



**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**

**REFUERZOS DE FIBRA DE CARBONO PARA
REHABILITACIÓN DE VIGAS DE MADERA. MODELOS
ANALÍTICOS, ENSAYOS EXPERIMENTALES Y PUESTA
EN OBRA**

TESIS DOCTORAL

FRANCISCO JOSÉ RESCALVO FERNÁNDEZ

Memoria presentada para la obtención del grado de Doctor por la
Universidad de Granada

E.T.S. DE INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN

UNIVERSIDAD DE GRANADA

Granada, España

Junio de 2018

**Refuerzos de fibra de carbono para rehabilitación de vigas de madera.
modelos analíticos, ensayos experimentales y puesta en obra**

Copyright©2018 por Francisco José Rescalvo Fernández



**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**

**REFUERZOS DE FIBRA DE CARBONO PARA
REHABILITACIÓN DE VIGAS DE MADERA. MODELOS
ANALÍTICOS, ENSAYOS EXPERIMENTALES Y PUESTA
EN OBRA**

TESIS DOCTORAL

FRANCISCO JOSÉ RESCALVO FERNÁNDEZ

DIRIGIDA POR

Dr. Antolino Gallego Molina

Dr. Ignacio Valverde Palacios

PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA CIVIL

E.T.S. DE INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN

UNIVERSIDAD DE GRANADA

Granada, España

Junio de 2018

Editor: Universidad de Granada. Tesis Doctorales
Autor: Francisco José Rescalvo Fernández
ISBN: 978-84-9163-995-4
URI: <http://hdl.handle.net/10481/53614>

**Refuerzos de fibra de carbono para rehabilitación de vigas de madera.
modelos analíticos, ensayos experimentales y puesta en obra**

Copyright©2018 por Francisco José Rescalvo Fernández

El doctorando / *The doctoral candidate* **Francisco José Rescalvo Fernández** y los directores de tesis / *and the thesis supervisor/s* **Antolino Gallego Molina e Ignacio Valverde Palacios**

Garantizamos, al firmar esta tesis doctoral, que el trabajo ha sido realizado por el doctorando bajo la dirección de los directores de la tesis y hasta donde nuestro conocimiento alcanza, en la realización del trabajo, se han respetado los derechos de otros autores a ser citados, cuando se han utilizado sus resultados o publicaciones.

/

Guarantee, by signing this doctoral thesis, that the work has been done by the doctoral candidate under the direction of the thesis supervisor/s and, as far as our knowledge reaches, in the performance of the work, the rights of other authors to be cited (when their results or publications have been used) have been respected

Lugar y fecha / *Place and date*

Granada, 14 de junio de 2018

Director/es de la Tesis / *Thesis supervisor/s;*

Firma /*Signed*

Firma/*Signed*

Doctorando/Doctoral candidate:

Firma /*Signed*

A mi madre

A mi tío Toribio

Resumen

La madera es uno de los materiales de construcción más respetuosos con el medio ambiente y la lucha contra el cambio climático. Tiene una buena resistencia a compresión y a tracción en relación con su limitada densidad. En muchas ocasiones resulta necesario reforzar o reparar elementos estructurales de madera por medio de materiales de alta resistencia. Tradicionalmente las vigas de madera se han reforzado o reparado mediante la inserción de elementos metálicos, lo cual presenta importantes inconvenientes.

Por estas razones, hace algunas décadas se propuso el uso de polímeros reforzados con fibras (FRP) como una alternativa al acero para el refuerzo de elementos de madera. En los últimos años el auge en el uso de los materiales compuestos en construcción está incrementando su popularidad. Sin embargo, actualmente la aplicación de estos refuerzos presenta algunos puntos oscuros, como es el desconocimiento en el comportamiento mecánico de la estructura y el material reforzado, sus mecanismos de fallo (en particular la deslaminación madera-FRP), la falta de normativas, de soluciones constructivas y guías de aplicación.

En este contexto, esta Tesis Doctoral evalúa experimentalmente diferentes configuraciones de refuerzo con fibra de carbono (CFRP) sobre vigas de pino de más de 200 años en servicio, extraídas de la cubierta de la Facultad de Derecho de la Universidad de Granada en 2015 por la empresa Dávila Restauración de Monumentos S.L.

Para ello, y como primer paso, se han realizado ensayos de adherencia madera-CFRP, con el fin de elegir las resinas y procedimientos de aplicación del refuerzo más apropiados. En estos ensayos se propone además el uso del método de emisión acústica (EA) para caracterizar dicha adherencia.

Además, en una fase posterior, se realizan numerosos ensayos a flexión sobre vigas de pequeña y gran escuadría, comparando diferentes configuraciones de refuerzo mediante laminados pultruidos y/o tejidos de CFRP. Se obtiene

y compara el comportamiento mecánico para cada configuración. En particular, la Tesis propone una nueva configuración de refuerzo consistente en un trenzado discontinuo mediante tejido, la cual proporciona una excelente mejora en la capacidad de carga y ductilidad del elemento, clave desde el punto de vista la seguridad estructural.

Por otro lado, se propone la valoración del comportamiento mecánico de dos configuraciones de refuerzo para la reparación de vigas de gran escuadría con una rotura previa que anula su capacidad portante. Se comprueba que la solución trenzada propuesta en esta Tesis permite recuperar completamente dicha capacidad portante del elemento reparado.

Finalmente, se realiza una transferencia directa del conocimiento de la investigación llevada a cabo en el laboratorio, mediante la realización de un demostrador en una actuación “in situ” sobre una cubierta de madera en un edificio histórico de la ciudad de Granada.

La investigación llevada a cabo en esta Tesis ha permitido establecer procedimientos y guías de aplicación, así como de cálculo del refuerzo, proponiendo un modelo analítico alternativo al empleado actualmente, y haciendo valoraciones de costes y tiempos de ejecución.

Summary

Wood is one of the most respectful building materials for the environment and the fight against climate change. It has good compressive and tensile strength in relation to its limited density. In many cases, it is necessary to strengthen or repair wooden structural elements using high-strength materials. Traditionally, wooden beams have been reinforced or repaired by the insertion of metal elements, which has major drawbacks.

For these reasons, the use of fiber-reinforced polymers (FRP) was proposed a few decades ago as an alternative to steel in the reinforcement of wood elements. In recent years the use of composite materials in construction has soared in popularity. However, at present, the application of these reinforcements presents some dark points, such as the lack of knowledge in the mechanical behavior of the structure and reinforced material, their failure mechanisms (in particular the delamination of wood-FRP), the lack of standards and constructive solutions and application guidelines.

In this context, this Doctoral Thesis evaluates experimentally different configurations of carbon fiber reinforcement (CFRP) on pine beams of more than 200 years in service, extracted from the cover of the Faculty of Law of the University of Granada in 2015 by the firm Dávila Restauración de Monumentos S.L.

To this end, and as a first step, wood-CFRP adherence tests have been carried out in order to choose the most appropriate resins and reinforcement application procedures. These tests also propose the use of the acoustic emission method (AE) to characterize this bond.

Subsequently, in a later phase, numerous bending tests are performed on small and large size beams, comparing different reinforcement layouts using pultruded laminates and/or CFRP fabrics. The mechanical behavior for each configuration is obtained and compared. In particular, the Thesis proposes a new reinforcement layout that consists in a discontinuous braiding with fabric, which provides an excellent improvement in the

flexural load capacity and ductility of the element, a key element from the point of view of structural safety.

Subsequently, it is proposed to evaluate the mechanical performance of two reinforcement layouts to repair largely sized beams with a previous fracture that nullifies their structural capacity. It is verified that the braided solution proposed in this Thesis allows the full recovery of this capacity in the repaired element.

As a final step, the knowledge of the research carried out in the laboratory is directly transferred by means of a demonstrator in an on-site intervention on a wooden cover in a historic building in the city of Granada.

The Thesis has established application procedures and guidelines, as well as a methodology for the reinforcement calculation, proposing an alternative analytical model to the one currently used, and evaluating costs and performance times.

Colaboraciones

En la elaboración de esta Tesis Doctoral se ha contado con el soporte y apoyo de varios expertos en diferentes áreas de trabajo. La elaboración de esta investigación ha sido posible gracias a sus aportaciones e imprescindibles contribuciones. Entre ellos,

La empresa **Dávila Restauración de Monumentos S.L.**, por ser la empresa financiadora de la investigación en la que se basa esta Tesis, así como proporcionar el demostrador en el que se realizó la intervención de reparación real, así como a los oficiales de obra que colaboraron en dicha intervención.

El Dr. **Andrés Roldán Aranda**, docente e investigador de la Universidad de Granada, integrante del grupo de Investigación en Nanoelectrónica (TIC-2016), a quien se agradece su asesoramiento en los diferentes sistemas de adquisición que se han empleado en esta Tesis.

La Dra. **Elisabet Suarez Vargas**, investigadora en la Universidad de Granada, integrante del grupo de investigación TEP 232, por su colaboración en el diseño y análisis de los resultados del proyecto de investigación base de esta Tesis Doctoral.

Los Catedráticos **Enrique Hernández Montes** y **Luisa María Gil Martín**, docentes e investigadores de la Universidad de Granada, integrante y directora del grupo de investigación de Ingeniería e Infraestructuras (TEP-190), a quienes agradecemos la posibilidad de poder llevar a cabo los ensayos a flexión en vigas de gran escuadría en el laboratorio de ensayos para elementos estructurales *LabIngEst*.

Las empresas **SIKA® S.A.U.** y **DRIZORO® S.A.U.**, las cuales han aportado gratuitamente los materiales de CFRP y resinas epoxi, claves para la realización de esta investigación.

Los técnicos **David Jiménez Delgado** y **Ismael Romero Castillo**, quiénes contribuyeron a la elaboración y ensayo de los distintos tipos de especímenes que se presentan en esta Tesis.

Los técnicos **Rafael Nuñez Nuñez** y **Luis Jiménez Moya**, técnicos del Laboratorio de Materiales de Construcción, del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la Universidad de Granada, por su colaboración en la preparación de ensayos de caracterización de materiales y vigas de pequeña escuadría.

El técnico **Andrés Antonio Gil Martín**, técnico del laboratorio de ensayos para elementos estructurales *LabIngEst*, quién contribuyó a la preparación de los ensayos de vigas de gran escuadría.

El Arquitecto Técnico **Antonio Jesús Aguilar Aguilera**, por su contribución en el análisis de los resultados de emisión acústica y en la elaboración de esta Tesis.

Los Técnicos Superiores en Mecatrónica Industrial **Francisco José Martínez García** y **Alberto Martín González**, quienes realizaron sus prácticas dentro de nuestro grupo de investigación y que han contribuido al desarrollo de esta Tesis.

Los Graduados de Edificación **Ángela Moreno Bazán**, **Iván Jiménez Rubio**, **Antonio Jesús Martínez Jiménez**, **Elias Berbel Román** y **Francisco Javier Benítez Corral** quienes realizaron su Proyecto Fin de Grado dentro del grupo de investigación, contribuyendo al desarrollo de esta Tesis Doctoral.

Agradecimientos

Esta Tesis Doctoral no podría haber visto la luz sin las numerosas personas e instituciones que en mayor o menor medida, han colaborado en su desarrollo. A todos ellos, me siento eternamente agradecido.

A mis directores de tesis, es quien quiero agradecer en primer lugar, Dr. Antolino Gallego Molina y Dr. Ignacio Valverde Palacios. El valor, de encontrar personas que te involucren en su equipo de trabajo, depositen su confianza en la labor que tanto yo como el resto del equipo realiza, es inconmensurable. Muchas gracias por los conocimientos que me han transmitido, en el ámbito profesional y personal, de nuevo, no tiene precio. Es remarcable su inmensa dedicación y la prolija revisión que ha tenido esta Tesis. El coste de que una línea del metro de Tokio deba detenerse por unas horas, es altísimo. La maravillosa deuda contraída con ellos solo podría alcanzarse si el metro de la ciudad se detuviera de por vida. Gracias.

A mis compañeros del grupo ADIME, estando siempre a disposición para cualquier necesidad, de cualquier ámbito (Francisco Sagasta, Elisabet Suárez, David Jiménez, Chihab Abarkane, David Pérez, Antonio Aguilar, Paco Martínez, Alberto Martín, Ruben Molina, Jesús Martínez, Iván Jiménez, Elias Berbel, Ángela Moreno y Francisco Benítez). Así como a personas afines al grupo, como Miguel Ángel y Santi. Trabajar junto a este conjunto de personas, hace que la palabra trabajo deba ser revisada.

