de la viga BR-2.....	82
Figura 6.45 Fotografía de la deslaminación producida en la viga BR-2.	82
Figura 6.46 Gráfica comparativa tensión-tiempo de las vigas del grupo NR y BR.	83
Figura 6.47 Gráfica carga-tiempo de la viga BR-r-1.	84
Figura 6.48 Gráfica deformación-tiempo de la viga BR-r-1.	84
Figura 6.49 Gráfica tensión-deformación de la viga BR-r-1.	84
Figura 6.50 Deslaminación de la viga BR-r-1 tras su rotura.	85
Figura 6.51 Reapertura de grieta existente en la rotura previa de la viga BR-r-1.....	85
Figura 6.52 Gráfica carga-tiempo de la viga BR-r-2.	86
Figura 6.53 Gráfica deformación-tiempo de la viga BR-r-2.	86
Figura 6.54 Gráfica tensión-deformación de la viga BR-r-2.	87
Figura 6.55 Deslaminación de la viga BR-r-2 tras su rotura.	88
Figura 6.56 Reapertura de la grieta existente que causó la rotura previa de la viga BR-r-2 antes de volver a ser reforzada.....	88
Figura 6.57 Gráfica carga-tiempo de la viga BR-r-3.	89
Figura 6.58 Gráfica deformación-tiempo de la viga BR-r-3.....	89
Figura 6.59 Gráfica tensión-deformación de la viga BR-r-3.	89
Figura 6.60 Aparición de nuevas grietas en la viga BR-r-3.	90
Figura 6.61 Grietas existentes contenidas por el material de CFRP de la viga BR-r-3.	90
Figura 6.62 Gráfica carga-tiempo de la viga BR-r-4.	91
Figura 6.63 Gráfica deformación-tiempo de la viga BR-r-4.....	91
Figura 6.64 Gráfica tensión-deformación de la viga BR-r-4.	92
Figura 6.65 Rotura por nudos situados en el centro de la viga BR-r-4.	92
Figura 6.66 Carga máxima, MOR y MOE de las vigas BR-r. Valores medios de las vigas NR, BR y BR-r. ...	93
Figura 6.67 Gráfica comparativa tensión-tiempo de las vigas NR y BR-r.	94
Figura 7.1 Fotografía de la rotura de la viga. Línea roja: cara traccionada.....	95
Figura 7.2 Esquema y fotografía de una probeta de madera con varilla de fibra de vidrio. Cotas en mm.....	96
Figura 7.3 Probeta de prueba marcada con nomenclatura.....	97
Figura 7.4 Lijado y cepillado de probeta para su acondicionamiento.	98
Figura 7.5 Limpieza de los agujeros de las piezas de madera con pistola de aire a presión.	98
Figura 7.6 Varillas de fibra de vidrio adaptadas con zona de no adhesión. Cotas en mm.	99
Figura 7.7 Izquierda: vertido de la resina Tipo 6 en el agujero de la pieza de madera. Derecha: Inserción de la varilla de fibra de vidrio en la pieza de madera.....	99
Figura 7.8 Izquierda: vertido de la resina Tipo 5 en el agujero de la pieza de madera. Centro: inserción de la varilla de fibra de vidrio en la pieza de madera. Derecha: retirada de resina sobrante.	100
Figura 7.9 Izquierda: comprobación de perpendicularidad de la varilla con respecto a la cara crítica. Derecha: fijación de la varilla a la pieza de madera para mantener perpendicularidad.....	100
Figura 7.10 Curado de las probetas en una sala acondicionada.	100
Figura 7.11 Izquierda: máquina de ensayos electromecánica IBERTEST TESTRONIC-100-MD2. Derecha: colocación de la probeta de prueba PO-P en la máquina.....	101
Figura 7.12 Esquema de ensayo de probetas Pull-Out. Cotas en mm.	102
Figura 7.13 Gráficas carga-tiempo del grupo PO-5. Línea roja: PO-5-1. Línea negra: PO-5-2. Línea azul: PO-5-3.....	102

Figura 7.14 Gráfica de carga máxima para las probetas PO-5. Línea punteada: valor medio.....	103
Figura 7.15 Gráficas carga-tiempo del grupo PO-6. Línea roja: PO-6-1. Línea negra: PO-6-2. Línea azul: PO-6-3.....	103
Figura 7.16 gráfica de la carga máxima para las probetas PO-6. Línea punteada: valor medio.	104
Figura 7.17 Comparativa de cargas máximas entre las probetas PO-5 y PO-6.....	104
Figura 7.18 Croquis de situación de partida de la viga. Línea roja: grieta de rotura. Cotas en mm.....	105
Figura 7.19 Recuperación de la posición original de la viga con varillas GFRP y resina Tipo 5.	106
Figura 7.20 Esquema de distribución y colocación del tejido de CFRP de la viga a rehabilitar. Cotas a ejes de las piezas de tejido de CFRP en mm.....	106
Figura 7.21 Corte y marcado de las piezas 1 y 2 de tejido de CFRP para la elaboración del refuerzo de la viga a rehabilitar.	107
Figura 7.22 Imprimación de la viga.	108
Figura 7.23 Protección de la viga frente al polvo tras la imprimación.	108
Figura 7.24 Medición y corte del laminado de CFRP.	109
Figura 7.25 Proceso de adhesión del laminado de CFRP en la cara inferior de la viga.....	109
Figura 7.26 Imagen de la viga antes y después de la colocación del tejido de CFRP.....	110
Figura 7.27 Vista lateral del tejido de CFRP una vez colocado en la viga.....	110
Figura 7.28 Gráfico comparativo de tiempos de ejecución para las vigas BR-U, BR-B, BR, BR-r y el refuerzo "in situ".	112

Índice de Tablas

Tabla 2.1 Valores de contracción volumétrica del pino silvestre.....	12
Tabla 2.2 Densidades aparentes de diferentes especies de maderas.....	13
Tabla 2.3 Comparación de las capacidades mecánicas del acero y la madera en relación a su densidad [5].	13
Tabla 2.4 Comparación de las resistencias y módulos de elasticidad en N/mm ² de la madera, hormigón y acero [5].	14
Tabla 2.5 Dimensiones, peso y densidad de las vigas de pequeña escuadría [1].	19
Tabla 2.6 Resultado de la clasificación visual de las vigas de pequeña escuadría analizadas según norma UNE EN 56544:2010 [1].	20
Tabla 2.7 Dimensiones de las vigas de gran escuadría [3].	20
Tabla 2.8 Peso, volumen y densidad de las vigas de gran escuadría [3].	20
Tabla 2.9 Resultado de la clasificación visual de las vigas de gran escuadría analizadas según norma UNE EN 56544:2010 [1].	21
Tabla 3.1 Clasificación de los compuestos de matriz polimérica según la disposición y el tipo de refuerzo [13].	23
Tabla 3.2 Propiedades mecánicas de las fibras más comunes en FRP. * Producto comercial de Amoco. ** Producto comercial de Du Pont. [14].	24
Tabla 3.3 Propiedades mecánicas de las matrices más comunes en FRP. * Producto comercial de ICL. ** Producto comercial de Philips Petroleum [14].	27
Tabla 3.4 Propiedades de las diferentes fibras de carbono provenientes de PAN [9].	30
Tabla 3.5 Características de las fibras de vidrio clase E y S-2.	31
Tabla 3.6 Propiedades de los laminados de DRIZORO S.A.U. [23].	32
Tabla 3.7 Propiedades del tejido de DRIZORO S.A.U. [23].	33
Tabla 3.8 Principales propiedades de las varillas de fibra de vidrio.	34
Tabla 3.9 Propiedades físicas y mecánicas de la resina Tipo 4 [23].	36
Tabla 3.10 Resistencia de la resina Tipo 5 para barras de 8 mm de diámetro fijadas en hormigón.	37
Tabla 3.11 Datos técnicos de la resina Tipo 6 CTS® EPO 150®.	38
Tabla 3.12 Datos técnicos de la resina de imprimación [23].	39
Tabla 4.1 Superficie de refuerzo para cada tipología de viga.	45
Tabla 4.2 Comparativa de rendimientos y tiempos de aplicación de imprimación y resina para cada tipo de viga.	46
Tabla 5.1 Características y nomenclatura de los tipos de refuerzo de vigas de pequeña escuadría.	47
Tabla 5.2 Asignación de los distintos tipos de refuerzos a las vigas de pequeña escuadría.....	48
Tabla 5.3 Características y nomenclatura de refuerzos de vigas de gran escuadría sin rotura previa.....	50
Tabla 5.4 Asignación de los distintos tipos de refuerzos a las vigas de gran escuadría.	51
Tabla 5.5 Características y nomenclatura de refuerzos de vigas de gran escuadría con rotura previa.	53
Tabla 5.6 Asignación de refuerzos de vigas de gran escuadría con rotura previa.....	53
Tabla 6.1 Resumen de resultados de los ensayos de las vigas NR de pequeña escuadría [2].	63
Tabla 6.2 Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación para la viga BR-U-1.	64
Tabla 6.3 Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación para la viga BR-U-2.	66
Tabla 6.4 Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación para la viga BR-U-3.	67
Tabla 6.5 Resumen de resultados de los ensayos de las vigas BR-U.	69
Tabla 6.6 Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación para la viga BR-B-1.	70
Tabla 6.7 Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación para la viga BR-B-2.	72

<i>Tabla 6.8 Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación para la viga BR-B-3.</i>	73
<i>Tabla 6.9 Resumen de resultados de los ensayos de las vigas BR-B.</i>	75
<i>Tabla 6.10 Resumen de resultados de los ensayos de las vigas NR de gran escuadría [3].</i>	76
<i>Tabla 6.11 Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación para la viga BR-1.</i>	77
<i>Tabla 6.12 Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación para la viga BR-2.</i>	80
<i>Tabla 6.13 Resumen de resultados para las vigas BR.</i>	82
<i>Tabla 6.14 Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima y densidad para la viga BR-1.</i>	83
<i>Tabla 6.15 Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima y densidad para la viga BR-2.</i>	86
<i>Tabla 6.16 Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima y densidad para la viga BR-3.</i>	88
<i>Tabla 6.17 Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima y densidad para la viga BR-4.</i>	91
<i>Tabla 6.18 Resumen de resultados para las vigas BR-r.</i>	93
<i>Tabla 7.1 Dimensiones de las probetas para los ensayos Pull-Out.</i>	97
<i>Tabla 7.2 Fechas de elaboración y ensayo de las probetas Pull-Out.</i>	101
<i>Tabla 7.3 Resultados de probetas PO-5.</i>	103
<i>Tabla 7.4 Resultados de probetas PO-6.</i>	104
<i>Tabla 7.5 Comparativa de tiempos de ejecución de las probetas Pull-Out.</i>	105
<i>Tabla 7.6 Medidas de las diferentes piezas de tejido de CFRP empleadas en la rehabilitación.</i>	107
<i>Tabla 7.7 Tareas y fechas de ejecución del refuerzo sobre la viga.</i>	111
<i>Tabla 7.8 Comparativa de tiempos de ejecución de los diferentes tipos de refuerzos en vigas de 1,3 m y 4,5 m.</i>	111

Capítulo 1 Introducción

1.1.Motivación

Este Proyecto Fin de Grado está englobado en el Proyecto de Investigación multidisciplinar 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 tuvo como objetivo avanzar en el conocimiento del uso en rehabilitación de refuerzos de materiales compuestos de CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*).

Durante las últimas décadas ha crecido el interés por la valoración, conservación y sostenibilidad del patrimonio arquitectónico. Uno de los grandes desafíos a los que se enfrenta es la prolongación de la vida útil de las estructuras, así como la búsqueda de nuevos usos.

El acero ha sido el material tradicionalmente empleado para el refuerzo de estructuras de madera. Sin embargo presenta una serie de inconvenientes: aumento del peso de la estructura base; son costosos en el tiempo; conllevan complicadas instalaciones y pierden su eficiencia con el tiempo. Para ello, desde hace varias décadas se viene investigando la posibilidad de usar refuerzos de materiales de polímeros reforzados con fibras (FRP).

En concreto, los refuerzos con CFRP están siendo utilizados principalmente para refuerzo de estructuras de hormigón. La empresa DRIZORO S.A.U., suministradora de este tipo de materiales, ha colaborado contribuyendo en la investigación con la aportación de materiales propios para la realización de los refuerzos, como resinas, laminados y tejidos de CFRP.

El Proyecto de Investigación REVMAC planteó 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 tiene una gran importancia y experiencia en rehabilitación de cubiertas de madera de edificios históricos, siendo complementada por el grupo de investigación ADIME de la ETS de Ingeniería de Edificación de la Universidad de Granada, el cual tiene experiencia en material CFRP y ensayos de materiales y estructuras [1].

1.2.Objetivos

1.2.1.Objetivos generales del proyecto de investigación

El Proyecto de investigación REVMAC, dentro del que se encuentra englobado este PFG, tiene los siguientes objetivos:

- 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 emisión acústica para la evaluación en tiempo real del proceso de daño, con especial hincapié en la detección de deslaminaciones madera-refuerzo.
- Ejecución de ensayos en vigas de gran escuadría sin y con rotura previa, 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 de este Proyecto es conocer el uso de la fibra de carbono como material de refuerzo en vigas de madera con y sin rotura previa para la posterior ejecución en una situación real de rehabilitación.

Los objetivos específicos de este Proyecto Fin de Grado son:

- Realización de ensayos a flexión de vigas de pequeña y gran escuadría con la configuración trenzada (BR) que dio los mejores resultados en los estudios llevados a cabo por el grupo de investigación.
- Realización de ensayos a flexión de vigas de gran escuadría con rotura previa para posteriormente realizar una comparación con las vigas de madera sin rotura previa.
- Realización de ensayos de adherencia (*Pull-Out*) en varillas de fibra de vidrio embebidas en madera, estudiando diferentes tipos de resinas.
- Traspaso del estudio de laboratorio a una situación real mediante el refuerzo de un par de cubierta altamente dañado con la solución de refuerzo trenzada.
- Estudio comparativo de tiempos de ejecución entre las vigas reforzadas de pequeña y gran escuadría, estas últimas con y sin rotura previa.

1.3. Estructura y alcance del Proyecto Fin de Grado

Este Proyecto se estructura en 8 Capítulos principales

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 características principales de la madera, así como las probetas ensayadas.

En el Capítulo 3 se introducen los materiales compuestos, tanto en su estructura como en su composición, profundizando en el estudio de la fibra de carbono. Finalmente se caracterizan las propiedades de los materiales usados para los refuerzos de las vigas.

En el Capítulo 4 se desarrolla la metodología de elaboración del refuerzo trenzado (BR) y se realiza una comparación de tiempos de aplicación y rendimientos de los productos entre vigas de 1,3 m y 4,5 m reforzadas con esta configuración.

En el Capítulo 5 se presentan las matrices de ensayo y se describen los ensayos para las vigas de pequeña y gran escuadría.

En el Capítulo 6 se describen los parámetros a tener en cuenta en los ensayos y se analizan los resultados de los ensayos a flexión de las vigas.

En el Capítulo 7 se desarrolla la elaboración de los ensayos *Pull-Out* y se describe la ejecución del refuerzo trenzado “in situ”.

En el Capítulo 8 se establecen las conclusiones finales que responden con los objetivos establecidos en este Proyecto.

1.4.Hipótesis de partida

Históricamente, la madera ha sido utilizada en la construcción en general y de elementos estructurales en particular. La madera ha sido ampliamente usada en edificaciones históricas y hoy día es uno de los elementos constructivos más utilizados para la realización de cubiertas tradicionales [3].

La madera es un material heterogéneo que presenta singularidades y defectos que disminuyen sus propiedades mecánicas, lo que lleva a la aparición de patologías. La resistencia de la madera depende en gran medida de su contenido de humedad. Al perder esta humedad en el proceso de secado tras ser aserrada, suelen producirse gran parte de los defectos de la misma.

Se han utilizado los resultados del PFG de Ángela Moreno Bazán titulado “Caracterización y adherencia entre madera antigua y fibra de carbono para refuerzo estructural: Resultados preliminares” [1] para la catalogación visual de las vigas de madera de pequeña escuadría y los del Proyecto Final de Grado de Elías Berbel Román [3] para las de gran escuadría.

Para la realización de ensayos de vigas de pequeña y gran escuadría se ha seguido la metodología descrita en los Proyectos Fin de Grado llevados a cabo anteriormente por los compañeros Iván Jiménez Rubio y Elías Berbel Román [2,3]. Iván Jiménez describió diferentes configuraciones con materiales de CFRP para refuerzo de vigas de 1,3 m, además de realizar el análisis de los resultados de los ensayos y poder determinar cuáles eran los mejores [2]. Elías Berbel aplicó y describió las configuraciones de refuerzo con laminado de CFRP colocado en la cara inferior. Este es el tipo de refuerzo más usado para vigas de 4,5 m [3].

Capítulo 2 Catalogación y caracterización de la madera

En primer lugar, se realizó un estudio de la madera, de sus características y propiedades físico-químicas. En este Capítulo se describe brevemente la catalogación de las vigas de pequeña y gran escuadría que se realizaron en proyectos anteriores [1, 2, 3].

2.1. Introducción general de la madera

La madera es un material orgánico con una estructura celular compleja y especializada en tejidos que llevan a cabo las funciones fundamentales del vegetal, tales como la conducción de la sabia, la transformación y almacenamiento de los productos vitales y el sostén vegetal. Desde el punto de vista comercial, se aprovecha sobre todo la madera de los árboles, es decir, vegetales de ciertas dimensiones.

A lo largo de la historia ha sido un material muy utilizado en construcción, debido a su origen natural y a sus propiedades físicas y mecánicas que le confieren una alta resistencia con respecto a su baja densidad.

2.1.1. Estructura de la madera

Para definir la estructura de la madera hay que hacer un análisis a tres niveles diferentes (Figura 2.1): estructura sub-microscópica, que es la encargada de definir la estructura de las diferentes paredes celulares; estructura microscópica, que se encarga de la agregación de células para formar madera limpia y la estructura macroscópica, que hace que entendamos la clasificación de la madera con defectos como objeto comercial.



Figura 2.1 Estructura sub-microscópica, microscópica y macroscópica de la madera.

Estructura sub-microscópica

Es la estructura que para ser vista necesita el empleo de técnicas ópticas sofisticadas, ya que el orden de aumentos necesarios para estudiarla supera los 3.000, y explica, entre otras muchas cosas, que los movimientos por humedad sean de 10 a 20 veces mayores en la dirección transversal que en la longitudinal.

La sustancia principal que compone esta pared celular es la celulosa, que a su vez se agrupa formando fibrillas elementales, agrupándose estas entre 100 y 2.000 para constituir las microfibrillas. Esta celulosa queda embebida en una matriz de lignina y hemicelulosa. En la Figura 2.2 se representa esta estructura y las diferentes capas que la forman. También se aprecia la capa intermedia o lámina media existente entre las células que apenas contiene celulosa.

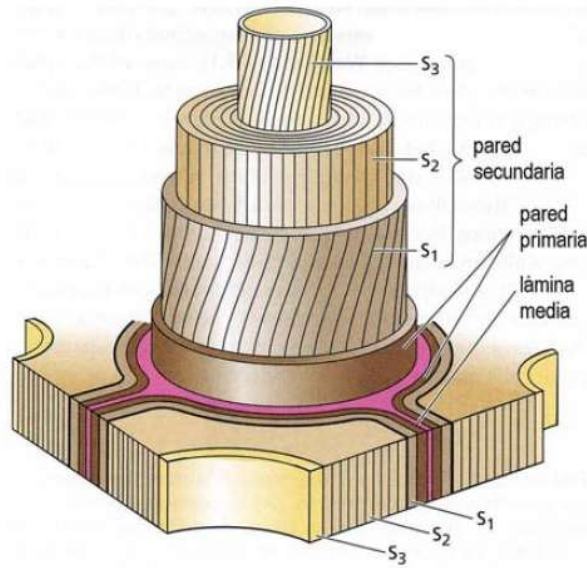


Figura 2.2 Diagrama de la estructura de la pared celular de las traqueidas.

En la Figura 2.2 se observa la pared primaria (P), en la que las fibras se encuentran dispuestas de manera aleatoria. La pared secundaria a su vez se divide en tres subcapas (S_1 , S_2 y S_3), en las que su espesor y orientación de las microfibrillas varía. Las microfibrillas de la capa S_1 se disponen con un ángulo de entre 50° y 70° , con un espesor de entre $0,1$ y $0,2 \mu\text{m}$. La capa S_2 es la más gruesa de las tres y la orientación de las microfibrillas es la misma que la del eje longitudinal, variando unos 5° a 20° . En la capa S_3 las microfibrillas se disponen nuevamente como en la capa S_1 formando entre todas una estructura firme y eficaz, dejando una sección hueca por la que puedan discurrir las sustancias necesarias para el vegetal y que confiere una disminución del peso.

Desde el punto de vista resistente, la capa intermedia de la pared secundaria (S_2) es la encargada de soportar los esfuerzos de tracción. Los esfuerzos a compresión son soportados gracias a que las capas S_1 y S_3 actúan zunchado de la S_2 .

Estructura microscópica

En las coníferas, la principal madera de uso estructural, la composición es muy sencilla puesto que entre el 90% y 95% de las células son las denominadas traqueidas. Son células que tienen una forma alargada, con una longitud entre 2 y 5 mm y un diámetro de 10 a 50 μm , lo que supone una esbeltez de 100, con los extremos afilados o planos. Estas fibras crecen en las diferentes capas anulares del vegetal y tienen su eje longitudinal paralelo al eje del tronco.

Las fibras que crecen al inicio de cada ciclo anual forman la llamada madera de primer crecimiento (madera de primavera) mientras que las que se forman al final se denominan madera de crecimiento tardío (madera de verano). Esta diferencia forma los llamados anillos de crecimiento de un árbol, como se aprecia en la Figura 2.3, presentando una diferencia de densidad entre la madera de verano y primavera del orden de 3 a 1. La madera de verano tiene las paredes más gruesas, dejando un diámetro interior mucho menor.

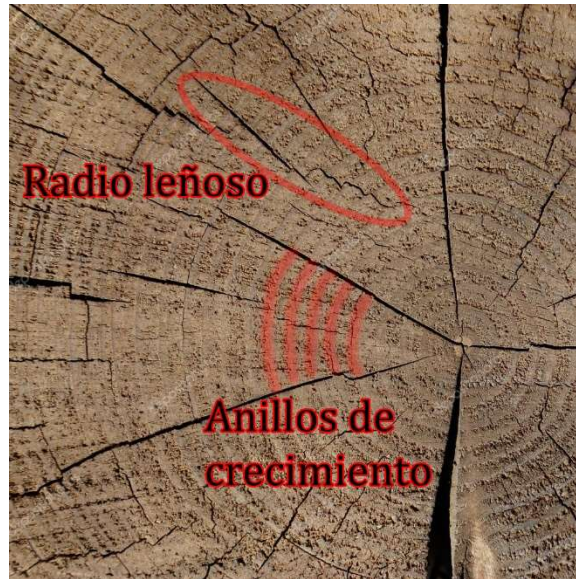


Figura 2.3 Sección transversal de un árbol. Anillos de crecimiento y radios leñosos.

Además, en la Figura 2.3 se pueden observar los radios leñosos formados por las células de parénquima (almacenan y transportan las sustancias) que se desarrollan en sentido radial.

Estructura macroscópica

Debido a su heterogeneidad, para estudiar la estructura macroscópica de la madera se deben definir 3 planos o secciones (Figura 2.4).

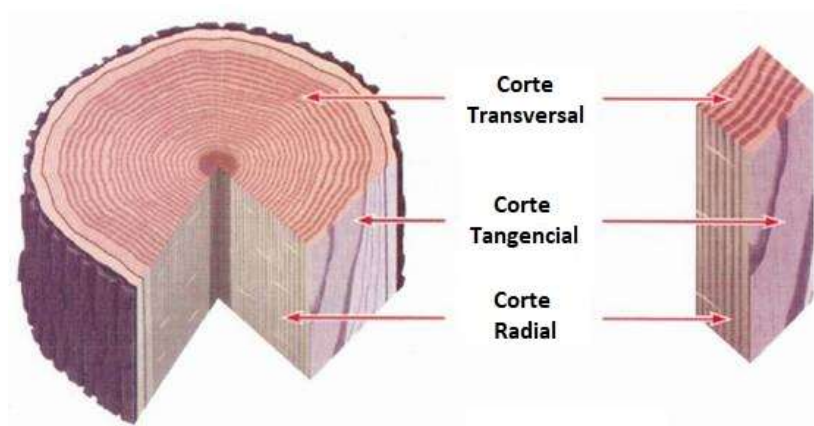


Figura 2.4 Planos principales de la madera.

- Corte transversal: realizado en el plano perpendicular al eje del tronco o rama.
- Corte radial: pasando por el eje y por un radio del tronco o rama.
- Corte tangencial: perpendicular a las anteriores y paralela a un plano tangente al tronco o rama.

Como se observa en la Figura 2.5, macroscópicamente es posible advertir las diferentes partes del sector de un tronco de madera en el que se aprecian la corteza exterior o peridermo (células muertas), la corteza interior o floema (por donde circula la sabia descendente), el cambium (la madera que se produce entre la corteza o floema y la madera o xilema) y el leño o tejido leñoso.

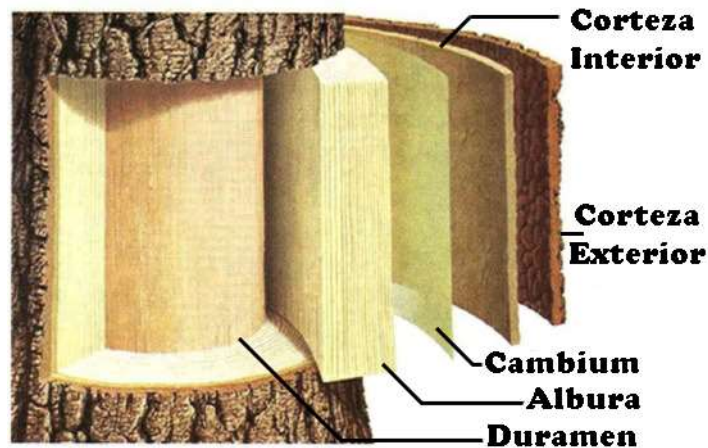


Figura 2.5 Estructura del tronco de árbol.

La Figura 2.5 representa las diferentes partes dentro del tejido leñoso, las cuales se detallan a continuación:

- Anillos de crecimiento: las células del cambium van formando nuevas células que forman los anillos de crecimiento. Estos anillos pueden formarse anualmente en las plantas de la zona boreal y del Ecuador de la Tierra, y estacionalmente en plantas de la zona tropical con estaciones climáticas claramente marcadas. Dentro de cada anillo se puede distinguir claramente la madera de primavera o primer crecimiento y la madera de verano o tardía.

En las coníferas estos anillos de crecimiento se distinguen principalmente por el color y existe una gran relación entre el espesor del anillo de crecimiento y la densidad de la madera.

- Radios leñosos o vasculares: los radios leñosos se disponen en dirección radial, lo que sirve de riostra entre las fibras longitudinales. Estos radios leñosos tienen un papel muy importante en la nutrición del vegetal y además son responsables, en parte, de los cambios volumétricos de la madera. También juegan un papel importante en las tensiones de compresión radial, aunque sobre todo en maderas provenientes de frondosas, las cuales los tienen más desarrollados.
- Duramen y albura: el duramen y la albura forman parte de la estructura del tejido leñoso. El duramen se encuentra en la parte interior del tronco y es la madera más vieja. La albura se encuentra en la parte exterior y es la más joven, encargándose de transportar la savia desde las raíces del árbol hasta la copa. Con el paso del tiempo y el crecimiento del tronco, la madera que una vez formó parte de la albura pasa a ser parte del duramen.

El duramen se forma a raíz de unos cambios físicos y químicos que le confieren, entre otras muchas cosas, un tono más oscuro, una densidad superior y mayor dureza, por lo que las capacidades mecánicas del duramen, en la mayoría de los casos, son muy superiores a las de la albura. Este aumento de capacidades mecánicas se debe esencialmente a que el árbol necesita sostenerse mientras va creciendo.

- Madera juvenil y madura: la madera juvenil es la que se encuentra entre los primeros 5 a 20 anillos de crecimiento, y tiene unas propiedades muy diferentes del resto de madera, la madura. En la madera juvenil de las coníferas, las células traqueidas son más cortas y delgadas que en la madera madura, y a su vez tienen un grado de inclinación de las

microfibrillas de la capa secundaria S_2 mayor, lo que implica una disminución de sus capacidades mecánicas y además una mayor capacidad de hinchazón y merma en su sentido longitudinal.

En maderas de rápido crecimiento, como el chopo, puede resultar que por este fenómeno se encuentre toda la madera juvenil en el duramen y presentar una menor diferencia de capacidades mecánicas entre albura y duramen.

- Madera de reacción: la madera de reacción es la que se produce cuando hay agentes externos (inclinación del terreno o viento predominante) que fuerzan al árbol durante parte o la totalidad de su vida. Para compensar estos esfuerzos, las coníferas forman madera de compresión mejorada, mientras que las frondosas la forman de tracción.

En las coníferas, esta madera de compresión mejorada presenta problemas similares a los asociados a la madera juvenil, ya que su formación se basa en la ampliación de la anchura de los anillos de crecimiento, y un aumento de proporción de madera de verano, que implica una desviación en las microfibrillas de la capa S_2 equivalentes a unos 45° con respecto al eje longitudinal.

2.1.2. Propiedades físico-químicas y mecánicas de la madera

La madera es un material anisótropo, es decir, sus propiedades dependen de la dirección que tomen las sollicitaciones con respecto a la orientación de las fibras. Como se aprecia en la Figura 2.4, considerando las tres direcciones principales, se puede considerar a la madera además como un material ortótropo.

- Axial: dirección paralela al eje de crecimiento.
- Radial: dirección perpendicular a la primera y cortando al eje del árbol.
- Tangencial: normal a las dos anteriores.

La madera, además, se puede considerar como un enorme haz de tubos dispuestos todos de manera longitudinal. Es muy fácil imaginar que la resistencia que estos tubos pueden ofrecer al aplastamiento transversal es muy inferior al longitudinal.

PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS

Estas propiedades son las que se pueden medir sin que se afecte la composición e identidad del material. En el caso de la madera son el contenido de humedad, la higroscopicidad, la densidad, la hinchazón o merma, etc.

Las más importantes e influyentes propiedades de la madera pueden observarse en la Figura 2.6. Se describen y detallan a continuación.

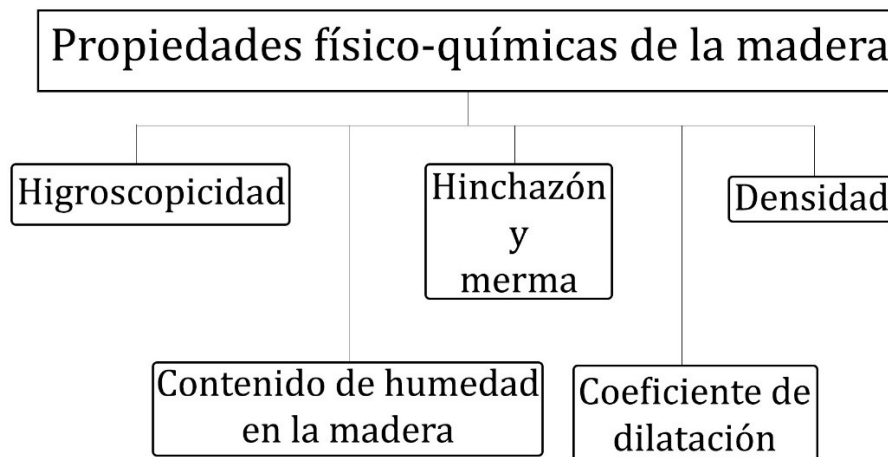


Figura 2.6 Principales propiedades físico-químicas de la madera.

El agua en la madera

El agua puede estar presente en la madera de tres maneras distintas:

- Agua de constitución: Es la que forma parte de la madera y sin ella no podría sostenerse el material.
- Agua de impregnación: Es el agua que se encuentra en las paredes celulares. Se encuentra en constante equilibrio con el ambiente y su disminución hace mejorar las capacidades mecánicas del material, exceptuando la tenacidad y la resistencia al choque.
- Agua libre: Es el agua que se encuentra llenando las cavidades de la célula una vez que las paredes de la misma alcanzan la saturación, siendo en las coníferas un valor entre 28 - 30%. Esta agua no influye en las propiedades físicas y mecánicas, exceptuando la densidad aparente.

Contenido de humedad en la madera

La humedad de la madera se define como la cantidad de agua que contiene expresada en porcentaje de su peso anhidro

$$H (\%) = \frac{P_h - P_s}{P_s} \cdot 100,$$

siendo P_h el peso húmedo y P_s el peso seco de la probeta obtenido por secado a estufa a 103 ± 2 °C. La madera recién cortada contiene entre el 50% y el 110% de agua, valores que se reducen, por secado ambiente, hasta proporciones del 16% - 18%.

Higroscopicidad

Un material higroscópico es aquel que absorbe o elimina humedad de su interior dependiendo de las condiciones del ambiente donde se sitúe, esto es, que la madera ganará o perderá humedad en función de la humedad relativa y la temperatura del aire llegando a la llamada humedad de equilibrio higroscópico.

Esta higroscopicidad se mide como la variación de la densidad de la madera cuando su contenido en humedad varía un 1%. La norma UNE 56532:1977 [18] recoge los métodos de ensayo y la norma UNE 56540:1978 [19] la clasificación de la madera según su grado de higroscopicidad, que puede ser débil, normal y fuerte, con unos valores de 0,0015, 0,0030 y 0,0050 respectivamente.

Es muy importante tener en cuenta esta propiedad en la madera debida a las grandes modificaciones que sufre su volumen (hinchazón y merma) y sus capacidades mecánicas al variar su contenido en humedad. El estado de servicio de un determinado elemento estructural de madera deberá ser estudiado con anterioridad para asimilarlo a las condiciones en las que se encontrará y que no surjan problemas.

Hinchazón y merma

Como se ha comentado previamente, la variación del contenido de humedad produce en la madera una variación de sus dimensiones. Cuando aumenta dicho contenido se hincha, mientras que cuando disminuye se contrae o merma. Esto sucede solamente cuando no existe agua libre en la madera, o lo que es lo mismo, que su contenido de humedad se encuentre por debajo del punto de saturación. Debido a la ya mencionada anisotropía de la madera, según la dirección elegida las variaciones dimensionales serán diferentes:

- La mayor variación dimensional se produce en la dirección tangencial;
- La variación dimensional en la dirección radial es del orden de un 50% o 60% de la que se produce en la dirección tangencial;
- La variación dimensional en la dirección longitudinal es muy reducida, prácticamente despreciable. Puede estimarse en tan solo un 2% o 4% de la correspondiente a la dirección radial.

El coeficiente de contracción lineal (tangencial o radial) expresa el porcentaje de variación de las dimensiones en la dirección considerada para una variación de un grado del contenido de humedad. La norma UNE 56533:1977 recoge los métodos de ensayo de contracción.

Como es evidente, con la variación dimensional en las diferentes direcciones también se modifica la volumetría de la pieza. Se denomina contracción volumétrica total a la variación de volumen, entre el estado saturado y el estado anhidro, expresado en tanto por ciento de su volumen anhidro, de la forma

$$C_V = \frac{V_s - V_0}{V_0} \cdot 100,$$

siendo V_s el volumen de la probeta saturada en agua y V_0 el volumen de la probeta en estado anhidro. El coeficiente de contracción volumétrica arroja una idea más ajustada del comportamiento de la madera frente a la humedad. Este corresponde a la variación de volumen que experimenta la madera, cuando existe una variación de la humedad de un 1%. Se expresa por la ecuación

$$C_{CV} (\%) = \frac{V_h - V_0}{V_0 H} \cdot 100,$$

siendo H el contenido de humedad de la madera y V_h el volumen de la probeta con una humedad $H\%$. El coeficiente C_{CV} es prácticamente constante cuando el grado de humedad de la madera se encuentra por debajo del estado de saturación de las fibras.

Las contracciones lineales radiales (C_{Lr}), tangenciales (C_{Lt}) y axiales (C_{La}) se pueden medir por expresiones análogas a la de la contracción volumétrica total, de la forma

$$C_{Lr} = \frac{R_s - R_0}{R_0} \cdot 100; \quad C_{Lt} = \frac{T_s - T_0}{T_0} \cdot 100; \quad C_{La} = \frac{A_s - A_0}{A_0} \cdot 100,$$

donde:

R_s Longitud radial de la probeta saturada de agua.

- R_0 Longitud radial de la probeta en estado anhidro.
- T_s Longitud tangencial de la probeta saturada de agua.
- T_0 Longitud tangencial de la probeta en estado anhidro.
- A_s Longitud axial de la probeta saturada de agua.
- A_0 Longitud axial de la probeta en estado anhidro.

De forma análoga al coeficiente de contracción volumétrica, se definen los coeficientes de contracción volumétrica radial (C_{Cvr}) y tangencial (C_{Cvt}).

En la Tabla 2.1 se observan estos valores para el pino silvestre.

Contracción volumétrica total (C_v)	12%
Contracción volumétrica radial (C_{Lr})	3,85%
Contracción volumétrica tangencial (C_{Lt})	6,82%
Coeficiente de contracción volumétrica (C_{Cv})	0,37%/%
Coeficiente de contracción volumétrica radial (C_{Cvr})	0,12%/%
Coeficiente de contracción volumétrica tangencial (C_{Cvt})	0,21%/%

Tabla 2.1 Valores de contracción volumétrica del pino silvestre.

La diferencia entre la contracción radial y la tangencial es la causa por la que las maderas se deforman durante el proceso de secado, y es por esto que en ebanistería son valoradas las maderas con coeficientes de contracciones volumétricas radiales y tangenciales muy parecidas, como ocurre con el abedul. Estas contracciones pueden tener repercusiones en la seguridad de la estructura:

- Tensiones originadas en los medios de unión. Si no permiten el movimiento libre de la madera, esta se puede agrietar en las proximidades;
- Desajustes y holguras en los medios de unión si la madera fue colocada con un excesivo contenido de humedad;
- Aparición de fendas de secado que disminuyen la calidad de la pieza y en algunos casos favorecen el ataque de organismos xilófagos.

Densidad

La densidad, como es ampliamente conocido, es la relación entre la masa y el volumen, y para concretarla en elementos de madera es necesario referirla a un cierto contenido de humedad. Normalmente el contenido de humedad de referencia es de un 12%, que equivale a una temperatura ambiente de 20 °C y una humedad relativa del aire del 65%.

La densidad de la madera oscila entre los 300 y los 1200 kg/m³ dependiendo de la especie, y en coníferas ronda los 400 y 550 kg/m³. En la Tabla 2.2 se aprecian algunos ejemplos de densidades según la especie de la madera.