En el terreno personal, en primer lugar a mi madre Mari, no estaría escribiendo estos agradecimientos sin su incansable esfuerzo diario y sus valores transmitidos, gracias de corazón. A mi tío Toribio, el cual es un referente fundamental, inculcándome los valores, la ayuda y la experiencia que me han hecho llegar hasta aquí. A mis abuelos Josefa e Isidro, mi tía Ángeles y mis primas Nerea y María de los Ángeles, gracias por todo vuestro apoyo.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Motivación y estado del arte.....	1
1.2. Objetivos.....	14
1.3. Marco de la investigación.....	16
1.4. Estructura de la tesis	17
2. Conocimientos previos	19
2.1. Interés por conservar el patrimonio.....	19
2.2. Refuerzo de vigas de madera mediante FRP. Concepto	21
2.3. Características mecánicas de los materiales.....	24
2.4. Modelos analíticos.....	26
2.4.1. Modelo de Bazan-Buchanan	27
2.4.2. Modelo de Argüelles (modelo alternativo).....	30
3. Materiales y métodos	33
3.1. Madera.....	33
3.1.1. Descripción general	34
3.1.2. Clasificación visual.....	41
3.1.3. Resistencias a compresión y flexión.....	47
3.2. CFRP.....	49
3.2.1. Descripción general	50
3.2.2. Resistencia a tracción	51
3.2.3. Materiales empleados en esta Tesis Doctoral	53
3.3. Elaboración de especímenes, matrices de ensayos e instrumentación	57

3.3.1. Estudio de adherencia	58
3.3.2. Vigas de 1,3 m	64
3.3.3. Vigas de 4,5 m	69
4. Resultados y discusión.....	75
4.1. Adherencia madera-refuerzo	75
4.1.1. Ensayos <i>pull-off</i>	76
4.1.2. Ensayos <i>Pull-out</i>	94
4.2. Ensayos en vigas de pequeña escuadría	98
4.2.1. Vigas sin refuerzo (NR).....	100
4.2.2. Vigas con refuerzo longitudinal con laminado (LR).....	102
4.2.3. Refuerzo con tejido en forma de U (UR).....	108
4.2.4. Refuerzo mixto con tejido y laminado. Refuerzo continuo (UR-P)	112
4.2.5. Refuerzo mixto con tejido y laminado. Refuerzo trenzado (BR)	115
4.3. Ensayos en vigas de gran escuadría sin rotura previa.....	119
4.3.1. Ensayos de flexión.....	120
4.3.2. Análisis de Emisión Acústica.....	131
4.4. Ensayos en vigas de gran escuadría reparadas.....	147
4.5. Comparación global de resultados	151
4.5.1. Comparación de los resultados experimentales	152
4.5.2. Comparación de los resultados analíticos y experimentales	158
4.5.3. Comparación de costes de materiales y tiempos de elaboración	165
5. Ejemplo de aplicación en obra.....	171
5.1. Descripción del elemento dañado.....	172

5.2. Diseño del refuerzo y ejecución	174
5.3. Costes y tiempos de elaboración.....	178
6. Conclusiones.....	181

Índice de figuras

Figura 1.1. Estructuras de madera. Izq.: Sin deterioro. Der.: Con deterioro. Fuentes: http://www.trcestructuras.com/trabajo/edificio-de-viviendas-plaza-santa-ana/ . http://blog.simbolocalidad.com/servicio-tecnologico-de-inspeccion-y-diagnos-is-de-madera-estructural	2
Figura 1.2. Ejemplos de refuerzo de estructuras de madera. Izq.: Forjado reformado con perfiles metálicos. Der.: Refuerzo de una viga de madera en el puente de Sins (Suiza) en 1995. Fuente-izq.: http://www.ibarkalde.com/proyectos/refuerzos/refuerzos-metalicos-para-estructuras-de-madera-en-gipuzkoa-ibarkalde-sl.html	4
Figura 1.3. Refuerzo de vigas de madera con una lámina de CFRP. Fuente: https://www.olympus-frp.com/consolidamento-strutturale/adequamento-sismico/rinforzo-strutture-copertura-legno-un-castello-federicano-santagata-puglia-cfrp/rinforzo-a-flessione-travi-in-legno-con-cfrp-3/	5
Figura 1.4. Resumen de las diferentes configuraciones de refuerzo (en rojo) de FRP (<i>fiber reinforced plastics</i>).....	11
Figura 1.5. Cubierta de la Facultad de Derecho de la Universidad de Granada. Izq.: Estado anterior a la rehabilitación. Der.: Estado posterior a la rehabilitación.....	15
Figura 1.6. Esquema de la estructura de la Tesis Doctoral. Cuadro en azul: Actividades que se monitorizaron con Emisión Acústica.....	17
Figura 2.1. Esquema de refuerzo de un forjado de viguetas de madera mediante una losa de hormigón. Fuentes: http://www.generadordeprecios.info/rehabilitacion/Estructuras/Madera/Refuerzos/EMZ310_Refuerzo_de_forjado_de_madera__medi.html . http://www.al-fer.it/wms/default-1.htm?iID=EDDGHHD	22
Figura 2.2. Imagen de una actuación de losa de hormigón sobre un forjado de viguetas de madera. Fuente: http://reotec.es/reparaciones-y-refuerzos-estructurales/reparaciones-en-construcciones-antiguas	23

Figura 2.3. Esquema de diferentes disposiciones de perfiles metálicos en elementos de madera. Fuente: <http://biter.us/forjado-de-viguetas-metalicas.html>. 23

Figura 2.4. Comparativa de ambos materiales a nivel microscópico. Izquierda: Madera (10x). Derecha: lámina de CFRP [66]..... 25

Figura 2.5. Tensión frente a deformación durante el comportamiento a tracción de la madera y el CFRP. 25

Figura 2.6. Tensión frente a deformación. Comportamiento a compresión axial de un elemento de madera. 26

Figura 2.7. Comportamiento de tensión-deformación de la madera para el modelo de Bazan-Buchanan [9,10]..... 28

Figura 2.8. Nomenclatura y diagramas de la relación entre la tensión y la deformación para el modelo en rango elástico de Bazan-Buchanan [9,10]. Izquierda: Sección de una viga no reforzada. Derecha: Sección de una viga reforzada con refuerzo longitudinal. Color rojo: Refuerzo de FRP..... 28

Figura 2.9. Nomenclatura y diagramas de la relación entre la tensión y la deformación para el modelo en rango elástico de Bazan-Buchanan [9,10]. Izquierda: Sección de una viga no reforzada. Derecha: Sección de una viga reforzada con refuerzo longitudinal. Color rojo: Refuerzo de FRP..... 29

Figura 2.10. Comportamiento de tensión-deformación de la madera para el modelo de Argüelles [67]. 30

Figura 2.11. Nomenclatura y diagramas de la relación entre la tensión y la deformación para el modelo en rango elástico de Argüelles [67]. Izq.: Sección de una viga no reforzada. Der.: Sección de una viga reforzada con refuerzo longitudinal. Color rojo: Refuerzo de FRP..... 31

Figura 2.12. Nomenclatura y diagramas de la relación entre la tensión y la deformación para el modelo en rango elástico de Argüelles [67]. Izq.: Sección de una viga no reforzada. Der.: Sección de una viga reforzada con refuerzo longitudinal. Color rojo: Refuerzo de FRP..... 31

Figura 3.1. Capas que forman la pared celular. Estructura submicroscópica. 36

Figura 3.2. Estructura microscópica de la madera. A: Sección transversal. B: Sección radial. C: Sección tangencial. 1: Canal resinífero longitudinal. 2: Radio leñoso. 3: Traqueidas longitudinales. 4: Células epiteliales resinógenas. 5: Sección de punteadura areolada. 6: Punteaduras aeroladas en traqueidas longitudinales. 7: Punteadura en los campos de cruce. 8: Traqueidas radiales. 9: Células de parénquima radial. 10: Canal resinífero transversal. Fuente: Estructura microscópica de maderas coníferas – Julio O. Vargas.....	37
Figura 3.3. Imagen al microscopio (10x) extraída de dos vigas empleadas en esta Tesis Doctoral. Izquierda: Viga sin presencia de traqueidas resinosas. Derecha: Viga con presencia de traqueidas resinosas y canales resiníferos.	37
Figura 3.4. Secciones o planos principales de la madera a nivel macroscópico. Fuente: http://docplayer.org/58524456-Tk2-biegebemessung-prof-dr-ing-michael-maas-rechteck-h-b-2-cm-3-2.html	39
Figura 3.5. Partes de la sección transversal de un tronco de madera. Fuente: http://mundobiologico-geral.blogspot.com/p/morfologia-vegetal.html	40
Figura 3.6. Principales defectos que se analizan para clasificar un elemento de madera. a: Nudo. b: Fenda. c: Acebolladura. d: Desviación de la fibra. e: Gema. Fuentes (c,d,e): https://sites.google.com/site/tecnologiadelamadera/enfermedades-y-defectos/defectos . http://normadera.tknika.net/es/content/desviaci%C3%B3n-de-la-fibra . http://tallerdetallaenmadera.blogspot.com/2012/01/maderas.html	42
Figura 3.7. Probeta de madera colocada en la estufa antes del proceso de secado.....	46
Figura 3.8. Relación entre tensión y deformación de un elemento sometido a compresión en dirección perpendicular a la fibra.	48
Figura 3.9. Elemento de madera sometido a un esfuerzo de flexión. Distribución de tensiones a lo largo de la sección del elemento [67].....	49
Figura 3.10. Comportamiento a tracción de los FRP. Izq.: Relación tensión-deformación de diferentes tipos de fibras [70]. Der.: Rotura frágil	

a tracción de un laminado de CFRP empleado en esta Tesis Doctoral de la casa comercial SIKA®.	52
Figura 3.11. Imagen de los laminados empleados en esta Tesis. Izq.: SIKA Carbodur®. Der.: DRIZORO® COMPOSITE.....	54
Figura 3.12. Imágenes de los tejidos empleados en esta Tesis. Izq.: Sikawrap®-230C. Centro: DRIZORO® WRAP 200. Der.: DRIZORO® CARBOMESH 210.	55
Figura 3.13. Imágenes de las resinas suministradas por SIKA® empleadas en esta Tesis. Izq.: RS-30. Der.: RS-330.....	57
Figura 3.14. Imágenes de las resinas e imprimación suministradas por DRIZORO® empleadas en esta Tesis. Izq.: Imprimación. Centro.: RM-CS. Der.: RM-C.....	57
Figura 3.15. Diagrama conceptual de tensión-deformación de la madera y el CFRP.	58
Figura 3.16. Probetas de madera para ensayos de adherencia. Izq.: <i>Pull-off</i> . Der.: <i>Pull-out</i>	59
Figura 3.17. Esquema de ensayos del estudio de adherencia. Izq.: Ensayo <i>pull-off</i> . Der.: Ensayo <i>pull-out</i> . Dimensiones en mm.	59
Figura 3.18. Proceso de elaboración de probetas de pull off y pull out. ..	61
Figura 3.19. Adherómetro Elcometer® 506.....	61
Figura 3.20. Curva de sensibilidad del sensor de EA VS45-H. Líneas azules: Frecuencias de corte de los filtros de adquisición.....	62
Figura 3.21. Configuración general de un ensayo <i>pull-off</i>	63
Figura 3.22. Configuración general de un ensayo <i>pull-out</i> . Izq.: Vista general. Der.: Imagen de la probeta y los sensores de EA.	64
Figura 3.23. Esquema de las distintas configuraciones de refuerzo para vigas de pequeña escuadría. NR: Sin refuerzo. LR: Refuerzo longitudinal. LR-P: Refuerzo longitudinal parcial. LR-F: Refuerzo longitudinal completo. UR: Refuerzo en forma de U. UR-P: Refuerzo mixto con tejido en forma de U y laminado de ancho parcial. BR: Refuerzo trenzado.	66
Figura 3.24. Descripción gráfica del proceso de colocación del tejido en las soluciones mixtas. Arriba: UR-P. Abajo: BR.....	67

Figura 3.25. Representación esquemática de un ensayo a flexión a tres puntos y posición de las galgas extensiométricas en las distintas caras de la viga (A, B, C, D). Cotas en mm.....	69
Figura 3.26. Esquema de las distintas configuraciones de refuerzo para vigas de gran escuadría. NR: Sin refuerzo. LR: Refuerzo longitudinal. BR: Refuerzo trenzado.	70
Figura 3.27. Fases del programa experimental de vigas de gran escuadría.	70
Figura 3.28. Fotografías de las vigas reparadas en la Fase 2. Izq.: Viga reparada con refuerzo LR-r. Centro: detalle de grietas existentes en una viga BR-r. Der.: Adaptación de la posición y dimensión del tejido a cada viga.	71
Figura 3.29. Representación esquemática de un ensayo a flexión a tres puntos y posición de las galgas extensiométricas (A, B, C y D) en las distintas caras de la viga.	73
Figura 4.1. Esquema de los sustratos y adhesivos que forman una probeta de <i>pull-off</i>	76
Figura 4.2. Clasificación de los distintos tipos de fallo en una unión adhesiva para las probetas <i>pull-off</i>	77
Figura 4.3. Probetas de <i>pull-off</i> en las cuales se producen dos tipos de fallo. Izq.: Predomina el modo de fallo C. Der.: Predomina el modo de fallo D. Distancias en mm.	78
Figura 4.4. Ejemplo de dos señales de EA. a: Señal bien registrada. b: Señal mal registrada.	79
Figura 4.5. RMS_{12} (a) y MR_{12} (b) para el ensayo L1-ALD1-p-3. Puntos verdes: Señales que pasan el filtro. Puntos rojos: Señales que no pasan el filtro.	81
Figura 4.6. Ejemplo de una señal de EA. a: Definición de la ventana temporal W_0 . b: Espectro y definición de las bandas B_1 , B_2 y B_3	82
Figura 4.7. Carga máxima media entre los tres los ensayos de <i>pull-off</i> . Izq.: Laminados. Der.: Tejidos.....	85