ESPECIE DE LA MADERA	DENSIDAD APARENTE (kg/m ³)
Pino Silvestre	320 - 760
Pino Negro	380 - 740
Pino Tea	830 - 850
Abeto	320 - 600
Alerce	440 - 800
Roble	710 - 1070
Encina	950 - 1200
Haya	600 - 900
Olmo	560 - 820
Nogal	600 - 810

Tabla 2.2 Densidades aparentes de diferentes especies de maderas.

Esta baja densidad comparada con su elevada resistencia y su módulo de elasticidad, posibilitan que la madera sea utilizada en soluciones constructivas clásicas con mucha mayor ligereza que otros elementos como el hormigón o el acero. En la Tabla 2.3 se describe la relación resistencia/densidad entre la madera y el acero, resultando la madera 3,8 veces más resistente que el acero en relación a su peso.

MATERIAL	Relación resistencia/densidad		Relación módulo de elasticidad/densidad en madera clasificada ^{b)}
	Madera limpia y valores medios de rotura ^{a)}	Madera clasificada y valores de cálculo ^{b)}	
Acero	1,0	1,0	1,0
Madera	3,8	1,0	1,0

^{a)} Probetas libres de defectos de madera de pino silvestre y acero S275.

^{b)} Madera laminada encolada GL24h y acero S275 (duración media de la carga).

Tabla 2.3 Comparación de las capacidades mecánicas del acero y la madera en relación a su densidad [5].

Coeficiente de dilatación térmica

Siendo fiel a su anisotropía, la madera tiene un coeficiente de dilatación térmica variable con la dirección respecto a la fibra. En la dirección perpendicular a la fibra el coeficiente de dilatación es de 5 a 10 veces superior al de la dirección paralela.

Al aumentar la temperatura ambiente en una madera húmeda se produce, por un lado, la correspondiente dilatación térmica y por otro, una merma debido a su pérdida de contenido de humedad. Así, a menos que la madera tenga un contenido de humedad inferior al 3% o 4%, la merma producida por la pérdida de humedad será mayor que la dilatación producida por el aumento de temperatura, y es por esto que la normativa, a efectos de cálculo, desprecia la dilatación térmica.

PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS

Antes de analizar las propiedades físico-mecánicas (Figura 2.7) de la madera, es necesario realizar una comparación general con las propiedades de otros materiales también usados en construcción, como el hormigón y el acero, teniendo en cuenta que las resistencias de la madera se refieren al 5% percentil. En la Tabla 2.4 se aprecian las diferencias entre los mismos [5].

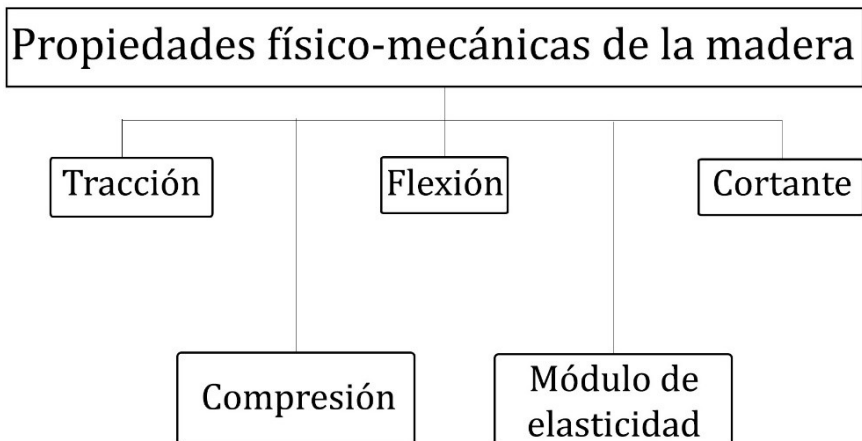


Figura 2.7 Principales propiedades físico-mecánicas de la madera.

	Flexión	Tracción		Compresión		Cortante	Módulo de elasticidad
		0°	90°	0°	90°		
Madera (C24)	24,00	14,00	0,40	21,00	2,50	4,00	11000,00
	14,70	8,60	0,25	12,90	1,54	2,46	
Hormigón (HA-25)	-	1,79		25,00		1,79	32000,00
		1,19		16,70		1,19	
Acero (S275)	275,00	275,00		275,00		158,00	210000,00
	262,00	262,00		262,00		150,00	

- Para los valores de resistencia se indican arriba los valores característicos y abajo los de cálculo (en madera para una clase de servicio 1 duración media de la carga).
- En el hormigón no tiene sentido la resistencia a flexión.
- Los valores del módulo de elasticidad son valores medios.

Tabla 2.4 Comparación de las resistencias y módulos de elasticidad en N/mm² de la madera, hormigón y acero [5].

Las conclusiones que se sacan de las capacidades mecánicas de la madera con esta comparativa son:

- Muy elevada resistencia a la flexión, sobre todo si se asocia a su peso;
- Buena capacidad de resistencia a la tracción y a la compresión paralelas a la fibra;
- Escasa resistencia al cortante, aunque en general es suficiente para las exigencias estructurales. Esta limitación se presenta también en el hormigón, pero no en el acero;
- Muy escasas resistencias a la compresión y a la tracción perpendicular a la fibra. Sobre todo, en tracción, lo que supone una característica muy particular frente a los otros materiales;
- Bajo módulo de elasticidad, la tercera parte del hormigón y veinte veces menor que el del acero. Los valores alcanzados por el módulo de elasticidad inciden sustancialmente sobre la deformación de los elementos resistentes y sus posibilidades de pandeo. Este valor neutraliza parte de la buena resistencia a la compresión paralela a la fibra a la cual se ha hecho referencia anteriormente.

Tracción

La tracción se puede dividir en dos direcciones principales, paralela y perpendicular a la fibra. En cuanto a la tracción paralela a la fibra la madera tiene una alta resistencia a la tracción, llegando

a superar la resistencia a flexión cuando se trata de madera libre de defectos. En la madera comercial alcanza una resistencia de unos 8 a 18 N/mm². La relación entre la tensión y la deformación es lineal hasta la rotura, como se observa en la Figura 2.8. Cuando se trata de tracción en dirección perpendicular a la fibra, esta se reduce del orden de 20 a 50 veces con respecto a la tracción paralela a la fibra.

Compresión

Del mismo modo que en la tracción, en madera estructural clasificada, la resistencia a la compresión paralela a la fibra alcanza valores de 16 a 23 N/mm². Esta resistencia hace posible el uso de madera en elementos estructurales como pilares, pares de cubierta, montantes de muros entramados, etc. Sin embargo, no hay que olvidar que para este tipo de elementos es necesario comprobar la resistencia al pandeo, para la cual el módulo de elasticidad influye decisivamente, y en el caso de la madera este no es tan alto como en el de otros materiales.

En el caso de la dirección perpendicular a la fibra, la madera en compresión reduce su resistencia hasta valores entre 2-2,7 N/mm², lo que supone reducir su resistencia a la octava parte solamente cambiando la dirección de aplicación del esfuerzo. En compresión, la relación entre tensión y deformación es prácticamente lineal hasta un punto donde el material empieza a comportarse de manera plástica hasta finalmente llegar a la rotura (Figura 2.8).

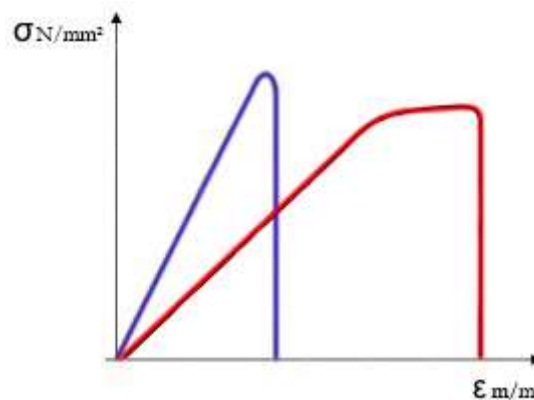


Figura 2.8 Relación entre tensión y deformación en compresión y tracción paralelas a la fibra, en madera libre de defectos. Línea azul: Tracción. Línea roja: Compresión

Flexión

La flexión se produce por la actuación de un momento flector que tiende a comprimir (cara superior) y traccionar (cara inferior) el material en la dirección paralela a las fibras, siendo sus valores máximos en las fibras más extremas y nulos en la fibra neutra, como se observa en la Figura 2.9. En la madera, la resistencia a la flexión es muy elevada, del orden de 14 a 30 N/mm² en las coníferas. Esta propiedad es importante en elementos estructurales como vigas, viguetas, pares de cubierta, etc.

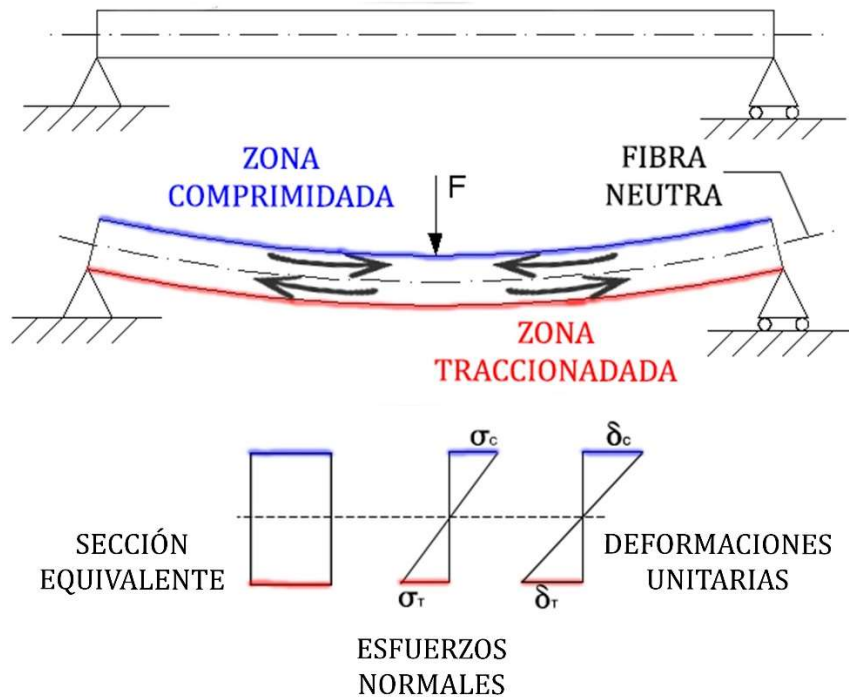


Figura 2.9 Compresiones y tracciones en viga flexionada.

Cortante

El esfuerzo cortante es el que origina tensiones tangenciales en las fibras de la madera, y dependiendo de la posición de la misma, éstas tensiones pueden ser de tres tipos, como se aprecia en la Figura 2.10.

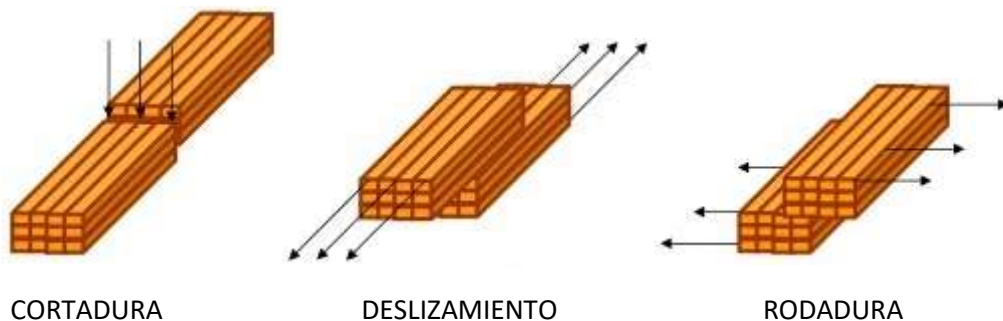


Figura 2.10 Tensiones tangenciales en la madera. Izquierda: cortadura. Centro: deslizamiento. Derecha: rodadura.

- Cortadura: las fibras son cortadas tangencialmente por el esfuerzo y el fallo se produce por aplastamiento;
- Deslizamiento: las fibras se desplazan unas con respecto a las otras en la dirección longitudinal;
- Rodadura: las fibras ruedan unas sobre las otras.

En vigas de madera, elementos sometidos a flexión y cortante, actúan las tensiones de cortadura y deslizamiento conjuntamente, y para estos esfuerzos cortantes, la madera tiene una resistencia muy baja, entre 3 y 4 N/mm^2 . Las tensiones tangenciales por rodadura se producen en casos muy excepcionales, como es la unión encolada entre el alma y el ala de una vigueta con sección en doble T.

Módulo de elasticidad

En la madera el módulo de elasticidad adopta valores diferentes para la compresión y la tracción, pero en la práctica y en el cálculo siempre se ha utilizado un único valor, el módulo de elasticidad en flexión. Este valor es intermedio entre el de compresión y el de tracción y oscila los 7000 y 12000 N/mm².

Para ambos esfuerzos en la dirección perpendicular a la fibra se toma igualmente un único valor que resulta unas 30 veces inferior al paralelo a la fibra.

2.1.3. Normativa de aplicación

A la hora de clasificar y catalogar la madera empleada para probetas en este proyecto se utilizaron diferentes métodos. La clasificación de resistencias para madera aserrada se regula en la norma UNE-EN 338:2010. La norma UNE 56544:2011 recoge la clasificación visual de la madera de coníferas aserrada de uso estructural y la norma UNE-EN 1912:2012 la asignación de calidades visuales y especies. Toda esta clasificación previa a este proyecto fue plasmada en otros proyectos anteriores dentro del proyecto general REVMAC, como los realizados por Ángela Moreno Bazán [1], Iván Jiménez Rubio [2] y Elías Berbel Román [3].

Así mismo, para la realización de ensayos se ha tenido en cuenta el Eurocódigo 5 y el Código Técnico de la Edificación, Documento Básico de Seguridad Estructural para estructuras de madera, como normas de cálculo y la norma ASTM C900-15 [22], como guía para la realización de los ensayos *Pull-Out*.

2.2. Caracterización y catalogación de vigas de madera

Las vigas utilizadas en los ensayos de este proyecto provienen de la cubierta de la Facultad de Derecho de la Universidad de Granada tras su intervención en 2015. Tras desmontarse, se marcaron como se observa en la Figura 2.11 y se realizó una inspección visual preliminar para seleccionar las que se encontraban en mejor estado y cumplían las condiciones mínimas para realizar las probetas.

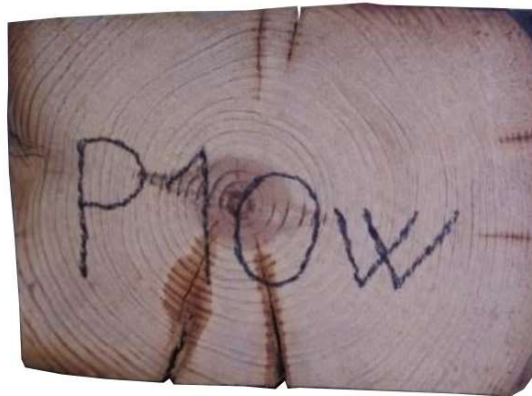


Figura 2.11 Marcado de las vigas extraídas de la cubierta de la Facultad de Derecho.

La primera letra de la nomenclatura indica la ubicación de la viga en la cubierta (P de par), luego le sigue un número de ordenación y finalmente otra letra que indica la orientación en la que se encontraba (este, oeste, norte o sur).

La madera extraída se clasificó como pino silvestre (*Pinus Sylvestris*), una conífera del grupo de las pináceas, caracterizada por su alto contenido en resina en el interior del tronco y un magnífico comportamiento mecánico en relación a su densidad con respecto a otras maderas.

Estas características han hecho que esta madera haya sido y sea una de las más usadas con carácter estructural en el sector de la construcción.

Se realizó una clasificación visual para así separar las diferentes piezas de madera en grupos que cumplieran con los requisitos de cada clasificación establecidos (MEG o rechazo). En la Figura 2.13 se pueden observar los principales defectos de la madera, los cuales se registraron para realizar la clasificación, al igual que las características geométricas, todas ellas en función de las siguientes variables:

- Dimensiones y perfil longitudinal de la pieza para cada cara;
- Defectos y cualquier otro parámetro de clasificación visual, haciendo referencia a su magnitud y a su posición en la pieza;
- Incidencias particulares (cajeados, roturas, daños de origen biótico, etc.) indicando magnitud y posición con la mayor exactitud posible.

Para referenciar todos estos defectos y parámetros se utilizó el eje de coordenadas que se puede observar en la Figura 2.12.

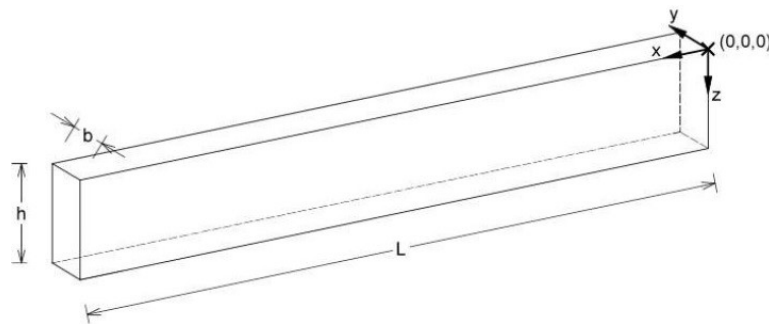


Figura 2.12 Dimensiones y origen de coordenadas de las vigas. L: longitud. h: altura. b: ancho.

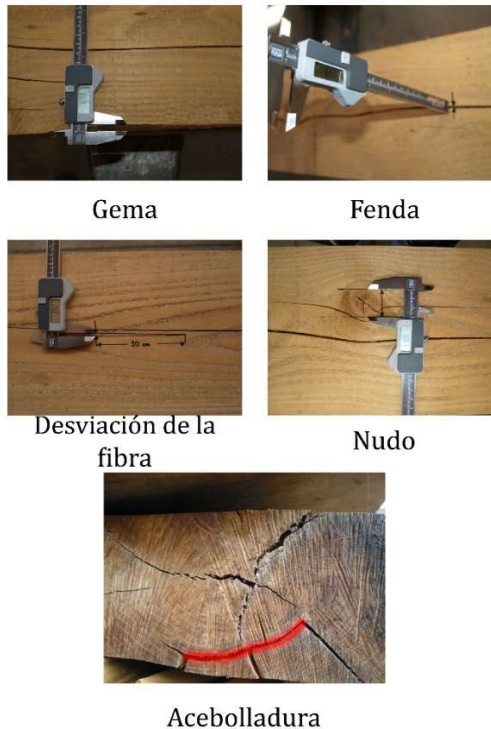


Figura 2.13 Principales defectos en la madera.

2.2.1. Vigas de pequeña escuadría – 1,30m

Para la obtención de las probetas de pequeña escuadría se aserraron un total de 54 vigas con una sección de $(145 \pm 1) \times (75 \pm 2) \text{ mm}^2$ y $(1290 \pm 3) \text{ mm}$ de largo. De las 54 vigas, 10 fueron las utilizadas para la elaboración de este proyecto, 4 de ellas sin refuerzo y las 6 restantes empleadas para el refuerzo trenzado.



Figura 2.14 Numeración de la testa derecha de una viga pequeña.

Cada una de las vigas se marcó en su testa derecha con la letra V (viga) y un número, como se muestra en la Figura 2.14, así como el origen de coordenadas. En la Tabla 2.5 se detallan las dimensiones y se establece el volumen, peso y densidad de cada una de estas vigas.

DIMENSIONES Y DENSIDAD DE LAS PIEZAS						
Viga	Alto (h) (mm)	Ancho (b) (mm)	Largo (L) (mm)	Volumen (m ³)	Peso (kg)	Densidad (kg/m ³)
V-1	146	74	1288	0,0139	8,9	639,57
V-2	145	75	1288	0,0140	7,2	514,03
V-6	146	76	1289	0,0143	9,9	692,17
V-19	145	75	1288	0,0140	7,7	549,73
V-27	146	75	1287	0,0141	9,7	688,30
V-33	145	75	1287	0,0140	8,8	628,75
V-34	145	75	1288	0,0140	8,8	628,26
V-36	145	75	1287	0,0140	6,0	428,69
V-45	145	75	1288	0,0140	9,0	642,54
V-51	145	75	1288	0,0140	7,3	521,17

Tabla 2.5 Dimensiones, peso y densidad de las vigas de pequeña escuadría [1].

La densidad media obtenida fue de $593,32 \text{ kg/m}^3$, la cual se encuentra dentro de los valores medios para coníferas que están entre 491 y 656 kg/m^3 . Tras la clasificación visual se elaboró la Tabla 2.6 en la que se describe si las vigas son rechazadas o clasificadas como MEG y el motivo del rechazo:

CLASIFICACIÓN VISUAL		
Viga	Aceptación/Rechazo	Motivo
V-1	MEG	-
V-2	RECHAZO	Nudo
V-6	RECHAZO	Nudo
V-19	MEG	-
V-27	MEG	-
V-33	RECHAZO	Nudo
V-34	RECHAZO	Nudo
V-36	RECHAZO	Fenda
V-45	MEG	-
V-51	RECHAZO	Fenda

Tabla 2.6 Resultado de la clasificación visual de las vigas de pequeña escuadría analizadas según norma UNE EN 56544:2010 [1].

2.2.2. Vigas de gran escuadría – 4,50m

Para el estudio con vigas de gran escuadría se contó con 10 vigas con una sección media según Tabla 2.7 de 149,0 x 221,5 mm² y 4500,3 mm de largo. De estas 10 vigas, 6 se han incluido en este proyecto, 2 sin refuerzo, 2 con refuerzo trenzado sin rotura previa y tras los primeros ensayos 4 con refuerzo trenzado con rotura previa. En la Tabla 2.7 se describen las diferentes medidas medias para cada una de las vigas y en la Tabla 2.8 se muestran el peso, el volumen y la densidad de las mismas.

DIMENSIONES DE LAS PIEZAS (mm)			
Viga	Ancho (b)	Alto (h)	Largo (l)
P10 W	147	219	4500
PN 17	151	227	4499
SN 6	159	226	4500
P 28 W	147	223	4503
P 48 E	147	218	4500
SN 8	144	216	4500

Tabla 2.7 Dimensiones de las vigas de gran escuadría [3].

VIGA	PESO (kg)	VOLUMEN (m ³)	DENSIDAD (kg/m ³)
P10 W	67,60	0,1442	468,72
PN 17	80,30	0,1542	520,86
SN 6	92,40	0,1618	571,12
P 28 W	76,90	0,1472	522,52
P 48 E	94,70	0,1439	658,11
SN 8	78,70	0,1402	561,53

Tabla 2.8 Peso, volumen y densidad de las vigas de gran escuadría [3].

La densidad media de las vigas fue de 545,84 kg/m³. De acuerdo con la clasificación de la norma UNE EN 338:2010 [21], estas vigas pertenecen por su densidad a la clase resistente C50. Los

resultados tras la clasificación visual se describen en la Tabla 2.9, indicando si las vigas son rechazadas o tienen calidad MEG y el motivo del rechazo.

CLASIFICACIÓN VISUAL		
Viga	Aceptación/Rechazo	Motivo
P 10 W	RECHAZO	Nudos
PN 17	RECHAZO	Nudos
SN 6	RECHAZO	Nudos
P 28 W	RECHAZO	Nudos
P 48 E	RECHAZO	Nudos
SN 8	RECHAZO	Nudos

Tabla 2.9 Resultado de la clasificación visual de las vigas de gran escuadría analizadas según norma UNE EN 56544:2010 [1].

Como se aprecia en la Tabla 2.9, la totalidad de las vigas clasificadas visualmente resultaron rechazadas. Un 80% de las vigas fueron rechazadas por nudos que sobrepasan el tamaño que permite la norma, un 10% presentaba fendas mayores a las permitidas y el otro 10% tenía presencia de carcoma, lo cual no está permitido por la normativa.

Capítulo 3 Materiales compuestos

Los materiales compuestos están formados por dos elementos principales, cuya adecuada combinación origina un material con características resistentes mejoradas con respecto a los elementos de origen. Además se pueden introducir en la composición del nuevo material, nuevos elementos que concedan características peculiares para usos específicos [9].

3.1. Materiales compuestos: FRP

Los materiales compuestos FRP se conocen con este nombre por sus siglas en inglés *Fiber Reinforced Polymer*, lo que quiere decir que son un compuesto de polímeros y fibras. Están formados por un armado en forma de fibras largas embebido en una matriz polimérica. Estos compuestos se utilizan habitualmente como refuerzo de estructuras debido a sus múltiples características, como es el reducido peso con respecto a su resistencia. En general las fibras son las responsables de las propiedades resistentes mientras que la matriz se encarga de envolverlas para hacerlas solidarias y protegerlas de daños mecánicos o ambientales.

Hay múltiples combinaciones posibles entre las diferentes matrices con distintos tipos de disposiciones de fibra, que hacen posible conseguir materiales con propiedades mecánicas muy especiales que pueden ser adaptados a diseños muy específicos [12].

Los materiales compuestos se pueden clasificar en función de su tipología o en función del tipo de sustancia componente. En la Tabla 3.1 se muestra la clasificación de los distintos tipos de compuestos según el refuerzo.

TIPO DE REFUERZO	DISPOSICIÓN
Fibra larga y continua	Fibra orientada unidireccional
	Fibra orientada bidimensional
	Fibra orientada tridimensional
	Orientación aleatoria
Fibra discontinua	Orientación aleatoria
	Orientación predominante
Partículas	Orientación aleatoria
	Orientación predominante

Tabla 3.1 Clasificación de los compuestos de matriz polimérica según la disposición y el tipo de refuerzo [13].

Los FRP más comunes en aplicaciones industriales son los de matriz termoestable reforzada con fibras cerámicas largas orientadas, entrelazadas o cosidas. Estos materiales han sido ampliamente usados en el refuerzo de estructuras debido a la facilidad de producción, coste y propiedades mecánicas específicas. Las matrices más utilizadas son las de resina epoxi o poliéster. En cuanto a las fibras, son la fibra de vidrio (GFRP) y de carbono (CFRP) las más usadas [12].

Sus elevadas propiedades específicas de rigidez y resistencia hacen de los polímeros reforzados con fibra larga sus características estructurales más valoradas. Las propiedades estructurales de

un material compuesto se obtienen con la adición de los distintos componentes. Por lo tanto, la resistencia final y propiedades mecánicas del compuesto dependen de las propiedades de los constituyentes y su disposición geométrica [12].

Como se ha dicho anteriormente, los materiales principales que constituyen las fibras son el carbono y el vidrio pero en algunas aplicaciones específicas se han utilizado fibras vegetales como la aramida [12]. En la Tabla 3.2 se pueden apreciar las principales características de los materiales más utilizados en polímeros reforzados.

MATERIAL	DENSIDAD ρ (g/cm ³)	MÓDULO ELÁSTICO E (GPa)	RESIST. A TRACCIÓN s_t (MPa)	ALARGAMIENTO (%)	COEF. POISSON ν	MÓDULO ESPECIF. (e/ρ)	RESIST. ESPECIF. (s_t/ρ)
FIBRA DE VIDRIO							
E-Glass	2,54	72,40	3450,00	4,80	0,20	28,50	1,36
S-Glass	2,49	86,90	4300,00	5,00	0,22	34,90	1,73
FIBRA DE CARBONO							
T-40 *	1,81	290,00	5650,00	1,80	-	160,20	3,12
T-300 *	1,76	231,00	3650,00	1,40	0,20	131,30	2,07
FIBRA DE BORO							
	2,70	393,00	3100,00	0,80	0,20	145,60	1,15
FIBRA DE ARAMIDA							
Kevlar 49 **	1,45	131,00	3620,00	2,80	0,35	90,30	2,50
Kevlar 149 **	1,47	179,00	3450,00	1,90	-	121,80	2,35

Tabla 3.2 Propiedades mecánicas de las fibras más comunes en FRP. * Producto comercial de Amoco. ** Producto comercial de Du Pont. [14].

En el caso de la fibra de vidrio, la Tabla 3.2 muestra dos tipos, *E-Glass* y *S-Glass*. La fibra de vidrio *E-Glass* es la más utilizada y está formada por un vidrio de aluminio-borosilicato con menos de 1%, en peso, de óxidos alcalinos. Su principal uso es la elaboración de plásticos reforzados. La fibra de vidrio *S-Glass* está conformada por un vidrio de silicato de aluminio sin óxido de calcio pero con alto contenido de magnesio. Este es un vidrio con alta resistencia a la tracción y sus propiedades mecánicas son superiores a las del *E-Glass* aun teniendo este una densidad mayor. Las propiedades de las fibras de carbono que aparecen en la Tabla 3.2 hacen referencia a distintos productos de la casa comercial AMOCO. Además de las fibras mencionadas en la Tabla 3.2, se pueden encontrar fibras metálicas y fibras cerámicas de cuarzo y sílice y fibras de basalto.

3.1.1. Características de los distintos tipos de fibras

En la Figura 3.1 se pueden apreciar diferentes tipos de fibras ya dispuestas para su comercialización y en la Figura 3.2 se pueden observar las tensiones (tracción) en relación a las deformaciones de estos tipos de fibras.



Figura 3.1 Diferentes tipos de fibras. Negro: fibra de carbono. Amarillo: fibra de aramida. Blanco: fibra de vidrio.

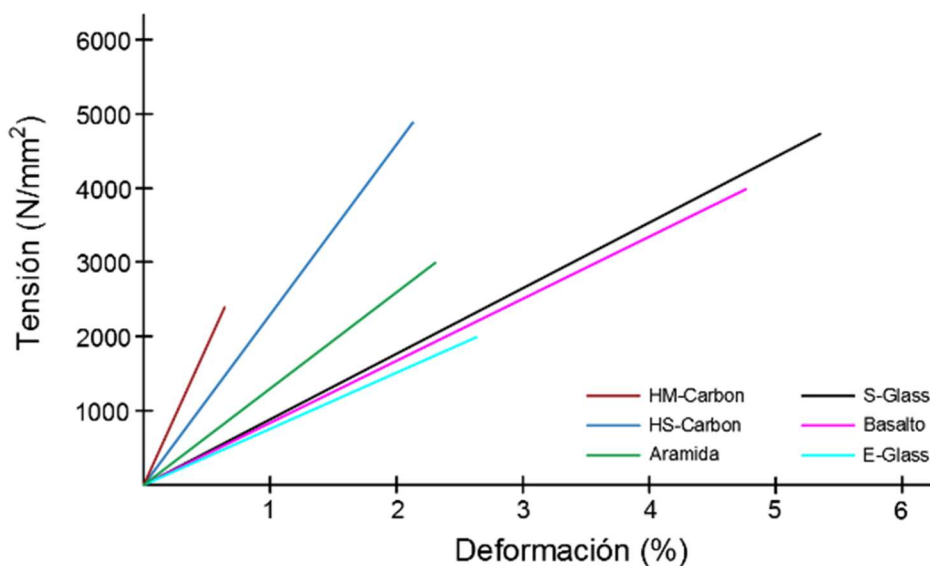


Figura 3.2 Relación tensión-deformación de los diferentes tipos de fibras.

Fibras de vidrio

Las fibras de vidrio o GFRP tienen una rigidez específica no superior a la de los metales tradicionales. Sin embargo, presentan una alta resistencia específica y un bajo coste [12].

Fibras de carbono

Las fibras de carbono o CFRP presentan unas excepcionales propiedades de rigidez y resistencia. Este tipo de fibras pueden variar mucho en función del proceso de producción y se pueden clasificar en dos tipos según sus características [12]:

- Fibras de carbono de alta resistencia;
- Fibras de carbono de alta rigidez.

Fibras de boro

Las fibras de boro son monofilamentos cerámicos relativamente gruesos con una baja flexibilidad. Estas fibras tienen una elevada rigidez y resistencia específica. Sin embargo, debido a su gran fragilidad son usadas en aplicaciones muy excepcionales [12].

Fibras de aramida

Las fibras de aramida tienen una elevada flexibilidad, mostrando muy buenas propiedades de resistencia específica y resistencia al impacto. Por el contrario, no presentan propiedades de rigidez excepcionales [12].

3.1.2. Características de la matriz

La matriz es el material que anexa unas fibras con otras para transmitir los esfuerzos entre las mismas y permitir que estas trabajen conjuntamente. Una de las principales limitaciones que presenta la matriz es la pérdida de propiedades a alta temperatura, su susceptibilidad medioambiental y la baja resistencia a cortante [12]. Las matrices poliméricas se pueden dividir en dos grandes grupos: matrices termoplásticas y matrices termoestables.

Matrices termoplásticas

Las matrices termoplásticas se reblandecen con la aplicación de calor y pueden ser reamoldadas mediante la aplicación de una temperatura y presión adecuada. Aunque su proceso de producción limita su uso en compuestos de fibras largas, están indicadas en aquellos casos donde es necesario mucho volumen con bajo coste. Las matrices termoplásticas más utilizadas son las de aramida y poliuretano. También es de uso muy frecuente la Polieteretercetona (PEEK).

Matrices termoestables

Las matrices termoestables son materiales que polimerizan durante su fabricación y no se reblandecen con el calor. El estado líquido que presentan estos materiales antes del proceso de curado los hace idóneos para la producción de laminados con fibras largas. Las matrices termoestables más usadas son las siguientes [12]:

- **Poliéster:** Es utilizada principalmente con fibras de vidrio y permite aplicaciones que pueden alcanzar hasta los 100 °C;
- **Resinas epoxi:** Son de un precio más elevado pero son resistentes a la humedad, tienen menos variaciones dimensionales durante el curado y aguantan temperaturas de hasta 175 °C;
- **Poliamida:** Tienen un proceso de producción mucho más complejo pero permiten aplicaciones que alcancen temperaturas de hasta 300 °C.

En la Tabla 3.3 se pueden apreciar las propiedades y características de algunas matrices usadas en polímeros reforzados.

MATERIAL	DENSIDAD ρ (g/cm ³)	MÓDULO ELÁSTICO E (GPa)	RESIST. A TRACCIÓN S_t (MPa)	ALARGAMIENTO (%)	COEF. POISSON ν	MÓDULO ESPECIF. (E/ρ)	RESISTENCIA ESPECIF. (S_t/ρ)
TERMOPLÁSTICOS							
PEEK *	1,30-1,32	3,24	100,00	50,00	0,40	2,50	76,30
PPS **	1,36	3,30	82,70	4,00	-	2,40	60,80
TERMOESTABLES							
Poliéster	1,10-1,40	2,10-3,40	34,50-103,50	1,00-5,00	-	2,20	55,20
Epoxi	1,38	4,60	58,60	-	0,36	5,50	74,00
Poliamida	1,46	3,50	103,00	-	0,35	2,40	70,50

Tabla 3.3 Propiedades mecánicas de las matrices más comunes en FRP. * Producto comercial de ICL. ** Producto comercial de Philips Petroleum [14].

3.1.3. Cargas y aditivos usados en los polímeros compuestos

En la industria de los polímeros compuestos se utilizan diferentes productos que pueden ser incorporados al material compuesto para aportar características particulares o reducir los costes del compuesto [10]. Generalmente se establece la distinción entre cargas y aditivos según la cantidad utilizada, ya que las cargas siempre se utilizan en mayores cantidades que los aditivos. Las cargas se pueden dividir en dos grandes grupos: cargas reforzantes y cargas no reforzantes, que se describen a continuación.

Cargas reforzantes

Las cargas reforzantes se caracterizan por tener una geometría que reparte de forma homogénea los refuerzos de las piezas evitando de esta forma la concentración de tensiones en el compuesto [7]. La relación volumen/superficie es mínima por lo que la influencia sobre la viscosidad de la resina es mínima permitiendo así su uso en porcentajes altos [9]. Estas cargas pueden ser macizas o huecas. Las cargas más usadas son las siguientes:

- Micro esferas huecas de carbono con una densidad de 120 kg/m³ y un diámetro de 5 – 150 μm ;
- Micro esferas huecas orgánicas con una densidad de 100 – 500 kg/m³ y con un diámetro de 10 – 800 μm ;

- Micro esferas de vidrio con una densidad de 150 – 600 kg/m³ y con un diámetro de 10 – 150 µm. Estas esferas son las más utilizadas ya que son más baratas, aunque sus prestaciones son inferiores.

Cargas no reforzantes

Las cargas no reforzantes se incorporan a la resina en proporciones compatibles con las características buscadas [9]. Se pueden clasificar en:

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

Aditivos

Las sustancias empleadas en menor proporción en los FRP son los aditivos. Cada tipo de aditivo tiene, por lo general, la propiedad de intervenir en una sola característica específica, por lo que es común utilizar varios tipos conjuntamente mientras éstos sean compatibles [9]. Si se emplean demasiados aditivos al mismo tiempo se pueden modificar otras propiedades del polímero base, por lo que es conveniente limitar su número en una misma matriz. Los tipos de aditivos más empleados son los siguientes:

- Lubricantes: los lubricantes internos modifican las fuerzas de cohesión intermoleculares y los lubricantes externos se usan para reducir la adherencia a los moldes;
- Agentes antiestáticos: los agentes antiestáticos son empleados en resinas incapaces de dispersar las cargas iónicas que se pueden dar sobre la superficie del producto durante su fabricación;
- Agentes antioxidantes: los agentes antioxidantes garantizan unas prestaciones prolongadas del material frente a la acción de los rayos UV y el ozono;
- Agentes que modifican las propiedades mecánicas: estos agentes se añaden al compuesto base durante la fabricación para influir en la rigidez del compuesto;
- Agentes retardantes de fuego o ignífugos;
- Conservantes: los aditivos conservantes impiden que el material sea atacado por microorganismos o insectos;
- Pigmentos: Los pigmentos son productos insolubles en forma sólida de origen mineral u orgánico;
- Colorantes: Los colorantes son compuestos solubles al agua o disolvente orgánico. Tienen mala resistencia química;
- Pastas colorantes: las pastas colorantes son dispersiones de pigmentos en un soporte pastoso, de fácil incorporación y dispersión en la resina.

3.2. Materiales Compuestos: CFRP y GFRP

El uso de materiales compuestos con fibras de vidrio y carbono como refuerzo de estructuras de madera sigue siendo novedoso en la actualidad por sus escasas aplicaciones documentadas. Sin embargo, múltiples análisis realizados en los últimos años indican que este tipo de fibras presentan grandes ventajas para la recuperación de una estructura [4]. En el caso de las fibras de carbono su aplicación en estructuras sometidas a cargas repetitivas o fatiga es ideal puesto

que es un material cuyas propiedades mecánicas son muy poco sensibles a la aplicación de cargas cíclicas [12].

3.2.1. Características de las fibras de carbono

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

La conductividad térmica de las fibras de carbono aumenta con el incremento de la perfección del cristal y posee una estabilidad relativamente baja a la termo-oxidación [3]. Según lo los análisis termo-gravimétricos, las fibras de carbono en el aire comienzan a degradarse entre los 500 – 700 °C. Los recubrimientos de resistencia a la oxidación tales como el óxido de boro o el carburo de silicio se pueden aplicar sobre la superficie de la fibra de carbono si se desea una estabilidad más elevada [9]. Además, las fibras de carbono son anisótropas, incrementándose dicha característica al aumentar el módulo axial. El CFRP es un material heterogéneo que presenta comportamiento lineal hasta la rotura de tipo frágil [4].

Ventajas que presenta el refuerzo con fibra de carbono

La principal ventaja que presenta este refuerzo es la facilidad de manejo debido a su escaso peso. La densidad se encuentra en torno a 1,6 g/cm³, por lo que también es muy baja y se pueden encontrar productos con espesores de entre 1,2 y 1,4 mm, como son los laminados SIKA® CarboDur® E-512 y DRIZORO® COMPOSITE 1405 de las casas comerciales SIKA® y DRIZORO®, respectivamente.

El aumento de peso en la estructura reforzada es prácticamente insignificante y esto aporta otro gran aspecto positivo [3]. Sumado a todo lo anterior, estos polímeros ofrecen numerosas ventajas con respecto a los materiales convencionales en términos de ligereza, resistencia a la corrosión y flexibilidad en los procesos de fabricación [9].

Desventajas que presenta el refuerzo con fibra de carbono

La principal desventaja que presenta este sistema es su aplicación, puesto que requiere de mano de obra especializada que aplique la resina epoxi y garantice una perfecta ejecución y no se produzca la delaminación entre el refuerzo y la madera. La delaminación es un proceso en el cual el refuerzo se desprende de forma repentina para valores de tensión y deformación muy inferiores a los de rotura del material de refuerzo [7]. Por último cabe decir que este sistema de refuerzo es bastante costoso y su aplicabilidad se aleja bastante en viviendas de carácter privado.

Factores que dificultan los refuerzos con fibras de carbono

Entre los factores que dificultan la aplicación de este tipo de sistemas de refuerzo en estructuras de madera, se encuentran la falta de conocimiento de la respuesta del mismo, el bajo interés por utilizar este sistema debido a su elevado precio (aunque disminuyendo actualmente) y a su escasa disponibilidad. En los últimos años la fibra de carbono está experimentando una notable bajada de precio debido a su aumento de demanda para la aplicación en otros sectores productivos y gracias a los compuestos híbridos que incorporan fibras de vidrio o aramida [11].

3.2.2. Tipos de fibra de carbono y su fabricación

En la Tabla 3.4 se pueden apreciar las propiedades que ofrece la fibra de carbono proveniente del proceso de poliacrilonitrilo (PAN).

DESIGNACIÓN	ALTA RESISTENCIA (HR)	ALTO MÓDULO (HM)	III
Diámetro del hilo (μm)	8,00	7,00	7,00 – 8,00
Densidad (g/cm^3)	1,74 – 1,76	1,81 – 1,87	1,82
Módulo elástico (GPa)	230,00	390,00	290,00
Resistencia a la tracción (MPa)	2600,00 – 5000,00	2100,00 – 2700,00	3100,00
Alargamiento (%)	2,00	0,70	1,10
Módulo específico	130,00	210,00	160,00
Coef. expansión térmica ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	2,56	2,56	2,56

Tabla 3.4 Propiedades de las diferentes fibras de carbono provenientes de PAN [9].

La fabricación de las fibras de carbono se lleva a cabo mediante pirolisis controlada y ciclización de los precursores de fibras orgánicas. Los precursores más comunes son los de poliacrilonitrilo (PAN), el alquitrán y el rayón [9]. Los dos primeros son los más utilizados. En las técnicas de procesamiento pueden distinguirse las siguientes etapas:

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

Los filamentos de carbono tienen un diámetro que oscila entre 5 – 8 μm y están combinados en mechas que contienen entre 5000 y 12000 filamentos. Estas mechas pueden retorcerse en hilos y formar tejidos, similares a la fibra de vidrio [9].

La ubicación del refuerzo de fibra de carbono responde a la deficiencia que se genera en las zonas de tracción de las piezas. Su colocación deberá ir en la zona inferior del elemento. La resistencia a tracción de las fibras de carbono puede alcanzar los 28000 kg/cm^2 , muy superior a la resistencia que tiene el acero, 3000 kg/cm^2 [4].

3.2.3. Características de las fibras de vidrio

Los rasgos distintivos del vidrio son, a grandes rasgos, su fragilidad, transparencia y también su alta dureza. Es maleable solo en estado de fundición, a unos 1250 °C. Está compuesto por sílice (la arena y el cuarzo poseen vidrio en su composición), por cal y por carbonato de sodio.

La fibra de vidrio es el resultado de la unión de una malla de vidrio con una matriz de resina epoxi, que al principio se aplica en forma líquida y posteriormente endurece, pudiendo conformar infinidad de formas distintas. Las principales propiedades de la fibra de vidrio son las siguientes:

- Resistencia química. La resina es un componente de la fibra de vidrio que la hace resistente ante la erosión química y del medio ambiente. Como norma general la fibra de vidrio no se pudre ni deteriora por efectos de ácidos o reacciones químicas, exceptuando el ácido fluorhídrico y el fosfórico;
- Peso ligero. Al igual que con otro tipo de materiales compuesto, el peso específico de la fibra de vidrio es muy reducido, haciendo, por un lado, que sea muy versátil y manejable en obra, y por otro un perfecto candidato para realizar refuerzos estructurales ya que no aumenta apenas la carga en la estructura;
- Aislamiento eléctrico. La fibra de vidrio no conduce la electricidad;
- Aislamiento térmico. Tiene un bajo coeficiente de expansión térmica y conductividad térmica relativamente alta. Esto hace que disipe el calor rápidamente;
- Económico. Es un material con una gran ventaja económica sobre otros tipos de materiales compuestos por fibras.

3.2.4. Tipos de fibra de vidrio y su fabricación

En la Tabla 3.5 se pueden observar las principales características de las fibras de vidrio de clase E y clase S-2.

TIPO DE FIBRA	VIDRIO CLASE E	VIDRIO CLASE S-2
Tensión de rotura (MPa)	3445	4890
Esfuerzo de compresión (MPa)	1080	1600
Densidad (kg/m ³)	2580	2460
Dilatación térmica (μm/m°C)	5,4	2,9
Tª de ablandamiento (°C)	846	1056

Tabla 3.5 Características de las fibras de vidrio clase E y S-2.

El proceso de fabricación de la fibra de vidrio se hace principalmente por fundición. Para este proceso primero debe fundirse el material, produciendo vidrio líquido que posteriormente se hace pasar por una malla con orificios muy finos (entre 4 y 6 μm) generando hebras que serán las que posteriormente se entrelazarán para formar el producto deseado: tejidos de fibra de vidrio (en múltiples direcciones); varillas; piezas específicas; etc. La fibra de vidrio, aparte de en la construcción, es un producto ampliamente utilizado en el ámbito aeroespacial y automovilístico.

3.3.Caracterización de materiales de refuerzo utilizados en este Proyecto

En los ensayos realizados en este Proyecto se ha utilizado un laminado CFRP con dos anchos diferentes, dos tipos de tejido de fibra de carbono, un tipo de resina y un tipo de imprimación. Estos materiales pertenecen a la casa comercial colaboradora DRIZORO S.A.U. cuyos productos y características se describen a continuación, así como su nomenclatura utilizada en este Proyecto.

3.3.1.Laminado CFRP

El laminado es un polímero armado con fibras de carbono con matriz epoxi diseñado para el refuerzo de estructuras [3]. Cabe destacar la importancia de la temperatura de almacenamiento, que debe permanecer en un rango de entre 5 °C y 40 °C y evitar su exposición al sol. El uso estructural de este tipo de refuerzo presenta una elevada resistencia sin sobrecargar la estructura a reforzar. Al contrario sucede con refuerzos con perfiles metálicos u hormigón [3]. Otra característica esencial que presenta el laminado es su nulo mantenimiento. En concreto, 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 (Figura 3.3). En la Tabla 3.6 se aprecian las propiedades del laminado (En diferentes anchos) utilizado en este Proyecto.



Figura 3.3 Laminado DRIZORO® COMPOSITE 1410.

	DRIZORO® COMPOSITE 1405	DRIZORO® COMPOSITE 1410
Ancho (mm)	50	100
Espesor (mm)	1,4	1,4
Sección (mm ²)	70	140
Módulo de elasticidad E (N/mm ²)	165000	165000
Densidad (kg/m ³)	-	-
Contenido volumétrico de fibra (%)	68	68
Resistencia última característica (N/mm ²)	1320	1320
Elongación de rotura (%)	1,60	1,60

Tabla 3.6 Propiedades de los laminados de DRIZORO S.A.U. [23].

3.3.2. Tejido CFRP

El tejido de fibra de carbono es un material de muy compleja elaboración y elevado coste. Está compuesto de átomos de carbono que forman fibras muy delgadas, de unos 5 a 10 μm , que se trenzan entre sí para formar hilos muy resistentes y ligeros. Estos hilos serán los que se junten con otros cientos de hilos, tejidos entre sí de diferentes formas y direcciones para formar una tela o tejido CFRP. Al igual que el laminado, el tejido una vez conformado con su correspondiente matriz requerirá de un nulo mantenimiento durante el resto de vida útil de la estructura reforzada. DRIZORO S.A.U. ofrece tejidos a base de fibras de carbono, tanto unidireccionales como bidireccionales (Figura 3.4). Su aplicación en seco o en húmedo dota al elemento reforzado de una mayor capacidad portante a flexión y cortante. En este Proyecto se utilizaron dos tipos de tejidos diferentes. Unidireccional y bidireccional, cuyas propiedades se pueden observar en la Tabla 3.7.



Figura 3.4 Tejido CFRP bidireccional DRIZORO® CARBOMESH 210.

	DRIZORO® WRAP 200	DRIZORO® CARBOMESH 210
Orientación	0° unidireccional	0° / 90° ortogonal/bidireccional
Módulo de elasticidad E (N/mm²)	230000	230000
Espesor de diseño de tejido (mm)	0,111	0,060
Resistencia a tracción de la fibra (N/mm²)	3400	4900
Elongación de rotura de la fibra (%)	-	2,1
Gramaje carbono (g/m²)	-	210 ± 5
Densidad (g/cm³)	-	1,8 ± 5

Tabla 3.7 Propiedades del tejido de DRIZORO S.A.U. [23].

3.3.3. Varillas corrugadas GFRP

Las varillas corrugadas de fibra de vidrio se forman a partir de un perfil rígido tipo varilla redonda con la inclusión de un hilo o filamento de fibra de vidrio que una vez desmoldado adquiere la forma rugosa o corrugada para un mejor agarre o adherencia al soporte [23]. En la Figura 3.5 se pueden observar varillas corrugadas de fibra de vidrio y de diferentes diámetros.



Figura 3.5 Varillas corrugadas de fibra de vidrio.

Las varillas corrugadas de fibra de vidrio utilizadas en este Proyecto fueron varillas de 8 mm de diámetro y sus propiedades se describen en la Tabla 3.8.

PROPIEDADES FÍSICAS		
Peso específico	(kg/m ³)	1650-1850
Contenido en vidrio	(%)	50-70
Absorción de agua	(% peso)	0,5-1,0
Coefficiente de dilatación lineal	(°C ⁻¹)	15-17
PROPIEDADES MECÁNICAS		
Resistencia a la flexión	(Mpa)	300-600
Resistencia a la tracción	(Mpa)	400-650
Resistencia a la compresión	(Mpa)	150-300
Módulo de elasticidad	(Mpa)	15000 - 32000
Resistencia al impacto	(daN cm/cm ²)	150
Dureza	(barcol)	50
PROPIEDADES ELÉCTRICAS		
Constante dieléctrica a 50 Hz		4 - 6
Rigidez dieléctrica	(kV/mm)	3 - 7
Factor de pérdida a 50 Hz	(tg)	0,03 - 0,04
Resistencia al aislamiento superior	(Ohms)	10 ¹⁰ - 10 ¹³
Clase de aislamiento		F - H
PROPIEDADES TÉRMICAS		
Conductividad térmica	Kcal/Mh°C	0,2 - 0,3
Resistencia a la temperatura	°C	-65 - +180

Tabla 3.8 Principales propiedades de las varillas de fibra de vidrio.

Como se puede observar en la Tabla 3.8 las varillas corrugadas de fibra de vidrio presentan unas excelentes propiedades físicas, mecánicas, térmicas y eléctricas que las confieren como un producto muy versátil, destacando entre ellas las siguientes:

- Gran rigidez;
- Excelente resistencia a agentes químicos;
- Mantenimiento nulo;
- Máxima durabilidad del producto;
- Diversos campos de aplicación y usos;
- Posibilidad de fabricación a base de resinas ortoftálicas, isoftálicas, vinylester, ignífugas, autoextinguibles o epoxi;
- Posibilidad de fabricación de diferentes colores.

3.3.4. Resina

Para los ensayos de refuerzo de vigas se usó una de las resinas suministrada por la casa comercial DRIZORO S.A.U. que se denominó como resina Tipo 4. Esta es un adhesivo que se conforma a partir de dos componentes: resina epoxi de dos componentes y cargas, como se observa en la Figura 3.6. La mezcla y elaboración se debe realizar con una batidora a bajas revoluciones durante al menos 3 minutos.



Figura 3.6 Resina Tipo 4.

Las propiedades físico-mecánicas de la resina Tipo 4 se expresan en la Tabla 3.9, tomándose como referencia una temperatura de 15 °C para todas las propiedades excepto para el módulo de elasticidad que se tomó una temperatura de referencia de 23 °C.

RESINA TIPO 4	
Densidad ρ (g/cm ³)	-
Resistencia a tracción (N/mm ²)	≥ 29
Resistencia a cortante (N/mm ²)	$\geq 9,8$
Módulo de elasticidad a tracción (N/mm ²)	-
Adherencia (N/mm ²)	$\geq 2,5$
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 3.9 Propiedades físicas y mecánicas de la resina Tipo 4 [23].

La resina Tipo 4 tiene una consistencia notablemente más fluida que otras, lo que hace que su aplicación sea más sencilla y rápida generalmente. Por otro lado la excesiva fluidez puede suponer un problema a la hora de aplicarla sobre elementos horizontales.

Además de la resina tipo 4, para la realización de los ensayos Pull-Out se contó con un anclaje químico INDEX® MOVESE® y una resina epoxídica CTS® EPO 150® que se denominaron resina tipo 5 y Tipo 6 respectivamente. La resina Tipo 5 es un anclaje químico compuesto por mortero vinylester sin estireno para fijaciones en hormigón, ladrillos huecos y ladrillos macizos de armaduras y espárragos de acero (Figura 3.7) y se caracteriza por una alta resistencia mecánica y resistencia a la hidrólisis alcalina, por lo que es apropiado en el uso de fijaciones de larga duración en las construcciones. Las resistencias de la resina Tipo 5 se expresan en la Tabla 3.10. Teniendo en cuenta que el diámetro de la barra fijada es 8 mm y el material base es hormigón.



Figura 3.7 Resina Tipo 5 INDEX MOVESE.

			RESISTENCIA CARACTERÍSTICA (N_{RK} , V_{RK})	RESISTENCIA DE CÁLCULO (N_{RD} , V_{RD})	CARGAS MÁXIMAS RECOMENDADAS (N_{RECOM} , V_{RECOM})	
Acero Cincado	Tracción	$h_{ef,min} = 8d$	kN	17,6	9,8	7,0
		Espárrago estándar	kN	<u>18,0</u>	<u>12,0</u>	<u>8,5</u>
		$h_{ef,max} = 12d$	kN	<u>18,0</u>	<u>12,0</u>	<u>8,5</u>
	Cortadura	Todas profundidades	kN	<u>9,0</u>	<u>7,2</u>	<u>5,1</u>
Acero inoxidable	Tracción	$h_{ef,min} = 8d$	kN	17,6	12,2	7,0
		Espárrago estándar	kN	22,1	12,2	8,7
		$h_{ef,max} = 12d$	kN	<u>26,0</u>	<u>13,6</u>	<u>9,7</u>
	Cortadura	Todas profundidades	kN	<u>13,0</u>	<u>8,3</u>	<u>5,9</u>

Los valores subrayados indican fallo del acero, el resto indica fallo por extracción.

Tabla 3.10 Resistencia de la resina Tipo 5 para barras de 8 mm de diámetro fijadas en hormigón.

Para la aplicación de esta resina es necesaria una pistola de aplicación y una cánula mezcladora. Su aplicación y manejo es mucho más sencillo que el de otro tipo de resinas. Hay que prestar mucha atención a la conservación de los cartuchos de resina, que deben estar en un lugar limpio y seco, sin contacto con el sol y a una temperatura de entre 5 °C y 24 °C.

Por otro lado, la resina Tipo 6 es una resina epoxídica líquida transparente de muy baja viscosidad para operaciones de restauración de estructuras dañadas en hormigón, piedra, ladrillo y madera, mediante inyecciones o anclado con espigas de barras de fibra de vidrio. Este producto está hecho a base de resinas epoxídicas fluidas reticulables en frío mediante un endurecedor a base de cicloalifáticas que produce un sistema de elevada resistencia altamente adhesivo (Figura 3.8). Las características técnicas de la resina Tipo 6 se expresan en la Tabla 3.11.



Figura 3.8 Resina Tipo 6 CTS® EPO 150® y endurecedor CTS® K 151®.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	
Aspecto	Líquido transparente
Peso específico a 25 °C (kg/m ³)	1040
Tiempo de trabajo de 200 g a 25 °C (min)	30 – 50
Resistencia a la tracción (N/mm ²)	40
Resistencia a la flexión (N/mm ²)	100
Resistencia a la compresión (N/mm ²)	122
Viscosidad del sistema (Pa-s)	500 – 800

Tabla 3.11 Datos técnicos de la resina Tipo 6 CTS® EPO 150®.

Ambos componentes se unen en una relación de 4:1 de resina epoxídica pura EPO 150 y endurecedor K151 respectivamente. La mezcla debe hacerse con batidora a bajas revoluciones para evitar la formación de burbujas de aire y se puede aplicar mediante jeringas manuales o sistemas mecánicos de inyección. El producto debe almacenarse en lugar seco y bien ventilado, lejos de fuentes de calor y de la luz solar directa y a una temperatura de entre 5 y 35 °C.

3.3.5. Imprimación

De los ensayos de adherencia realizados en el proyecto REVMAC se comprobó que la aplicación previa de una imprimación mejoraba notablemente los resultados. La aplicación de la capa de imprimación ha de ser lo más meticulosa posible, prestando especial atención a que la superficie se encuentre limpia y evitando la aparición de burbujas de aire. Para todas las vigas ensayadas

se ha utilizado la misma imprimación, proporcionada por la casa comercial DRIZORO S.A.U. En la Tabla 3.12 se aprecian los datos técnicos de la resina de imprimación.

IMPRIMACIÓN	
Peso específico (kg/m ³)	1100 ± 100
Viscosidad (mPa·s)	600 – 700
Tiempo de secado (h)	4 – 5
Tiempo hasta segunda capa (h)	14 – 15
Tiempo de curado (d)	7
Proporción de los componentes en peso	4 : 1
Rendimiento (kg/m ²)	0,25 – 0,50

Tabla 3.12 Datos técnicos de la resina de imprimación [23].

La resina de imprimación de la casa comercial DRIZORO S.A.U. es un bicomponente, es decir, el componente A es una resina y el componente B es un endurecedor, como se muestra en la Figura 3.9. La mezcla debe hacerse igualmente con batidora a bajas revoluciones para evitar la formación de burbujas de aire y conseguir una mezcla lo más homogénea posible.



Figura 3.9 Componentes de la imprimación MAXPRIMER® C-S.

Capítulo 4 Refuerzo trenzado (BR)

En este capítulo se describe la elaboración de las vigas reforzadas que posteriormente se ensayaron a flexión, empleándose tanto el laminado como el tejido de fibra de carbono de la casa comercial DRIZORO S.A.U. El laminado de CFRP se adhirió a la cara inferior, cubriendo parcialmente el ancho total de las vigas, la cual es la que mayor sollicitación a tracción alcanza. El tejido de CFRP por otro lado se colocó a modo de vendaje transversal cubriendo la cara inferior y los laterales de la viga para prevenir el fallo a cortante y conferir ductilidad al elemento.

4.1. Elaboración

El proceso de elaboración del refuerzo trenzado BR es prácticamente idéntico para las vigas de pequeña y gran escuadría y es el que se describe a continuación. En la Figura 4.1 se aprecia el diagrama del proceso de elaboración que se detalla a continuación.

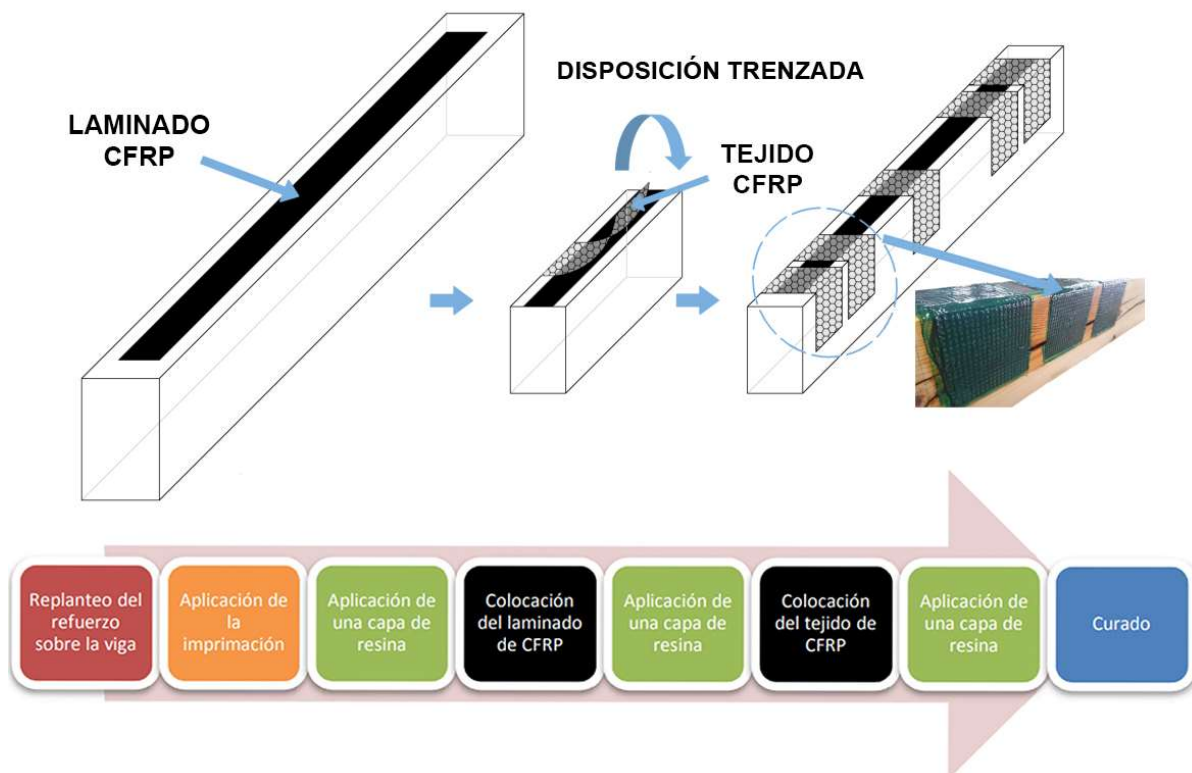


Figura 4.1 Diagrama del proceso de elaboración del refuerzo trenzado BR [2].

Aunque el proceso de elaboración sea idéntico para toda tipología y tamaño de viga, los tiempos de ejecución y la cantidad de los materiales de CFRP y resinas necesarias para la elaboración, son diferentes.

4.1.1. Replanteo del refuerzo sobre la viga

En primer lugar se deben inspeccionar las superficies donde se va a aplicar el refuerzo para detectar posibles imperfecciones. Como se observa en la Figura 4.2, se realizó un cepillado y limpiado de la superficie para su regularización y se eliminaron las partes sueltas o disgregadas.



Figura 4.2 Cepillado de la viga para su regularización.

4.1.2. Aplicación de la imprimación

Antes de iniciar el proceso de refuerzo se cortó el laminado y el tejido de CFRP en las dimensiones adecuadas y se preparó según las recomendaciones del fabricante. La imprimación consta de dos componentes principales, el agente principal y el endurecedor, realizándose la mezcla según la dosis recomendada. Por último, tras la aplicación de la imprimación sobre la superficie (Figura 4.3) de refuerzo se dejó un tiempo de secado según indicaciones del fabricante.



Figura 4.3 Aplicación de la imprimación sobre viga de gran cuadría.

4.1.3. Aplicación de la resina

La resina epoxi se suministró en dos componentes y al igual que ocurrió con el proceso de imprimación, el proceso de mezclado se realizó en las proporciones que marcan las fichas técnicas y siempre teniendo en cuenta el tiempo de trabajo de la resina para optimizar al máximo el material. En la Figura 4.4 se aprecia una viga con la resina ya extendida y preparada para recibir el laminado de CFRP.



Figura 4.4 Aplicación de la resina sobre viga de gran escuadría.

4.1.4. Colocación del laminado de CFRP

Una vez aplicada la resina sobre el soporte se aplicó una capa sobre el laminado con ayuda de un dosificador como el de la Figura 4.5, garantizando un espesor continuo y uniforme de resina sobre el laminado de CFRP. Una vez colocado el laminado se aplicó la presión necesaria para asegurar la correcta adhesión entre el laminado y la madera.



Figura 4.5 Dosificador de resina para el laminado CFRP.

4.1.5. Colocación del tejido de CFRP

La aplicación de la resina para el tejido de CFRP se realizó siguiendo el mismo procedimiento que para el laminado. En primer lugar se replantearon las diferentes zonas donde iría el tejido, marcándolas con cinta como en los pasos anteriores y posteriormente se aplicó la resina con herramientas adecuadas. Una vez que el tejido estaba preparado y la resina elaborada, con el fin de optimizar los tiempos de elaboración, se fue intercalando la aplicación de la resina y la colocación de las bandas de tejido de CFRP. En la Figura 4.6 se puede observar la colocación de una de las bandas de refuerzo con tejido de CFRP.



Figura 4.6 Colocación del tejido CFRP sobre una viga de pequeña escuadría.

Para finalizar el proceso y consolidar la fijación del tejido y el laminado de CFRP y la viga de madera se dispuso una última capa sobre las diferentes bandas de tejido a lo largo de toda la viga obteniendo el resultado final del refuerzo. Posteriormente se dejó secar y curar todo el sistema según indicaciones del fabricante.

4.2.Comparativa entre los distintos tipos de vigas

Con el fin de obtener un estudio riguroso, se realizó una comparativa de las superficies de refuerzo para cada tipología y tamaño de viga. También se hizo una comparación entre rendimientos y tiempos de aplicación de la imprimación y la resina necesarias para reforzar las vigas, teniendo en cuenta los valores por metro lineal de viga reforzada. La Tabla 4.1 muestra los cálculos realizados de superficie de refuerzo para cada tamaño de viga, así como para las vigas sin y con rotura previa.

		V. PEQUEÑA ESCUADRÍA	V. GRAN ESCUADRÍA SIN ROTURA PREVIA	V. GRAN ESCUADRÍA CON ROTURA PREVIA*
Longitud de las vigas reforzadas (mm)		1.300	4.500	
Laminado CFRP	Longitud de refuerzo (mm)	1.000	4.000	
	Ancho de refuerzo (mm)	45	100	
	Área de refuerzo (mm²)	45.000	400.000	
	Área d refuerzo por m³ de viga (m²/m³)	3,21	2,69	
Tejido CFRP	Nº de bandas de tejido	5	15	16-17
	Longitud de banda de refuerzo (mm)	225	430	475**
	Ancho de banda de refuerzo (mm)	100	150	175**
	Área de refuerzo (mm²)	112.500	967.500	1.371.562**
	Área d refuerzo por m³ de viga (m²/m³)	8,04	6,51	9,23

* Las vigas de gran escuadría con rotura previa disponen de una configuración de refuerzo personalizada para cada una.

** Valores medios.

Tabla 4.1 Superficie de refuerzo para cada tipología de viga.

Se aprecia una reducción del área de refuerzo del laminado de CFRP por m³ del 16,19% en las vigas de gran escuadría con respecto las de pequeña escuadría. En cuanto al tejido de CFRP se puede observar una reducción del 19,03% y aumento del 14,80% para las vigas de gran escuadría sin rotura previa y con rotura previa, respectivamente. En la Tabla 4.2 se muestra la comparativa en tanto por ciento de rendimientos y tiempos de aplicación de la imprimación y de las resinas para cada tipo de viga, tomando como referencia las vigas de 1,3 m.

REFUERZO BR		V. PEQUEÑA ESCUADRÍA		V. GRAN ESCUADRÍA CON ROTURA PREVIA	V. GRAN ESCUADRÍA SIN ROTURA PREVIA
		BR-U	BR-B		
Rendimientos (kg/m ²)	Imprimación	100 %		104%	105%
	Resina	101%	100%	178%	181%
Tiempos de aplicación (min/m ²)	Imprimación	100%		70%	67%
	Resina	121%	100%	50%	59%

Tabla 4.2 Comparativa de rendimientos y tiempos de aplicación de imprimación y resina para cada tipo de viga.

Capítulo 5 Ensayos a flexión

A continuación se describen los diferentes tipos de refuerzo para cada tipología de viga (Figura 4.1) así como la metodología e instrumentación usada en los ensayos a flexión. Estos ensayos se realizaron en el Laboratorio de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación en el caso de vigas de pequeña escuadría y en el Laboratorio de Mecánica de Estructuras de la Escuela Técnica Superior de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Granada en el caso de las vigas de gran tamaño.

5.1. Matrices de ensayo

5.1.1. Vigas de pequeña escuadría – 1,30m

Aunque las vigas de pequeña escuadría tienen una longitud de 1300 mm el refuerzo de laminado CFRP ocupó 1000 mm, dejando 150 mm libres a cada extremo de las mismas para los apoyos de la maquinaria de ensayo. Tal y como se aprecia en la Figura 5.1, se obtuvieron unas condiciones similares a las que se darían en un refuerzo real de una viga ya colocada en la estructura con ambos extremos empotrados. Como se observa en la Tabla 5.1, el refuerzo se aplicó sobre un total de 6 vigas y 4 vigas fueron ensayadas sin refuerzo como elementos de control, además se puede apreciar la configuración de los distintos tipos de refuerzo que se asignaron a las vigas y que se explican posteriormente.

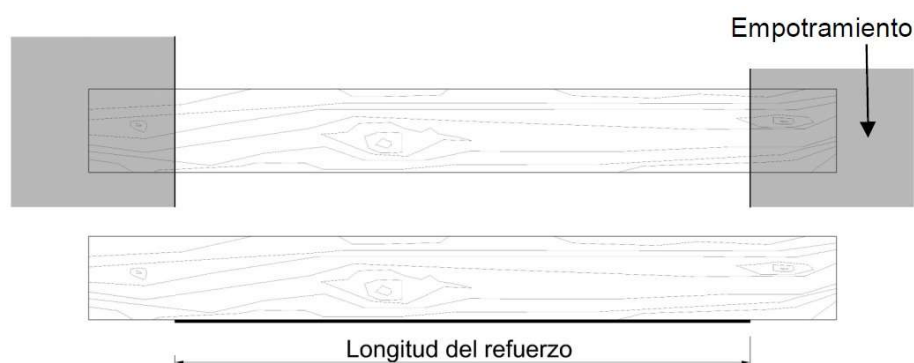


Figura 5.1 Arriba: representación de una viga con los extremos empotrados. Abajo: disposición del refuerzo con respecto a la longitud de la viga.

REFUERZO	CFRP	DESCRIPCIÓN	TIPO DE RESINA	NÚMERO DE ESPECÍMENES
NR	-	No Reforzada	-	4
BR-U	DRIZORO® COMPOSITE 1405 + DRIZORO® WRAP 200.	<i>Braided Reinforcement - Unidirectional</i>	4	3
BR-B	DRIZORO® COMPOSITE 1405 + DRIZORO® CARBOMESH 210.	<i>Braided Reinforcement - Bidirectional</i>	4	3

Tabla 5.1 Características y nomenclatura de los tipos de refuerzo de vigas de pequeña escuadría.

En la Tabla 5.2 se puede observar la asignación de cada tipo de refuerzo a las vigas clasificadas visualmente. Esta distribución se hizo de manera aleatoria teniendo en cuenta que en cada grupo hubiese al menos 3 vigas, y que al menos una de ellas fuera catalogada como MEG. En la nomenclatura de las vigas según catalogación se añadió una R al número de viga para indicar que se clasificó como Rechazo según la normativa.

	NOMENCLATURA	Nº DE VIGA SEGÚN CATALOGACIÓN
NR	NR-1	6R
	NR-2	2R
	NR-3	1
	NR-4	45R
BR-U	BR-U-1	27
	BR-U-2	36R
	BR-U-3	51R
BR-B	BR-B-1	19
	BR-B-2	33R
	BR-B-3	34R

Tabla 5.2 Asignación de los distintos tipos de refuerzos a las vigas de pequeña escuadría.

Vigas sin refuerzo

Como se ha comentado anteriormente, este grupo lo componen un total de 4 vigas y su objetivo es poder determinar la efectividad del refuerzo. En la Figura 5.2 se puede observar una de las vigas sin reforzar.

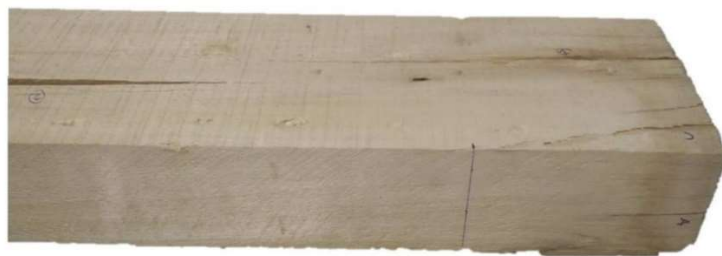


Figura 5.2 Fotografía de una viga de pequeña escuadría sin reforzar

Vigas con refuerzo mixto trenzado BR

El refuerzo mixto trenzado se configuró con un refuerzo longitudinal parcial que ocupó 45 mm de los 75 mm que tenía de ancho cada viga de pequeña escuadría (Figura 5.3). En ensayos previos [2] se corroboró que la colocación de un ancho total o parcial sobre la base de la viga no presentaba una gran variedad en cuanto a resistencia mecánica se refiere, con lo cual se decidió disponer un ancho parcial debido al importante ahorro de material que supone

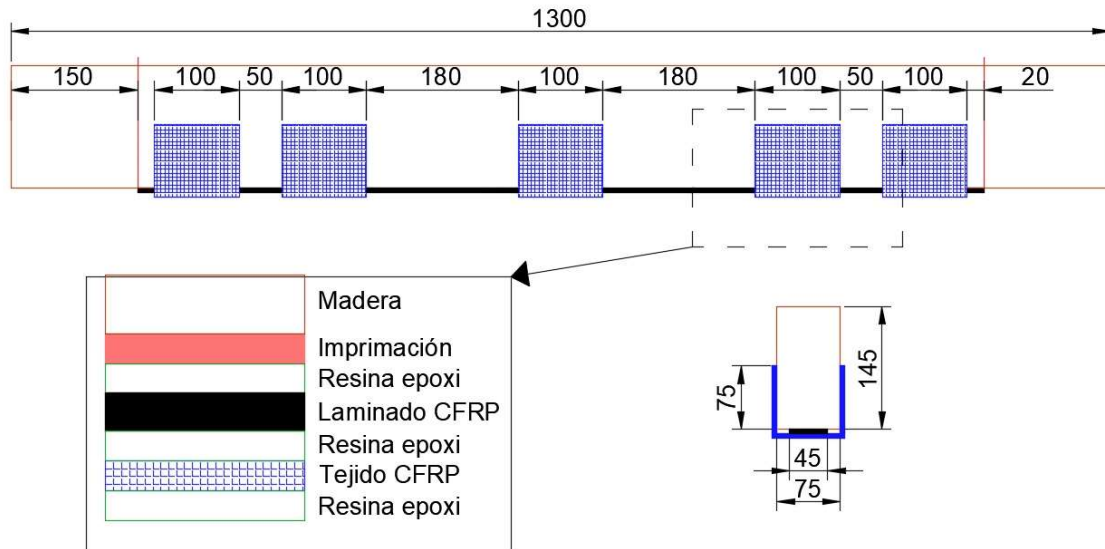


Figura 5.3 Disposición de los refuerzos mixtos trenzados en vigas de pequeña escuadría. Cotas en mm.

Con esta configuración de refuerzo se obtuvieron 2 grupos diferentes, según el tipo de tejido que se empleó para cubrir la viga transversalmente: refuerzo trenzado con tejido unidireccional de Drizoro (BR-U) y refuerzo trenzado con tejido bidireccional de Drizoro (BR-B).

BR-U

De sus siglas en inglés *Braided Reinforcement– Unidirectiona*, este refuerzo se elaboró a base de un laminado DRIZORO® COMPOSITE 1405, tejido DRIZORO® WRAP 200 y la resina Tipo 4, reforzándose 3 vigas, como se puede observar en la Figura 5.4.

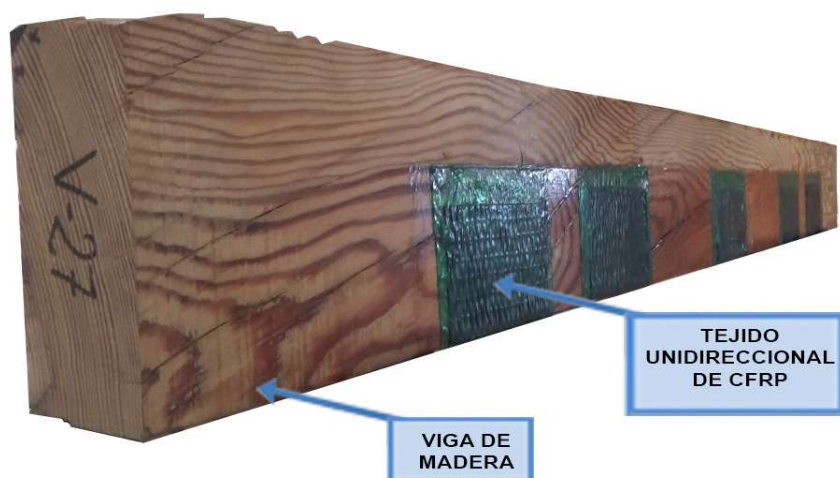


Figura 5.4 Fotografía de una viga de pequeña escuadría con el refuerzo BR-U.

BR-B

De sus siglas en inglés *Braided Reinforcement– Bidirectional*, este refuerzo se elaboró a base de un laminado DRIZORO® COMPOSITE 1405, tejido DRIZORO® CARBOMESH 210 y la resina Tipo 4, reforzándose 3 vigas, como se aprecia en la Figura 5.5.