Figura 4.8. Probetas con un fallo de tipo A. Laminado de CFRP. a, b: <i>Hits</i> acumulados frente al tiempo. c, d.: Imagen del fallo. Distancias en mm.	87
Figura 4.9. Probetas con un fallo de tipo B. Laminado de CFRP. a-d: <i>Hits</i> acumulados frente al tiempo. e, f: Imagen del fallo. Distancias en mm.	88
Figura 4.10. <i>Hits</i> acumulados frente al tiempo de probetas con un fallo de tipo C. Laminado de CFRP.	89
Figura 4.11. Imagen del fallo tipo C. Laminado de CFRP. Distancias en mm.	89
Figura 4.12. Probetas con un fallo de tipo D. Laminado de CFRP. a-d: <i>Hits</i> acumulados frente al tiempo. e, f: Imagen del fallo. Distancias en mm.	90
Figura 4.13. Probetas con un fallo de tipo A. Tejido de CFRP. a: <i>Hits</i> acumulados frente al tiempo. b: Imagen del fallo. Distancias en mm.	91
Figura 4.14. Probetas con un fallo de tipo B. Tejido de CFRP. a, b: <i>Hits</i> acumulados frente al tiempo. c, d: Imagen del fallo. Distancias en mm. .	92
Figura 4.15. <i>Hits</i> acumulados frente al tiempo de probetas con un fallo de tipo D. Tejido de CFRP.	93
Figura 4.16. Imagen del fallo tipo D. Tejido de CFRP. Distancias en mm.	93
Figura 4.17. Ejemplo de la probeta L1-AHD1-2 con un fallo parcial de tipo C (70%) y modo A (30%).....	94
Figura 4.18. Carga media entre los tres ensayos de <i>pull-out</i> . Izq.: Laminados. Der.: Tejidos.....	97
Figura 4.19. Clasificación de los tipos de fallos de una viga de madera a flexión [32].	100
Figura 4.20. Tensión a flexión frente al tiempo de las vigas sin refuerzo (NR).	101
Figura 4.21. Imágenes de las roturas de las vigas del grupo NR. Arriba: NR-1. Abajo: NR-3.	101
Figura 4.22. Tensión frente a la deformación medida durante los ensayos a flexión del grupo NR. Izq.: NR-1. Centro: NR-2. Der.: NR-3.	102

Figura 4.23. Tensión a flexión frente al tiempo de las vigas con refuerzo longitudinal con laminado (LR). Casa comercial: SIKA®.	103
Figura 4.24. Imágenes de las roturas de las vigas del grupo LR. Arriba: LR-P-S-1. Centro: LR-F-S-2. Abajo: LR-F-S-3. Casa comercial: SIKA®.	104
Figura 4.25. Tensión frente a la deformación medida durante los ensayos a flexión del grupo LR. Arriba-Izq.: LR-P-S-1. Arriba-Centro: LR-P-S-2. Arriba-Der.: LR-P-S-3. Abajo-Izq.: LR-F-S-1. Abajo-Centro: LR-F-S-2. Abajo-Der.: LR-F-S-3. Casa comercial: SIKA®.	105
Figura 4.26. Tensión a flexión frente al tiempo de las vigas con refuerzo longitudinal con laminado (LR). Casa comercial: DRIZORO®.	106
Figura 4.27. Imágenes de las roturas de las vigas del grupo LR. Arriba: LR-P-D-2. Centro: LR-F-D-1. Abajo: LR-F-D-3. Casa comercial: DRIZORO®.	107
Figura 4.28. Tensión frente a la deformación medida durante los ensayos a flexión del grupo LR. Arriba-Izq.: LR-P-D-1. Arriba-Centro: LR-P-D-2. Arriba-Der.: LR-P-D-3. Abajo-Izq.: LR-F-D-1. Abajo-Centro: LR-F-D-2. Abajo-Der.: LR-F-D-3. Casa comercial: DRIZORO®.	108
Figura 4.29. Tensión a flexión frente al tiempo de las vigas con refuerzo de tejido (UR).	109
Figura 4.30. Imágenes de las roturas de las vigas del grupo UR. Arriba: UR-U-S-1. Centro: UR-U-D-3. Abajo: UR-B-D-1.	110
Figura 4.31. Tensión frente a la deformación medida durante los ensayos a flexión del grupo UR. Tejido unidireccional. Arriba-Izq.: UR-U-S-1. Arriba-Centro: UR-U-S-2. Arriba-Der.: UR-U-S-3. Abajo-Izq.: UR-U-D-1. Abajo-Centro: UR-U-D-2. Abajo-Der.: UR-U-D-3.	111
Figura 4.32. Tensión frente a la deformación medida durante los ensayos a flexión del grupo UR. Tejido bidireccional. Izq.: UR-B-D-1. Centro: UR-B-D-2. Der.: UR-B-D-3.	111
Figura 4.33. Tensión a flexión frente al tiempo de las vigas con refuerzo mixto continuo (UR-P).	113
Figura 4.34. Imágenes de las roturas de las vigas del grupo UR-P. Arriba: UR-P-U-S-3. Centro: UR-P-U-D-1. Abajo: UR-P-B-D-1.	114

Figura 4.35. Tensión frente a la deformación medida durante los ensayos a flexión del grupo UR-P. Tejido unidireccional. Arriba-Izq.: UR-P-U-S-1. Arriba-Centro: UR-P-U-S-2. Arriba-Der.: UR-P-U-S-3. Abajo-Izq.: UR-P-U-D-1. Abajo-Centro: UR-P-U-D-2. Abajo-Der.: UR-P-U-D-3.....115

Figura 4.36. Tensión frente a la deformación medida durante los ensayos a flexión del grupo UR. Tejido bidireccional. Izq.: UR-P-B-D-1. Centro: UR-P-B-D-2. Der.: UR-P-B-D-3.115

Figura 4.37. Tensión a flexión frente al tiempo de las vigas con refuerzo trenzado (BR).....116

Figura 4.38. Imágenes de las roturas de las vigas del grupo BR. Arriba: BR-U-S-1. Centro: BR-U-D-1. Abajo: BR-B-D-1.118

Figura 4.39. Tensión frente a la deformación medida durante los ensayos a flexión del grupo BR. Tejido unidireccional. Arriba-Izq.: BR-U-S-1. Arriba-Centro: BR-U-S-2. Arriba-Der.: BR-U-S-3. Abajo-Izq.: BR-U-D-1. Abajo-Centro: BR-U-D-2. Abajo-Der.: BR-U-D-3.....119

Figura 4.40. Tensión frente a la deformación medida durante los ensayos a flexión del grupo BR. Tejido bidireccional. Izq.: BR-B-D-1. Centro: BR-B-D-2. Der.: BR-B-D-3.....119

Figura 4.41. Tensión a flexión frente al tiempo de las vigas sin refuerzo de gran escuadría (NR).....121

Figura 4.42. Imágenes de las roturas de las vigas sin refuerzo de gran escuadría (NR). Arriba: NR-1. Abajo: NR-2.....121

Figura 4.43. Tensión frente a la deformación medida durante los ensayos a flexión de las vigas sin refuerzo de gran escuadría (NR). Arriba: NR-1. Abajo: NR-2. Izq.: Grupo de galgas 1. Centro: Grupo de galgas 2. Der.: Grupo de galgas 3.122

Figura 4.44. Tensión a flexión frente al tiempo de las vigas con refuerzo longitudinal de gran escuadría (LR). Izq.: Casa comercial: SIKA®. Der.: Casa comercial: DRIZORO®.....123

Figura 4.45. Imágenes de las roturas de las vigas con refuerzo longitudinal de gran escuadría (LR). Arriba: LR-S-1. Abajo: LR-S-2. Casa comercial: SIKA®.124

Figura 4.46. Imágenes de las roturas de las vigas con refuerzo longitudinal de gran escuadría (LR). Arriba: LR-D-1. Abajo: LR-D-2. Casa comercial: DRIZORO®.....	125
Figura 4.47. Tensión frente a la deformación medida durante los ensayos a flexión de las vigas con refuerzo longitudinal de gran escuadría (LR). Arriba: LR-S-1. Abajo: LR-S-2. Izq.: Grupo de galgas 1. Centro: Grupo de galgas 2. Der.: Grupo de galgas 3. Casa comercial: SIKA®.	126
Figura 4.48. Tensión frente a la deformación medida durante los ensayos a flexión de las vigas con refuerzo longitudinal de gran escuadría (LR). Arriba: LR-D-1. Abajo: LR-D-2. Izq.: Grupo de galgas 1. Centro: Grupo de galgas 2. Der.: Grupo de galgas 3. Casa comercial: DRIZORO®.	126
Figura 4.49. Tensión a flexión frente al tiempo de las vigas con refuerzo trenzado de gran escuadría (BR). Izq.: Casa comercial: SIKA®. Der.: Casa comercial: DRIZORO®.....	127
Figura 4.50. Imágenes de las roturas de las vigas con refuerzo trenzado de gran escuadría (BR). Arriba: BR-S-1. Abajo: BR-S-2. Casa comercial: SIKA®.	129
Figura 4.51. Imágenes de las roturas de las vigas con refuerzo trenzado de gran escuadría (BR). Arriba: BR-D-1. Abajo: BR-D-2. Casa comercial: DRIZORO®.	129
Figura 4.52. Tensión frente a la deformación medida durante los ensayos a flexión de las vigas con refuerzo trenzado de gran escuadría (BR). Arriba: BR-S-1. Abajo: BR-S-2. Izq.: Grupo de galgas 1. Centro: Grupo de galgas 2. Der.: Grupo de galgas 3. Casa comercial: SIKA®.	130
Figura 4.53. Tensión frente a la deformación medida durante los ensayos a flexión de las vigas con refuerzo trenzado de gran escuadría (BR). Arriba: BR-D-1. Abajo: BR-D-2. Izq.: Grupo de galgas 1. Centro: Grupo de galgas 2. Der.: Grupo de galgas 3. Casa comercial: DRIZORO®.	130
Figura 4.54. Descripción del ensayo de atenuación.	131
Figura 4.55. Resultados del estudio de atenuación mediante el uso de PLBs.	133
Figura 4.56. RMS espectral de las señales de EA obtenidas de las roturas de PLBs en cada banda de frecuencia.	134

Figura 4.57. RMS_{12} (a) y MR_{12} (b) de la viga BR-D-2. Puntos verdes: Señales que pasan el filtro. Puntos rojos: Señales que no pasan el filtro.136

Figura 4.58. Amplitud frente al tiempo de los primeros *hits* de los eventos de EA localizados en la viga BR-D-2. Izq.: Sin corrección de la atenuación. Der.: Con corrección de la atenuación.....138

Figura 4.59. *Hits* acumulados frente al tiempo de las vigas sin refuerzo NR. Línea negra: Grupo 1. Línea azul: Grupo 2. Línea roja: Ratio de carga.....138

Figura 4.60. *Hits* acumulados frente al tiempo de las vigas con refuerzo longitudinal LR. Línea negra: Grupo 1. Línea azul: Grupo 2. Línea roja: Ratio de carga.139

Figura 4.61. *Hits* acumulados frente al tiempo de las vigas con refuerzo trenzado BR. Línea negra: Grupo 1. Línea azul: Grupo 2. Línea roja: Ratio de carga.139

Figura 4.62. Hits localizados durante los ensayos a flexión del Grupo 2 para las vigas sin refuerzo (NR). Puntos rojos: Posición de los sensores de EA. Línea verde: Grietas de la madera al final del ensayo.....141

Figura 4.63. Imágenes de las roturas en las zonas de *hits* localizados del Grupo 2. Vigas NR.....141

Figura 4.64. Hits localizados durante los ensayos a flexión del Grupo 2 para las vigas con refuerzo longitudinal (LR). Puntos rojos: Posición de los sensores de EA. Línea verde: Grietas de la madera al final del ensayo. Zona naranja: Rotura de la interfase madera-resina. Zona punteada: Deslaminación CFRP-madera. Zona negra: Laminado de CFRP.....142

Figura 4.65. Imágenes de las roturas en las zonas de *hits* localizados del Grupo 2. Vigas LR.144

Figura 4.66. Hits localizados durante los ensayos a flexión del Grupo 2 para las vigas con refuerzo trenzado (BR). Puntos rojos: Posición de los sensores de EA. Línea verde: Grietas de la madera al final del ensayo. Zona naranja: Rotura de la interfase madera-resina. Zona punteada: Deslaminación CFRP-madera. Zona negra: Laminado de CFRP. Trama de cuadros: Tejido de CFRP.....145

Figura 4.67. Imágenes de las roturas en las zonas de <i>hits</i> localizados del Grupo 2. Vigas BR.....	147
Figura 4.68. Esquema de reparación de las vigas ensayadas en la primera fase.....	147
Figura 4.69. Tensión a flexión frente al tiempo de las vigas reparadas. Izq.: LR-r. Der.: BR-r.....	148
Figura 4.70. Imágenes de las roturas de las vigas reparadas de gran escuadría con rotura previa.	150
Figura 4.71. Tensión frente a la deformación medida durante los ensayos a flexión de las vigas reparadas de la galga 2B (grupo 2 – cara inferior).151	
Figura 4.72. MOR medio corregido para cada configuración de refuerzo en vigas de pequeña escuadría. Línea roja horizontal: MOR medio corregido del grupo NR.	152
Figura 4.73 MOE medio corregido para cada grupo de vigas de pequeña escuadría. Línea roja horizontal: MOE medio corregido del grupo NR. .	154
Figura 4.74. MOR medio corregido para cada grupo de vigas de gran escuadría sin rotura previa. Línea roja horizontal: MOR medio corregido del grupo NR.....	155
Figura 4.75. MOE medio corregido para cada grupo de vigas de gran escuadría sin rotura previa. Línea roja horizontal: MOE medio corregido del grupo NR.....	155
Figura 4.76. MOR medio corregido para cada grupo de vigas de gran escuadría sin y con rotura previa. Línea roja horizontal: MOR medio corregido del grupo NR sin rotura previa. Línea gris vertical: Separación entre vigas sin rotura (izq.) y con rotura previa (der.).	157
Figura 4.77. MOE medio corregido para cada grupo de vigas de gran escuadría sin y con rotura previa. Línea roja horizontal: MOE medio corregido del grupo NR sin rotura previa. Línea gris vertical: Separación entre vigas sin rotura (izq.) y con rotura previa (der.).	157
Figura 4.78. Esquema de la sección total y el área eficaz real de una sección de madera con defectos en la zona de máximas tracciones.	159
Figura 4.79. Tensión frente a deformación durante los ensayos a compresión de probetas de cada viga.....	160

Figura 4.80. Eje neutro frente al tiempo durante el ensayo a flexión de la viga LR-P-D-1. Línea discontinua horizontal: Valor empleado en el modelo de Argüelles.....	162
Figura 4.81. Valores de desviación entre el MOR teórico y experimental para ambos modelos analíticos.....	164
Figura 4.82. Imágenes de una viga en particular. Izq.: LR-P-S-1. Der.: LR-P-D-1.....	165
Figura 4.83. Variación de los tiempos de elaboración para los diferentes tipos de refuerzo y tamaño de vigas. Valores con respecto del refuerzo LR-P-S y normalizados según la sección de la viga reforzada.	167
Figura 4.84. Variación de los costes de elaboración para los diferentes tipos de refuerzo y tamaño de vigas. Valores con respecto del refuerzo LR-P-S y normalizados según la sección de la viga reforzada.	169
Figura 5.1. Vista general de la localización de la Jefatura del MADOC y detalle de la situación de la viga a reforzar. Línea roja: Viga a reforzar. Fuente: Google Maps®.	171
Figura 5.2. Imagen de la rotura del par de cubierta en el edificio de Capitanía. Arriba: Vista general. Abajo: Detalle de la rotura y la llegada del par al durmiente.	172
Figura 5.3. Imágenes del estado de la viga una vez fijada con las varillas de fibra de vidrio.	173
Figura 5.4. Croquis de situación del estado del par antes de la reparación. Línea roja: Grieta principal del par. Cotas en mm.....	174
Figura 5.5. Esquema de distribución y colocación del tejido de CFRP de la viga a reparar. Cotas a los ejes de las tiras de tejido de CFR. Dimensiones en mm.	175
Figura 5.6. Imágenes del par antes y después de aplicar la capa de imprimación.....	176
Figura 5.7. Estado de la viga tras la colocación de la lámina de CFRP.	177
Figura 5.8. Imágenes del último repaso de resina y del estado final del refuerzo.....	177

Figura 5.9. Gráfico comparativo de tiempos de ejecución y costes de los diferentes tipos de refuerzos en vigas de 1,3 m, 4,5 m sin y con rotura previa y en la actuación “in situ” en Capitanía General. 179

Índice de tablas

Tabla 2.1. Nomenclatura empleada en los modelos analíticos.....	27
Tabla 3.1. Resultado de la clasificación visual de las 51 vigas de pequeña escuadría según la norma UNE 56544:2011. R: Rechazo.....	44
Tabla 3.2. Resultado de la clasificación visual de las 10 vigas de gran escuadría según la norma UNE 56544:2011.	45
Tabla 3.3. Propiedades de los laminados de fibra de carbono de SIKA® y DRIZORO® usados en esta Tesis.	54
Tabla 3.4. Propiedades de los tejidos de fibra de carbono de SIKA® y DRIZORO® usados en esta Tesis.	55
Tabla 3.5. Propiedades de las resinas empleadas en esta Tesis. ¹ Datos a 7 días y 20-23 °C.	56
Tabla 3.6. Matriz de ensayos de adherencia. Ensayos <i>pull-off</i> y <i>pull-out</i> ..	60
Tabla 3.7. Matriz de ensayos de adherencia. Ensayos <i>pull-off</i> y <i>pull-out</i> ..	60
Tabla 3.8. Programa experimental para los ensayos a flexión de vigas de 1,3 m. Tejido Uni.: Tejido unidireccional. Tejido Bidi.: Tejido bidireccional.	68
Tabla 3.9. Programa experimental para los ensayos a flexión de vigas de 4,5 m. Fases 1 y 2. Tejido Uni.: Tejido unidireccional. Tejido Bidi.: Tejido bidireccional.	72
Tabla 4.1. Resultados mecánicos de los ensayos de <i>pull-off</i> para laminados. Carga máxima, carga máxima media entre los tres ensayos, desviación máxima y mínima y tipo de rotura.	83
Tabla 4.2. Resultados mecánicos de los ensayos de <i>pull-off</i> para tejidos. Carga máxima, carga máxima media entre los tres ensayos, desviación máxima y mínima y tipo de rotura.....	84
Tabla 4.3. Resultados mecánicos de los ensayos de <i>pull-out</i> para laminados. Carga máxima, carga media entre los tres ensayos, desviación máxima y mínima y tipo de rotura.....	95

Tabla 4.4. Resultados mecánicos de los ensayos de <i>pull-out</i> para tejidos. Carga máxima, carga media entre los tres ensayos, desviación máxima y mínima y tipo de rotura.	96
Tabla 4.5. Resultados mecánicos obtenidos en los ensayos a flexión de las vigas sin refuerzo (NR). Clasificación visual, MOR (capacidad máxima a flexión), densidad, MOR corregido con la densidad, MOE (módulo elástico a flexión), flecha máxima y tipo de fallo (según la clasificación de la Figura 4.19 [32]).	100
Tabla 4.6. Resultados mecánicos obtenidos en los ensayos a flexión de las vigas con refuerzo longitudinal con laminado (LR). Clasificación visual, MOR (capacidad máxima a flexión), densidad, MOR corregido con la densidad, MOE (módulo elástico a flexión), flecha máxima y tipo de fallo (según la clasificación de la Figura 4.19 [32]). Casa comercial: SIKA®.....	103
Tabla 4.7. Resultados mecánicos obtenidos en los ensayos a flexión de las vigas con refuerzo longitudinal con laminado (LR). Clasificación visual, MOR (capacidad máxima a flexión), densidad, MOR corregido con la densidad, MOE (módulo elástico a flexión), flecha máxima y tipo de fallo (según la clasificación de la Figura 4.19 [32]). Casa comercial: DRIZORO®.	106
Tabla 4.8. Resultados mecánicos obtenidos en los ensayos a flexión de las vigas con refuerzo de tejido (UR). Clasificación visual, MOR (capacidad máxima a flexión), densidad, MOR corregido con la densidad, MOE (módulo elástico a flexión), flecha máxima y tipo de fallo (según la clasificación de la Figura 4.19 [32]).	109
Tabla 4.9. Resultados mecánicos obtenidos en los ensayos a flexión de las vigas con refuerzo mixto continuo (UR-P). Clasificación visual, MOR (capacidad máxima a flexión), densidad, MOR corregido con la densidad, MOE (módulo elástico a flexión), flecha máxima y tipo de fallo (según la clasificación de la Figura 4.19 [32]).	112
Tabla 4.10. Resultados mecánicos obtenidos en los ensayos a flexión de las vigas con refuerzo trenzado (BR). Clasificación visual, MOR (capacidad máxima a flexión), densidad, MOR corregido con la densidad,	

MOE (módulo elástico a flexión), flecha máxima y tipo de fallo (según la clasificación de la Figura 4.19 [32]).....	116
Tabla 4.11. Resultados mecánicos obtenidos en los ensayos a flexión de las vigas sin refuerzo de gran escuadría (NR). MOR (capacidad máxima a flexión), densidad, MOR corregido con la densidad, MOE (módulo elástico a flexión), flecha máxima y tipo de fallo (según la clasificación de la Figura 4.19 [32]).	121
Tabla 4.12. Resultados mecánicos obtenidos en los ensayos a flexión de las vigas con refuerzo longitudinal de gran escuadría (LR). MOR (capacidad máxima a flexión), densidad, MOR corregido con la densidad, MOE (módulo elástico a flexión), flecha máxima y tipo de fallo (según la clasificación de la Figura 4.19 [32]).....	123
Tabla 4.13. Resultados mecánicos obtenidos en los ensayos a flexión de las vigas con refuerzo trenzado de gran escuadría (BR). MOR (capacidad máxima a flexión), densidad, MOR corregido con la densidad, MOE (módulo elástico a flexión), flecha máxima y tipo de fallo (según la clasificación de la Figura 4.19 [32]).....	127
Tabla 4.14. Resultados de la velocidad de propagación optimizada medida en cada viga antes del ensayo a flexión.....	137
Tabla 4.15. Resultados mecánicos obtenidos en los ensayos a flexión de las vigas reparadas. MOR (capacidad máxima a flexión), densidad, MOR corregido con la densidad, MOE (módulo elástico a flexión) y flecha máxima.	148
Tabla 4.16. Resultados de la caracterización de la madera a compresión para cada viga. Media de las tres probetas extraídas de cada viga.....	161
Tabla 4.17. MOR teórico y experimental para ambos modelos analíticos. Ratio EtEc.	163
Tabla 4.18. Tiempos de elaboración para los diferentes tipos de refuerzo y tamaño de vigas. Valores con respecto del refuerzo LR-P-S y normalizados según la sección de la viga reforzada.	166
Tabla 4.19. Costes de elaboración para los diferentes tipos de refuerzo y tamaño de vigas. Valores con respecto del refuerzo LR-P-S y normalizados según la sección de la viga reforzada.	169

Tabla 5.1 Tareas y fechas de ejecución del refuerzo sobre el par de cubierta.	178
Tabla 5.2. Comparativa de tiempos de elaboración y costes de los diferentes tipos de refuerzos de vigas de pequeña y gran escuadría, sin y con rotura previa y de la reparación “in situ” en Capitanía General.	178

1. Introducción

1.1. Motivación y estado del arte

La madera es uno de los materiales de construcción más respetuosos con el medio ambiente. Como es bien sabido, es un material muy utilizado en la construcción, tanto en edificación como en infraestructuras civiles. Lo es en la actualidad y lo ha sido a lo largo de la historia, empleándose en muros de carga, forjados, pilares, vigas, cerchas, etc. Este material resulta muy eficiente, debido a su notable resistencia bajo cargas de flexión y compresión en relación con su limitada densidad. Sin embargo, los elementos de madera están generalmente infrautilizados, debido principalmente a sus defectos naturales (nudos, fendas, etc.) y a su deterioro producido por algunos procesos ambientales (cambios de temperatura, humedad, ataques biológicos, etc.), como se observa en la Figura 1.1. Otro aspecto negativo importante es su baja resistencia al fuego, siendo esta un punto débil de las estructuras de madera



Figura 1.1. Estructuras de madera. Izq.: Sin deterioro. Der.: Con deterioro. Fuentes:
<http://www.trcestructuras.com/trabajo/edificio-de-viviendas-plaza-santa-ana/>.
<http://blog.simbolocalidad.com/servicio-tecnologico-de-inspeccion-y-diagnosic-de-madera-estructural>.

Por estas razones, resulta necesario en muchas ocasiones reemplazar, reparar y/o reforzar los elementos de madera dañados con diferentes técnicas. El reemplazo por elementos de madera nueva cada vez se está convirtiendo en una tarea más costosa y compleja, ya que es difícil obtener piezas de madera de gran formato. Así mismo, la sustitución de elementos por nuevas soluciones constructivas, como pueden ser las vigas laminadas o *glulam*, conlleva a una intervención altamente costosa y de un alto consumo de tiempo.

Son muchas las causas que pueden llevar a la necesidad de reforzar o reparar elementos estructurales que están o han estado en servicio, entre las cuales se pueden citar:

- Cambio de uso;
- Aumento de las solicitaciones;
- Excesiva deformación;
- Rotura parcial o total del elemento;
- Deterioro (exposición a la humedad, ataque de agentes bióticos (termitas, carcoma, etc.), fuego, sismo, explosiones, etc.);
- Dudas sobre su seguridad;
- Condiciones de servicio inadecuadas.

Los refuerzos deben realizarse desde el exterior del elemento y con este en servicio o sin desmontar. Por otro lado, generalmente no quedan totalmente integrados en el elemento, provocando un cierto impacto visual y estético,

que en muchos casos no es para nada despreciable. Este hecho limita su uso en ciertas actuaciones, especialmente de tipo patrimonial y en edificios catalogados como Bienes de Interés Cultural (BIC). No obstante, juegan un importantísimo papel pues permiten reducir los costes de la actuación, siempre que sea más económico rehabilitar que sustituir por un elemento nuevo. Además, es una intervención sostenible, pues ahorra el uso de nueva madera, permitiendo mantener los elementos estructurales protegidos por su valor histórico, patrimonial o por otro motivo.