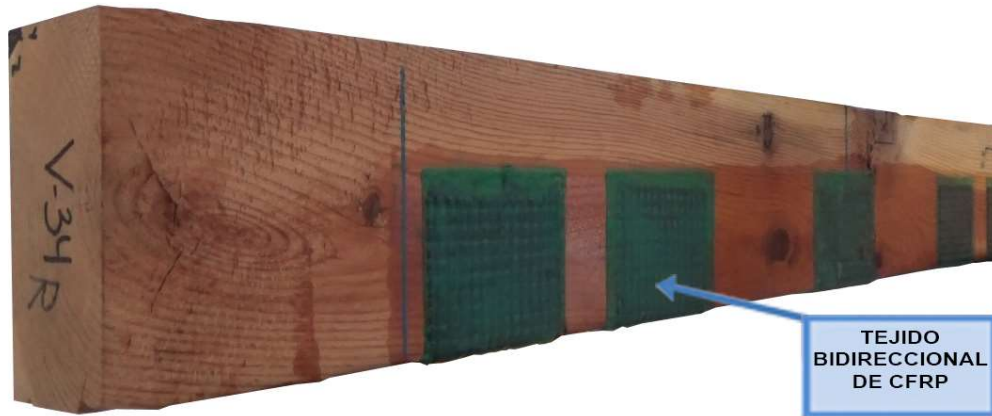


Figura 5.5 Fotografía de una viga de pequeña escuadría con el refuerzo BR-B.

5.1.2. Vigas de gran escuadría sin rotura previa – 4,50m

Las vigas de gran escuadría tenían una longitud de 4500 mm, pero al igual que en el caso de las vigas de pequeña escuadría y como se observa en la Figura 5.1, la longitud total del refuerzo fue de 4000 mm, dejando 250 mm a cada lado para el correcto apoyo de la viga sobre la máquina de ensayos. Como se observa en la Tabla 5.3, en el caso de las vigas de 4,5 m cada grupo de vigas constó de 2 especímenes, debido a la alta complejidad, costes de elaboración y mecanización de vigas de este formato. Así mismo se seleccionó de los ensayos en vigas de 1300 mm el tejido bidireccional como tejido a usar en las vigas de gran formato, debido a que se obtuvieron mejores resultados mecánicos que con las vigas con tejido unidireccional, como se detallará en el Capítulo 6.

REFUERZO	CFRP	DESCRIPCIÓN	TIPO DE RESINA	NÚMERO DE ESPECÍMENES
NR	-	No reforzada	-	2
BR	DRIZORO® COMPOSITE 1410 + DRIZORO® CARBOMESH 210.	<i>Braided Reinforcement</i>	4	2

Tabla 5.3 Características y nomenclatura de refuerzos de vigas de gran escuadría sin rotura previa.

En la Tabla 5.4 se puede observar la asignación de cada grupo, dependiendo de si tienen o no refuerzo, a las vigas clasificadas visualmente y con la nomenclatura según se realizó durante su extracción de la cubierta.

	NOMENCLATURA	Nº DE VIGA TRAS EXTRACCIÓN DE LA CUBIERTA
NR	NR-1	P 28 W
	NR-2	SN 6
BR	BR-1	P 10 W
	BR-2	P 48 E

Tabla 5.4 Asignación de los distintos tipos de refuerzos a las vigas de gran escuadría.

Vigas sin refuerzo

Como se ha comentado anteriormente, se reservaron 2 vigas sin reforzar, las cuales sirvieron como elementos de control. En la Figura 5.6 se puede observar el grupo de vigas sin reforzar acopiado para su traslado.



Figura 5.6 Fotografía de las vigas de gran escuadría acopiadas y sin reforzar.

Vigas con refuerzo mixto trenzado BR

Las vigas de gran escuadría siguieron el mismo proceso de elaboración y aplicación de refuerzo que se llevó a cabo para las de pequeña escuadría, pero con la configuración que se observa en la Figura 5.7. El refuerzo longitudinal con laminado de CFRP tenía un ancho de 100 mm y se dispuso de forma parcial en la cara inferior de las vigas (150 mm de ancho), cubriendo aproximadamente el mismo porcentaje que en las vigas de pequeña escuadría.

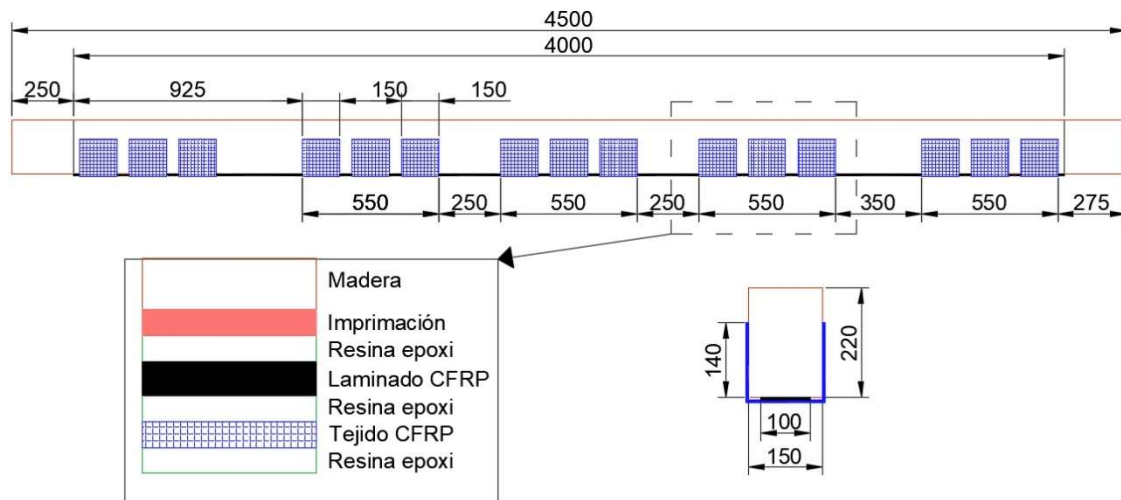


Figura 5.7 Disposición de los refuerzos mixtos trenzados en vigas de gran escuadría. Cotas en mm.

BR

De sus siglas en inglés *Braided Reinforcement* este refuerzo se elaboró a base de un laminado DRIZORO® COMPOSITE 1410, tejido DRIZORO® CARBOMESH 210 y la resina Tipo 4, reforzándose 2 vigas, como se aprecia en la Figura 5.8.

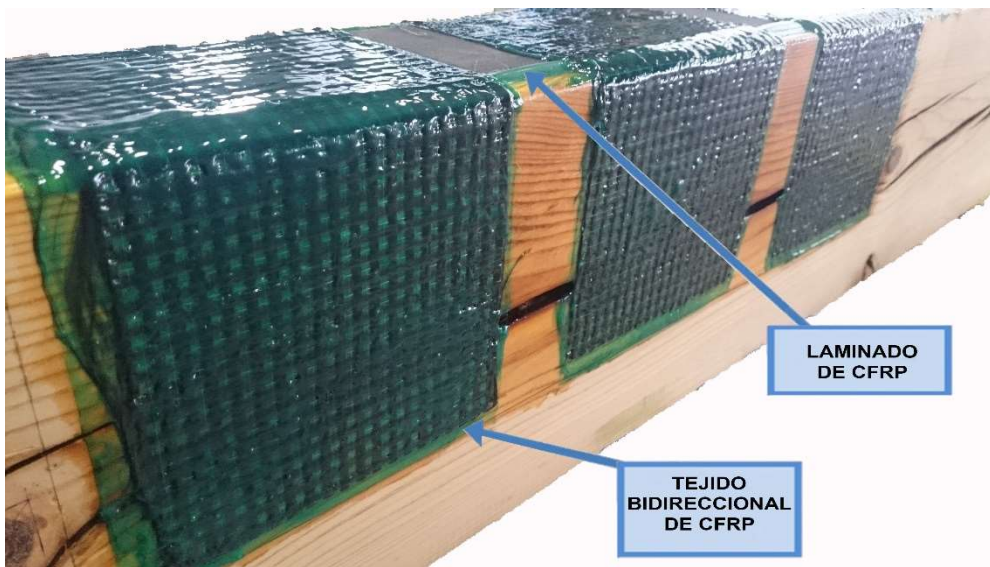


Figura 5.8 Fotografía de una viga de gran escuadría con el refuerzo BR.

5.1.3. Vigas de gran escuadría con rotura previa – 4,50m

El estudio del refuerzo para especímenes de gran escuadría finalizó con el refuerzo de 4 vigas previamente ensayadas y llevadas hasta rotura, por lo que llegaron a su capacidad máxima a flexión con un importante daño final (grandes grietas). Las vigas que volvieron a ser reforzadas fueron las 2 del grupo NR y otras 2 con una configuración de refuerzo LR (*Longitudinal reinforcement*), que se encuentran descritas en el Proyecto Final de Grado de Elías Berbel Román [3]. En la Tabla 5.5 se aprecian las características y nomenclatura del refuerzo y en la Tabla 5.6 se puede observar la asignación de refuerzos a las vigas que fueron previamente ensayadas con una nueva nomenclatura para clarificar los resultados posteriormente.

REFUERZO	CFRP	DESCRIPCIÓN	TIPO DE RESINA	NÚMERO DE ESPECÍMENES
BR-r	DRIZORO® COMPOSITE 1410 + DRIZORO® CARBOMESH 210.	<i>Braided Re-reinforcement</i>	4	4

Tabla 5.5 Características y nomenclatura de refuerzos de vigas de gran escuadría con rotura previa.

	NOMENCLATURA	Nº DE VIGA TRAS EXTRACCIÓN DE LA CUBIERTA
BR-r	BR-r-1	SN 8
	BR-r-2	P 28 W
	BR-r-3	PN 17
	BR-r-4	SN 6

Tabla 5.6 Asignación de refuerzos de vigas de gran escuadría con rotura previa.

Antes de reforzar las vigas rotas de nuevo, se eliminó cualquier rastro del refuerzo antiguo para que este no influyese de ninguna manera en el nuevo refuerzo. La elección de las zonas de refuerzo con tejido CFRP atendió a dos criterios:

- Mantener la misma proporción de cantidad total de tejido de CFRP dispuesto en todos los elementos (necesario para una correcta comparación mecánica de resultados);
- Reforzar las zonas con mayor daño de la viga, teniendo cada viga un refuerzo personalizado.

Para la correcta aplicación del refuerzo fue necesario en algunos casos llevarlas a su posición original con ayuda de herramientas adecuadas como se observa en la Figura 5.9.



Figura 5.9 Izquierda: grieta de una viga rota. Derecha: colocación de viga rota en su posición original.

5.2.Descripción de ensayos e instrumentación

Para realizar los ensayos fue necesario hacer uso de tres equipos simultáneamente; una prensa eléctrica o hidráulica, un equipo de extensometría y cámaras de grabación. Estos equipos fueron distintos para las vigas de pequeña escuadría y para las de gran escuadría.

5.2.1.Vigas de pequeña escuadría – 1,30m

INSTRUMENTACIÓN

Para los ensayos de las vigas de pequeña escuadría se utilizó una prensa eléctrica 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 conectada a un ordenador que registró los datos de fuerza, tiempo y desplazamiento con una frecuencia de 1 Hz usando el software específico PA/MPC-2, de ICC S.A.

Se dispuso de 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.

El equipo de extensometría utilizado para obtener los datos de las deformaciones sufridas en la viga durante el ensayo fue el modelo P70 de la casa italiana CONTROLS, que proporcionó datos con una frecuencia de 0,25 Hz. En la Figura 5.10 se pueden identificar todos estos elementos y en la Figura 5.11 se aprecia la posición entre los distintos equipos.



Figura 5.10 Montaje completo de un ensayo a flexión de una viga de pequeña escuadría [2].

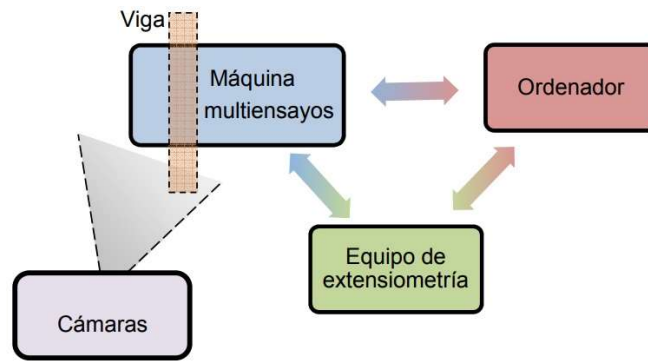


Figura 5.11 Esquema de interrelación entre los equipos utilizados para el ensayo de vigas de pequeña escuadría [2].

La colocación de las galgas extensiométricas se realizó una vez las vigas estuvieron reforzadas y curadas. Las galgas extensiométricas son unos sensores resistivos sensibles a la elongación, que pueden ser de tipo metálico, por resistencia, por capacitancia, semiconductoras y fotoeléctricas. Para este Proyecto [2] se usaron galgas extensiométricas modelo 10/120 LY41-2L-0,5M de HBM (Figura 5.12), 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 extensometría, traduciéndolo en deformaciones.

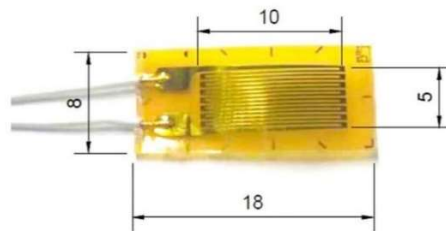


Figura 5.12 Modelo de galga extensiométrica 10/120 LY41-2L-0,5M de HBM [2]. Cotas en mm.

Cada viga se equipó con 4 galgas antes del ensayo, denominadas 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. Como se aprecia en la Figura 5.13, todas las galgas se colocaron a una distancia de $1/4$ de la altura o el ancho de la viga desde el centro de su respectiva cara y bajo la fibra neutra, por lo que las deformaciones registradas fueron debidas a tensiones de tracción.

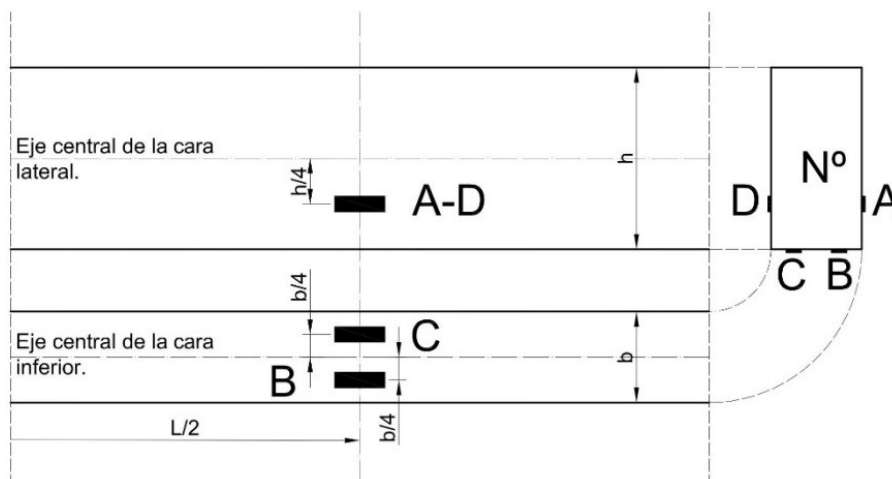


Figura 5.13 Esquema de colocación de galgas extensiométricas en vigas de pequeña escuadría [2].

DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO

Todas las probetas se ensayaron siguiendo la misma metodología. Se realizó un ensayo a flexión a tres puntos, donde los dos puntos inferiores o apoyos estaban separados 1000 y el punto central superior era el punto de aplicación de la carga, tal y como se aprecia en la Figura 5.14. Los apoyos estaban formados por piezas de acero semicirculares para que en el ensayo a tres puntos no se repartiera la carga en exceso y se recubrieron con protectores de caucho con el fin de evitar su hundimiento en las vigas. En este modelo de prensa el apoyo superior es el que quedó fijo mientras que los apoyos inferiores eran los que ascendían. Los ensayos se realizaron por control de posición manteniendo una velocidad constante de 1,5 mm/min, aunque el software de la prensa ofrecía la posibilidad de realizarlo también por control de fuerza.

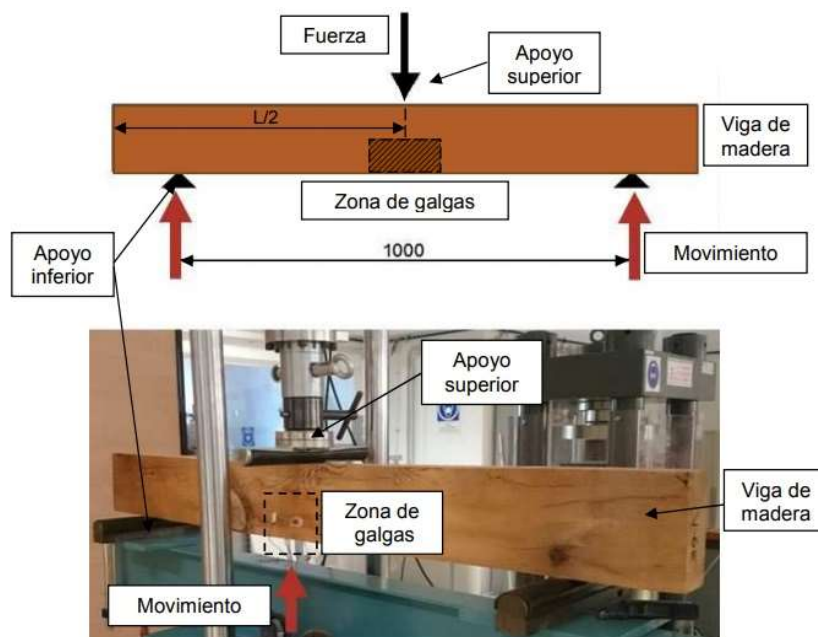


Figura 5.14 Esquema de la disposición del ensayo en vigas de pequeña escuadría [2]. Cotas en mm.

Los ensayos comenzaron con la colocación de la pieza centrada en todos los ejes y la aplicación de una precarga para comprobar que todos los elementos preservaban su lugar y no existían excentricidades. Una vez comprobado, se comenzaba la toma de datos de todos los dispositivos y se aplicaba un desplazamiento constante que llevaba la probeta hasta el colapso.

5.2.2. Vigas de gran escuadría – 4,50m

INSTRUMENTACIÓN

Para las vigas de gran escuadría con y sin rotura previa se utilizó la máquina de la marca SERVOSIS S.L., modelo CH4-ST-100. Aunque esta máquina dispone de tres actuadores para realizar diversos ensayos, en los ensayos se utilizó solamente el actuador 1 con capacidad de 1000 kN, tal y como se observa en la Figura 5.15. El software asociado a la máquina es el CATMAN EASY versión 4.1 de la marca HBM.



Figura 5.15 Máquina de ensayos modelo CH4-ST-100 de SERVOSIS S.L.

Al igual que para los ensayos de vigas de pequeña escuadría, se dispuso de dos cámaras de vídeo modelo HANDYCAM EXMOR R. de la marca SONY capaces de grabar en HD y dos trípodes. El equipo de extensometría utilizado para registrar las deformaciones fue el modelo QUANTUMX MX 1615 B de la marca HBM, que tomaba 10 datos por segundo, y las galgas extensiométricas fueron las mismas que las usadas para las vigas de pequeña escuadría (Figura 5.12), el modelo 10/120 LY41-2L-0,5M de HBM. Cada viga se equipó con un total de 12 galgas distribuidas en tres grupos diferentes, exceptuando las vigas de gran escuadría con rotura previa que se equiparon con 3 galgas en el centro de la viga, correspondiendo con el grupo 2 como se aprecia en la Figura 5.16. Si a la hora de colocar el grupo de galgas se encontraban nudos u otros defectos, este se desplazaba ligeramente hasta encontrar una zona libre de defectos importantes en la viga.

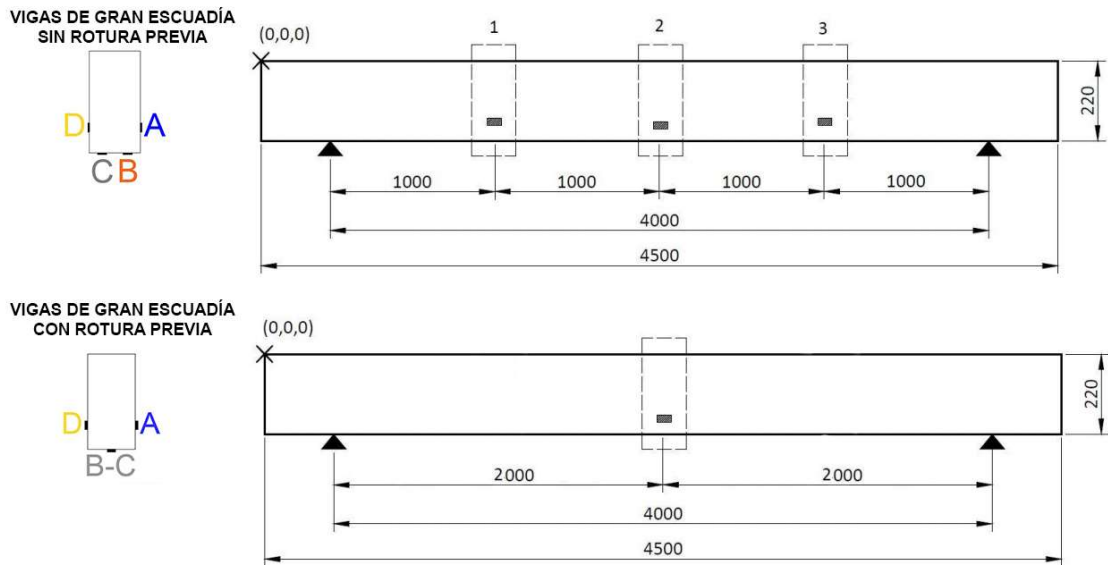


Figura 5.16 Esquema de colocación de galgas extensiométricas en vigas de gran escuadría. Arriba: vigas de gran escuadría sin rotura previa. Abajo: vigas de gran escuadría con rotura previa. Izquierda: nomenclatura de galgas extensiométricas. Derecha: Grupos de galgas [3]. Cotas en mm.

En la misma localización donde se encontraban los grupos de galgas extensiométricas se dispusieron 3 dispositivos LVDTs como se muestra en la Figura 5.17. Estos dispositivos LVDTs eran de la marca HBM y se utilizaron para medir el desplazamiento vertical de la viga. Los LVDTs 1 y 3 tenían una longitud de 100 mm y el LVDT 2 de 200 mm. El equipo de registro seleccionado para medir los desplazamientos verticales fue un MX 840 B de la marca HBM (Figura 5.18).

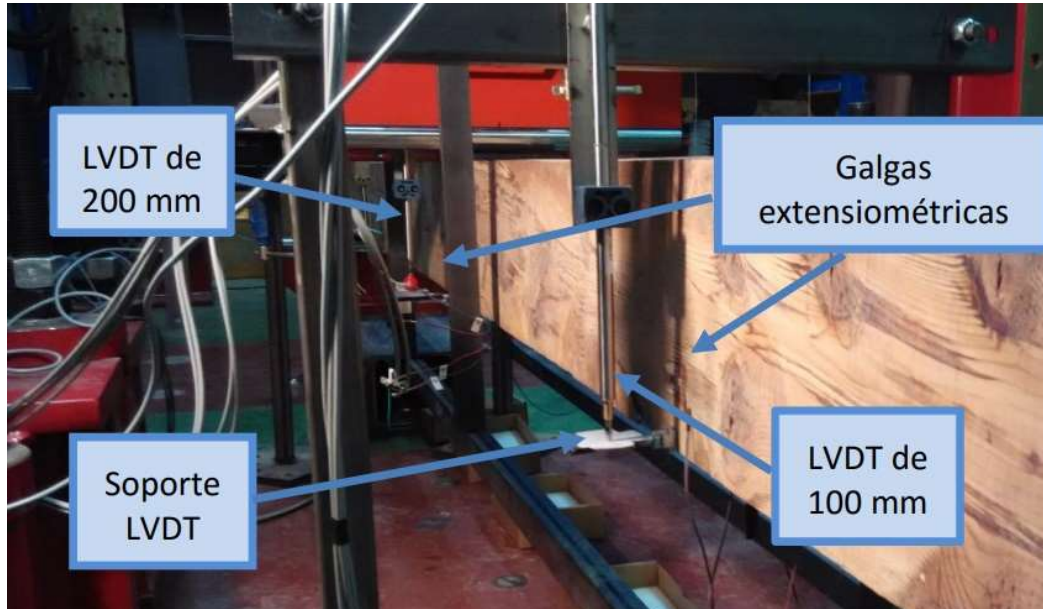


Figura 5.17 Disposición de los LVDTs y galgas extensiométricas durante el ensayo [3].



Figura 5.18 Equipo de registro MX 840 B de HBM para galgas extensiométricas y LVDTs [3].

DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO

Se realizaron ensayos a flexión a 3 puntos, aplicando una carga puntual en el centro de la viga y dos apoyos separados entre sí 4000 mm, como se muestra en la Figura 5.19. En el punto de aplicación de la fuerza y en los apoyos se colocó una pieza de goma para reducir el hincado del pistón semicircular en la viga a ensayar. Los ensayos se llevaron a cabo por control de posición con una velocidad de 1,5 mm/min hasta rotura de la viga.

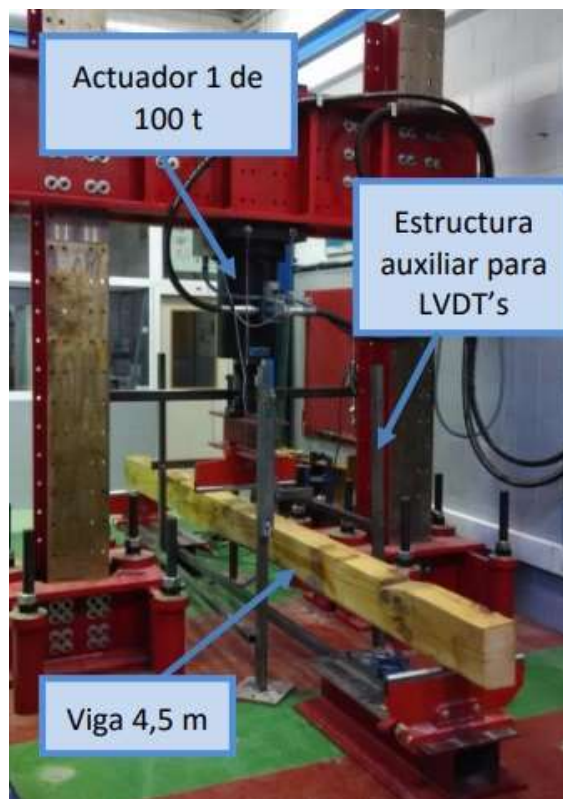


Figura 5.19 Esquema de la disposición del ensayo en vigas de gran escuadría [3]. Cotas en mm.

Capítulo 6 Resultados y análisis

6.1. Parámetros analizados

Carga máxima o carga de rotura

Es el valor máximo de carga que la probeta llega a soportar. Este dato fue obtenido directamente de la prensa hidráulica o eléctrica, según se indicó en el Capítulo 5.

Tensión máxima o módulo de rotura a flexión (MOR)

La tensión se define como la fuerza aplicada por unidad de superficie en la que se aplica y produce una deformación. La tensión a flexión se puede descomponer como la suma vectorial de una fuerza paralela a las fibras de la madera, y otra normal a estas. En los ensayos a flexión simple, como son los de este Proyecto, estas tensiones serán de compresión en la parte superior de la viga y de tracción en la inferior, tal y como se muestra en la Figura 6.1.

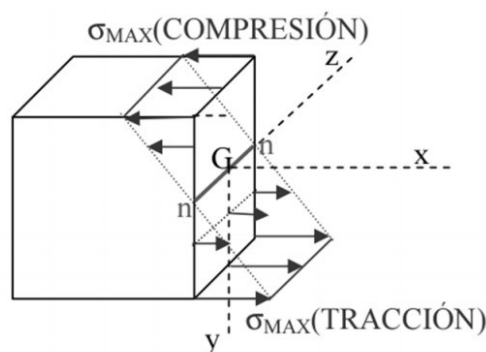


Figura 6.1 Distribución de tensiones en una sección transversal a flexión simple [2].

Por otro lado se generan esfuerzos de cortante debido a las tensiones tangenciales, haciéndose máximas en la fibra neutra de la viga. Estas tensiones pueden provocar dos tipos de fallo principales: 1) fallo por cortadura: donde las fibras se cortan transversalmente; 2) fallo por deslizamiento: se produce por el desplazamiento de unas fibras con respecto a otras en la dirección longitudinal. 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

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

donde y es la distancia desde la fibra neutra al extremo de la sección, I el momento de inercia de la sección y M_z el momento flector máximo alrededor del eje Z , calculados según las expresiones

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12}; \quad M_z = \frac{P \cdot L}{4};$$

siendo b la base y h la altura de la sección rectangular, P la carga aplicada y L la longitud entre apoyos. De la combinación de las ecuaciones anteriores se obtiene la fórmula que permite calcular el MOR (*Modulus of Rupture*), que se define como la capacidad máxima de un espécimen sometido a flexión, expresado en N/mm^2 o MPa y su expresión es

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

Módulo de Young (MOE)

El módulo de Young o módulo de elasticidad es una constante elástica que, al igual que el límite elástico, puede calcularse empíricamente, puesto que es la relación existente entre la tensión y la deformación de un material en el rango elástico del mismo.

Para obtener el MOE (*Modulus of Elasticity*) en este Proyecto se han tomado los valores comprendidos en el rango del 30% al 60% del valor de tensión máxima y deformaciones tras los distintos ensayos. El cálculo del MOE se realizó aplicando la fórmula

$$MOE = \frac{\sigma_{60\%} - \sigma_{30\%}}{\varepsilon_{60\%} - \varepsilon_{30\%}},$$

siendo σ la tensión y ε la deformación. 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 el desplazamiento experimentado por la viga en la dirección de la carga aplicada, siendo este desplazamiento máximo en el centro de la viga (punto de aplicación de la carga). En este Proyecto se han calculado las flechas utilizando los datos de desplazamiento de los LVDTs en el caso de vigas de gran escuadría. Para las vigas de pequeña escuadría, la flecha se calculó con el desplazamiento de la máquina multiensayos, restando el hundimiento que se produjo en la viga por el apoyo central. Debido a la heterogeneidad de la madera o a defectos tales como nudos o presencia de carcoma, a veces el hundimiento fue diferente en las dos caras laterales. Para ello se calculó la media aritmética del hundimiento en las dos caras laterales. En la Figura 6.2 se puede observar gráficamente el concepto de flecha y hundimiento.

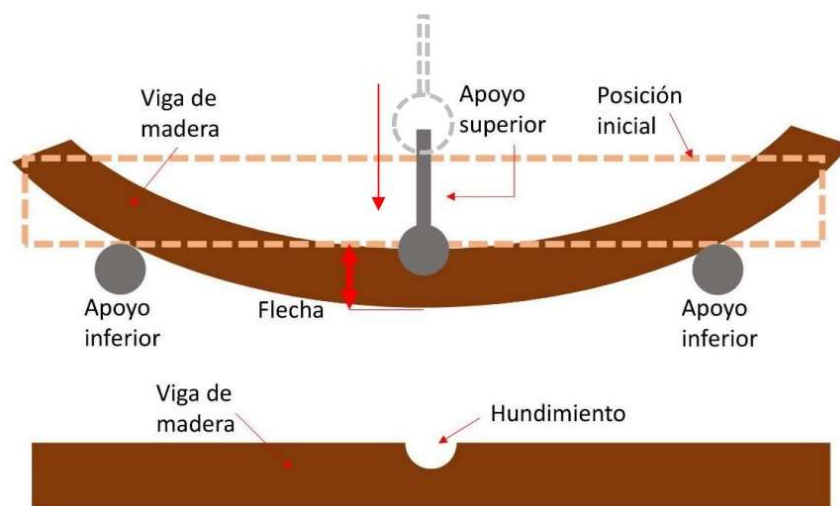


Figura 6.2 Esquema de flecha y hundimiento producido tras un ensayo a flexión en tres puntos [2].

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 6.3) [4]. Además, en cada rotura se hizo referencia al material que había fallado, viendo si había roturas en el laminado o tejido de CFRP o existían deslaminaciones.

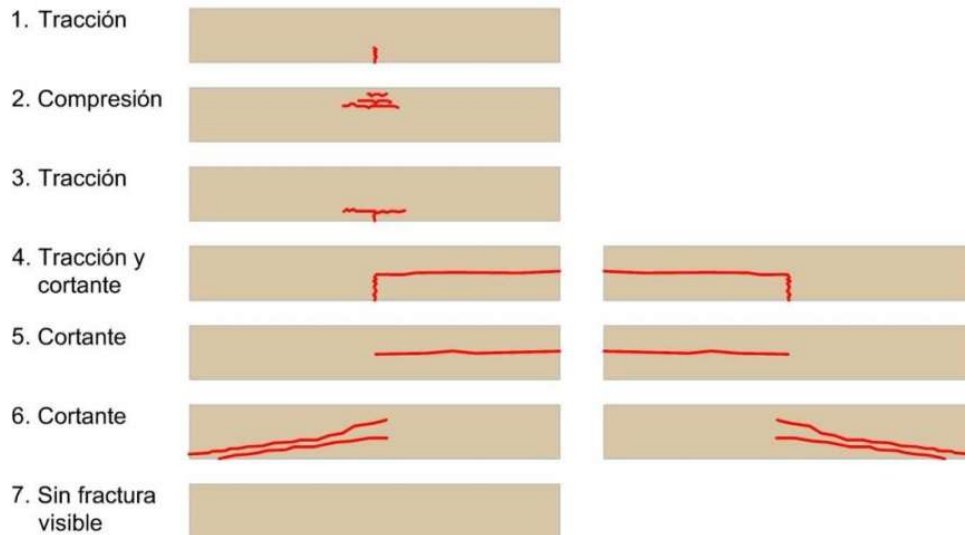


Figura 6.3 Modelos de fallo para las diferentes roturas en los ensayos [4].

Gráficas

Gracias a que las diferentes prensas de carga y equipos de extensometría eran capaces de registrar los diferentes datos de fuerza, desplazamiento y deformaciones, se pudieron representar las gráficas carga-tiempo y deformación-tiempo. La gráfica que relaciona la tensión y la deformación se realizó empleando los datos recogidos por las galgas extensiométricas y los cálculos de tensión realizados en hojas de cálculo. De esta forma se pudieron obtener gráficas en las que se observaba la deformación de cada una de las cuatro galgas de cada grupo a lo largo del ensayo, hasta llegar al momento de carga o tensión máxima.

6.2. Vigas de pequeña escuadría – 1,30m

En este apartado se muestra un resumen de los resultados del grupo de vigas sin reforzar NR analizados anteriormente [2]. Por otro lado se muestran los resultados individualizados y por grupo de las vigas con refuerzo BR-U y BR-B.

6.2.1. Vigas sin refuerzo NR

El resumen de los datos obtenidos de carga máxima, tensión máxima en flexión, módulo de elasticidad en flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación para las vigas sin refuerzo se muestra en la Tabla 6.1, añadiéndose además los datos medios del grupo.

VIGA	CARGA MÁXIMA (kN)	MOR (N/mm ²)	MOE (N/mm ²)	FLECHA MÁXIMA (mm)	MODO DE FALLO (1-7)	DENSIDAD (kg/m ³)	CATALOG. SEGÚN NORMA UNE 56545
NR-1	27,06	25,74	13410,55	10,39	3	692,17	Rechazo
NR-2	20,90	19,88	-	-	6	514,57	Rechazo
NR-3	34,56	32,88	7508,31	15,21	5	639,57	MEG
NR-4	31,59	30,05	-	13,26	6	642,54	Rechazo
Promedio	28,53	27,14	10459,43*	12,95*		622,21	

* Imposibilidad de realizar el promedio con todas las vigas

Tabla 6.1 Resumen de resultados de los ensayos de las vigas NR de pequeña escuadría [2].

Los resultados de la Tabla 6.1 fueron la referencia para comparar con el resto de grupos de vigas de 1,30 m empleándose para ello el valor medio de los resultados mecánicos. Para tener suficientes datos, se tomaron 4 vigas, ya que algunas no se pudieron monitorizar completamente. Cabe destacar la alta heterogeneidad en resultados que se obtuvieron, tanto mecánicos como en las deformaciones registradas por las galgas extensiométricas. Se puede ver como entre el MOR menor y mayor de este grupo (Vigas NR-2 y NR-3, respectivamente) hubo una diferencia de un 65%. Por último, en cuanto a los modos de fallo, se pudo apreciar que en las 4 vigas se obtuvieron 3 modos de fallo diferentes. En la Figura 6.4 se puede observar las cargas máximas y tensiones máximas a flexión de las vigas NR, así como el promedio del grupo.

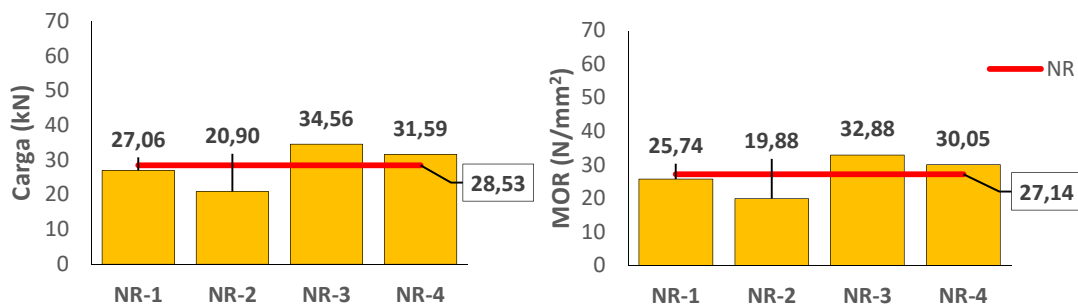


Figura 6.4 Carga máxima y MOR de las vigas NR. Línea roja: valor medio.

6.2.2. Vigas con refuerzo BR-U

A continuación se analizan los resultados individualizados para las 3 vigas con esta tipología de refuerzo. Las Tablas 6.2 a 6.4 recogen los resultados, de cada una de las vigas ensayadas, de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación.

BR-U-1

CARGA MÁXIMA (kN)	MOR (N/mm ²)	MOE (N/mm ²)	FLECHA MÁXIMA (mm)	MODO DE FALLO (1-7)	DENSIDAD (kg/m ³)	CATALOG. SEGÚN NORMA UNE 56545
43,41	41,28	16870,84	22,71	6	688,30	MEG

Tabla 6.2 Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación para la viga BR-U-1.

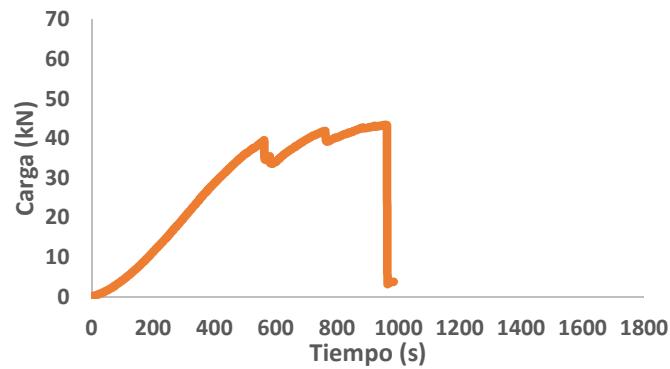


Figura 6.5 Gráfica carga-tiempo de la viga BR-U-1.