Tradicionalmente, las vigas de madera se han reparado o reforzado mediante el aporte de madera, cosido de clavos, tirafondos y acero, ensamblando armaduras y/o perfiles metálicos. Las intervenciones con refuerzos de acero usualmente se colocan en las zonas del elemento sometidas a esfuerzos de tracción. Estas técnicas sin embargo, presentan algunos problemas como:

- Aumento del peso propio de la estructura;
- Disminución de la superficie y/o altura libre;
- Elevado tiempo de ejecución de la intervención;
- Posible corrosión de las piezas metálicas, adquiriendo especial relevancia en zonas con alta concentración de cloruros como las zonas costeras;
- Limitaciones geométricas para adaptarse a las diversas formas de la estructura, como pueden ser arcos, bóvedas o cúpulas, así como a defectos de la propia madera, p. ej. ser las gemas;
- Instalación compleja del sistema de refuerzo.

Bajo esta perspectiva, estos inconvenientes pueden ser solucionados de forma general por las nuevas técnicas de refuerzo, empleando materiales compuestos. El interés creciente mostrado internacionalmente por este sistema de refuerzo queda demostrado por las recomendaciones de proyecto y construcción que se están publicando en los últimos años en diferentes países. Dentro de los materiales compuestos, los usados en el refuerzo estructural son los materiales plásticos reforzados con fibras (FRP). La Figura 1.2 muestra dos estructuras de madera, una reforzada con acero y otra con material plástico reforzado con fibra de carbono (CFRP) en el

puente de Sins (Suiza) en 1995, con más de 185 años de antigüedad, cuyo proyecto fue llevado a cabo por G. Schewegler y H. Meie. Se considera la primera actuación relevante de madera con CFRP. La diferencia de espesor del refuerzo entre ambos casos puede ser del orden de 10 a 15 veces mayor en el caso del refuerzo metálico.



Figura 1.2. Ejemplos de refuerzo de estructuras de madera. Izq.: Forjado reformado con perfiles metálicos. Der.: Refuerzo de una viga de madera en el puente de Sins (Suiza) en 1995. Fuente-izq.:

<http://www.ibarkalde.com/proyectos/refuerzos/refuerzos-metalicos-para-estructuras-de-madera-en-gipuzkoa-ibarkalde-sl.html>.

La sustitución del acero por FRP en la ejecución de refuerzos ha experimentado mayor desarrollo y aceptación en las estructuras de hormigón. Esto conlleva que las guías de cálculo existentes se centren en el estudio de estructuras de hormigón, por lo que no hay una metodología establecida para el refuerzo de estructuras de madera con materiales compuestos. La aplicación en este tipo de estructuras actualmente se basa en manuales con recomendaciones de carácter general. Estas guías además tienen en cuenta únicamente el comportamiento elástico del elemento, ya que los modelos han sido tomados directamente de los refuerzos metálicos. Por lo tanto, apenas se tiene en cuenta la plastificación de la madera (la cual no es nimia) y el fallo por adherencia entre el material y el refuerzo, conocido como fallo por deslaminación.

Todo ello genera cierta reticencia de los profesionales del sector, arquitectos, ingenieros, así como de los propietarios de edificios con estructuras de madera (tanto privados como administraciones públicas). Debido a esto, perdura en la actualidad el método tradicional de refuerzo con acero.

Por lo tanto, se necesita generar confianza en la técnica de refuerzo con materiales de FRP. Las ventajas aportadas con respecto al acero son básicamente su menor peso, menor invasividad, la aptitud de adaptación a las diferentes geometrías del elemento estructural, su facilidad de instalación in-situ y un mantenimiento más reducido a largo plazo, es decir, mayor durabilidad. La Figura 1.3 muestra un ejemplo de refuerzo con CFRP de la cubierta del castillo de santa Agata de Puglia.



Figura 1.3. Refuerzo de vigas de madera con una lámina de CFRP. Fuente: <https://www.olympus-frp.com/consolidamento-strutturale/adequamento-sismico/rinforzo-strutture-copertura-legno-un-castello-federicano-santagata-puglia-cfrp/rinforzo-a-flessione-travi-in-legno-con-cfrp-3/>

Como se observa en la Figura 1.3, el FRP (principalmente vidrio, GFRP, o carbono, CFRP) se ha utilizado básicamente en forma de tejidos, placas laminadas (laminados) o varillas. El refuerzo de vigas de madera empleando este tipo de materiales es una idea que comenzó en los años 1960s [1,2]. Los autores proponen el uso de GFRP para refuerzo de madera aserrada y laminada. En particular, [1] ya propone la idea de que si el tejido de GFRP se coloca envolviendo en forma de U a la viga (en la zona de tensión y cortante), su resistencia última y ductilidad aumentan considerablemente. Esta conclusión es de enorme importancia desde el punto de vista de la seguridad estructural.

Rowlands et al. [3] plantea la idea de elaborar vigas laminadas con CFRP embebido en el laminado. Los autores indican una mejora significativa en la

resistencia y rigidez mediante el uso de GFRP (del 50% y del 20%, respectivamente). Además, hace estimaciones sobre el resultado que se obtendría con el uso de CFRP y Kevlar, relacionando las posibles mejoras mecánicas con el coste de los materiales. Es importante descartar que se trata de un trabajo de 1986. Esta idea fue planteada también por Moulin et al. [4], donde se utilizó por primera vez la madera de chopo en vigas laminadas.

El CFRP como material de refuerzo, se comienza a aplicar a partir de 1992 [5]. En este trabajo, Meier ya señala las ventajas del CFRP frente a materiales tradicionales de refuerzo, mostrando su rentabilidad en comparación con el acero a partir de una cierta longitud de viga. En el mismo año, se publican dos importantes estudios realizados por autores del mismo grupo, [6,7], aplicando laminados de CFRP externamente adheridos en la cara sometida a tracción del elemento. En el primero se aplica el laminado sin pretensar, mientras que en el segundo se pretensa antes de su aplicación, apoyado en un trabajo previo de los mismos autores [8]. En el estudio de Plevris et al. [6] se incorporan interesantes resultados de un modelo analítico basado en la teoría de Bazan [9] y Buchanan [10], estudiando la influencia del contenido de FRP y la resistencia de la madera, comparando CFRP y GFRP. Se observa que el refuerzo produce un cambio de fallo frágil a dúctil en el elemento reforzado, y que la ganancia en ductilidad se adquiere con menores áreas de CFRP que de GFRP. Además, los autores demuestran que a partir de una cierta área de refuerzo, no se obtienen mejoras significativas en los resultados, estando de acuerdo con Rowlands et al. [3]. Hasta ese valor, la resistencia aumenta linealmente con la cantidad de refuerzo añadido, aumentando la resistencia hasta en un 60% aplicando un área de refuerzo de un 1% del área de la sección transversal. Este valor puede verse incluso incrementado si se produce plastificación en la zona de compresiones.

En la misma línea, Fiorelli et al. [11] indica que se producen incrementos en la rigidez entre un 15% y un 60%, dependiendo de la cantidad (desde un 0,4% hasta un 3%) y tipo del material de refuerzo (GFRP y CFRP), adherido como laminado en la zona de tracciones. Poco después, Valluzzi et

al. [12] usa láminas de CFRP adheridas externamente para refuerzos en forjados de madera, obteniendo mejoras de hasta el 100% de la resistencia última a flexión bajo condiciones de humedad adecuadas (en torno al 12%, humedad internacional), pero muy inferiores si se aplica con una humedad del 22%. Este trabajo deja clara la importancia del grado de humedad de la madera cuando se instala el refuerzo de CFRP en la cara inferior. Muy diferentes son los resultados obtenidos por Vanerek et al. [13], los cuales usan tejido de CFRP y GFRP colocado en la cara inferior, sometida a tracción, con dos espesores (0,17 y 1 mm), en madera maciza y laminada; los autores concluyen que la mejora con espesores de CFRP de 0,17 mm oscila entre el 2% y el 5%, mientras que con espesores de 1 mm, la mejora se encuentra entre un 5% y un 40%. Con GFRP sin embargo, la mejora es del orden del 2%-3% y del 4%-7% para cada espesor, respectivamente.

De Jesús et al. [14] comparan dos longitudes de laminado de CFRP (350 mm y 600 mm), aplicado sobre la cara inferior de la viga (máximas tracciones). La rigidez elástica alcanza una mejora del 23% y del 34% para cada longitud de refuerzo, respectivamente, mientras que la capacidad de carga mejora en un 28% para el refuerzo de 600 mm y empeora en un 12% para el de 350 mm de longitud. En el caso de Neubauerová [15], adhiere también láminas de CFRP en la zona de tracción, con mejoras de resistencia muy moderadas o incluso inexistentes en algún caso. Posteriormente, Kim et al. [16] se presentan resultados experimentales de vigas y subestructuras de tres vigas de abeto extraídas de un edificio de 32 años de antigüedad, propiedad de la Universidad. Las vigas se refuerzan con laminado pultruido (dos láminas) y tejido (seis láminas) de CFRP, dispuestas con una disminución del espesor de forma progresiva, con el fin de evitar concentración de tensiones en los extremos, definido anteriormente por Kim et al. [17]. El refuerzo con CFRP mejora notablemente la capacidad de carga de las vigas reforzadas, oscilando entre un 33% y un 184% en comparación con los especímenes de control. En todos los casos se advierte un comportamiento lineal de los elementos reforzados, no alcanzándose la plastificación de la madera a compresión.

Diversos trabajos han considerado el uso de varillas como refuerzo [18-20]. Borri et al. [18] compara el uso de laminados de CFRP adheridos externamente en la zona de tracción, colocados en la cara inferior o en las esquinas inferiores de las vigas de madera, con refuerzos con una o dos varillas en hendiduras realizadas en las partes de la viga sometidas a tracción. La mejora en resistencia introducida por los refuerzos laminados es del 42% y del 60% (con dos o tres láminas, respectivamente), y de un 55% con las láminas en esquina, proporcionando una clara mejora en la ductilidad. La rigidez alcanzó mejoras que oscilan entre el 22% y el 30%. Sin embargo, las varillas proporcionan un comportamiento mucho menos dúctil y una mayor rigidez (29% y 52% con una y dos varillas, respectivamente) en comparación con el laminado. El uso de una o dos varillas introducidas en hendiduras practicadas desde el exterior en la cara inferior de tracción, es propuesto por Johnsson et al. [19] para vigas laminadas. Con esta solución, se consigue una mejora en la capacidad de carga a flexión que varía entre el 44% y el 63%, con mejoras en la ductilidad, demostrando las ventajas del uso de dos varillas en lugar de una. Yang et al. [20] compara el refuerzo con barras pretensadas y sin pretensar, embebidas en hendiduras. Además de usar barras de CFRP de dos diámetros (11 mm y 16 mm), estudia la diferencia entre una solución de refuerzo en la zona de tracciones y otro en la zona de tracción y compresión. Con el refuerzo en ambas zonas, se consigue una mejora de un 131% de media, siendo la solución más frágil.

También diversos trabajos han propuesto la introducción de láminas en hendiduras practicadas desde el exterior [21-25]. Luggin et al. [21] indican que un ancho excesivo de la lámina de CFRP con respecto a la sección de madera puede perjudicar a la adherencia del sistema en general. En el estudio de Nowak et al. [23], se propone embeber láminas de CFRP desde el exterior mediante hendiduras laterales a ambos lados. En concreto, se insertan tres láminas en cada lado, consiguiendo un aumento de la capacidad a flexión en torno al 21%, con un aumento significativo de la flecha máxima y de la zona de plastificación de la viga. En un posterior trabajo, Nowak et al. [24] amplía estos resultados para el caso de refuerzo de láminas

introducidas en hendiduras verticales, con mejoras en la capacidad de carga última de hasta un 19%.

Con respecto de la ubicación del refuerzo, Buel et al. [26] consideran cuatro soluciones de refuerzo, comparando diferentes formas de envolver la viga con tejido de CFRP. Las mejoras oscilan entre el 17% y 27% en rigidez, 40% y 53% en resistencia a flexión, y entre el 36% y 68% en resistencia a cortante. Gracias al refuerzo a cortante lateral, la ductilidad aumenta notablemente. Alam et al. [27] comparan el uso de GFRP, CFRP y acero colocado en la cara de tracción, en la de compresión o ambas, demostrando que su colocación en ambas mejora los resultados. De nuevo, muestra que el refuerzo con CFRP es más efectivo que con GFRP. Por último, Moayyed et al. [28] propone refuerzos con laminados pretensados embebidos verticalmente en la cara sometida a esfuerzos de tracción. Este refuerzo lo aplica en vigas de madera laminada de chopo y abeto, proporcionando una importante mejora en ductilidad y resistencia, estable a lo largo del tiempo.

Un posible y muy habitual fallo de las vigas de madera es debido al esfuerzo cortante, en muchos casos producido por la existencia de fendas de secado. Son varios los autores que han analizado y propuesto sistemas de refuerzo a cortante con láminas dispuestas en las caras laterales de las vigas. En particular, Triantafyllou [29] propone el uso de tejido de CFRP colocado en las dos caras laterales de la viga, mostrando una alta efectividad del refuerzo. Los autores concluyen que la mejora se maximiza cuando las fibras se disponen en la dirección longitudinal y la altura de las láminas de refuerzo es ligeramente mayor que un valor límite. A partir de este valor, el fallo del FRP precede al de la madera. Ajdukiewicz et al. [30] muestran un ejemplo de relevancia histórica, como es el de la rehabilitación de la mayor torre de madera existente en Polonia mediante el uso de parches de láminas de CFRP. Otros autores han propuesto el uso de varillas pultruidas para el refuerzo a cortante. Este es el caso de Radford et al. [31], en el que se demuestra experimentalmente la efectividad de la inclusión de estas varillas embebidas en resina epoxi mediante orificios practicas desde la cara inferior a la superior. Los autores presentan el uso de placas laterales de GFRP como

solución más efectiva, aunque de mayor impacto visual y coste económico. En concreto, Buell et al. [26] propone el uso de tejido para envolver la viga en forma de U y ganar en resistencia a cortante y ductilidad. En el trabajo se usa tejido bidireccional de CFRP, comparando diferentes configuraciones, proporcionando el refuerzo lateral un aumento considerable en ductilidad. Del mismo modo, establecen que la ausencia de refuerzo lateral, cuando solo existe refuerzo en la zona de tracciones, puede producir fallo por cortante. Los autores también determinan que es mejor envolver en una pieza toda la longitud de la viga, que en varias piezas con solapes en la dirección perpendicular de la misma. De la Rosa et al. [32] usa refuerzo con tejido en forma de U, bidireccional de CFRP y unidireccional de basalto (BFRP), mostrando las mejoras respecto de los tejidos unidireccionales, así como el buen comportamiento de la fibra de basalto, siendo esta más económica.

La Figura 1.4 presenta un resumen general de las diferentes configuraciones de refuerzo de FRP, bien sean tejidos, laminados o barras, estudiadas en trabajos previos. Las disposiciones a.1 se corresponden con aplicaciones en la superficie o NSM (*near surface mounted*), siendo por tanto visibles desde el exterior. Las soluciones a.2 se corresponden con refuerzos aplicados en hendiduras. Por otro lado, las configuraciones b son vigas reforzadas de madera en las que durante el proceso de laminado de una viga *glulam*, el refuerzo queda embebido y por lo tanto, exteriormente oculto.

Un aspecto relevante, es que en la mayoría de trabajos previos, los especímenes ensayados en laboratorio se elaboraron con madera nueva (óptimas condiciones). Se han llevado a cabo escasos estudios con elementos de madera extraídos de edificios en servicio. La diferencia puede ser notable entre madera nueva y antigua, debido principalmente al deterioro en el tiempo de la segunda. Este deterioro se refiere a un mayor número de defectos en la madera, lo cual se traduce en una mayor dispersión en las propiedades mecánicas de los especímenes extraídos de diferentes elementos estructurales. Aunque en el pasado se han propuesto y ensayado un considerable número de soluciones de refuerzo, hasta la fecha no muchos trabajos han comparado diferentes configuraciones de refuerzo bajo las

mismas circunstancias del elemento estructural base, como es el caso de las condiciones de madera antigua extraída de un mismo edificio, después de muchos años de servicio.

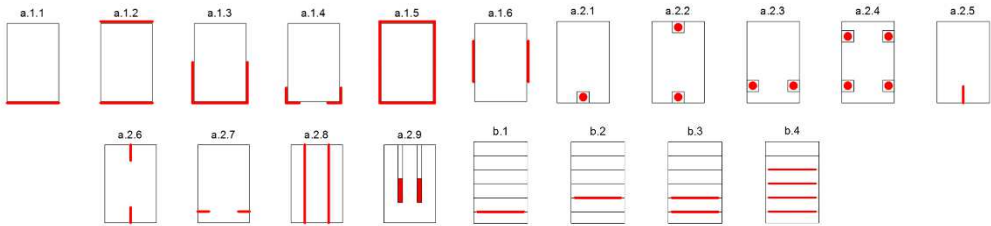


Figura 1.4. Resumen de las diferentes configuraciones de refuerzo (en rojo) de FRP (*fiber reinforced plastics*).

Por otro lado, muchos autores han propuesto modelos analíticos para el cálculo de la capacidad mecánica a flexión y la rigidez de vigas reforzadas con FRP. Generalmente, se considera un comportamiento elastoplástico de la madera a compresión y un comportamiento elástico a tracción, así como un comportamiento elástico del FRP. Los métodos analíticos que se tienen en cuenta están basados en los usados para el cálculo en hormigón, considerando la anteriormente mencionada teoría de Bazan-Buchanan [9-11,20,32,33]. Otros autores sin embargo, hacen uso del método de las secciones transformadas [34], o de modelos alternativos [4,21,27,35,36]. Como regla general, la rigidez a tracción y compresión se estiman iguales, es decir, mismo módulo elástico para ambos esfuerzos. Este supuesto, aunque razonable para madera nueva sin apenas defectos o deterioro por el paso del tiempo, no es válido en el caso de madera antigua con muchos años de servicio, la cual necesita ser reforzada para rehabilitarla y/o repararla [37]. Además, estos elementos de madera, bastante comunes en edificios históricos suelen tener un origen desconocido; lo que conlleva a una gran dispersión en sus propiedades mecánicas y estados de conservación.

En este contexto, Argüelles, Baño et al. [37] proponen un modelo analítico más general para modelizar el comportamiento de la madera, considerando que los módulos elásticos a compresión y tracción no son iguales. En madera antigua, debido a sus defectos, esta desigualdad entre módulos puede no ser

trivial, conllevando a un importante error al comparar los resultados teóricos con los experimentales. Por otro lado, el refuerzo de FRP hace que este efecto sea aún mayor, sobre todo cuando la madera entra en régimen plástico.

A pesar de lo anteriormente expuesto, la aplicación de este tipo de refuerzos presenta aún algunos puntos oscuros que fuerzan a seguir investigando al respecto y en los cuales se centra esta Tesis Doctoral. Entre ellos, cabe citar:

- Un desconocimiento importante en el comportamiento mecánico de la estructura y el material reforzado, por su complejidad de diseño y construcción;
- Un desconocimiento aún importante de los mecanismos de daño de la estructura y del elemento reforzado, tanto a nivel de la estructura base, como del refuerzo y la unión de ambos;
- La escasa experiencia en los tipos de resinas y cantidades a utilizar en la aplicación de fibra de carbono en madera antigua;
- La falta de guías y manuales rigurosos de aplicación y uso de fibra de carbono en madera antigua;
- La falta de normativas de cálculo estructural referentes a refuerzos de materiales compuestos en madera antigua;
- La falta de soluciones constructivas para evitar el fallo más común en este tipo de técnicas, la deslaminación;
- La falta de experiencia en el comportamiento a largo plazo (queda fuera del alcance de esta Tesis);
- El comportamiento frente al fuego, sabotaje o gamberrismo (queda fuera del alcance de esta Tesis).

De los puntos anteriores, cabe destacar un fallo muy común que se da en elementos reforzados o reparados con CFRP de la forma NSM, la deslaminación. Este fallo depende directamente de que la aplicación de la resina epoxi, encargada de la unión entre la madera y el FRP se lleve a cabo correctamente, permitiendo que la transmisión de esfuerzos entre ambos materiales sea la adecuada [38-41]. La calidad de la adherencia depende de factores como la calidad de los materiales (resinas, CFRP y estado de conservación de la madera) y una adecuada aplicación. Para evaluar esta

calidad, dos de los ensayos que se suelen realizar son ensayos de *pull-off* y *pull-out*. Sin embargo, este tipo de análisis mayormente se han llevado a cabo en refuerzos de elementos de hormigón con CFRP [42-44].

Por todo ello, para generar confianza sobre las aplicaciones “in situ”, así como un seguimiento continuo del elemento reforzado con unas adecuadas alarmas estructurales establecidas, la monitorización “in situ” y en tiempo real de estructuras es una estrategia eficiente (SHM - *Structural Health Monitoring*). El SHM puede ser de gran utilidad en el caso de estructuras de madera reforzadas o reparadas con FRP. En esta línea, los NDT (*non-destructive tests*) juegan un papel importante en la evaluación de la integridad estructural de un material, como es el caso de la madera, así como la evaluación de superficies y adherencia de materiales [45-48]. En particular, uno de los métodos de NDT es el método de emisión acústica (EA), una tecnología eficiente para la monitorización estructural, la cual encaja perfectamente con este propósito [49-52]. Hasta la fecha, no existen publicaciones previas sobre la monitorización con EA de estructuras de madera reforzadas con CFRP. Este método, sin embargo, ha sido ampliamente utilizado para la madera y el CFRP [53,54], de forma individual, así como para hormigón y CFRP [55]. También existen algunos trabajos de monitorización con EA en elementos de hormigón reforzado o reparado con CFRP.

Desde el punto de vista del proceso físico, la emisión acústica consiste en la liberación espontánea de energía en forma de ondas elásticas al someter una estructura a un cierto estímulo. Este fenómeno se produce debido a cambios en el campo de deformaciones del elemento, como pueden ser procesos de fractura, corrosión, deslaminación, etc. Parte de esta energía liberada, puede alcanzar la superficie de la estructura y ser registrada por sensores piezoeléctricos, convirtiendo la onda en una señal eléctrica. Además, basándose en la sismología, se puede llevar a cabo una localización de las fuentes de EA.

En primer lugar, referente al material base, la madera presenta dos problemas al aplicar esta técnica: a) Su alta heterogeneidad, confiriendo una

muy elevada distorsión a las ondas a partir de fases tempranas. Estas múltiples reflexiones y otros fenómenos de propagación de las ondas, alteran considerablemente la forma de onda, haciendo que su ulterior análisis sea muy complicado y poco fiable; b) Su gran atenuación, la cual conlleva una disposición de sensores más cercana, y a la pérdida casi total de la información a altas frecuencias.

Por otro lado, en cuanto al análisis del fallo por deslaminación, la importancia del método recae en el hecho de que las señales registradas contienen información en su forma y en su contenido en frecuencias. Esta información está directamente relacionada con la fuente que las produce, y por lo tanto con el mecanismo de fallo. En concreto, hay muchos trabajos que han aplicado exitosamente este método para la evaluación de recubrimientos, superficies y adherencia entre materiales [56-61].

Queda claro que la EA es un método muy interesante para realizar una evaluación continua tanto del material base, tratándose de madera antigua, como de la adherencia entre el CFRP y la madera. Es importante destacar que el éxito de la evaluación mediante EA recae en el análisis y tratamiento de los datos. En otras palabras, el procesado de las señales de EA juega un papel fundamental en la veracidad del método para cada aplicación. Esta Tesis Doctoral propone una estrategia en el análisis de los datos de EA, con el fin de obtener una evaluación rigurosa del estado de un elemento de madera antigua reforzado con CFRP. La propuesta pretende evitar en la medida de lo posible las problemáticas anteriormente descritas, como son las reflexiones y la alta atenuación de la madera, así como la pérdida de información a altas frecuencias, incluyendo una corrección de la atenuación de la señal en el dominio de la frecuencia.

1.2. Objetivos

Esta Tesis se centra en la evaluación de diferentes soluciones de refuerzo de CFRP sobre vigas de madera de pino (de más de 200 años en servicio) extraídas de la cubierta de la Facultad de Derecho de la Universidad de

Granada en 2015 por la empresa DÁVILA Restauración de Monumentos S.L.



Figura 1.5. Cubierta de la Facultad de Derecho de la Universidad de Granada. Izq.: Estado anterior a la rehabilitación. Der.: Estado posterior a la rehabilitación.

Para ello, se han empleado materiales de CFRP suministrados por dos casas comerciales, SIKA[®] S.A.U. y DRIZORO[®] S.A.U., con el fin de obtener resultados comerciales reales y representativos a nivel nacional. El objetivo general de esta Tesis es el diseño y caracterización de diferentes soluciones de refuerzo estructural para madera antigua mediante el uso de CFRP, teniendo en cuenta las propiedades mecánicas, ahorro de material y costes. A continuación se presentan los objetivos específicos necesarios para cumplir con el objetivo general:

- Avanzar en el conocimiento del comportamiento mecánico y del fallo, especialmente por delaminación, en vigas de madera antigua rehabilitadas con refuerzos de material compuesto avanzado de CFRP [62-64].
- Catalogar la madera siguiendo la normativa vigente de clasificación visual.
- Comparar diferentes resinas y productos de CFRP existentes en el mercado, estudiando para ello los productos de dos casas comerciales de gran relevancia nacional e internacional en el sector.
- Estudiar la adherencia entre la madera y el refuerzo, desde un punto de vista comparativo de diferentes resinas epoxy que existen en el mercado.
- Caracterizar mediante emisión acústica la adherencia CFRP-madera.