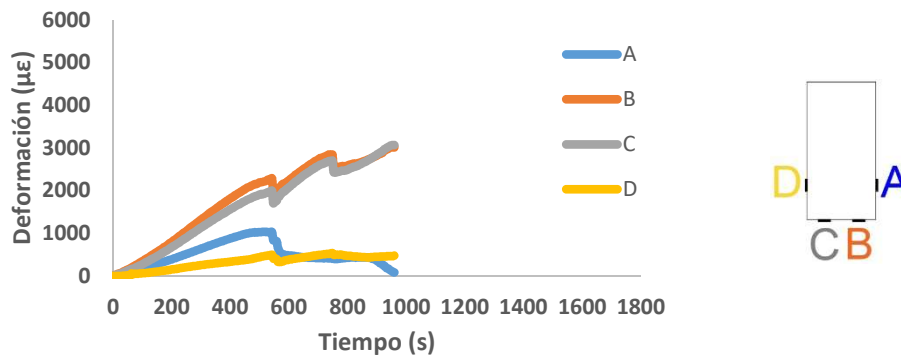


Figura 6.6 Izquierda: gráfica deformación-tiempo de la viga BR-U-1. Derecha: disposición de las galgas en la viga.

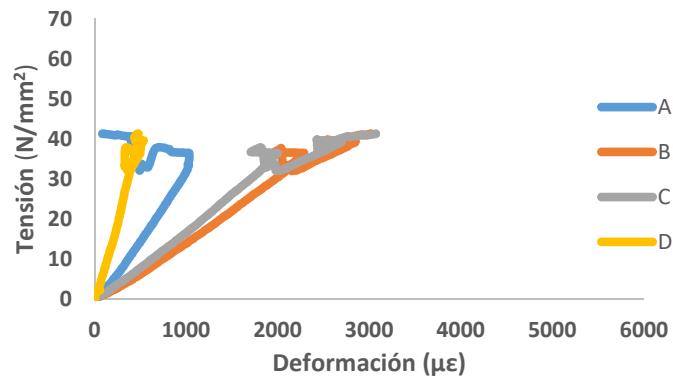


Figura 6.7 Gráfica tensión-deformación de la viga BR-U-1.

Como se aprecia en la Tabla 6.2 la viga BR-U-1 dio un MOR de 41,28 N/mm² con una carga máxima de 43,41 kN y un MOE de 16870,84 N/mm². La carga máxima, MOE y MOR aumentaron un 52%, 52% y 61%, respectivamente con respecto a la media de las vigas NR. La viga se clasificó como MEG, teniendo además una elevada densidad. La flecha máxima que alcanzó la viga fue de 22,71 mm, un 75% más que las vigas no reforzadas. En la Figura 6.5 se aprecia la ductilidad que aporta el refuerzo al elemento, produciéndose escalones cuando la madera empieza a alcanzar un alto estado tensional. Este comportamiento dúctil es de gran interés, ya que permite que la viga no colapse súbitamente, sino que en caso de fallo se pueda realizar una intervención a tiempo. En las Figuras 6.6 y 6.7 se observan las deformaciones frente al tiempo y la tensión frente a la deformación. Las deformaciones tuvieron un comportamiento lineal hasta el primer escalón, además se observa que las galgas B y C tuvieron un comportamiento casi idéntico. La rotura fue por cortante (modo de fallo 6) como se observa en la Figura 6.8.



Figura 6.8 Fotografía de la rotura por cortante de la viga BR-U-1.

CARGA MÁXIMA (kN)	MOR (N/mm ²)	MOE (N/mm ²)	FLECHA MÁXIMA (mm)	MODO DE FALLO (1-7)	DENSIDAD (kg/m ³)	CATALOG. SEGÚN NORMA UNE 56545
34,84	33,14	21645,46	19,96	4	428,69	Rechazo

Tabla 6.3 Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación para la viga BR-U-2.

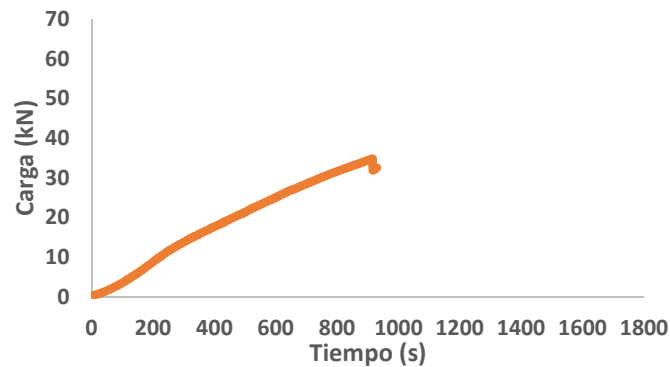


Figura 6.9 Gráfica carga-tiempo de la viga BR-U-2.

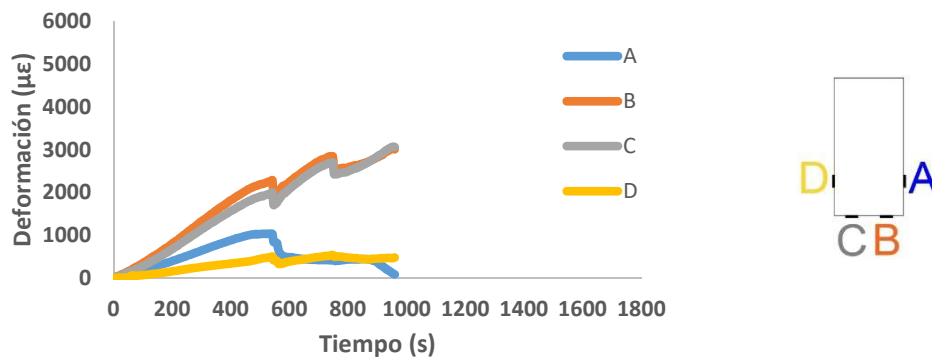


Figura 6.10 Izquierda: gráfica deformación-tiempo de la viga BR-U-2. Derecha: disposición de las galgas en la viga.

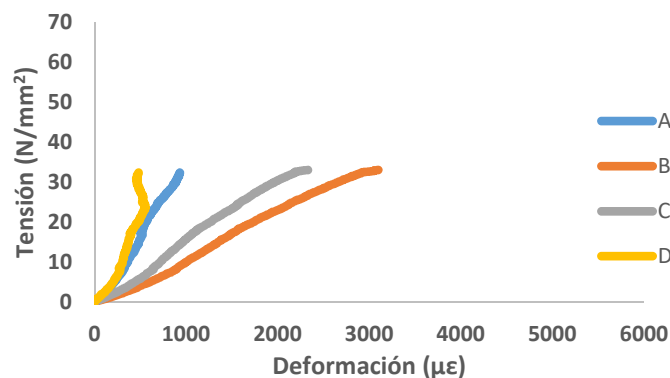


Figura 6.11 Gráfica tensión-deformación de la viga BR-U-2.

Como se observa en la Tabla 6.3 y Figura 6.9, la viga BR-U-2 dio un MOR de 33,14 N/mm² con una carga máxima de 34,84 kN y un MOE de 21645,46 N/mm². En este caso la viga reforzada

resistió una carga superior, de un 22%, a la media de las vigas sin reforzar. En el caso del MOR y MOE el aumento supuso un 22% y 107%, respectivamente. Era la viga con menor densidad del grupo y en su catalogación dio rechazo por fenda. La flecha máxima registrada fue de 19,96 mm, un 52% más que las vigas NR. En la Figura 6.10 se puede observar como las galgas de nuevo tuvieron un comportamiento lineal, con similitud entre los valores de las dos parejas de galgas (A-D y B-C). En la Figura 6.11 se aprecia un comportamiento lineal hasta un cierto valor de tensión en el cual la viga empezó a plastificar a compresión. Este hecho deja claro que el refuerzo permite que la madera alcance mayores valores tensionales, sobre todo a compresión, traduciéndose en un mejor aprovechamiento del material. Como se observa en la Figura 6.12, la rotura fue por tracción y cortante según el modo de fallo 4.



Figura 6.12 Fotografía de la rotura por tracción y cortante de la viga BR-U-2.

BR-U-3

CARGA MÁXIMA (kN)	MOR (N/mm ²)	MOE (N/mm ²)	FLECHA MÁXIMA (mm)	MODO DE FALLO (1-7)	DENSIDAD (kg/m ³)	CATALOG. SEGÚN NORMA UNE 56545
48,18	45,83	18491,64	24,79	4	521,17	Rechazo

Tabla 6.4 Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación para la viga BR-U-3.

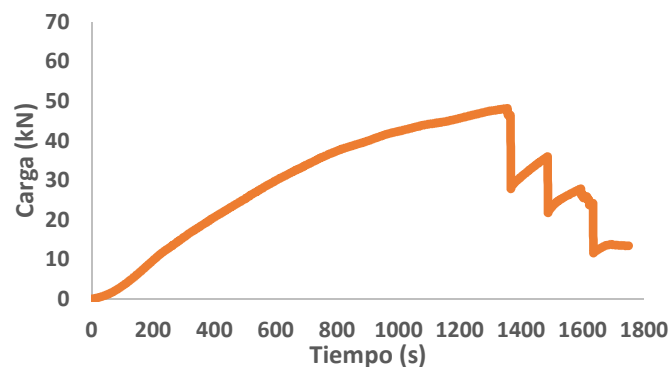


Figura 6.13 Gráfica carga-tiempo de la viga BR-U-3.

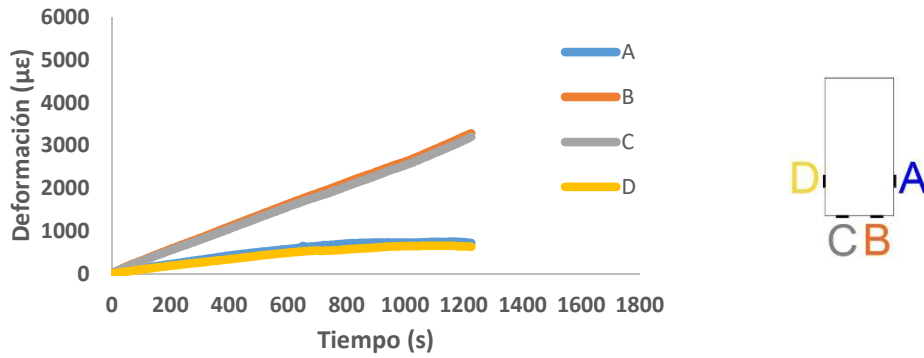


Figura 6.14 Izquierda: gráfica deformación-tiempo de la viga BR-U-3. Derecha: disposición de las galgas en la viga.

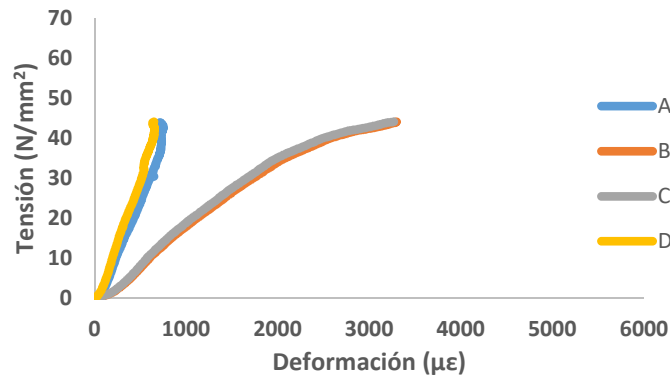


Figura 6.15 Gráfica tensión-deformación de la viga BR-U-3.

En la Tabla 6.4 se observa que la viga BR-U-3 dio un MOR de $45,83 N/mm^2$, el mayor de todo el grupo, con una carga máxima de $48,18 kN$ y un MOE de $18491,64 N/mm^2$, respectivamente. Aunque fue catalogada como rechazo por tener fendas, la carga máxima soportada supuso un aumento del 69% con respecto a las vigas NR. Esto indica que la clasificación visual no es suficiente para estimar que viga tendrá mayor capacidad de carga. El MOR y el MOE aumentaron un 69% y 77%, respectivamente. Se observó un gran aumento de la flecha, de un 91%. Como se ve en la Figura 6.13, tras alcanzar los $48,18 kN$ la carga cayó un 40% hasta los $28 kN$ produciéndose el primero de los tres escalones reflejando una gran ductilidad y evitando la rotura súbita, características idóneas para cualquier esfuerzo de elemento estructural. En la Figura 6.14 se puede apreciar que las deformaciones son muy similares hasta alcanzar la carga máxima y el primer escalón. Las deformaciones registradas por las galgas B y C de la cara inferior alcanzaron un valor de $3250 \mu\epsilon$. En la Figura 6.15 se puede observar cómo al inicio del ensayo las galgas B y C muestran que la viga plastificó a partir de los $30 N/mm^2$. En esta viga la rotura también se produjo por tracción y cortante (Figura 6.16), produciendo una delaminación y una rotura del tejido de CFRP.



Figura 6.16 Fotografía de la rotura por tracción y cortante de la viga BR-U-3.

En la Tabla 6.5 se observa un resumen de los resultados mecánicos del grupo de vigas BR-U, además de una comparativa con respecto a las vigas no reforzadas NR. Los resultados obtenidos indican que este tipo de solución no solo aporta un aumento de capacidad de carga (47,70%) sino de rigidez (81,68%) y permite dotar a la viga de una ductilidad frente a la rotura de gran valor estructural. Con respecto a las vigas NR el MOR aumentó un 47,72%. La flecha aumenta hasta alcanzar 22,49 mm, lo que supone un aumento del 73,67%. En la Figura 6.17 se pueden observar las gráficas comparativas de las distintas vigas del grupo para el valor de carga máxima y MOR, así como el valor promedio.

VIGA	CARGA MÁXIMA (kN)	MOR (N/mm ²)	MOE (N/mm ²)	FLECHA MÁXIMA (mm)	MODO DE FALLO (1-7)	DENSIDAD (kg/m ³)	CATALOG. SEGÚN NORMA UNE 56545
BR-U-1	43,41	41,30	16870,84	22,71	6	688,30	MEG
BR-U-2	34,84	33,14	21645,46	19,96	4	428,69	Rechazo
BR-U-3	48,18	45,84	18491,64	24,79	4	521,17	Rechazo
Promedio	42,15	40,09	19002,65	22,49		546,05	
Mejora respecto a NR (%)	47,70	47,72	81,68	73,67			

Tabla 6.5 Resumen de resultados de los ensayos de las vigas BR-U.

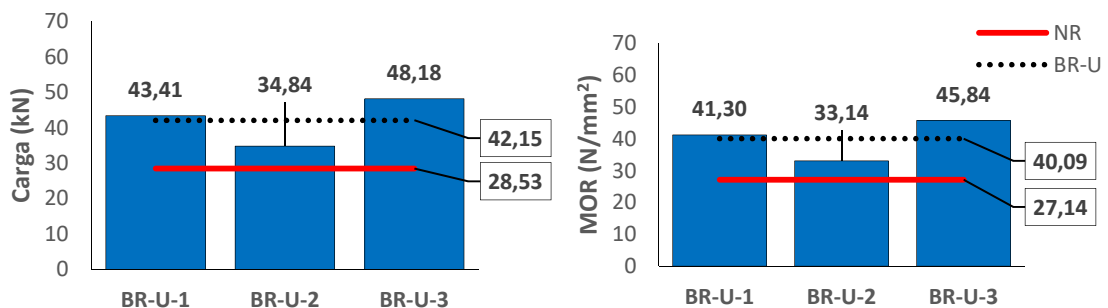


Figura 6.17 Carga máxima y MOR de las vigas BR-U. Línea roja: valor medio vigas NR. Línea discontinua: valor medio vigas BR-U.

6.2.3. Vigas con refuerzo BR-B

A continuación se presentan los resultados de las vigas reforzadas con laminado de 45 mm y tejido bidireccional colocado parcialmente.

BR-B-1

CARGA MÁXIMA (kN)	MOR (N/mm ²)	MOE (N/mm ²)	FLECHA MÁXIMA (mm)	MODO DE FALLO (1-7)	DENSIDAD (kg/m ³)	CATALOG. SEGÚN NORMA UNE 56545
61,31	58,31	13439,87	27,30	1	549,73	MEG

Tabla 6.6 Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación para la viga BR-B-1.

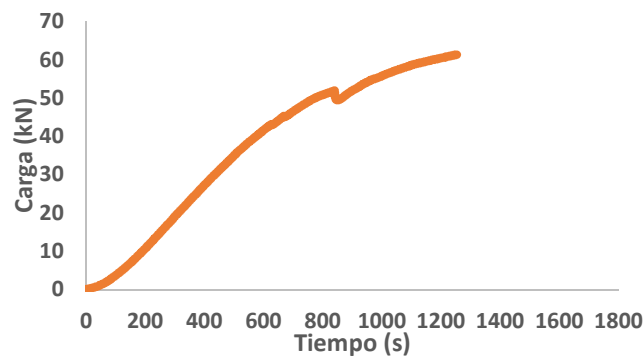


Figura 6.18 Gráfica carga-tiempo de la viga BR-B-1.

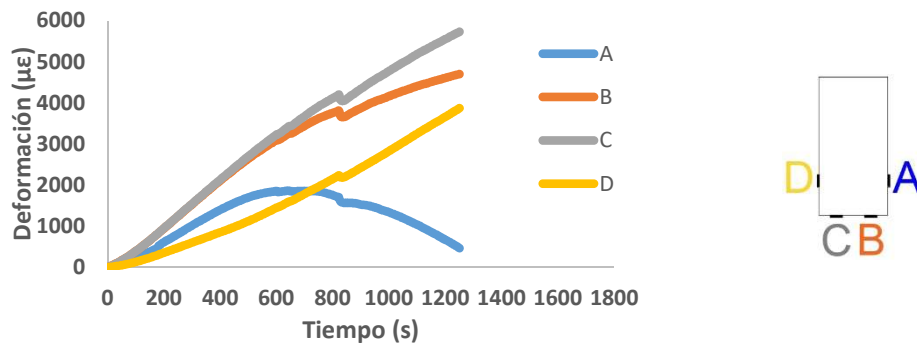


Figura 6.19 Izquierda: gráfica deformación-tiempo de la viga BR-B-1. Derecha: disposición de las galgas en la viga.

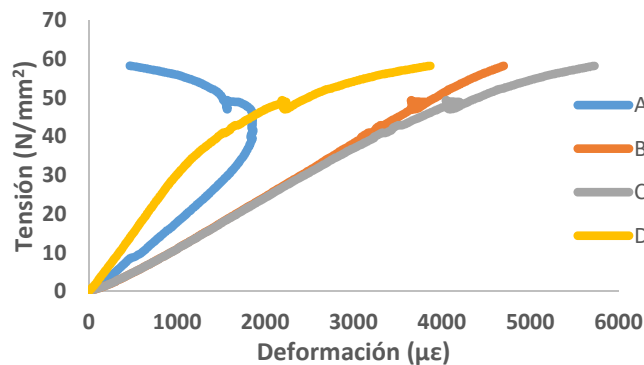


Figura 6.20 Gráfica tensión-deformación de la viga BR-B-1.

En la Tabla 6.6 y Figura 6.18 se observa que la viga BR-B-1 soportó una carga máxima de 61,31 kN, obteniendo un MOR de 58,31 N/mm² y un MOE de 13439,87 N/mm². Esto implicó un aumento de la carga máxima soportada del 115% con respecto a las vigas NR y del 45% con respecto de las vigas BR-U. El MOR y MOE aumentaron con respecto a las vigas NR un 115% y 29%, respectivamente. La densidad de esta viga era la menor de las que componen el grupo, estando catalogada visualmente como MEG. La flecha máxima obtenida fue de 27,30 mm, un 111% y 21% más que en las vigas NR y BR-U, respectivamente. Las deformaciones, como se ve en la Figura 6.19 fueron muy estables durante todo el ensayo. Observando el comportamiento de las galgas A y D se ve claramente el momento en que la viga empezó a girar sobre su eje longitudinal (Figura 6.21), produciéndose también una caída de la carga. En la Figura 6.20 se observa como la tensión frente a la deformación presenta un comportamiento elástico hasta cierto punto en el que la viga comenzó a plastificar. En la Figura 6.22 se puede advertir cómo la viga rompió por tracción siguiendo un modo de fallo 1, produciéndose deslaminación y grandes roturas del tejido de CFRP.



Figura 6.21 Fotografía de la viga BR-B-1 rotando sobre su eje longitudinal en el ensayo.

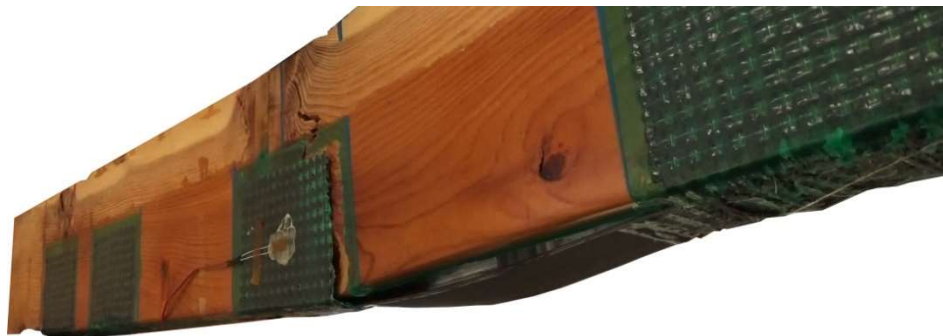


Figura 6.22 Fotografía de la rotura por tracción de la viga BR-B-1.

BR-B-2

CARGA MÁXIMA (kN)	MOR (N/mm ²)	MOE (N/mm ²)	FLECHA MÁXIMA (mm)	MODO DE FALLO (1-7)	DENSIDAD (kg/m ³)	CATALOG. SEGÚN NORMA UNE 56545
56,85	54,08	16875,22	22,66	4	628,26	Rechazo

Tabla 6.7 Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación para la viga BR-B-2.

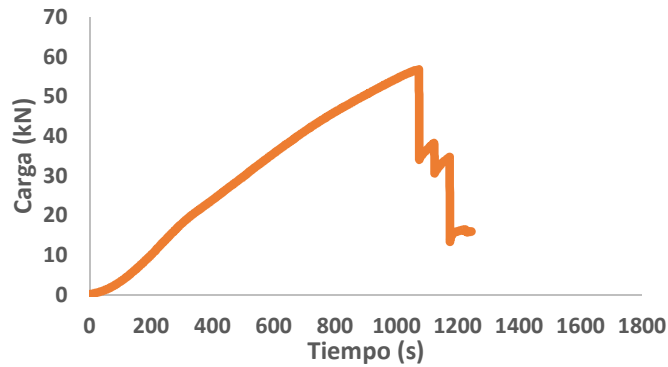


Figura 6.23 Gráfica carga-tiempo de la viga BR-B-2.

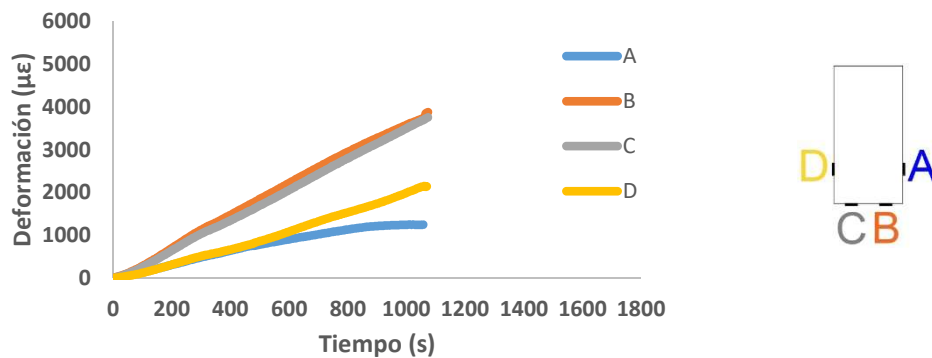


Figura 6.24 Izquierda: gráfica deformación-tiempo de la viga BR-B-2. Derecha: disposición de las galgas en la viga.

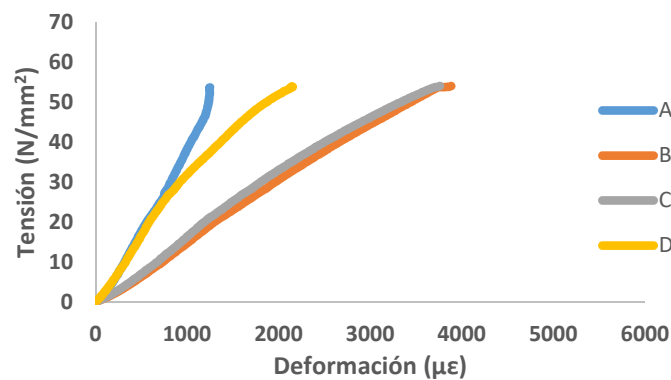


Figura 6.25 Gráfica tensión-deformación de la viga BR-B-2.

La viga BR-B-2 obtuvo un MOR de 54,08 N/mm² y un MOE de 16875,22 N/mm² como se ve en la Tabla 6.7. La carga máxima que soportó fue de 56,85 kN, incrementando dicho valor para las vigas NR y BR-U un 99% y 35%, respectivamente. La densidad de esta viga era la más elevada del grupo y su catalogación visual fue como rechazo por nudos. De nuevo se comprobó que la clasificación visual no es suficiente para prever la capacidad mecánica de una viga. La flecha máxima que alcanzó fue de 22,66 mm, un 75% más que las vigas NR. En la Figura 6.23 se observa de nuevo el comportamiento dúctil de este tipo de refuerzos. Las deformaciones tuvieron un comportamiento lineal, observándose cierta plastificación. Las galgas A y D tuvieron un comportamiento asimétrico a partir de los 26 N/mm² de tensión como se puede comprobar en la Figura 6.25. La rotura de esta viga se produjo según el modo de fallo 4 por tracción y cortante como se aprecia en la Figura 6.26 produciéndose también delaminación y cierto resquebrajamiento del tejido de CFRP.



Figura 6.26 Fotografía de la rotura por tracción y cortante de la viga BR-B-2.

BR-B-3

CARGA MÁXIMA (kN)	MOR (N/mm ²)	MOE (N/mm ²)	FLECHA MÁXIMA (mm)	MODO DE FALLO (1-7)	DENSIDAD (kg/m ³)	CATALOG. SEGÚN NORMA UNE 56545
45,07	42,86	17591,69	19,15	1	628,10	Rechazo

Tabla 6.8 Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación para la viga BR-B-3.

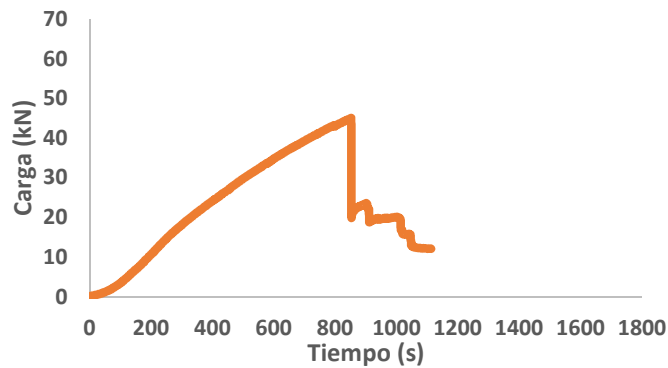


Figura 6.27 Gráfica carga-tiempo de la viga BR-B-3.

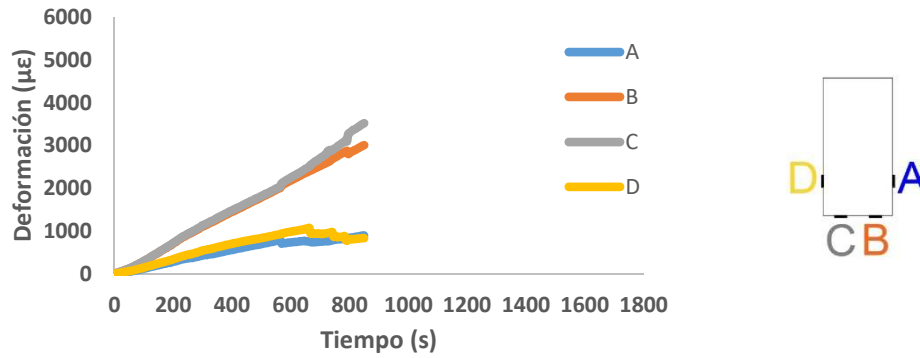


Figura 6.28 Izquierda: gráfica deformación-tiempo de la viga BR-B-3. Derecha: disposición de las galgas en la viga.

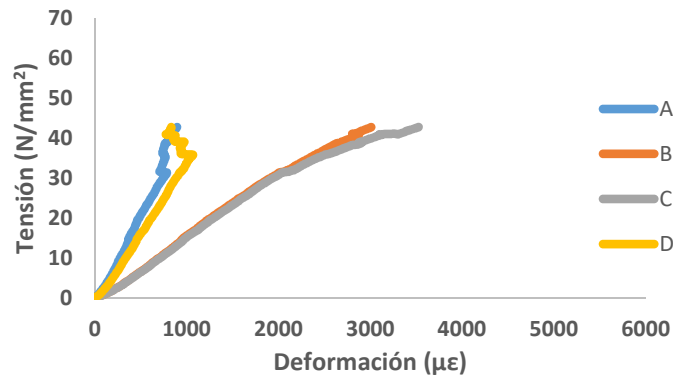


Figura 6.29 Gráfica tensión-deformación de la viga BR-B-3.

La viga BR-B-3 alcanzó una carga máxima de 45,07 kN (Figura 6.27), obteniendo un MOR de 42,86 N/mm² y un MOE de 17591,69 N/mm² (Tabla 6.8). El aumento de carga con respecto de las vigas no reforzadas alcanzó el 58%. El aumento para el MOR y MOE fue del 58% y 68%, respectivamente. La flecha máxima fue de 19,15 mm, con un aumento del 48% con respecto a las vigas no reforzadas. Como se ve en la Figura 6.28, las deformaciones de las galgas B y C fueron idénticas y lineales, sin embargo las galgas B y C dejaron de mostrar comportamientos lineales a partir de los 36,50 N/mm² de tensión. La rotura de esta viga se produjo según el modo de fallo 1 a tracción debido a un gran nudo situado casi en el centro de la viga, como se ve en la Figura 6.30, produciéndose también la deslaminación y rotura de tejido de CFRP en la cara inferior.

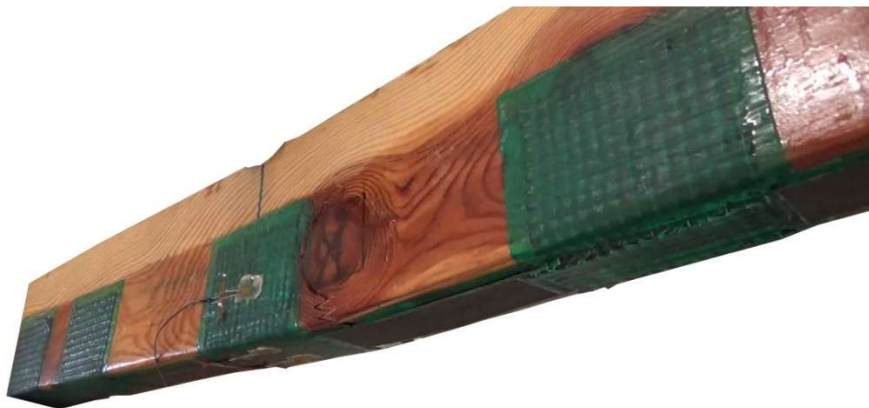


Figura 6.30 Fotografía de la rotura por tracción de la viga BR-B-3.

En la Tabla 6.9 se puede observar un resumen de los datos obtenidos tras los ensayos de las vigas del grupo BR-B, un promedio de estos y la comparación en % con respecto a las vigas NR. Las mejoras tras la ejecución del refuerzo son muy elevadas para todos los resultados mecánicos.

VIGA	CARGA MÁXIMA (kN)	MOR (N/mm ²)	MOE (N/mm ²)	FLECHA MÁXIMA (mm)	MODO DE FALLO (1-7)	DENSIDAD (kg/m ³)	CATALOG. SEGÚN NORMA UNE 56545
BR-B-1	61,31	58,32	13439,87	27,30	1	549,73	MEG
BR-B-2	56,85	54,08	16875,22	22,66	4	628,26	Rechazo
BR-B-3	45,07	42,87	17591,69	19,15	1	628,10	Rechazo
Promedio	54,41	51,75	15968,93	23,04		602,03	
Mejora respecto a NR (%)	90,71	90,68	52,67	77,92			

Tabla 6.9 Resumen de resultados de los ensayos de las vigas BR-B.

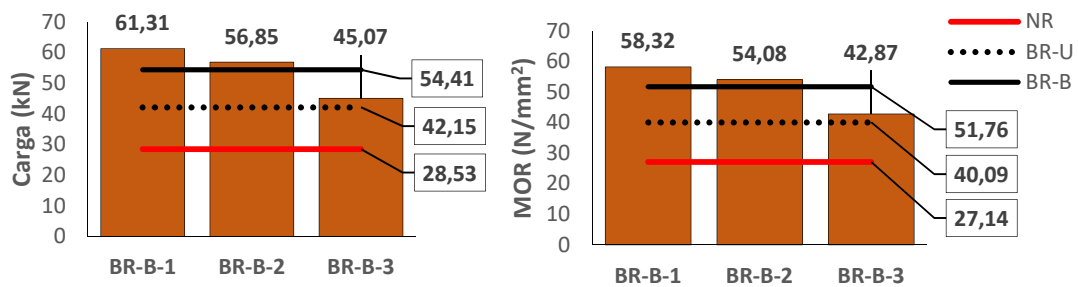


Figura 6.31 Carga máxima y MOR de las vigas BR-B. Línea roja: valor medio vigas NR. Línea discontinua: valor medio vigas BR-U. Línea continua: valor medio vigas BR-B

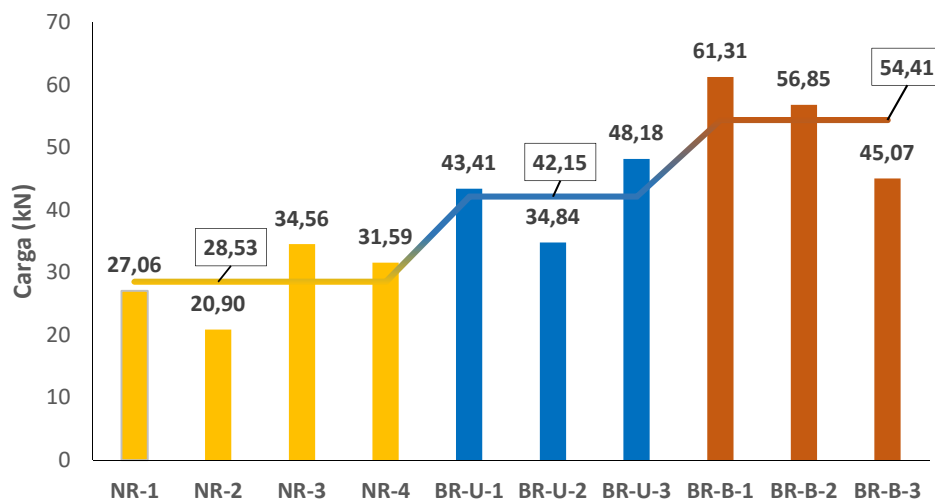


Figura 6.32 Gráfico comparativo de la carga máxima soportada por los grupos de vigas de 1,30 m.

En el caso de la carga máxima soportada y el valor máximo de tensión a flexión, este tipo de refuerzo tuvo una mejora del 90,71% y 90,68%, respectivamente (Figura 6.31). El módulo de

elasticidad a flexión alcanzó una media de 15968,93 N/mm² que con respecto a las vigas NR supone un aumento del 52,67%. Por otro lado, la flecha media tuvo una mejora del 77,92%. En la Figura 6.32 se observa una gráfica que recoge las cargas máximas admitidas de cada viga de pequeña escuadría así como los valores medios de cada grupo, evidenciando la mejora de los refuerzos con respecto a las vigas no reforzadas, sobre todo el refuerzo BR-B.

6.3. Vigas de gran escuadría sin rotura previa– 4,50m

A continuación se describen los resultados individualizados para cada viga de gran escuadría sin rotura previa a excepción del grupo sin refuerzo NR, cuyos datos fueron analizados anteriormente [3], y del que solo se describirá un breve resumen. Todas las vigas fueron catalogadas visualmente como Rechazo como se describió en el Capítulo 2.

6.3.1. Vigas sin refuerzo NR

El resumen de los datos mecánicos obtenidos para las vigas sin refuerzo se muestra en la Tabla 6.10, añadiéndose además los datos medios del grupo.

VIGA	CARGA MÁXIMA (kN)	MOR (N/mm ²)	MOE (N/mm ²)	FLECHA MÁXIMA (mm)	MODO DE FALLO (1-7)	DENSIDAD (kg/m ³)
NR-1	20,72	17,61	9239,25	34,86	4	522,52
NR-2	17,33	13,19	6384,23	35,43	3	571,12
Promedio	19,03	15,40	7811,74	35,15		546,87

Tabla 6.10 Resumen de resultados de los ensayos de las vigas NR de gran escuadría [3].

Estos resultados fueron la referencia para comparar con el resto de grupos de vigas de 4,50 m. Los resultados de carga máxima fueron muy similares, con un 20% de diferencia entre ellos y una media de 19,03 kN. Los valores promedio de MOR y MOE fueron de 15,40 N/mm² y 7811,74 N/mm², respectivamente. La flecha media alcanzada fue de 35,15 mm, con tan solo un 2% de diferencia entre las flechas de NR-1 y NR-2. En cuanto a la rotura, en ambos casos se produjo en la zona de tracción de la viga, en la NR-1 debido a la tracción y al cortante y en la NR-2 debido a la tensión de tracción, sin llegar ninguna viga a plastificar en la zona de compresión. Los fallos en las caras inferiores se produjeron debido a los nudos existentes en dicha cara como se observa en las Figuras 6.33 y 6.34.



Figura 6.33 Rotura por tracción y cortante de la viga NR-1.

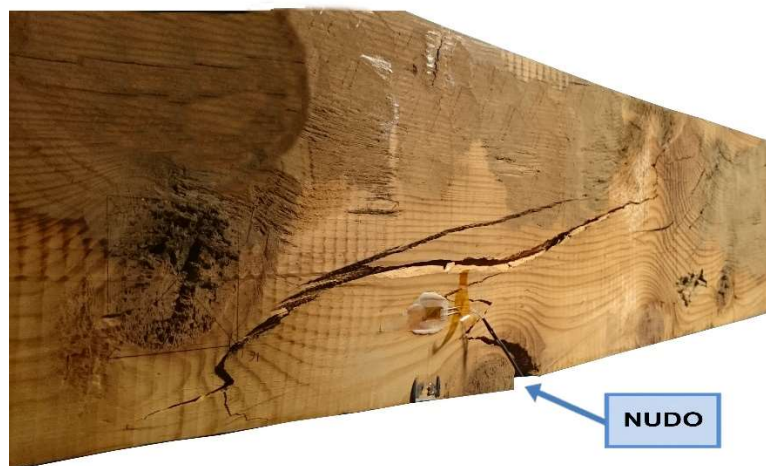


Figura 6.34 Rotura por tracción de la viga NR-2

6.3.2. Vigas con refuerzo BR

Este grupo de refuerzo estuvo formado por 2 vigas reforzadas con laminado de CFRP de 100 mm y tejido bidireccional de CFRP colocado discontinuamente. A continuación se describen los resultados individualizados de cada una de ellas, del mismo modo que se realizó para las vigas de pequeño formato.

BR-1

CARGA MÁXIMA (kN)	MOR (N/mm ²)	MOE (N/mm ²)	FLECHA MÁXIMA (mm)	MODO DE FALLO (1-7)	DENSIDAD (kg/m ³)
49,53	42,88	16858,18	59,95	5	468,72

Tabla 6.11 Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación para la viga BR-1.

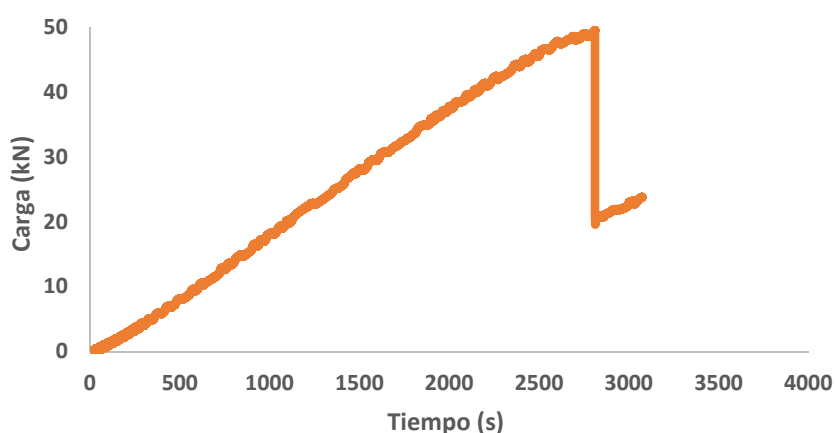


Figura 6.35 Gráfica carga-tiempo de la viga BR-1.

La Tabla 6.11 recoge los datos de las capacidades mecánicas de la viga BR-1 obtenidos en el ensayo. Como se puede apreciar, la carga máxima fue de 49,53 kN (Figura 6.35) obteniendo un MOR de 42,88 N/mm² y un MOE de 16858,18 N/mm². El aumento con respecto a las vigas NR de la carga máxima soportada, el MOR y MOE fue del 160%, 178% y 116%, respectivamente. En

la Figura 6.35 se puede observar como la viga llegó a su capacidad máxima de carga, cayó un 60% y siguió admitiendo carga hasta la rotura final.

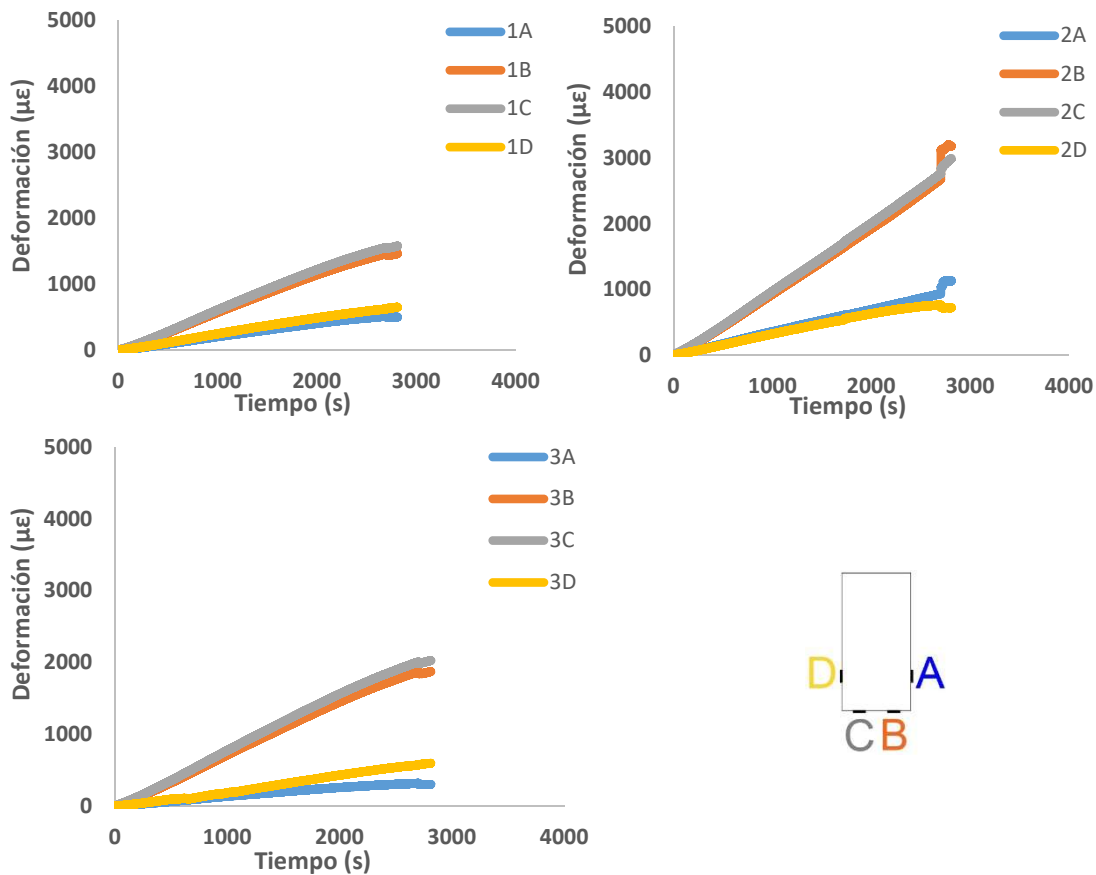


Figura 6.36 Gráficas deformación-tiempo de la viga BR-1. Arriba izquierda: grupo de galgas 1. Arriba derecha: grupo de galgas 3. Abajo izquierda: grupo de galgas 2. Abajo derecha: disposición de las galgas en la viga.

Como se puede apreciar en la Figura 6.36, las tres gráficas representadas describen la deformación de los diferentes grupos de galgas frente al tiempo. El grupo 2 es el que mayores deformaciones registra por encontrarse en el punto de aplicación de la carga. Se aprecia cómo en los grupos 1 y 3 las pendientes varían levemente, registrando más deformaciones las galgas del grupo 3. Por último también se puede observar cómo cerca de la carga máxima las galgas A y D, situadas en los laterales divergen del mismo modo en los tres grupos, lo que indica una pequeña torsión debida principalmente por la geometría propia de la viga, la cual sufrió torsiones durante su vida útil.

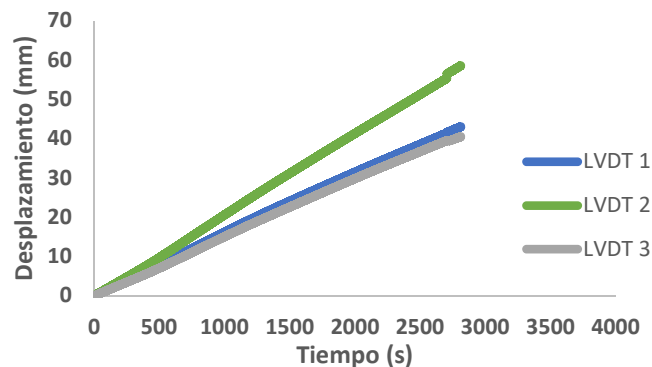


Figura 6.37 Gráfica desplazamiento-tiempo de los LVDTs 1, 2 y 3 de la viga BR-1.

Para las vigas de gran escuadría también se utilizaron 3 LVDTs en la misma posición que los grupos de galgas cuyos resultados se aprecian en la Figura 6.37. Al igual que con las galgas extensiométricas, el LVDT 2 es el que más desplazamiento registró al encontrarse en la posición de aplicación de la carga, un 23% más que los LVDTs 1 y 3. La flecha máxima alcanzada por esta viga antes de la rotura fue de 59,95 mm, que frente a los 35,15 mm de flecha de las vigas NR supuso un aumento del 70%.

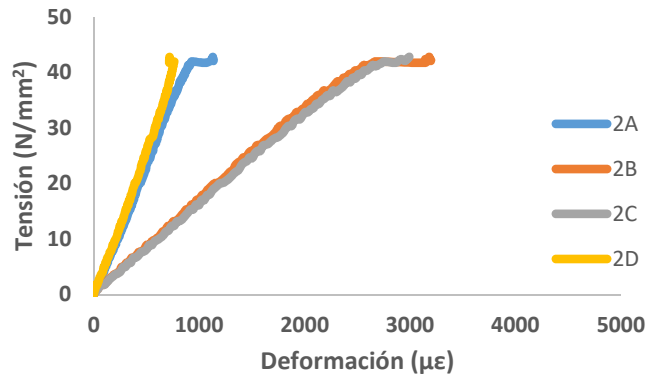


Figura 6.38 Izquierda: gráfica tensión-deformación del grupo 2 de galgas extensiométricas de la viga BR-1.

En la Figura 6.38 se puede apreciar la gráfica que relaciona la tensión con la deformación registrada por el grupo 2 de la viga, siendo este el que mayores valores alcanza como se ha visto anteriormente. Las galgas B y C tuvieron comportamientos lineales e idénticos frente a la tensión mientras que una vez alcanzado cierto valor, las galgas A y D comenzaron desviar su pendiente muy levemente, lo que indica la ligera torsión durante el ensayo antes mencionada. Con la representación de las deformaciones de las galgas B y C se aprecia cómo la viga a partir de los 35 N/mm² de tensión comienza a plastificar hasta la rotura, confirmando ductilidad al elemento como se vio anteriormente. La rotura de esta viga sigue el modo de fallo 5 por cortante (figura 6.39), en el que además se produjeron graves daños en el tejido de CFRP en las zonas de contacto con el laminado. En la Figura 6.40 se aprecia el desgarro del tejido de CFRP debido al deslizamiento del laminado.

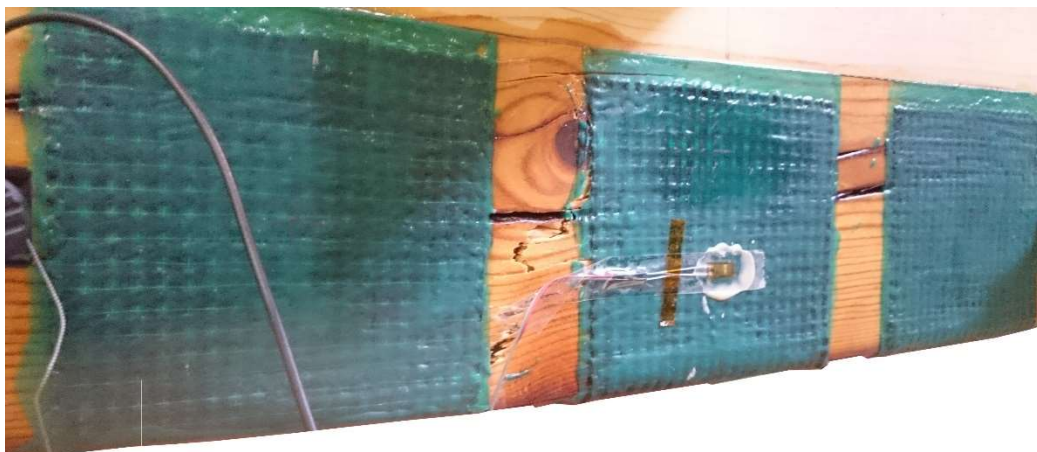


Figura 6.39 Fotografía de la rotura por cortante de la viga BR-1.



Figura 6.40 Fotografía del desgarro sufrido por el tejido de CFRP de la viga BR-1.

BR-2

CARGA MÁXIMA (kN)	MOR (N/mm ²)	MOE (N/mm ²)	FLECHA MÁXIMA (mm)	MODO DE FALLO (1-7)	DENSIDAD (kg/m ³)
43,12	38,19	14131,79	58,91	3	658,11

Tabla 6.12 Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima, modo de fallo, densidad y catalogación para la viga BR-2.

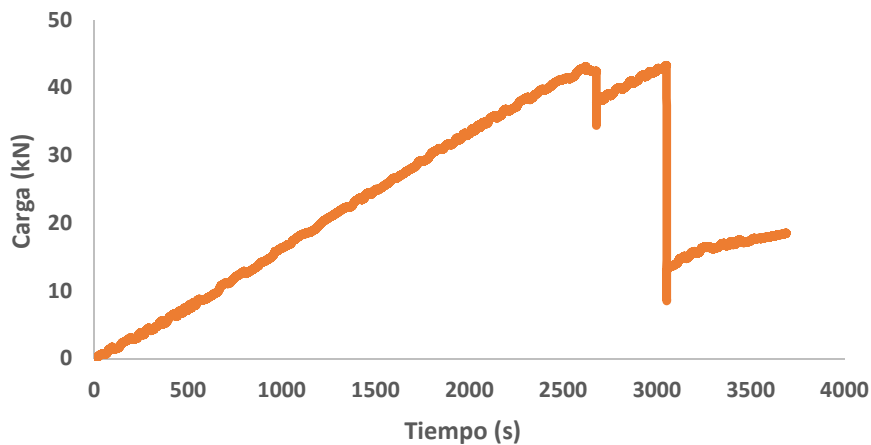


Figura 6.41 Gráfica carga-tiempo de la viga BR-2.

Como se aprecia en la Tabla 6.12 y la Figura 6.41, la viga BR-2 alcanzó una carga máxima de 43,12 kN, obteniendo un MOR y un MOE de 38,19 N/mm² y 14131,79 N/mm², respectivamente. Estos valores son superiores a los alcanzados por las vigas NR, aumentando la carga, el MOR y el MOE un 127%, 148% y 81%, respectivamente. En la Figura 6.41 se aprecia cómo se produjo un pequeño escalón una vez la viga alcanzó los 42,50 kN tras el que siguió admitiendo más carga hasta llegar a los 43,12 kN de carga máxima produciéndose una última caída hasta los 15 kN, observándose de nuevo un comportamiento dúctil.

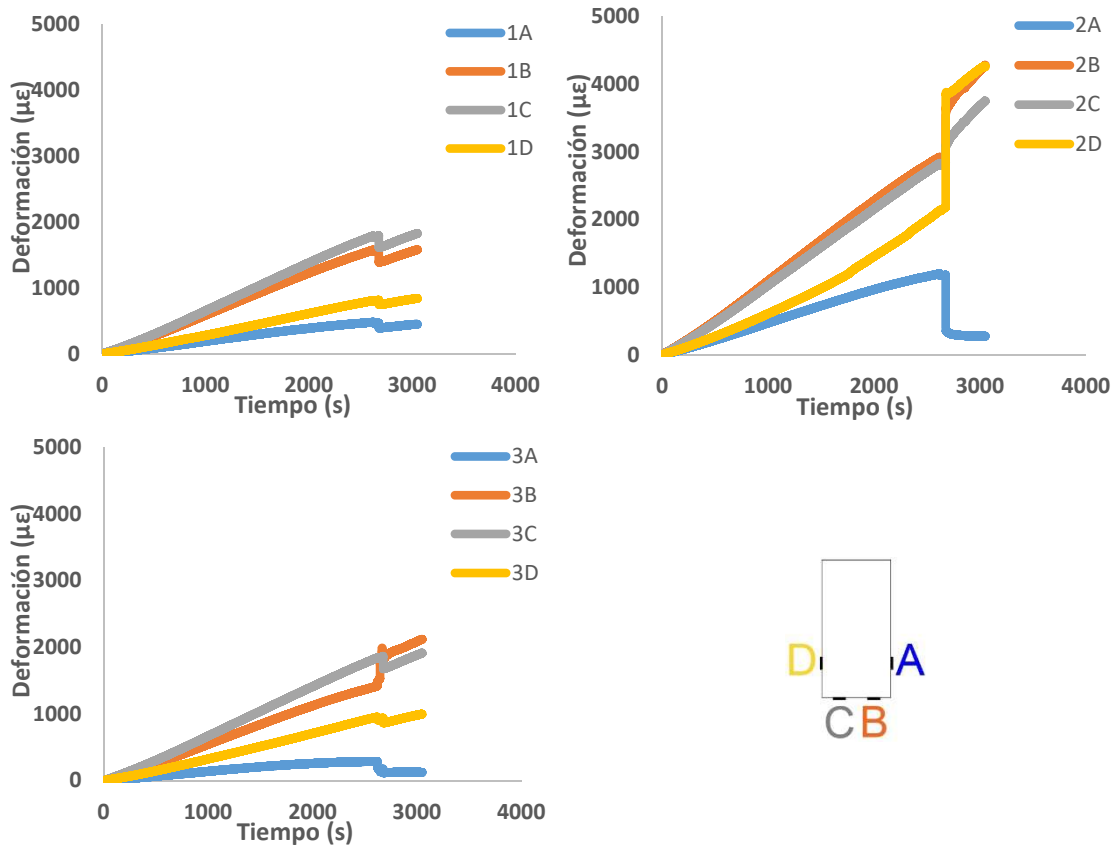


Figura 6.42 Gráficas deformación-tiempo de la viga BR-2. Arriba izquierda: grupo de galgas 1. Arriba derecha: grupo de galgas 3. Abajo izquierda: grupo de galgas 2. Abajo derecha: disposición de las galgas en la viga.

Como se observa en la Figura 6.42, las deformaciones del grupo 1 de galgas fueron las más similares mientras que en el grupo 3 se observan mayores dispersiones. En el grupo 2 se aprecia cómo las galgas A y D comenzaron con deformaciones similares hasta que empezaron a alejarse. Además, se percibe como la galga D describió una mayor pendiente que la galga A en cada uno de los grupos, debida de nuevo a la torsión propia de la viga. En la Figura 6.43 se observan los datos registrados por los LVDTs. El LVDT 2 es el que mayor desplazamiento registró debido a su ubicación en el centro de la viga y el LVDT 3 no registró datos durante el ensayo. La diferencia del desplazamiento máximo entre el LVDT 1 y el LVDT 2 fue de 20 mm. La flecha máxima alcanzada fue de 58,91 mm, muy similar a la de la viga BR-1 y suponiendo un aumento del 68% con respecto a las vigas NR.

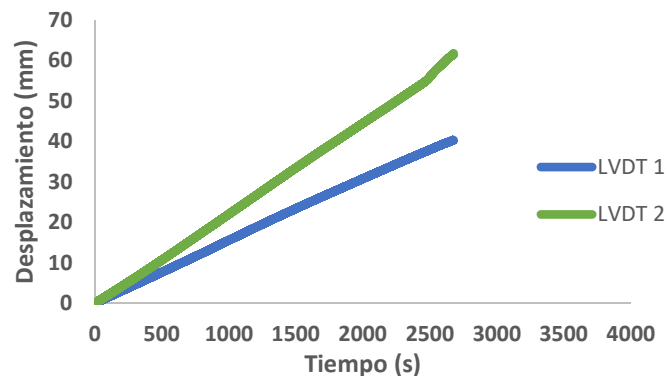


Figura 6.43 Gráfica desplazamiento-tiempo de los LVDTs 1, 2 y 3 de la viga BR-2.

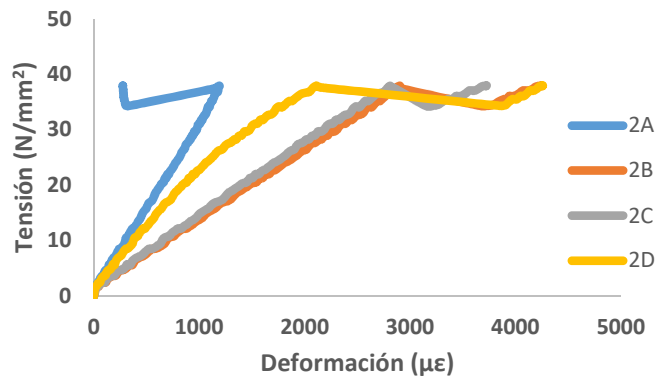


Figura 6.44 Izquierda: gráfica tensión-deformación del grupo 2 de galgas extensiométricas de la viga BR-2.

En la Figura 6.44 se aprecian unas pendientes muy constantes de las deformaciones registradas por las galgas B y C frente a la tensión hasta los 2800 s en el que se observa plastificación del material hasta la rotura. En toda la trayectoria marcada por la gala D se aprecia mucho mejor la plastificación anteriormente descrita. Como se aprecia en la Figura 6.45, la rotura produjo una importante deslaminación y agrietamiento del tejido de CFRP.



Figura 6.45 Fotografía de la deslaminación producida en la viga BR-2.

En la Tabla 6.13 se observa el resumen de resultados de las vigas del grupo BR de gran escuadría y su comparación con el grupo NR. La Figura 6.46 recoge las gráficas de carga frente al tiempo de las 4 vigas estudiadas anteriormente con el fin de realizar una comparación global de los resultados.

VIGA	CARGA MÁXIMA (kN)	MOR (N/mm ²)	MOE (N/mm ²)	FLECHA MÁXIMA (mm)	MODO DE FALLO (1-7)	DENSIDAD (kg/m ³)	CATALOG. SEGÚN NORMA UNE 56545
BR-1	49,53	42,88	16858,18	59,95	5	468,72	Rechazo
BR-2	43,12	38,19	14131,79	58,91	3	658,11	Rechazo
Promedio	46,33	40,54	15494,98	59,43		563,42	
Mejora respecto a NR (%)	143,46	163,25	98,36	69,08			

Tabla 6.13 Resumen de resultados para las vigas BR.

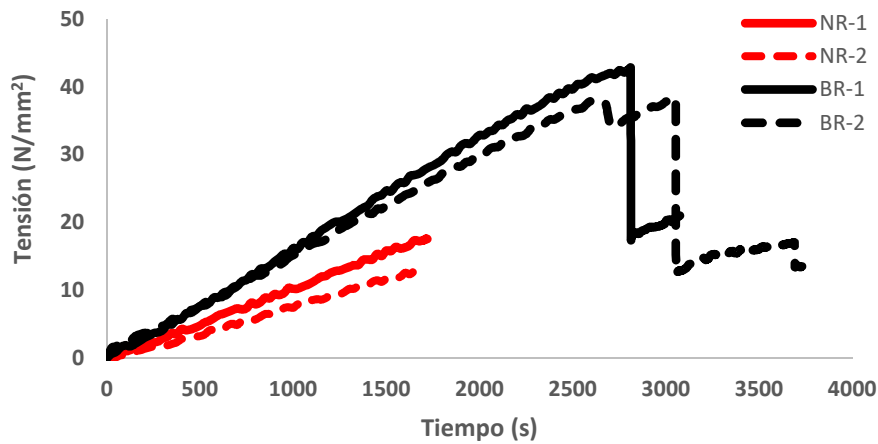


Figura 6.46 Gráfica comparativa tensión-tiempo de las vigas del grupo NR y BR.

Como se aprecia en la Tabla 6.13 y la Figura 6.46, el aumento de capacidad portante gracias al refuerzo trenzado BR fue muy elevado. Queda claro por lo tanto los altos beneficios que presenta esta configuración de refuerzo, no solamente en lo que a mejora de características se refiere, sino en la conferencia de ductilidad al elemento reforzado. La carga máxima soportada aumentó un 143,46%. El MOR, el MOE y la flecha máxima aumentaron un 163,25%, 98,36% y 69,08%, respectivamente.

6.4. Vigas de gran escuadría con rotura previa – 4,50m

A continuación se describen los resultados individualizados obtenidos para las vigas BR-r con rotura previa. Como se describió en el Capítulo 5 con las vigas una vez rotas y su capacidad mecánica totalmente agotada, se volvieron a reforzar con la solución trenzada con tejido de CFRP bidireccional.

BR-r-1

	CARGA MÁXIMA (kN)	MOR (N/mm ²)	MOE (N/mm ²)	FLECHA MÁXIMA (mm)	DENSIDAD (kg/m ³)
BR-r-1	27,62	24,67	10497,46	74,94	561,53
Mejora respecto a NR (%)	45,14	60,20	57,33	113,20	

Tabla 6.14 Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima y densidad para la viga BR-1.

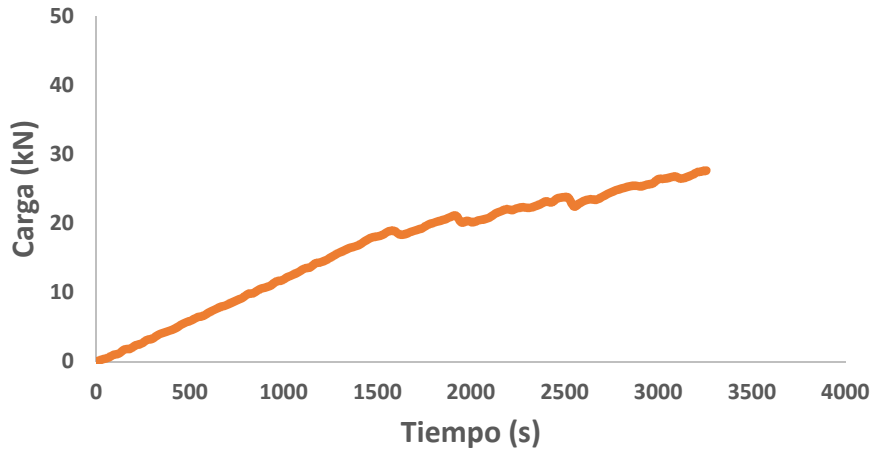


Figura 6.47 Gráfica carga-tiempo de la viga BR-r-1.

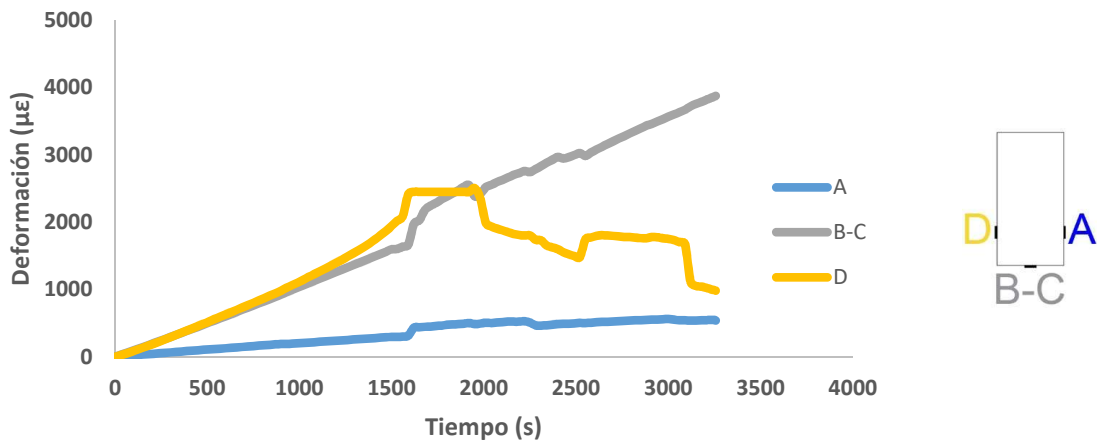


Figura 6.48 Gráfica deformación-tiempo de la viga BR-r-1.

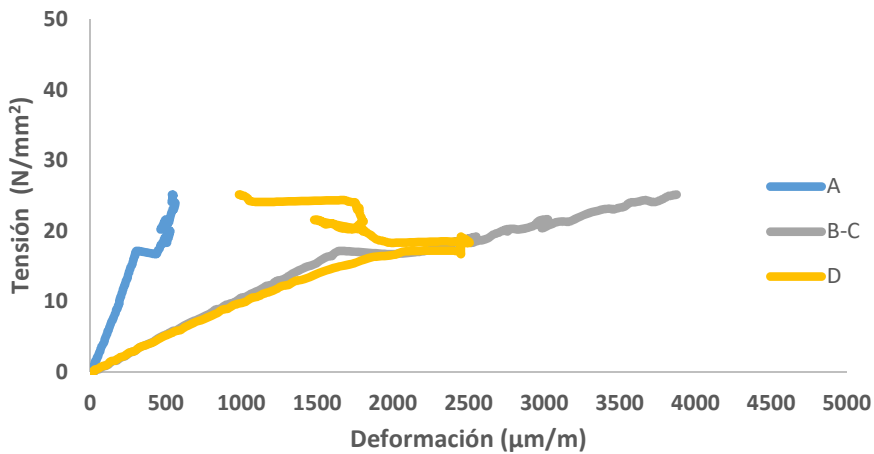


Figura 6.49 Gráfica tensión-deformación de la viga BR-r-1.

La Tabla 6.14 recoge los datos analizados a partir del ensayo de la viga BR-r-1. La viga soportó una carga máxima de 27,62 kN y dio un MOR de 24,67 N/mm², con un MOE de 10497,46 N/mm². Los valores de carga máxima, MOR y MOE, superaron en un 45,14%, 60,20% y 34,38% los obtenidos en el grupo NR, respectivamente teniendo en cuenta que la viga se llevó previamente al colapso. La flecha en el punto de aplicación de la carga alcanzó un valor de 74,94 mm, lo que supuso un aumento del 113,20% con respecto de una viga sin refuerzo y sin daño previo. La

Figura 6.47 representa la carga frente al tiempo. Se puede apreciar cómo la viga en el primer tercio del ensayo se comportó linealmente hasta alcanzar un valor de 18 kN, a partir del cual la carga siguió incrementándose levemente hasta la parada por seguridad de la máquina, que alcanzó su límite de recorrido. En la Figura 6.48 las deformaciones de las 3 galgas tuvieron un comportamiento lineal hasta cierto estado tensional. La galga A registró los datos más inusuales debido a que debajo de esta se encontraba un nudo, a parte de una zona con grietas. Las deformaciones de la galga D fueron similares a las registradas en la cara inferior. En la Figura 6.49 se observa claramente como hasta los 17 N/mm² de tensión las deformaciones eran similares a las de las vigas sin rotura previa. A partir de este momento comenzaron a dispersarse debido al daño y las grietas existentes. La rotura de esta viga fue debida a las grietas formadas en su rotura previa, produciéndose una gran deslaminación, arrancamiento del tejido de CFRP nuevas fisuras como se puede observar en las Figuras 6.50 y 6.51.



Figura 6.50 Deslaminación de la viga BR-r-1 tras su rotura.

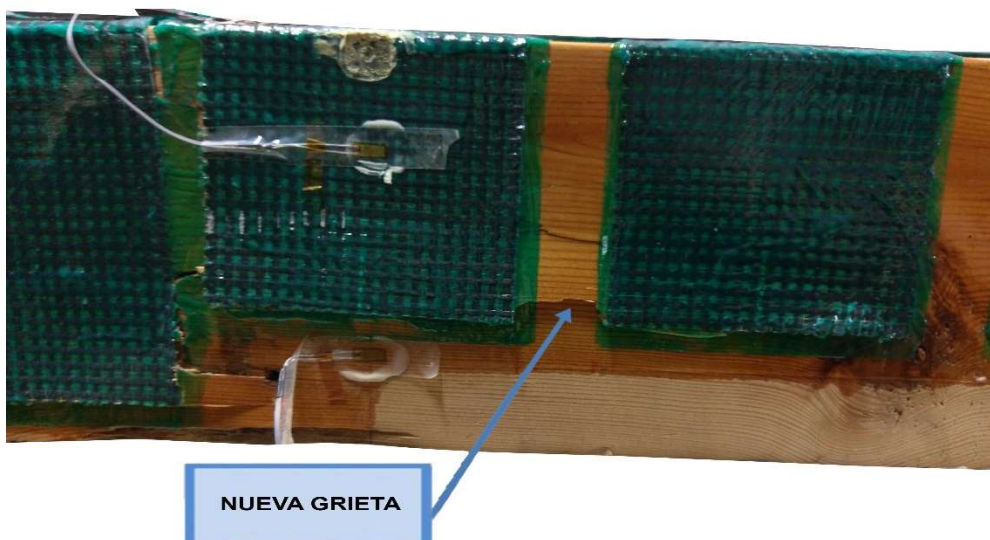


Figura 6.51 Reapertura de grieta existente en la rotura previa de la viga BR-r-1.

BR-r-2

	CARGA MÁXIMA (kN)	MOR (N/mm ²)	MOE (N/mm ²)	FLECHA MÁXIMA (mm)	DENSIDAD (kg/m ³)
BR-r-2	26,76	21,97	12899,86	72,60	522,52
Mejora respecto a NR (%)	40,62	42,66	65,13	106,54	

Tabla 6.15 Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima y densidad para la viga BR-2.

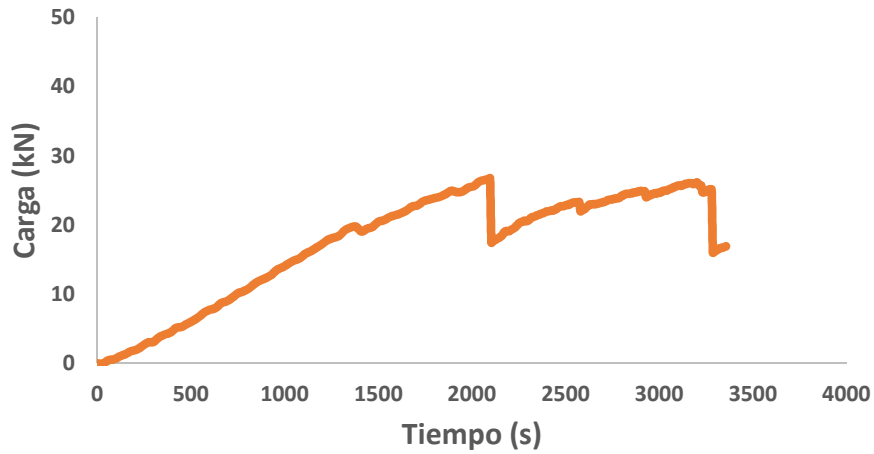


Figura 6.52 Gráfica carga-tiempo de la viga BR-r-2.

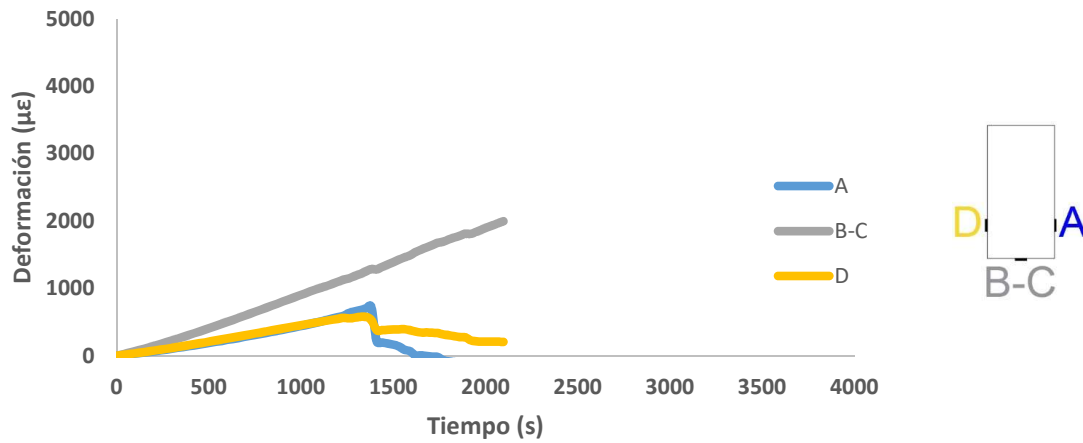


Figura 6.53 Gráfica deformación-tiempo de la viga BR-r-2.

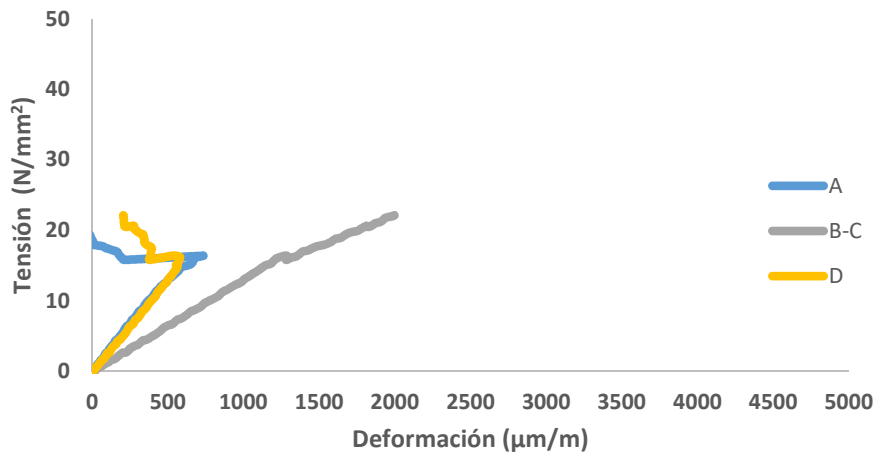


Figura 6.54 Gráfica tensión-deformación de la viga BR-r-2.

En la Tabla 6.15 se pueden observar los datos mecánicos tras el ensayo de la viga BR-r-2. La viga alcanza su capacidad máxima de carga a los 26,76 kN, con un MOR de 21,17 N/mm² y un MOE de 12899,86 N/mm². La carga y el MOR aumentaron con respecto a las vigas NR sin daño previo un 40,62 % y 42,66%, respectivamente. El MOE aumentó un 65,13%. La flecha para esta viga fue de 72,60 mm, un 106,54% más que para las vigas NR. En la Figura 6.52 se ve representada la gráfica de la carga frente al tiempo en la que se observa cómo la viga alcanzó su carga máxima, cayó un 30% hasta los 18 kN, y siguió admitiendo carga con una pendiente y valores muy similares a los anteriores. Después se produce un último escalón y no se llegó a romper la viga totalmente debido a que la prensa se encontraba cerca de su recorrido máximo y se paró por seguridad. En la Figura 6.53 se observan las deformaciones registradas por las galgas. La galga B-C mantiene una pendiente constante y lineal hasta que la viga alcanzó la carga máxima. Las galgas A y D mantienen una trayectoria prácticamente idéntica hasta los 1800 s, instante en el que las deformaciones comienzan a reducirse. En la Figura 6.54 se puede observar un cambio de pendiente en la galga inferior, con lo cual pese a la rotura, el refuerzo permitió que la madera tuviera cierta plastificación. Dicha plastificación ocurrió a valores inferiores que para las vigas sin rotura previa debido al daño existente. En el momento de la rotura se produjo una gran deslaminación y desgarre del tejido de CFRP (Figura 6.55). La viga colapsó debido a los daños previamente sufridos, las grietas existentes llevaron al límite el material de CFRP y más concretamente el tejido, como se aprecia en la Figura 6.56, que juega un papel imprescindible en este tipo de refuerzos con materiales compuestos.