- Establecer un procedimiento de análisis y procesado de datos de EA que permita monitorizar de forma continua y en tiempo real el estado de un elemento reforzado con CFRP [65].
- Realizar ensayos a flexión sobre vigas de madera con y sin refuerzo de CFRP, en primer lugar sobre vigas de pequeña escuadría (1,3 metros), analizando un total de 8 tipologías de refuerzo. Posteriormente realizar ensayos sobre vigas de gran escuadría (4,5 metros) seleccionando ciertas tipologías de la primera fase.
- Llevar a cabo la reparación de una parte de las vigas de gran escuadría rotas previamente, y que por lo tanto han agotado su capacidad portante, volviéndolas a ensayar a flexión. Esta situación es muy cercana a una aplicación real en obra, permitiendo comprobar esta técnica en dichas situaciones.
- Establecer procedimientos y guías de aplicación, así como de cálculo analítico del refuerzo, describiendo con detalle los procesos de elaboración y los materiales usados.
- Aplicar en una situación real de obra la técnica estudiada, a fin de analizar en una actuación “in situ” los tiempos de ejecución, formas de aplicación y eficacia del refuerzo, comparándose con los resultados de laboratorio.

1.3. Marco de la investigación

Esta Tesis Doctoral ha formado parte del contrato N.º 3546, titulado “Rehabilitación de vigas de madera mediante refuerzos de material compuesto laminado de fibra de carbono (CFRP). Comportamiento mecánico y evaluación de fallos con emisión acústica”. El proyecto, ha sido financiado por la empresa DÁVILA Restauración de Monumentos, cuyo investigador principal es el Dr. Antolino Gallego Molina, y en el que participa también el Dr. Ignacio Valverde Palacios. Los materiales de CFRP y resinas epoxi han sido suministrados por SIKA[®] y DRIZORO[®].

1.4. Estructura de la tesis

Esta Tesis Doctoral se divide en cinco actividades principales, divididas en seis capítulos. La Figura 1.6 muestra un esquema resumen de las cinco actividades llevadas a cabo.

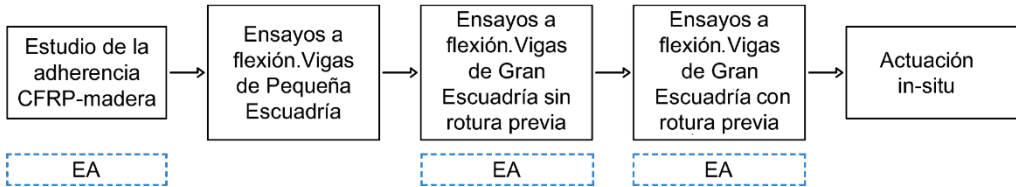


Figura 1.6. Esquema de la estructura de la Tesis Doctoral. Cuadro en azul: Actividades que se monitorizaron con Emisión Acústica.

Además del presente Capítulo de introducción, la Tesis se estructura en otros cinco capítulos.

El **Capítulo 2** expone una serie de conocimientos previos, como son el interés por conservar el patrimonio, el concepto de refuerzo de vigas de madera mediante FRP, las características mecánicas de los materiales y los modelos analíticos empleados en esta Tesis.

En el **Capítulo 3** se definen los materiales y métodos usados en esta Tesis Doctoral para cada una de las actividades que se observan en la Figura 1.6. En concreto la madera, con una descripción general, la clasificación visual llevada a cabo y algunas de sus propiedades resistentes. Seguidamente se detalla la descripción del CFRP de forma general, su resistencia a tracción y los materiales empleados en esta Tesis Doctoral (laminados de CFRP, tejidos de CFRP, resinas e imprimación). Por último, en este Capítulo se describe la elaboración de especímenes, matrices de ensayos y su instrumentación.

El **Capítulo 4** recoge los resultados y su discusión. Siguiendo la Figura 1.6, en primer lugar se presentan los resultados de adherencia madera-refuerzo de CFRP, los cuales se monitorizaron con EA. Posteriormente se muestran los resultados de los ensayos a flexión sobre vigas de pequeña escudría.

Seguidamente los resultados de los ensayos a flexión sobre vigas de gran escuadría, los cuales se dividen en dos fases:

Fase 1: Ensayos sobre vigas sin rotura previa.

Fase 2: Reparación y ensayo de vigas rotas en la Fase 1.

Ambas fases se han monitorizado con EA. En este Capítulo se realiza una comparación global de los resultados mecánicos, de los resultados analíticos y experimentales y de los costes de materiales y tiempos de elaboración.

En el **Capítulo 5**, se expone la última actividad que aparece en la Figura 1.6, la actuación “in situ”. En concreto, se describe el elemento dañado, el diseño del refuerzo y los costes y tiempos de elaboración, comparándose con los resultados obtenidos en laboratorio.

En el **Capítulo 6** se presentan las conclusiones de esta Tesis Doctoral.

2. Conocimientos previos

2.1. Interés por conservar el patrimonio

La conferencia internacional de Atenas o Carta de Atenas [66] representa hoy en día un documento fundamental para el conocimiento de los problemas de conservación y restauración en Europa que se plantearon en el periodo entreguerras (1918-1939), así como para entender algunos conceptos establecidos en ese momento y aún hoy vigentes [67].

La celebración del congreso fue una importante iniciativa europeísta promovida por el Consejo Internacional de Museos. En especial, permitió la internacionalización del problema de la conservación, exponiendo que, por encima de las posturas particulares y las concepciones nacionales del patrimonio, debía prevalecer el interés público general.

Según la Ley 8/2013 de 26 de junio, de rehabilitación, regeneración y renovación urbana [68], la tradición urbanística en España se ha enfocado fundamentalmente a la producción de nueva ciudad. Una intervención de manera inteligente en las ciudades no debería dejar en el olvido los tejidos urbanos existentes. La situación de crisis que aún se vive, incrementa este hecho, ya que estas últimas intervenciones, a fin de preservar su calidad y

autenticidad, suelen ser más complejas y de un coste elevado, tanto para la financiación pública como privada.

Cabe destacar que España es, detrás de Italia, el país con más patrimonio cultural en Europa, muy cerca de Francia. En los últimos años se ha realizado un esfuerzo considerable en restauración y puesta en valor de dicho patrimonio, motivado fundamentalmente por el auge del turismo, el cual en 2016 representó el 16% del Producto Interior Bruto. El turismo cultural es uno de los sectores con mayor crecimiento, lo que motiva la necesidad de conservación y restauración del patrimonio, con el fin de atraer a una mayor cantidad de visitantes. Sin embargo, a la problemática económica se unen el envejecimiento y el fenómeno de desruralización, que provoca un abandono del patrimonio histórico, cuestiones éstas a las que es necesario aportar soluciones.

El conjunto de la inversión pública y privada en el sector del patrimonio histórico se sitúa en no menos de 1864 millones de euros, de los cuales el 90,9% corresponde al sector público (datos de 2004, Fundación Caja Madrid), suponiendo el 0,2% del PIB español. La presión turística, la necesidad de buscar nuevas fuentes de explotación en los territorios, la demografía y el abandono rural, hacen que la demanda de soluciones de conservación y restauración deba ser atendida de manera rápida, eficaz y lo más económica posible.

En países como Francia o Italia, el turismo está provocando un aumento del gasto en restauración del patrimonio (en torno a un 5% en los últimos años para ambos países).

Por otro lado, y como se recoge en [68], alrededor del 55% del parque edificado en España, que asciende a 25.208.622 viviendas, es anterior al año 1980 y casi el 21% cuentan con más de 50 años. Además, cobran especial relevancia los edificios con más de 100 años de antigüedad en los cuales las actuaciones de protección se concentran en su cubierta y estructura, que generalmente son de madera.

La propiedad de los edificios histórico/artístico recae principalmente entre la Administración Pública y la Iglesia Católica. En su conjunto las propiedades del Estado español ascienden a más de 12000 bienes inmuebles, de los cuales son catalogados como edificios histórico/artísticos unos 4000. Andalucía, seguida de Castilla y León, son las Comunidades Autónomas donde más edificios de esta categoría existen. En ciudades como Granada, con un importante casco histórico antiguo y un alto valor patrimonial, las edificaciones con forjados y/o cubiertas de madera pueden alcanzar valores mucho mayores en comparación con las edificaciones de nueva planta.

Los gobiernos autonómicos y ayuntamientos también cuentan con innumerables inmuebles bajo su gestión y propiedad. Por su parte, la Iglesia Católica cuenta con unos 100000 bienes inmuebles, de los que 50000 son edificios religiosos, teniendo una parte importante más de 100 años y necesidades de rehabilitación. Por último, las universidades (este es el caso de la Universidad de Granada) son otro tipo de organismos que agrupan gran cantidad de bienes inmuebles de más de 100 años y sobre los que es necesario realizar intervenciones. Actualmente, en la Universidad de Granada los edificios más significativos que se encuentran en fase de rehabilitación son la Facultad de Derecho (II Fase) y la Facultad de Traducción e Interpretación, cuya intervención se centra en su mayoría en la rehabilitación de la cubierta, construida en su mayor parte con madera.

2.2. Refuerzo de vigas de madera mediante FRP. Concepto

Como se ha comentado, la madera es un material común en construcciones tanto patrimoniales como residenciales que, dada su antigüedad, requieren actuaciones de rehabilitación. Se pueden presentar dos situaciones principales por las que una estructura o parte de ella necesite ser reforzada:

- Deterioro de parte o la totalidad de la estructura debido a ataques externos (paso del tiempo, cambios de humedad, agentes xilófagos, etc.). Este hecho incrementa la alta variabilidad de propiedades mecánicas que se pueden encontrar en un elemento de madera,

incluso teniendo la misma edad o siendo madera de la misma variedad;

- Cambio de uso del edificio en cuestión, requiriendo en una o más de sus partes un aumento de las solicitaciones que debe soportar.

En algunos casos ambas situaciones pueden coincidir, dándose el caso de que un edificio cambie de uso y el aumento de peso descubra que la estructura base se encuentra ya altamente dañada.

En la actualidad las soluciones constructivas llevadas a cabo para solucionar estas problemáticas son la sustitución del elemento o de la estructura completa, o el refuerzo de la misma empleando hormigón y/o acero.

El refuerzo con hormigón es empleado principalmente para el refuerzo de forjados. El sistema constructivo consiste en la elaboración de una losa sobre las viguetas de madera (Figura 2.1) la cual contiene un mallazo de acero. Para establecer una conexión entre las viguetas de madera y el hormigón se disponen clavos a lo largo de estos elementos de madera.

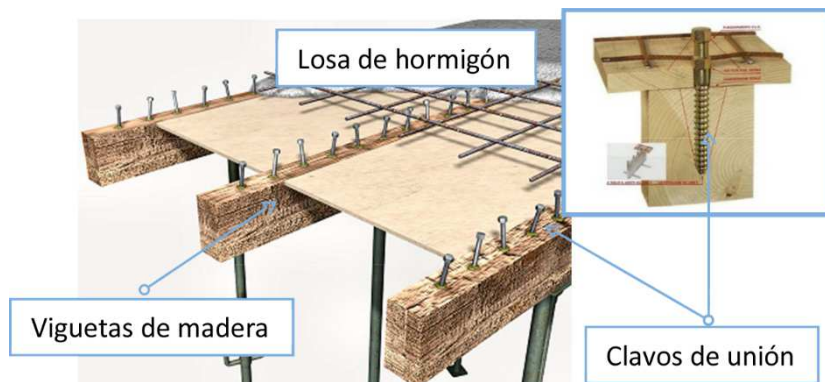


Figura 2.1. Esquema de refuerzo de un forjado de viguetas de madera mediante una losa de hormigón. Fuentes: http://www.generadordeprecios.info/rehabilitacion/Estructuras/Madera/Refuerzos/EMZ310_Refuerzo_de_forjado_de_madera__medi.html. <http://www.al-fer.it/wms/default-1.htm?iID=EDDGHHD>.

Sin embargo, esta solución constructiva presenta una serie de inconvenientes, entre los que destacan el gran aumento de peso sobre la estructura base, el mal comportamiento entre ambos materiales, sobre todo en términos de variaciones volumétricas, y que a la madera se le deja con

un trabajo mecánico casi nulo. En la Figura 2.2 se puede observar un ejemplo real de aplicación de una losa sobre un forjado de madera. Otro problema añadido a este tipo de soluciones es la humedad extra que supone para la madera el agua que contiene el hormigón. Esto puede provocar un deterioro mayor del elemento base, así como problemas asociados a cambios volumétricos de la madera.



Figura 2.2. Imagen de una actuación de losa de hormigón sobre un forjado de viguetas de madera. Fuente: <http://reotec.es/reparraciones-y-refuerzos-estructurales/reparraciones-en-construcciones-antiguas>.

Otra técnica clásica de refuerzo estructural es mediante elementos de acero, principalmente en el refuerzo de tirantes y pares, así como de viguetas de forjado. El sistema consiste básicamente en la colocación de perfiles de metal en el perímetro del elemento. En la Figura 2.3 se pueden ver algunos ejemplos esquemáticos de este tipo de refuerzos. El nexo de unión, de existir, suele ser mecánico.