Figura 6.55 Deslaminación de la viga BR-r-2 tras su rotura.

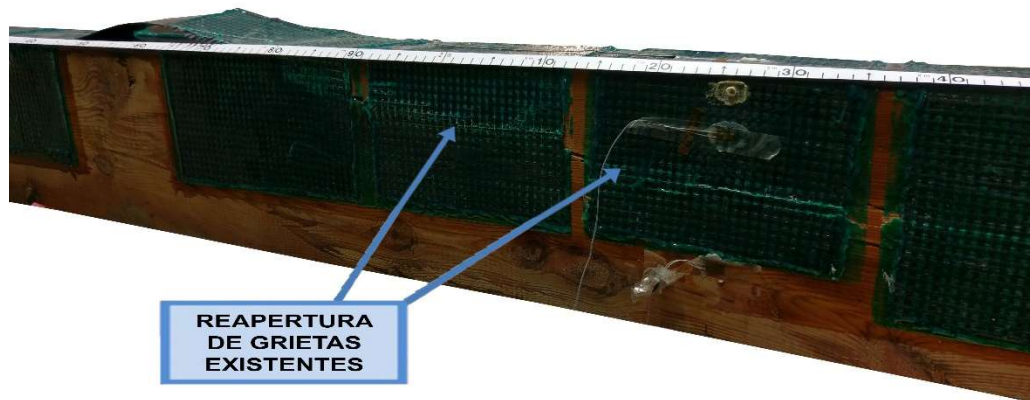


Figura 6.56 Reapertura de la grieta existente que causó la rotura previa de la viga BR-r-2 antes de volver a ser reforzada.

BR-r-3

	CARGA MÁXIMA (kN)	MOR (N/mm ²)	MOE (N/mm ²)	FLECHA MÁXIMA (mm)	DENSIDAD (kg/m ³)
BR-r-3	46,14	35,58	9671,25	79,24	520,86
Mejora respecto a NR (%)	142,46	131,04	36,20	125,43	

Tabla 6.16 Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima y densidad para la viga BR-3.

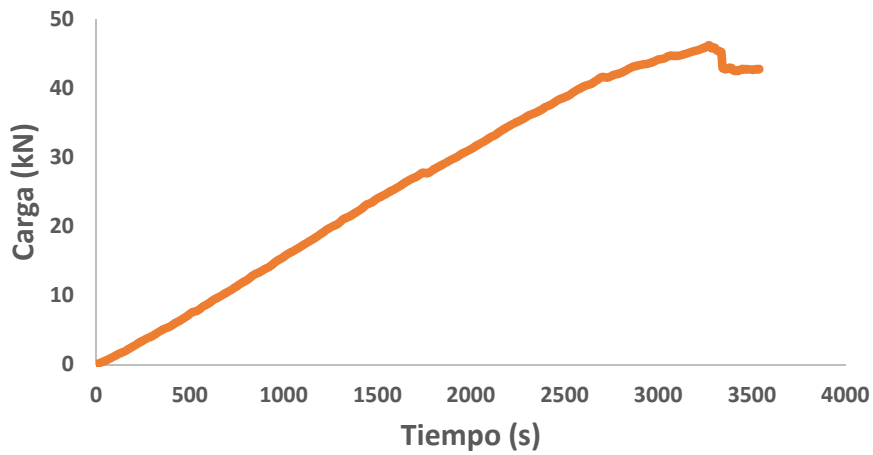


Figura 6.57 Gráfica carga-tiempo de la viga BR-r-3.

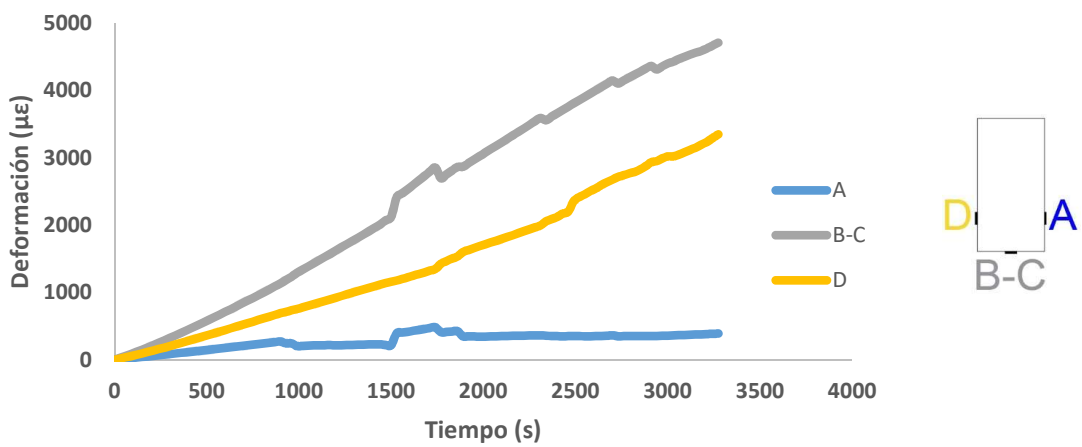


Figura 6.58 Gráfica deformación-tiempo de la viga BR-r-3.

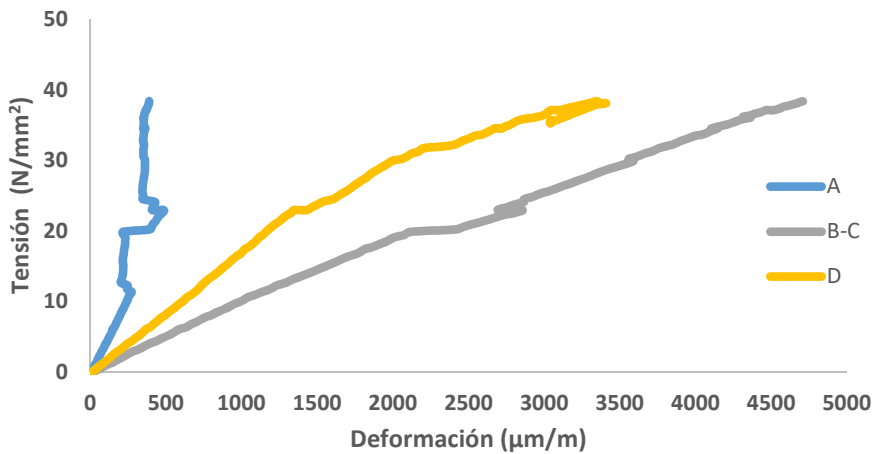


Figura 6.59 Gráfica tensión-deformación de la viga BR-r-3.

En la Tabla 6.16 se observan los datos elaborados a partir del ensayo a flexión de la viga BR-r-3. Esa viga obtuvo un MOR de 35,58 N/mm² y un MOE de 9671,25 N/mm². Fue la que más carga soportó, llegando a 46,14 kN, un 142,46% más que las vigas NR. El aumento del MOR y el MOE con respecto a las vigas NR fue del 131,04% y 23,80%, respectivamente. La flecha fue de 79,24 mm, también la mayor del grupo, aumentando en un 125,43% con respecto a las vigas NR. En la Figura 6.57 se ve la gráfica carga-tiempo que presenta una pendiente lineal y continua hasta que

alcanzó su carga máxima, después se produjo un pequeño escalón y se tuvo que detener el ensayo debido a que la máquina alcanzó su recorrido límite. En la Figura 6.58 se representa la deformación frente al tiempo, observándose como las galgas laterales se deformaron menos que la galga B-C. En la Figura 6.59 se aprecia una trayectoria lineal de la tensión frente a la deformación de la galga B-C hasta un valor de 22 N/mm² a partir del cual se registraron valores no lineales y con cierta inestabilidad debidos a las grietas existentes. La galga A no registró aumento de deformaciones aunque la tensión si lo hizo y se debió a su cercanía con defectos de la viga. En la Figura 6.60 se observa cómo en la viga BR-r-3 aparecieron nuevas grietas, pero no existió deslaminación ni un desgarró grave del tejido de CFRP debido la parada de la máquina por seguridad. Las grietas existentes debidas al ensayo previo de esta viga se mantuvieron cerradas, corroborando la efectividad del refuerzo BR (Figura 6.61).

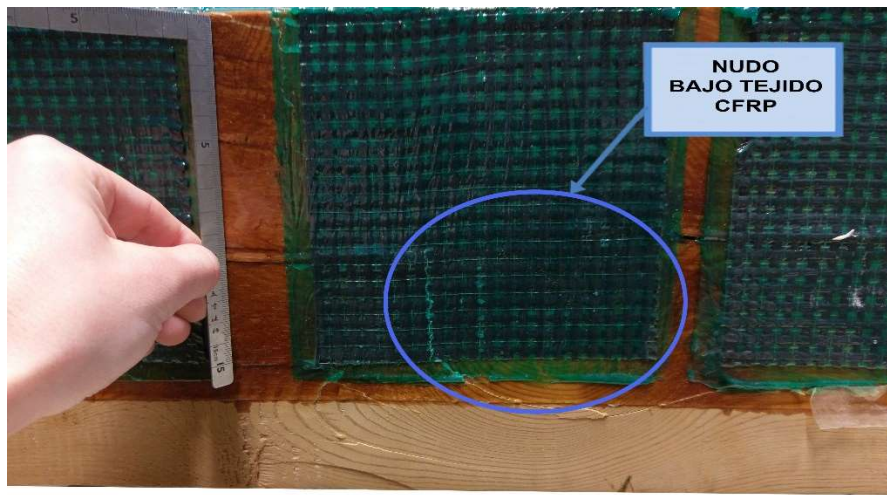


Figura 6.60 Aparición de nuevas grietas en la viga BR-r-3.

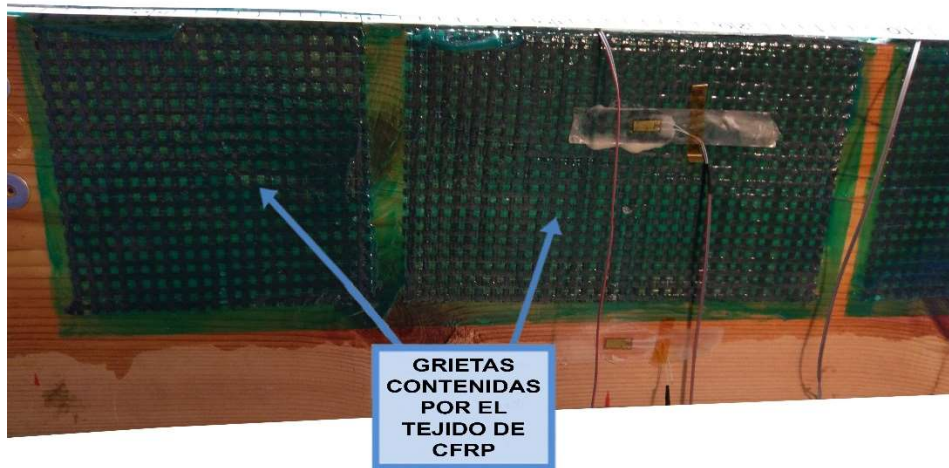


Figura 6.61 Grietas existentes contenidas por el material de CFRP de la viga BR-r-3.

BR-r-4

	CARGA MÁXIMA (kN)	MOR (N/mm ²)	MOE (N/mm ²)	FLECHA MÁXIMA (mm)	DENSIDAD (kg/m ³)
BR-r-4	20,05	14,81	8595,44	63,65	571,12
Mejora respecto a NR (%)	5,36	-3,83	72,48	81,08	

Tabla 6.17 Resultados de carga, tensión máxima a flexión, módulo de elasticidad a flexión, flecha máxima y densidad para la viga BR-4.

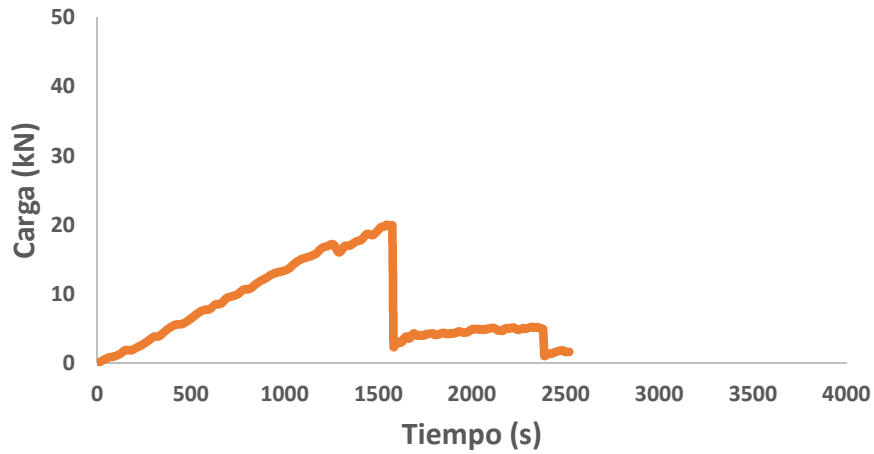


Figura 6.62 Gráfica carga-tiempo de la viga BR-r-4.

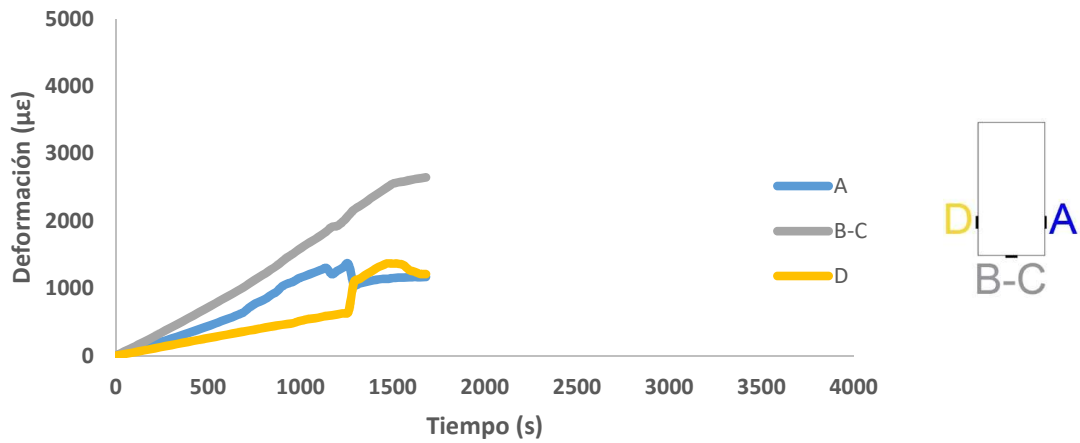


Figura 6.63 Gráfica deformación-tiempo de la viga BR-r-4.

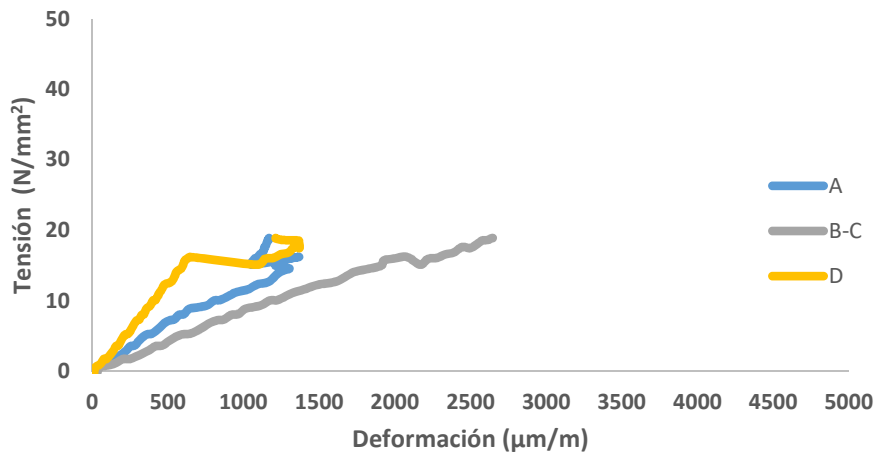


Figura 6.64 Gráfica tensión-deformación de la viga BR-r-4.

En la Tabla 6.17 se pueden observar los resultados mecánicos de la viga BR-r-4. Esta es la que menos diferencia obtuvo con respecto a las vigas NR. La carga máxima, el MOR y MOE fueron de 20,05 kN, 14,81 N/mm², y 8595,44 N/mm², con una variación respecto de las vigas sin reforzar del 5,36%, -3,83% y 10,03%, respectivamente. Por otro lado, la flecha alcanzó un máximo de 63,65 mm, lo que supone un aumento del 81,08% con respecto a las vigas NR. La gráfica carga-tiempo representada en la Figura 6.62 muestra como aproximadamente a los 1500 s de ensayo se produjo la rotura aunque la viga tras esto aguantó una carga de unos 5 kN durante unos 800 s, comprobándose por lo tanto que pese a estar rota, el refuerzo sigue aportando un carácter dúctil al elemento reforzado. En las Figuras 6.63 y 6.64 se aprecian las gráficas que relacionan la deformación con el tiempo y la tensión con la deformación, respectivamente. Las deformaciones en la galga B-C fueron muy estables hasta la rotura de la probeta. La rotura de la viga BR-r-4 se produjo debido a que esta viga no solamente se encontraba altamente dañada, sino que además esta viga tenía en el centro de la misma dos grandes nudos (Figura 6.35) lo que provocó grandes desgarros del tejido de CFRP como se observa en la Figura 6.65.

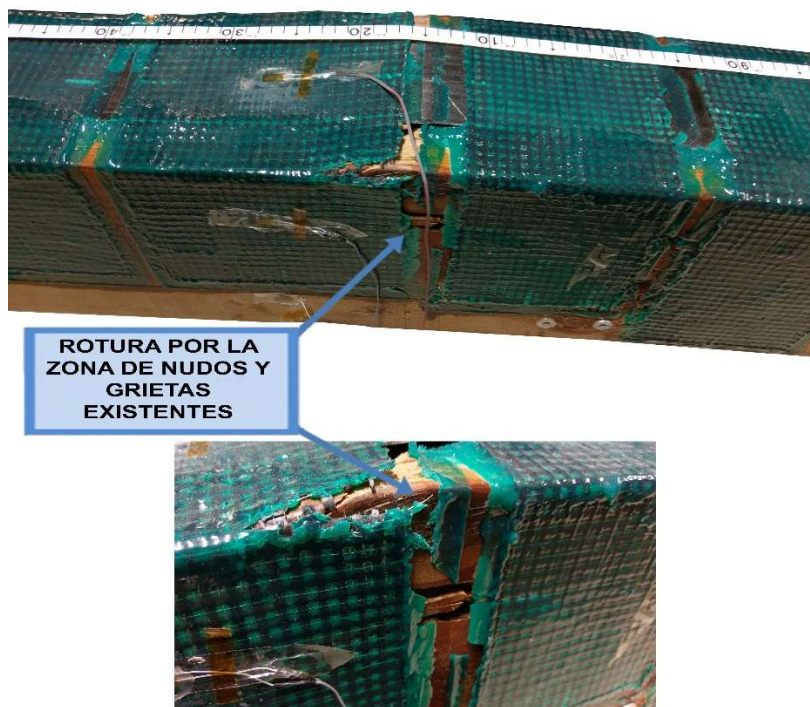


Figura 6.65 Rotura por nudos situados en el centro de la viga BR-r-4.

El resumen de resultados de este grupo se recoge en la Tabla 6.18, así como los valores promedio y la comparación de los resultados de las vigas NR con las BR-r. En la Figura 6.66 y 6.67 se realiza una comparativa de la carga máxima soportada, el MOR y el MOE entre las vigas NR, BR y BR-r.

VIGA	CARGA MÁXIMA (kN)	MOR (N/mm ²)	MOE (N/mm ²)	FLECHA MÁXIMA (mm)	DENSIDAD (kg/m ³)
BR-r-1	27,62	24,67	10497,46	74,94	561,53
BR-r-2	26,76	21,97	12899,86	72,60	522,52
BR-r-3	46,14	35,58	9671,25	79,24	520,86
BR-r-4	20,05	14,81	8595,44	63,65	571,12
Promedio	30,14	24,26	10416,00	72,61	544,01
Mejora respecto a NR (%)	58,38	57,53	33,34	106,57	

Tabla 6.18 Resumen de resultados para las vigas BR-r.

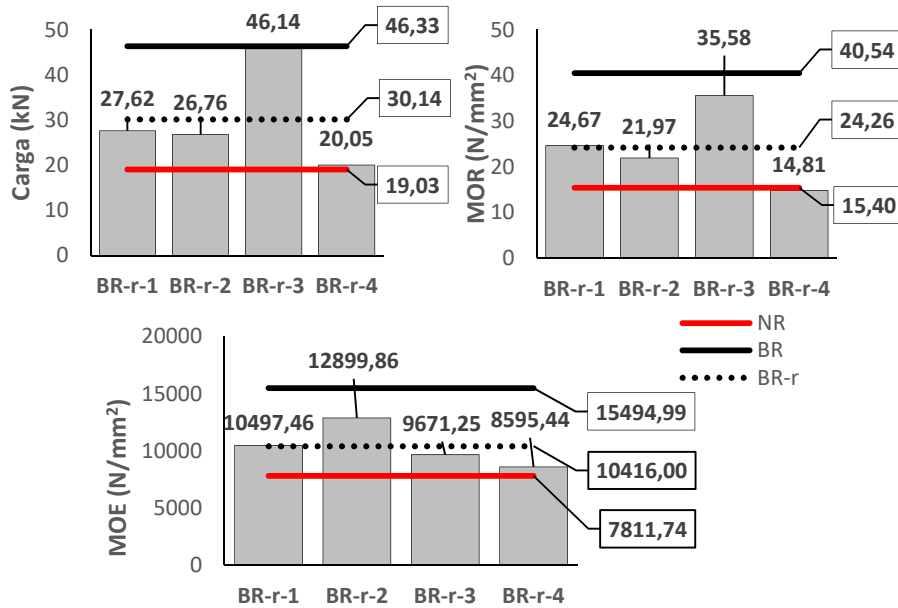


Figura 6.66 Carga máxima, MOR y MOE de las vigas BR-r. Valores medios de las vigas NR, BR y BR-r.

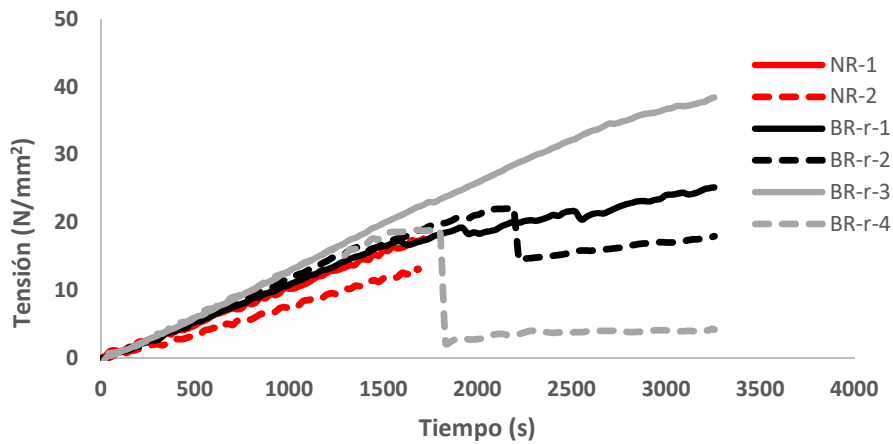


Figura 6.67 Gráfica comparativa tensión-tiempo de las vigas NR y BR-r.

La carga máxima, el MOR y el MOE medio del grupo BR-r fueron de 30,14 kN, 24,26 N/mm² y 10416,00 N/mm², respectivamente. El aumento con respecto las vigas NR fue del 58,38%, 57,53% y 33,34% para la carga máxima, MOR y MOE, respectivamente. La flecha media fue de 72,61 mm, un 160,57% más que en las vigas NR. Sin embargo los resultados del grupo BR-r no alcanzaron los obtenidos por el grupo BR, obteniendo una carga máxima, MOR y MOE inferiores en un 35%, 40% y 33%, respectivamente. Las capacidades mecánicas de las vigas reforzadas con rotura previa, aunque con unos resultados no tan buenos como los de las vigas sin rotura previa, superan con creces las de las vigas NR como se muestra en la Figura 6.66. La Figura 6.67 representa la gráfica carga-tiempo de las vigas NR y BR-r. Como claramente se observa, aun habiendo sufrido una rotura previa y habiendo llegado al límite de carga en flexión, las vigas que volvieron a ser reforzadas ofrecieron unas mayores capacidades mecánicas que las vigas sin reforzar y sin ensayar previamente.

Capítulo 7 Actuación de refuerzo “in situ”

7.1.Desarrollo de la actuación

En este Capítulo se describe el desarrollo de la puesta en obra, en una situación real de rehabilitación, del refuerzo trenzado BR. Esta obra se llevó a cabo en la Jefatura del MADOC – Edificio de la Capitanía General situado en la Plaza de San Juan de la Cruz, S/N. La actuación consistió en el refuerzo de una viga de 3380 mm de longitud situada en la cubierta del edificio que se encontraba totalmente rota en su cara traccionada, como se aprecia en la Figura 7.1.



Figura 7.1 Fotografía de la rotura de la viga. Línea roja: cara traccionada.

La actuación se llevó a cabo en dos partes: 1) Primero se realizó una recuperación de la posición inicial de la viga, lo máximo posible. Para fijar la viga en dicha posición se introdujeron 10 varillas de fibra de vidrio. Para establecer qué adhesivo se emplearía, se estudiaron dos tipos de adhesivos mediante ensayos *Pull-Out* en laboratorio. 2) Una vez fijada la viga, se procedió a la aplicación del refuerzo trenzado, siguiendo los procedimientos y técnicas según se desarrolló en el laboratorio.

7.2.Ensayos *Pull-Out*

Como se ha comentado anteriormente, la realización de los ensayos tenía el objetivo de comprobar la resistencia al arrancamiento entre varillas de fibra de vidrio y madera con dos tipos de adhesivos (resina Tipo 5 y Tipo 6) para mantener la viga en su posición original y poder realizar el refuerzo BR. Las probetas de madera fueron mecanizadas a partir de unas vigas de madera muy similar a la utilizada en la cubierta del Edificio de la Capitanía General. La elaboración de las probetas se llevó a cabo por el grupo de investigación ADIME en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación y los ensayos se efectuaron en el Laboratorio de Materiales del Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería, dirigido por el profesor José Rodríguez Montero, en la Escuela Técnica Superior de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Granada.

7.2.1.Elaboración

Clasificación

El primer paso después de recibir el material fue llevar a cabo una catalogación y clasificación. Cada probeta estaba formada por 3 materiales diferentes: madera, varilla corrugada de fibra de vidrio y la resina (descritas anteriormente en el Capítulo 3). Se realizó la medición de todas las dimensiones de cada una para comprobar que todas fueran las mismas y posteriormente se asignaron las varillas de GFRP a cada pieza de madera para que todas las probetas fueran similares. En la Figura 7.2 se puede observar el esquema de las probetas y la fotografía de una de ellas antes de su elaboración.

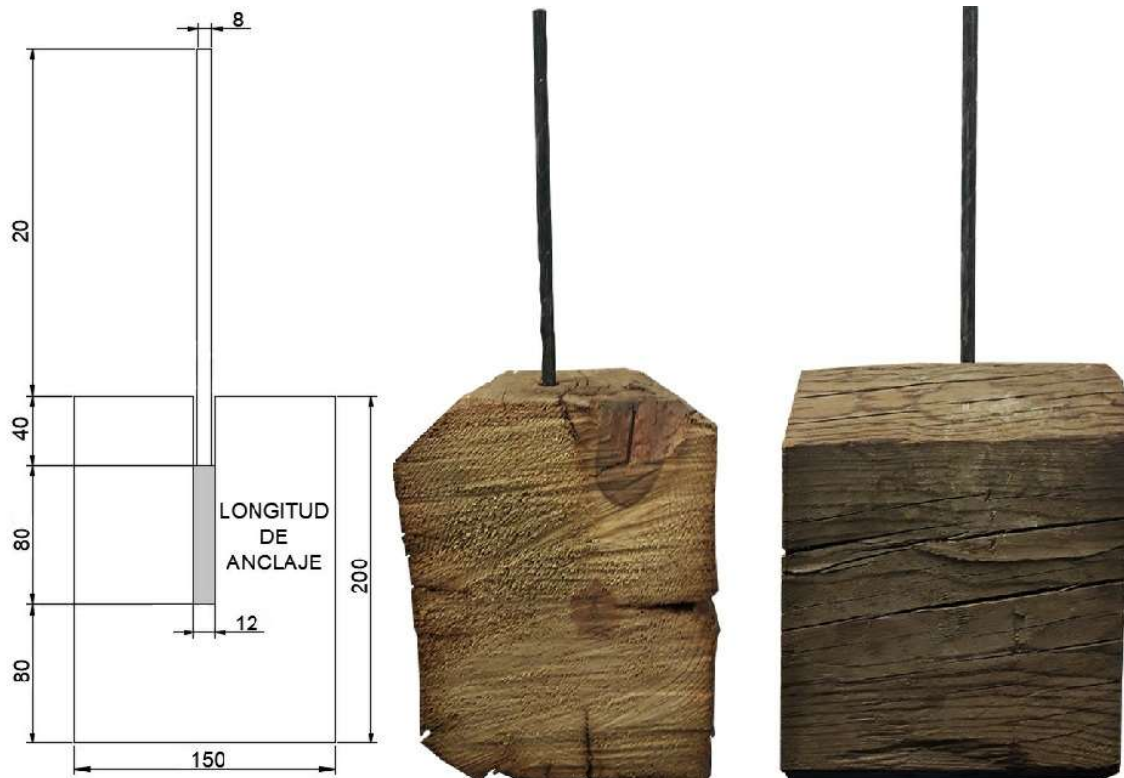


Figura 7.2 Esquema y fotografía de una probeta de madera con varilla de fibra de vidrio. Cotas en mm.

Como se observa en la Figura 7.2 las probetas de madera eran prismas rectangulares, extraídas de una viga de sección aproximada $150 \times 150 \text{ mm}^2$ y cortadas cada $199,0 \pm 1,0 \text{ mm}$, a las que se les practicó un agujero en la cara opuesta a la más plana de 120 mm de profundidad y $\varnothing = 12 \text{ mm}$ de diámetro. Las varillas de fibra de vidrio eran corrugadas con un diámetro de $\varnothing = 8 \text{ mm}$ y una longitud de $318,5 \pm 1,5 \text{ mm}$. En total se ensayaron 7 probetas, de las cuales se eligió arbitrariamente una que sirvió como verificación del ensayo antes de la elaboración del resto. Tras realizar todas las mediciones y asignar cada varilla a su pieza de madera se procedió a dividir las en dos grupos, uno para cada tipo de resina. Se decidió utilizar la resina Tipo 6 para la elaboración de la probeta de prueba, por requerir la elaboración de la misma una prueba previa para comprobar el tiempo de curado de la resina. Las probetas recibieron la nomenclatura

PO-X-Y,

donde PO se refería a las siglas en inglés de *Pull-Out*, X designaba el tipo de resina e Y el número de la probeta. A continuación se muestran en la Tabla 7.1 las medidas de las piezas de madera y varillas de fibra de vidrio con su nomenclatura. En la Figura 7.3 se puede observar la probeta de prueba marcada con su nomenclatura particular.

NOMENCLATURA	ALTO (mm)	ANCHO (mm)	LARGO (mm)	PROFUNDIDAD DEL AGUJERO (mm)	DIÁMETRO DEL AGUJERO (mm)	LONGITUD DE LA VARILLA (mm)
PO-P	199,0	152,5	150,0	114,0	11,7	320,0
PO-5-1	200,0	150,5	151,0	115,0	11,5	319,0
PO-5-2	199,0	150,5	148,5	116,5	13,0	317,0
PO-5-3	197,5	152,5	147,5	116,0	12,0	320,0
PROMEDIO	198,8	151,2	149,0	115,8	12,2	318,7
PO-6-1	198,0	150,0	150,5	117,0	10,6	318,5
PO-6-2	199,0	148,0	151,5	116,0	10,3	319,0
PO-6-3	199,0	150,0	150,5	114,0	12,8	319,0
PROMEDIO	198,7	149,3	150,8	115,7	11,2	318,8

Tabla 7.1 Dimensiones de las probetas para los ensayos Pull-Out.



Figura 7.3 Probeta de prueba marcada con nomenclatura.

Acondicionamiento

Antes de la adhesión entre las varillas de fibra de vidrio y las piezas de madera se examinaron las caras que estarían en contacto con el dispositivo y se realizó un cepillado y lijado de las mismas (Figura 7.4). El objetivo era que estuviesen completamente lisas y perpendiculares con respecto a la varilla, para que la aplicación de la carga produjese una presión uniforme. La maquinaria utilizada para este acondicionamiento fue una lijadora de banda y disco de la marca JET, modelo JSG96-102E. Seguidamente se limpió el interior de los agujeros de todas las piezas de madera con una pistola de aire a presión para hacer salir todas las virutas que se introdujeron tras el lijado, tal y como se ve en la Figura 7.5.



Figura 7.4 Lijado y cepillado de probeta para su acondicionamiento.



Figura 7.5 Limpieza de los agujeros de las piezas de madera con pistola de aire a presión.

Se estableció una longitud de anclaje de 80 mm con respecto a los 120 mm de longitud de los agujeros y, por tanto, que la zona cercana al borde no tuviese adhesivo con el objetivo de evitar la posible concentración de esfuerzos que se pueden dar en dicha zona y que la fuerza a ejercer entre la unión madera-adhesivo-GFRP fuese puramente a tracción. Para respetar esta zona de no adhesión se adaptaron las varillas de fibra de vidrio con un tope de látex, tal y como se puede ver en la Figura 7.6

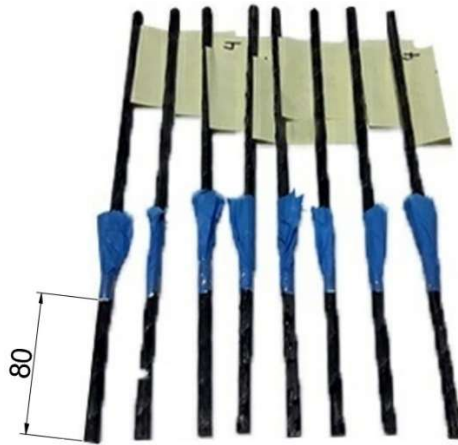


Figura 7.6 Varillas de fibra de vidrio adaptadas con zona de no adhesión. Cotas en mm.

Adhesión

Para finalizar la elaboración de las probetas, se procedió a la adhesión de las varillas de fibra de vidrio con las piezas de madera. En primer lugar se adhirieron las probetas PO-6, por tener la resina epoxídica de dos componentes CTS® EPO 150® un mayor tiempo de curado, y que todas estuviesen al mismo tiempo preparadas para ensayar. Se procedió al mezclado de los dos componentes de la resina en un vaso de plástico a bajas revoluciones y se vertió, una a una, en el interior de todas las probetas. A continuación se introdujeron las varillas y se limpió la resina sobrante, tal y como se puede ver en la Figura 7.7



Figura 7.7 Izquierda: vertido de la resina Tipo 6 en el agujero de la pieza de madera. Derecha: Inserción de la varilla de fibra de vidrio en la pieza de madera.

Para las probetas PO-5 se utilizó el taco químico INDEX® MOVISE®, cuya aplicación requirió del uso de una pistola. De igual modo que con las probetas PO-6, se introdujo el adhesivo en el agujero de la pieza con ayuda de la cánula de aplicación de la pistola. Se introdujo la varilla hasta que tocó el fondo y posteriormente se retiró la resina sobrante, lo cual resultó más sencillo que con las probetas PO-6 (Figura 7.8).



Figura 7.8 Izquierda: vertido de la resina Tipo 5 en el agujero de la pieza de madera. Centro: inserción de la varilla de fibra de vidrio en la pieza de madera. Derecha: retirada de resina sobrante.

Además de la longitud de anclaje y zona de no adhesión antes mencionada, se prestó especial atención a que las varillas quedasen totalmente perpendiculares a la cara de contacto con el dispositivo de tracción. Para ello, se utilizó una pequeña escuadra y se fijó la posición con tensores entre el extremo de cada varilla y las piezas de madera, tal y como se observa en la Figura 7.9. Por último se dejó curar el adhesivo con las probetas en una sala limpia, lejos de la exposición directa al sol y en las condiciones de temperatura y humedad recomendadas por los fabricantes (Figura 7.10).



Figura 7.9 Izquierda: comprobación de perpendicularidad de la varilla con respecto a la cara crítica. Derecha: fijación de la varilla a la pieza de madera para mantener perpendicularidad.



Figura 7.10 Curado de las probetas en una sala acondicionada.

7.2.2.Descripción del ensayo

Para los ensayos de arrancamiento de varillas de fibra de vidrio y madera no existe ninguna normativa específica, por lo que se siguieron las pautas de la norma para extracción en hormigón endurecido [22] y diversos estudios de ensayo específicos sobre la madera [15, 16]. En la Tabla 7.1 se pueden ver las fechas de elaboración y ensayo de las probetas.

NOMENCLATURA	FECHA DE ELABORACIÓN	FECHA DEL ENSAYO
PO-P	02/06/2017	05/06/2017
PO-5-1	05/06/2007	07/06/2017
PO-5-2	05/06/2007	07/06/2017
PO-5-3	05/06/2007	07/06/2017
PO-6-1	05/06/2007	07/06/2017
PO-6-2	05/06/2007	07/06/2017
PO-6-3	05/06/2007	07/06/2017

Tabla 7.2 Fechas de elaboración y ensayo de las probetas Pull-Out.

Para los ensayos se utilizó la prensa electromecánica de la marca IBERTEST modelo TESTRONIC-100-MD2, que contaba con doble espacio de ensayo y una capacidad de carga de 100 kN (Figura 7.11). La configuración de la máquina fue la misma que para un ensayo de tracción de barras de acero, anclándose con mordazas la varilla de GFRP y la jaula en la parte superior e inferior, respectivamente. También se utilizó una jaula de acero según el esquema de ensayo que se describe en la Figura 7.12. Ella se observa la disposición de la jaula, la probeta y la dirección y punto de aplicación de la fuerza. El ensayo se realizó con control por posición, a una velocidad de 1,5 mm/s, registrándose los datos de carga y recorrido de la prensa.

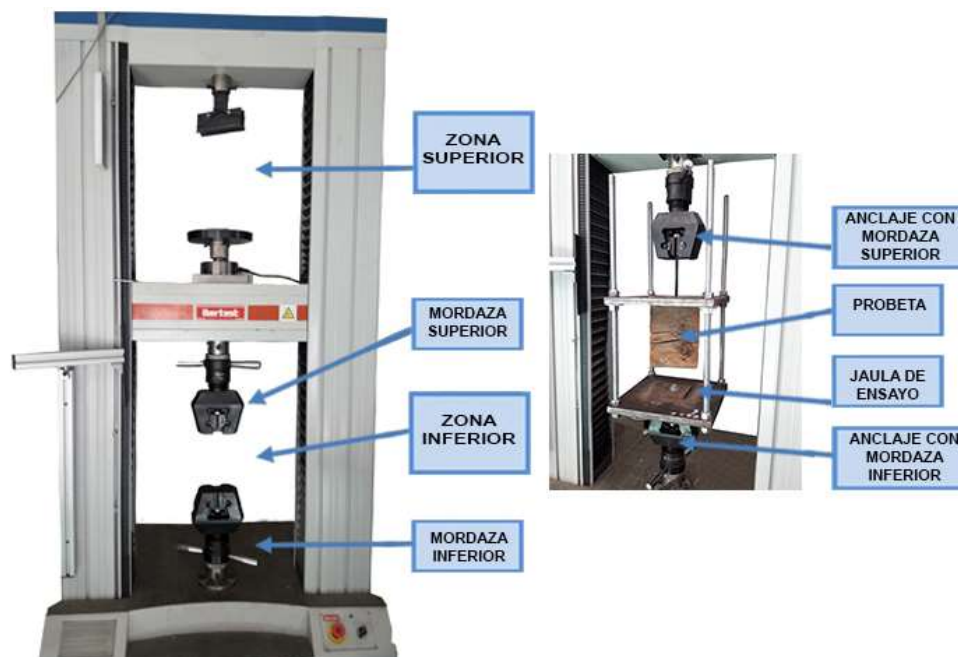


Figura 7.11 Izquierda: máquina de ensayos electromecánica IBERTEST TESTRONIC-100-MD2. Derecha: colocación de la probeta de prueba PO-P en la máquina.

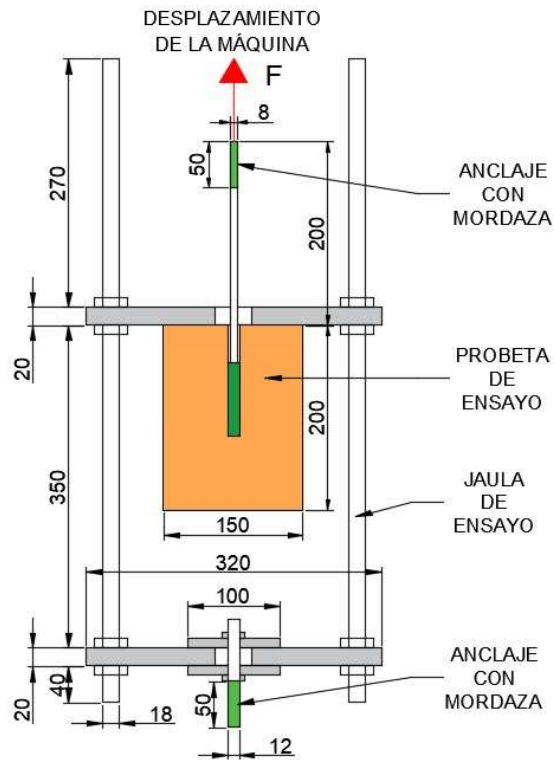


Figura 7.12 Esquema de ensayo de probetas Pull-Out. Cotas en mm.

7.2.3. Resultados

A continuación se muestran los resultados de los ensayos por grupos, realizando finalmente una comparativa entre estos.

PO-5

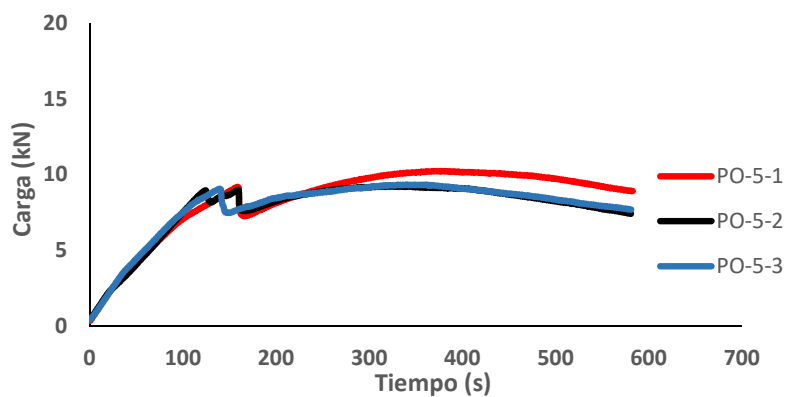


Figura 7.13 Gráficas carga-tiempo del grupo PO-5. Línea roja: PO-5-1. Línea negra: PO-5-2. Línea azul: PO-5-3.

Como se observa en la Figura 7.13 todas la probetas siguieron una trayectoria aproximadamente lineal hasta la carga máxima soportada. Tras ese punto, la carga cayó entre un 15% y un 20%, debido al arrancamiento de la unión madera-adhesivo. Posteriormente, la carga aumentó levemente, para luego descender y mantenerse casi constante, produciéndose en esta última

fase la extracción de las varillas en la misma proporción que la caída de la carga. En la Tabla 7.3 y Figura 7.14 se pueden ver los resultados obtenidos, así como el valor medio del grupo. Las probetas PO-5-1, PO-5-2 y PO-5-3 resistieron un total de 10,24 kN, 9,23 kN y 9,34 kN, respectivamente. El valor medio obtenido fue de 9,60 kN.

	PO-5-1	PO-5-2	PO-5-3	PROMEDIO
Carga máxima (kN)	10,24	9,23	9,34	9,60

Tabla 7.3 Resultados de probetas PO-5.

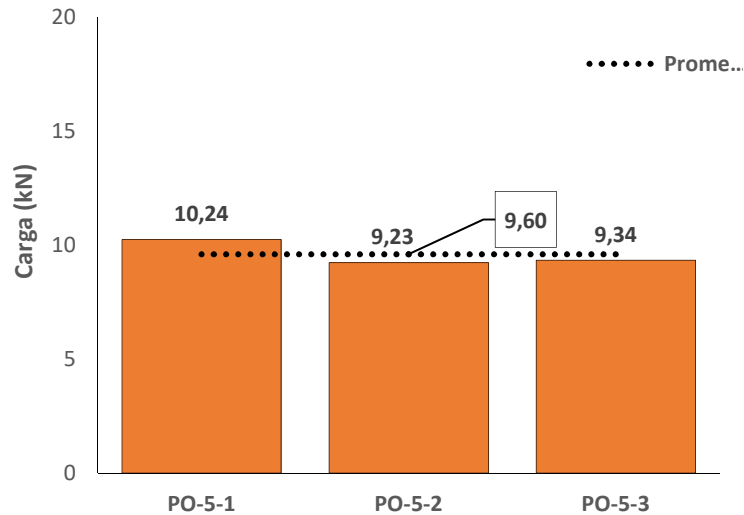


Figura 7.14 Gráfica de carga máxima para las probetas PO-5. Línea punteada: valor medio.

PO-6

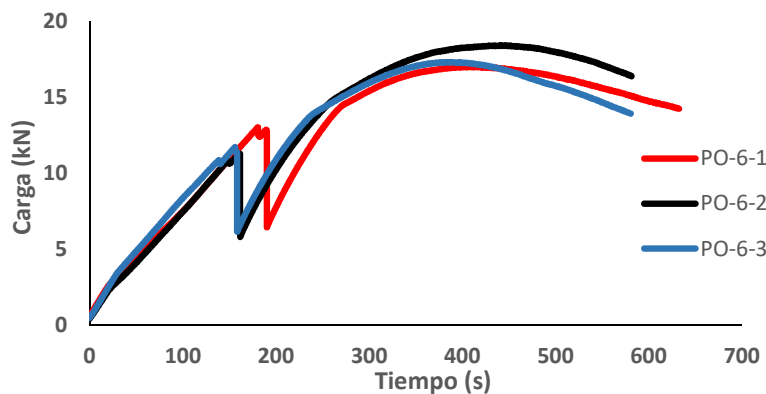


Figura 7.15 Gráficas carga-tiempo del grupo PO-6. Línea roja: PO-6-1. Línea negra: PO-6-2. Línea azul: PO-6-3.

Como se observa en la Figura 7.15 todas las probetas tuvieron un comportamiento similar, describiendo una pendiente casi lineal hasta el primer escalón, entre los 150 y 190 s. Después de este escalón la carga descendió entre un 46% y un 49%, tras lo que la pendiente aumentó su inclinación, lo que indica un mayor esfuerzo para seguir arrancando las varillas de GFRP, para posteriormente alcanzar la carga máxima, con un aumento del 48% con respecto a la carga alcanzada antes del escalón. Por último, la carga se mantiene levemente y comienza a

descender, debido al lento arrancamiento de las varillas. En la Tabla 7.4 y Figura 7.16 se pueden ver los resultados obtenidos del grupo y en la Figura 7.17 una comparativa de los dos grupos.

	PO-6-1	PO-6-2	PO-6-3	PROMEDIO
Carga máxima (kN)	17,02	18,42	17,32	17,59

Tabla 7.4 Resultados de probetas PO-6.

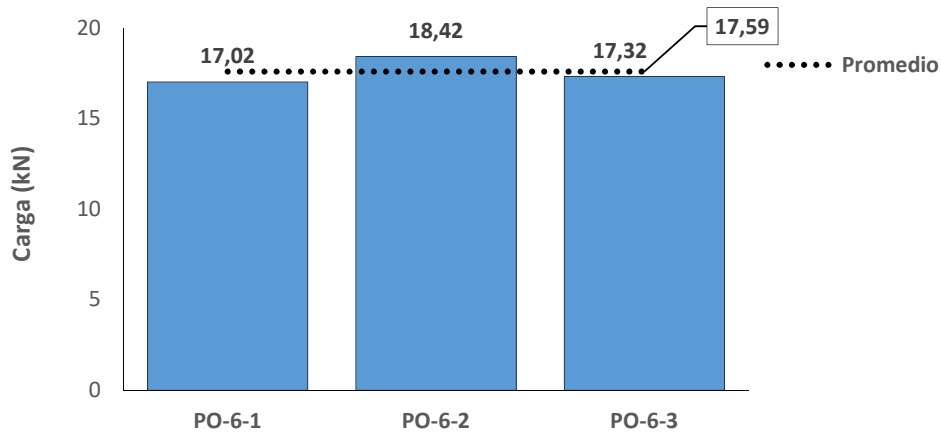


Figura 7.16 gráfica de la carga máxima para las probetas PO-6. Línea punteada: valor medio.

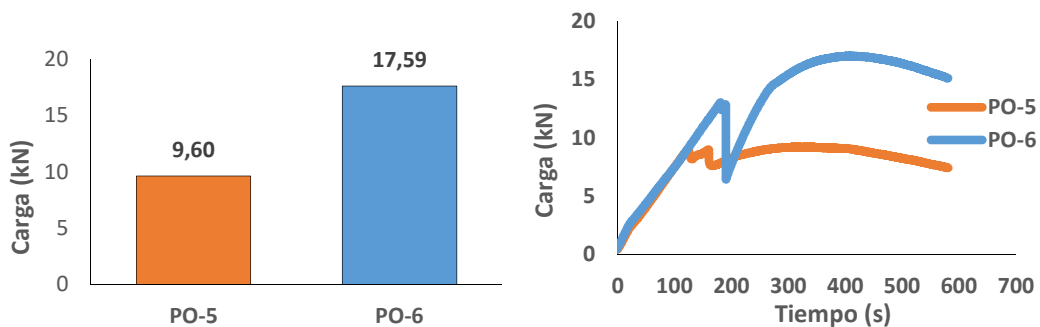


Figura 7.17 Comparativa de cargas máximas entre las probetas PO-5 y PO-6.

Como se muestra en los resultados anteriores, las probetas adheridas con la resina Tipo 6 ofrecieron mayor resistencia al arrancamiento que las adheridas con la resina Tipo 5. La carga máxima soportada por las probetas PO-6-1, PO-6-2 y PO-6-3 fue de 17,02, 18,42 y 17,32 kN, respectivamente. La carga media de las probetas PO-6 fue de 17,59 kN, un 83,23% más que la resistida por las probetas PO-5. Cabe prestar especial atención a que la principal diferencia entre las dos resinas fue el comportamiento después del escalón, que se produjo en 9 y 12 kN para las probetas PO-5 y PO-6, respectivamente. Tras este escalón la resina Tipo 5 mantiene una carga constante hasta la carga máxima, aumentando un 5,6% con respecto al escalón, mientras que con la resina Tipo 6 aumenta un 48,3%. Por último, se elaboró la Tabla 7.5 en la que se comparó el tiempo de ejecución de las probetas en porcentaje, utilizando como referencia las probetas PO-5. Como se observa, las probetas PO-6 requirieron de mayor tiempo de ejecución debido a la elaboración previa de la resina Tipo 6.

PROBETAS	TIEMPOS DE EJECUCIÓN (%)
PO-5	100%
PO-6	150%

Tabla 7.5 Comparativa de tiempos de ejecución de las probetas Pull-Out.

7.3. Ejecución del refuerzo

La viga a reforzar situada en la cubierta del Edificio de la Capitanía General tenía una gran grieta de 1940 mm debida a una rotura por efecto de las tensiones de tracción y cortante, tal y como se observa en el croquis de la Figura 7.18. Los ensayos *Pull-Out* realizados ayudaron a determinar el adhesivo que se utilizó para mantener la viga en su posición original previa a la rotura, y debido a que la aplicación de la misma debía hacerse desde abajo y en posición inclinada, se eligió la resina Tipo 5. Esta resina, aunque con capacidades mecánicas inferiores a las de la resina Tipo 6, poseía una consistencia adecuada para una correcta aplicación en la posición requerida. La situación de partida para la elaboración del refuerzo trenzado con materiales de CFRP fue con la viga ya acondicionada en su posición original, tras la inserción de 10 varillas de fibra de vidrio y con sus caras lijadas, cepilladas y limpias, tal y como se aprecia en la Figura 7.19.

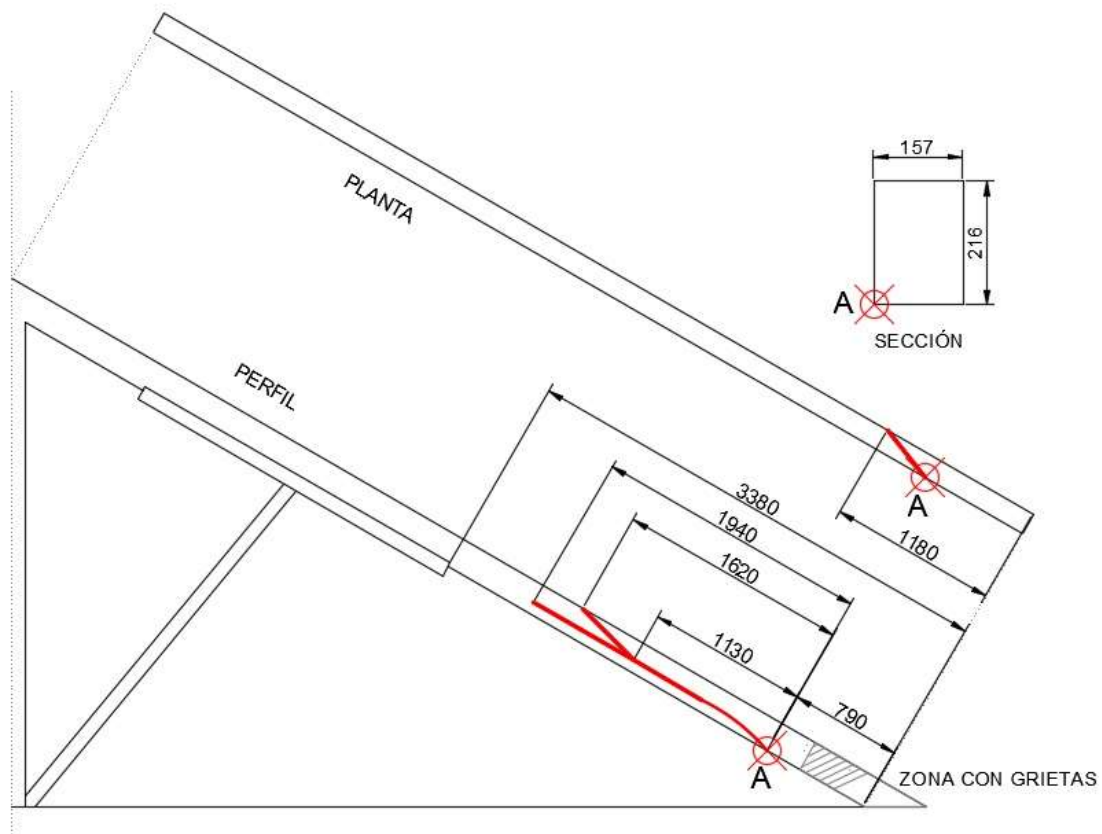


Figura 7.18 Croquis de situación de partida de la viga. Línea roja: grieta de rotura. Cotas en mm.

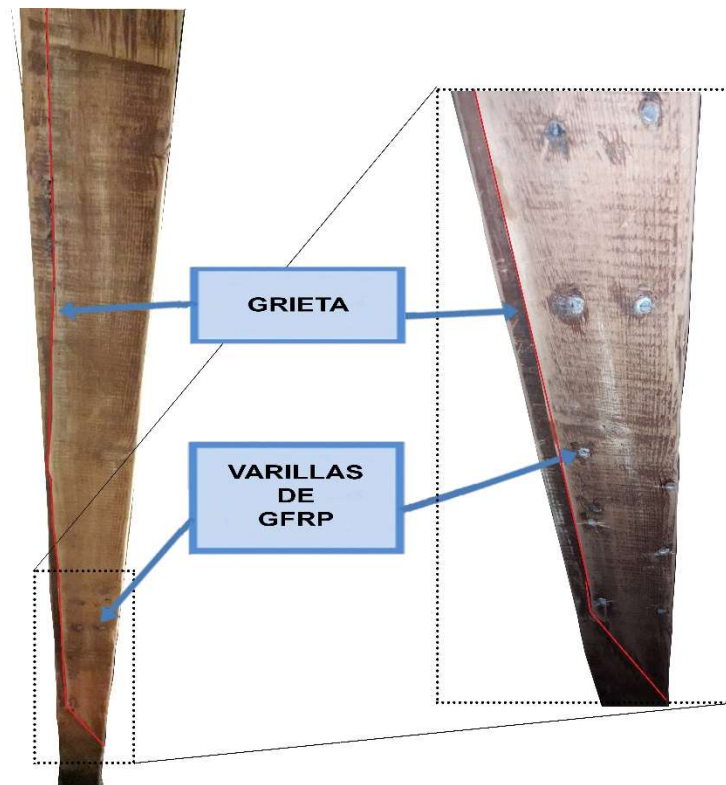


Figura 7.19 Recuperación de la posición original de la viga con varillas GFRP y resina Tipo 5.

7.3.1. Elaboración

El refuerzo específico de esta viga fue diseñado y realizado por Francisco José Rescalvo Fernández, miembro del grupo ADIME del Departamento de Física Aplicada de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Edificación de la Universidad de Granada, con la experiencia requerida de este tipo de refuerzos con material de CFRP. En el diseño se tuvo en cuenta que el laminado de 100 mm de CFRP se colocaría en toda la longitud de la viga a reforzar. El tejido de CFRP se configuró en 10 piezas de diferentes dimensiones, tal y cómo se especifica en la Figura 7.20 y la Tabla 7.6.

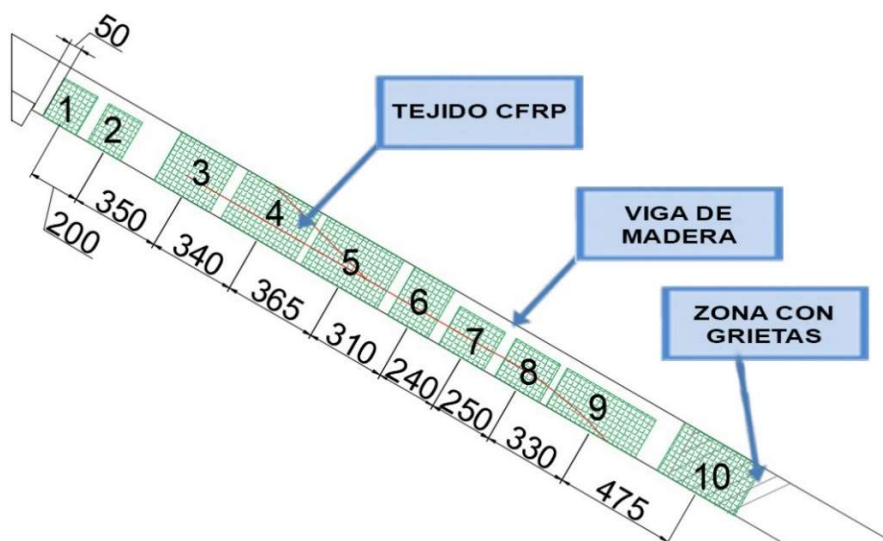


Figura 7.20 Esquema de distribución y colocación del tejido de CFRP de la viga a rehabilitar. Cotas a ejes de las piezas de tejido de CFRP en mm.

Nº PIEZA TEJIDO CFRP	LARGO (mm)	ANCHO (mm)					
1	500	150					
2	500	150					
3	600	250					
4	600	330					
5	600	340					
6	600	180					
7	500	200					
8	500 <td 200	9	500	400	10	600	350
9	500	400					
10	600	350					

Tabla 7.6 Medidas de las diferentes piezas de tejido de CFRP empleadas en la rehabilitación.

Preparación de material

En primer lugar se preparó todo el material necesario para su transporte al lugar de rehabilitación. Este material se encuentra descrito en los Capítulos 3 y 4, aunque cabe destacar que el tejido de CFRP se cortó y marcó previamente según las medidas indicadas en la Tabla 7.6 para que la manipulación fuese en un lugar lo más limpio posible, a fin de evitar deterioros (Figura 7.21).



Figura 7.21 Corte y marcado de las piezas 1 y 2 de tejido de CFRP para la elaboración del refuerzo de la viga a rehabilitar.

Imprimación

El primer día de actuación en la cubierta del Edificio de la Capitanía General estuvo dedicado a aplicar la capa de imprimación. El acceso era muy complejo y el espacio de trabajo muy reducido. Además, la aplicación debía ser meticulosa para aprovechar al máximo el material, el cual solo se había aplicado antes en condiciones de laboratorio.

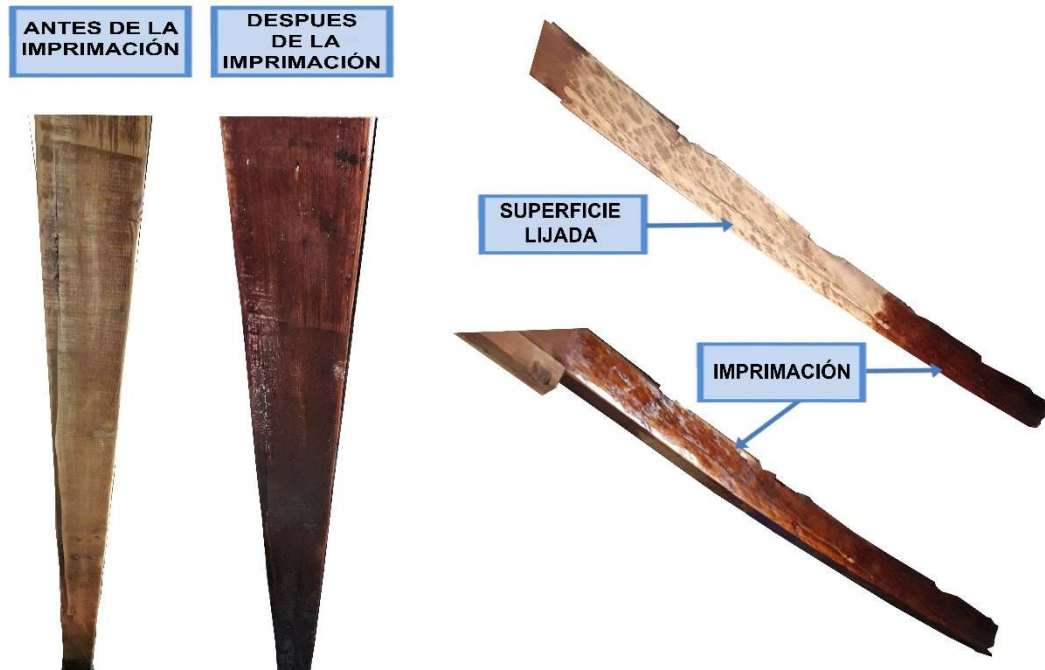


Figura 7.22 Imprimación de la viga.

En la Figura 7.22 se observa la situación de partida y el acabado tras la imprimación que, a diferencia de los refuerzos realizados en laboratorio y por cuestiones de operatividad, ocupó toda la superficie de la viga y no solo la del refuerzo. Por último, se tapó la viga para evitar en la medida de lo posible la adherencia de polvo sobre su superficie y que esta se mantuviese limpia (Figura 7.23).



Figura 7.23 Protección de la viga frente al polvo tras la imprimación.

Laminado de CFRP

La adhesión del laminado se realizó después de la imprimación, dejando que esta curase según las indicaciones del fabricante. En primer lugar se ascendió a la cubierta para replantear la colocación del CFRP. Posteriormente se cortó el laminado a la longitud adecuada y se preparó la resina para su adherencia a la viga, tal y como se aprecia en la Figura 7.24.



Figura 7.24 Medición y corte del laminado de CFRP.

Una vez subido todo el material a la cubierta, se aplicó la resina, siguiendo el mismo procedimiento que en el laboratorio. A diferencia del laboratorio, en esta ocasión el laminado debía ser aplicado desde abajo. En la Figura 7.25 se muestra la imagen del laminado ya colocado.



Figura 7.25 Proceso de adhesión del laminado de CFRP en la cara inferior de la viga.

Tejido de CFRP

La aplicación del tejido de CFRP se realizó siguiendo el procedimiento descrito en el Capítulo 4. Al igual que con el laminado, se comenzó con el replanteo de cada una de las 10 bandas de tejido de CFRP, para proceder posteriormente a su colocación.

El criterio para aplicar el tejido fue empezar por la parte inferior de la viga, por ser la más compleja de ejecutar, hasta llegar arriba, comenzando por la pieza número 10 y siguiendo por orden descendente. En la Figura 7.26 se representa una imagen de la viga antes y después de colocar el tejido, vista desde la parte inferior. En la Figura 7.27 se puede observar desde el lateral.

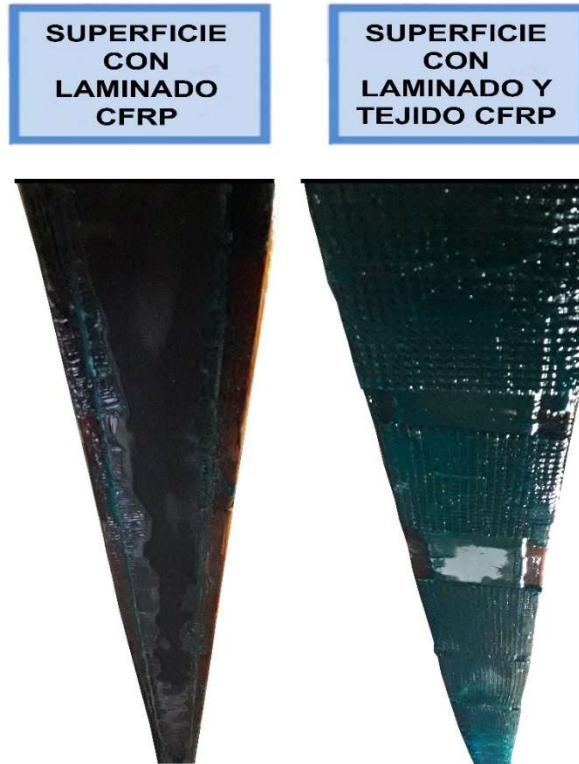


Figura 7.26 Imagen de la viga antes y después de la colocación del tejido de CFRP.



Figura 7.27 Vista lateral del tejido de CFRP una vez colocado en la viga.

Segunda mano de resina

Para finalizar la intervención y al igual que en la elaboración del refuerzo de vigas en el laboratorio, se aplicó una segunda mano de resina. Por último, se elaboró la Tabla 7.7 que recoge las tareas y las fechas de elaboración del refuerzo.

TAREA	FECHA DE EJECUCIÓN
Preparación del material	29/05/2017
Imprimación	06/06/2017
Preparación y colocación del laminado de CFRP	08/06/2017
Preparación y colocación de tejido de CFRP	09/06/2017
2ª mano de resina	12/06/2017

Tabla 7.7 Tareas y fechas de ejecución del refuerzo sobre la viga.

7.3.2. Comparativa tiempos de ejecución

Durante la elaboración de las vigas reforzadas en el laboratorio se obtuvieron datos en cuanto al tiempo invertido y el número de operarios, haciendo una media de todos los especímenes del mismo grupo [2, 3]. En la ejecución del refuerzo “in situ” se realizaron medidas similares, a fin de realizar una comparativa entre ambos. Los datos obtenidos se cuantificaron mediante porcentajes, asignando el 100% a los refuerzos BR-B en vigas de pequeña escuadría. Ante la gran diferencia existente entre las vigas de 1,3 m y 4,5 m, se decidió normalizar los tiempos según el m² de superficie reforzada, de modo que los resultados fuesen comparables. Se midió el tiempo empleado en la aplicación de la imprimación y de la resina. En la Tabla 7.8 se pueden observar los tiempos de cada grupo.

TIEMPOS DE APLICACIÓN	V. PEQUEÑA ESCUADRÍA		V. GRAN ESCUADRÍA CON ROTURA PREVIA	V. GRAN ESCUADRÍA SIN ROTURA PREVIA	REFUERZO “IN SITU”
	BR-U	BR-B			
Imprimación	100%		70%	67%	62%
Resina	121%	100%	50%	59%	77%

Tabla 7.8 Comparativa de tiempos de ejecución de los diferentes tipos de refuerzos en vigas de 1,3 m y 4,5 m.

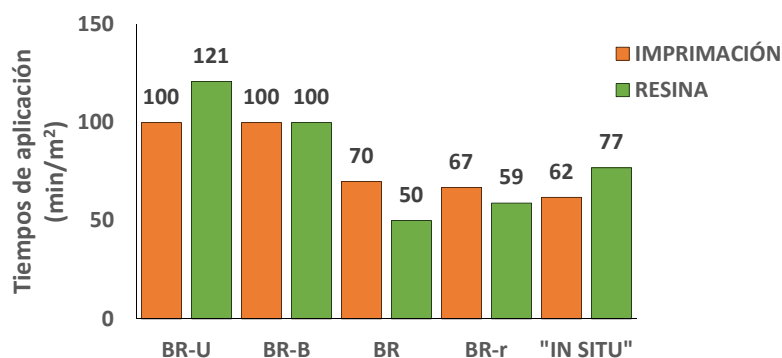


Figura 7.28 Gráfico comparativo de tiempos de ejecución para las vigas BR-U, BR-B, BR, BR-r y el refuerzo “in situ”.

En la Figura 7.28 se puede visualizar gráficamente cómo al aumentar el tamaño de la viga los tiempos de aplicación se reducen. Para vigas de 4,5 m reforzadas en laboratorio los tiempos se reducen un mínimo de 30% y 41% en la aplicación de imprimación y resina, respectivamente. En el caso del refuerzo realizado “in situ” los resultados fueron similares, una reducción del 38% para la resina y del 23% para la resina. Como se puede observar, el tiempo de aplicación de la imprimación en la rehabilitación de la viga rota aumentó un 30,5% con respecto a las vigas de gran escuadría con rotura previa. Sin embargo, el tiempo de ejecución de la imprimación se redujo un 7,5%.

Capítulo 8 Conclusiones

Este Proyecto Fin de Grado ha sido la continuación del análisis de las vigas ensayadas y presentadas en los Proyectos Fin de Grado de Iván Jiménez Rubio y Elías Berbel Román [2,3], en el cual se presenta una solución novedosa denominada refuerzo “trenzado”. Este tipo de refuerzo se ha aplicado en vigas de pequeña y gran escuadría. En este último caso, en vigas sin y con rotura previa. Así mismo, el refuerzo se ha aplicado en una situación real en la que se ha rehabilitado una viga de la cubierta de la Jefatura del MADOC – Edificio de la Capitanía General.

En primer lugar, de los ensayos de laboratorio en vigas de 1,3 m y 4,5 m sin rotura previa, se puede comprobar claramente cómo para todos los casos, este tipo de refuerzo aumenta la capacidad mecánica un mínimo de un 22,12%. De las vigas pequeñas se extrajo la conclusión de que el tejido bidireccional presentaba mejores resultados frente al unidireccional, no solamente en términos de capacidades mecánicas sino de la ductilidad que aportaba el primero frente al segundo. Del refuerzo de vigas de 4,5 m sin rotura previa, se pudo observar como esta disposición de refuerzo seguía manteniendo la ductilidad observada en vigas pequeñas, así como se consiguió una mejora de la capacidad mecánica de un mínimo de 126,59%, lo cual es algo sumamente destacable.

Por otro lado, se llevó a cabo una recuperación en laboratorio de 4 vigas previamente rotas y con su capacidad mecánica totalmente agotada, reforzándolas con la solución trenzada. Como ha quedado comprobado, esta solución no solo es capaz de recuperar totalmente la capacidad mecánica de la viga, sino de mejorarla en todos los casos a la vez que dotarla de una ductilidad frente a la rotura que por sí sola no tendría. Así mismo la flecha de la viga no solo se recupera, sino que mejora un mínimo de un 81%.

Del estudio de tiempos de elaboración, se ha comprobado que en vigas de gran escuadría se redujo con respecto a las vigas pequeñas. Entre un 30% y 38% tratándose de la imprimación y entre un 23% y 50% para la resina.

Por último, se llevó a cabo la primera actuación de un refuerzo de CFRP en una situación real de obra, rehabilitando un par de cubierta que se encontraba altamente dañado y con riesgo de llegar al colapso total. La realización de esta actuación evitó el desmontaje parcial de la cubierta de la Jefatura del MADOC para extraer la viga rota y reemplazarla por una nueva, lo que hubiese supuesto un gran aumento de los costes debido al tiempo y la mano de obra necesaria.

Los ensayos *Pull-Out* que se realizaron previamente a la actuación, permitieron determinar la resina adecuada para la colocación de las varillas que sujetarían la viga mientras se colocaba la solución trenzada. La resina Tipo 5 fue la seleccionada debido a la facilidad de aplicación y al cumplimiento de las resistencias requeridas.

De la actuación “in situ”, la principal conclusión que se extrajo y la cual corrobora trabajos previos, es que en la elaboración de este tipo de refuerzos reside la clave de su éxito. Por lo tanto, es imprescindible que la actuación se lleve a cabo por un especialista que conozca los materiales, modos de empleo, consejos de los fabricantes, tiempos de trabajo, secado y curado de las resinas, detección de anomalías durante la elaboración, etc.

La viga ha llevado y llevará un seguimiento para comprobar la efectividad del refuerzo y evitar posibles fallos prematuros. A día de hoy no se ha detectado ninguna anomalía que pueda causar el fallo de la técnica aplicada.

Para concluir, tras este estudio queda demostrado que la utilización de CFRP en refuerzos para elementos estructurales de madera resulta muy efectiva, confiriendo nuevas capacidades mecánicas con un aumento de peso ínfimo y diferentes posibilidades de actuación en rehabilitaciones con madera.

Bibliografía

- [1] Moreno Bazán, A. (2015). *Caracterización y adherencia entre madera antigua y fibra de carbono para refuerzo estructural: Resultados preliminares*. (Proyecto Final de Grado). Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación, Universidad de Granada.
- [2] Jiménez Rubio, I. (2016). *Refuerzo de vigas de madera antigua mediante CFRP. Ensayos a flexión* (Proyecto Final de Grado). Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación, Universidad de Granada.
- [3] Berbel Román, E. (2016). *Implantación del CFRP como refuerzo de madera antigua estructural de gran escuadría* (Proyecto Final de Grado). Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación, Universidad de Granada.
- [4] Rosa García, P. (2013). *Análisis de elementos de madera reforzados con materiales compuestos* (Tesis doctoral). Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación, Universidad Politécnica de Madrid.
- [5] Argüelles Álvarez, R. & Arriaga Martitegui, F. (2013). *Estructuras de madera. Bases de cálculo*. Madrid. Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera (AITIM).
- [6] Gutiérrez Oliva, A. (1997). La madera en la construcción. *Informes de la construcción*. 35, (358).
- [7] Olivares Santiago, M., Galán Marín, C., & Roa Fernández, J. (2003). Los Composites. Características y aplicaciones en la edificación. *Informes de la construcción*. 54, (484).
- [8] Arriaga, F., Íñiguez, G., Esteban, M. & Bobadilla, I. (2007). Madera aserrada de gran escuadría para uso estructural y sus particularidades. *Informes de la construcción*. 59, (506).
- [9] Miravete, A. (2012). *Materiales compuestos* (Tomo 1). Reverté.
- [10] Besednjak, A. (2005). *Materiales compuestos. Procesos de fabricación de embarcaciones* (Vol. 100). Universidad Politécnica de Cataluña: Ediciones UPC.
- [11] Recuero, A., Gutiérrez, J. P., Miravete, A., & Cuartero, J. (1997). *Strengthening of structure using advanced composites*. Madrid: CSIC - Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETCC).
- [12] Mayugo Majó, J. A. (2003). *Estudio constitutivo de materiales compuestos laminados sometidos a cargas cíclicas* (Tesis doctoral). Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- [13] Barbero, E.J. (1999). *Introduction to composite material design*. Philadelphia: Taylor & Francis.
- [14] Reifsnider, K. L., & Case, S. W. (2002). *Damage tolerance and durability of material systems*. United States: John Wiley and Sons Ltd.
- [15] de la Rosa García, P., Cobo Escamilla, A. & González García, M. N. (2013). *Bending reinforcement of timber beams with composite carbon fiber and basalt fiber materials*. Madrid: Elsevier Ltd.
- [16] You-long, Y., Jin-wei, L. & Guang-jing, X. (2013). *Flexural behavior of Wood beams strengthened with HFRP*. China: Elsevier Ltd.

- [17] UNE 56544:2011. Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas. Madrid. Asociación Española de Normalización (AENOR).
- [18] UNE 56532:1977. Características físico-mecánicas de la madera. Determinación de la higroscopicidad. Madrid. Asociación Española de Normalización (AENOR).
- [19] UNE 56540:1978. Características físico-mecánicas de la madera. Interpretación de los resultados de los ensayos. Madrid. Asociación Española de Normalización (AENOR).
- [20] UNE-EN 844:1997. Madera aserrada y madera en rollo. Terminología. Madrid. Asociación Española de Normalización (AENOR).
- [21] UNE-EN 338:2010. Madera estructural. Clases resistentes. Madrid. Asociación Española de Normalización (AENOR).
- [22] ASTM C900-15 *Standard Test Method for Pull-Out Strength of Hardened Concrete*
- [23] Drizoro. Construction Products (2013). Recuperado de <http://www.drizoro.com/>