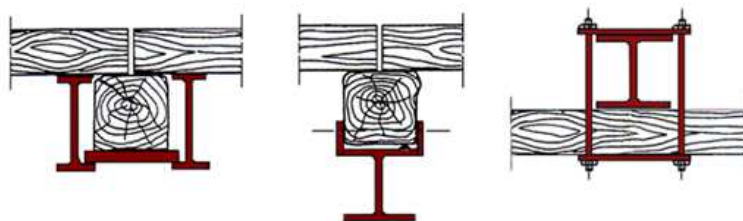


Figura 2.3. Esquema de diferentes disposiciones de perfiles metálicos en elementos de madera. Fuente: <http://biter.us/forjado-de-viguetas-metalicas.html>.

Al igual que el refuerzo con hormigón, esta solución añade un gran peso a la estructura de base y mecánicamente la madera deja de trabajar. A este

hecho se añade el diferente comportamiento en cuanto a deformaciones se refiere y la compleja o imposible adaptación del acero a las diferentes formas que puede presentar un elemento de madera.

El refuerzo mediante el uso de material FRP pretende abarcar los beneficios de las dos soluciones anteriores, en actuaciones que queden ocultas, resolviendo la mayoría de inconvenientes que dichas soluciones tradicionales presentan, tal y como se indicó en el Capítulo 1. De esta forma, un refuerzo de FRP permitiría aumentar la capacidad mecánica del elemento base con un aumento de peso global del elemento prácticamente nulo. De igual forma, tanto el comportamiento a deformación como la adaptabilidad del refuerzo de FRP a la madera, se ven enormemente mejorados. Sin embargo, y como se ha explicado en el Capítulo 1, el refuerzo de FRP presenta una serie de nuevos inconvenientes, cuya solución o reducción pretende abordar esta Tesis.

2.3. Características mecánicas de los materiales

Observando la composición básica de la madera y del FRP, ambos materiales son conceptualmente similares. Ambos están constituidos a base de fibras dispuestas en una dirección principal, con una elevada resistencia a tracción en dicha dirección. De igual modo, tanto el FRP como la madera están formados por un elemento que sustenta dichas fibras (Figura 2.4). Para el caso de la madera, se trata de las parénquimas y los canales resiníferos. En el caso del FRP se trata de la matriz de resina. La principal y gran diferencia reside en su origen. La madera es un material natural de origen orgánico, afectado por numerosos factores como nudos, cambios de humedad, etc., con bajo o nulo control en su producción y desarrollo. Sin embargo, los materiales FRP son productos industriales elaborados con un riguroso control.

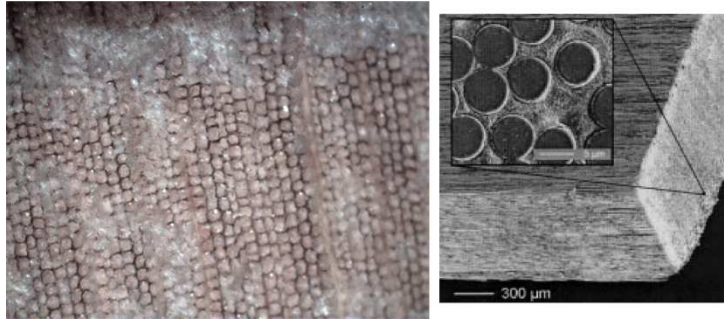


Figura 2.4. Comparativa de ambos materiales a nivel microscópico. Izquierda: Madera (10x). Derecha: lámina de CFRP [69].

El hecho de que tanto la madera como el FRP sean materiales con fibras dispuestas en una dirección principal, hace que su comportamiento a tracción sea prácticamente similar (Figura 2.5). Se puede observar como para ambos casos, la relación entre tensión y deformación es totalmente lineal hasta una rotura frágil. Sin embargo, el módulo elástico a tracción del CFRP es de 15 a 20 veces mayor que el de la madera.

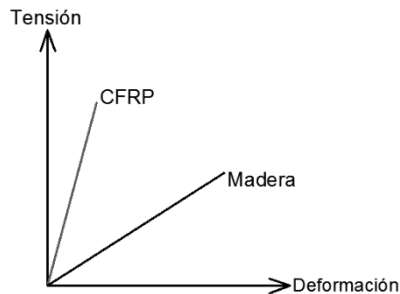


Figura 2.5. Tensión frente a deformación durante el comportamiento a tracción de la madera y el CFRP.

El comportamiento mecánico a otro tipo de esfuerzos (compresión, cortante, etc.) es muy diferente en ambos materiales, debido principalmente a las dimensiones en que se utilizan en el sector de la construcción. En el caso del comportamiento a compresión, la madera presenta un excelente comportamiento, con unas buenas prestaciones mecánicas en relación a su peso. En la Figura 2.6 se muestra un gráfico tensión-deformación, el cual presenta dos tramos claramente diferenciados, marcando un comportamiento elasto-plástico.

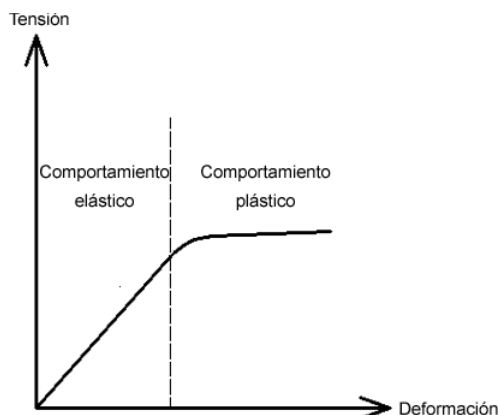


Figura 2.6. Tensión frente a deformación. Comportamiento a compresión axial de un elemento de madera.

Por el contrario, para los materiales FRP, pese a que su resistencia última a compresión es similar, aunque inferior a la resistencia a tracción, las geometrías típicas de suministro (gran esbeltez) presentan grandes problemas de pandeo ante este esfuerzo. El tipo de rotura a compresión sigue siendo frágil, sin ningún comportamiento plástico.

2.4. Modelos analíticos

Tradicionalmente se ha empleado para el cálculo de secciones de madera el modelo analítico de Bazán-Buchanan [9,10]. Dentro de las simplificaciones que se llevan a cabo, este modelo considera iguales los valores de los módulos elásticos a tracción y compresión. En el caso de la madera, especialmente en el caso de madera antigua con defectos, puede haber diferencias muy significativas entre la tensión a tracción directamente obtenida de un ensayo de caracterización (altamente afectado por nudos o la dirección de la fibra) y la tensión a tracción de un elemento sometido a flexión. Este hecho afecta de manera importante al análisis teórico de un elemento. Además, la incorporación de un refuerzo de FRP al modelo analítico causa mayor variación de este efecto, ya que el refuerzo actúa en cierta medida como un “suavizador de defectos”, permitiendo a la madera trabajar a mayores tensiones. La nomenclatura habitualmente empleada en los modelos se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Nomenclatura empleada en los modelos analíticos.

Nomenclatura para los modelos analíticos Nomenclature for the analytical models		
$\sigma_{w,t,u}$	wood, tension stress, ultimate	madera, tracción, última
$\sigma_{w,c,y}$	wood, compression stress, elastic limit	madera, compresión, límite elástico
$\sigma_{w,c,u}$	wood, compression stress, ultimate	madera, compresión, última
$E_{w,t}$	wood, tension elastic modulus	madera, módulo elástico a tracción
$E_{w,c}$	wood, compression elastic modulus	madera, módulo elástico a compresión
$\epsilon_{w,t,u}$	wood, tension strain, ultimate	madera, deformación a tracción, última
$\epsilon_{w,t,u,b,i}$	wood, tension strain, ultimate, bending test, bottom face	madera, deformación a tracción, última, flexión, cara inferior
$\epsilon_{w,t,u,b,l}$	wood, tension strain, ultimate, bending test, lateral face	madera, deformación a tracción, última, flexión, cara lateral
$\epsilon_{w,c,y}$	wood, compression strain, elastic limit	madera, deformación a compresión, límite elástico
$\epsilon_{w,c,u}$	wood, compression strain, ultimate	madera, deformación a compresión, última
$\sigma_{frp,t,u}$	FRP, tension stress, ultimate	FRP, tracción, última
$E_{frp,t}$	FRP, tension elastic modulus	FRP, módulo elástico a tracción
$\epsilon_{frp,t,u}$	FRP, tension strain, ultimate	FRP, deformación a tracción, última
$\epsilon_{frp,t,u,b,i}$	FRP, tension strain, ultimate, bending test, bottom face	FRP, deformación a tracción, última, flexión, cara inferior

Una opción alternativa es la propuesta por Argüelles et al. [70], cuya principal diferencia es considerar que los valores de los módulos elásticos (compresión y tracción) son diferentes. Tener en cuenta esta consideración permite que el modelo se adapte mejor al comportamiento de un elemento sometido a flexión. Además, en el rango plástico de un elemento reforzado, este modelo aporta resultados más precisos que el modelo de Bazán-Buchanan.

2.4.1. Modelo de Bazan-Buchanan

El modelo de Bazan-Buchanan [9,10], el cual se muestra en la Figura 2.7, considera un comportamiento lineal y con rotura frágil a tracción y un comportamiento bilineal en el caso de la compresión, con una pendiente

negativa a partir del punto de plastificación de la madera. Como se ha comentado anteriormente, en este modelo la relación entre el módulo elástico a tracción ($E_{w,t}$) y el módulo elástico a compresión ($E_{w,c}$) es igual a 1.

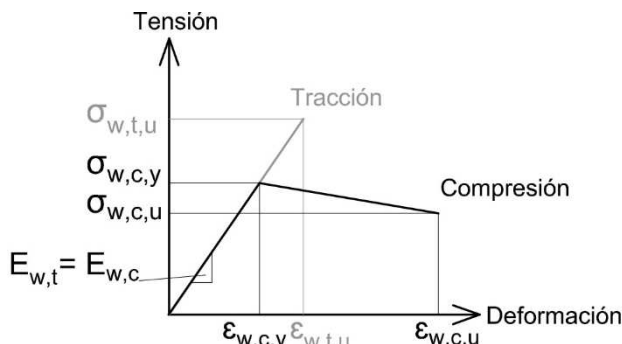


Figura 2.7. Comportamiento de tensión-deformación de la madera para el modelo de Bazan-Buchanan [9,10].

Además, la posición de la fibra neutra en el rango elástico permanece en el centro de la sección. Debido a la heterogeneidad de la madera y al hecho de que cada sección de madera puede provenir de diferentes partes de la sección de un tronco, esta simplificación puede llevar a ciertos errores en el análisis entre los resultados teóricos y experimentales. Mediante el principio de compatibilidad de deformaciones y de la sección equivalente, se puede obtener la tensión a flexión en el rango elástico (Figura 2.8) para una sección de madera con o sin refuerzo de FRP. La Figura 2.9 muestra ambas situaciones cuando un elemento se encuentra en rango plástico.

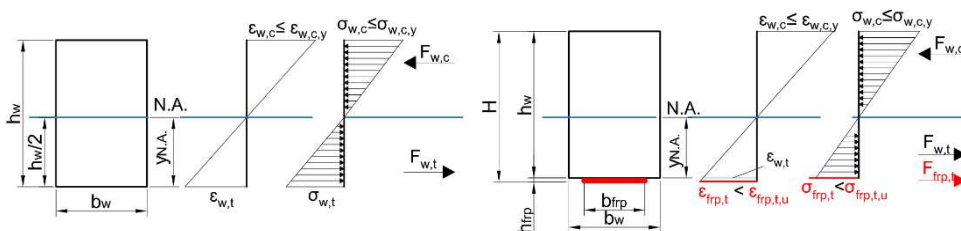


Figura 2.8. Nomenclatura y diagramas de la relación entre la tensión y la deformación para el modelo en rango elástico de Bazan-Buchanan [9,10]. Izquierda: Sección de una viga no reforzada. Derecha: Sección de una viga reforzada con refuerzo longitudinal. Color rojo: Refuerzo de FRP.

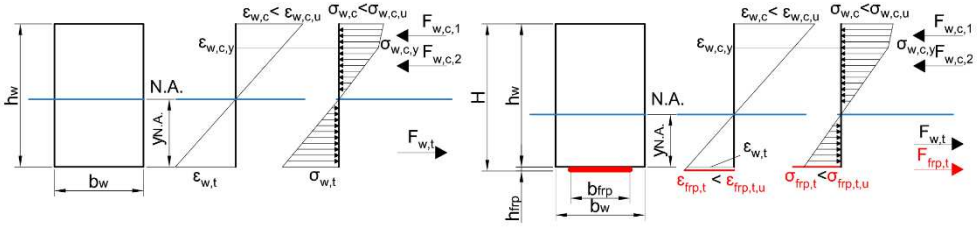


Figura 2.9. Nomenclatura y diagramas de la relación entre la tensión y la deformación para el modelo en rango elástico de Bazan-Buchanan [9,10]. Izquierda: Sección de una viga no reforzada. Derecha: Sección de una viga reforzada con refuerzo longitudinal.

Color rojo: Refuerzo de FRP.

Las ecuaciones que se muestran a continuación (Ecs. 1-4) representan el momento último teórico a flexión (M_u) que puede soportar un elemento, según si se trata de una viga sin refuerzo en rango elástico (Ec. 1) o plástico (Ec. 2), o de una viga con refuerzo longitudinal en rango elástico (Ec. 3) o plástico (Ec. 4).

$$M_u = F_{w,c} \cdot \frac{2}{3} (h_w - y_{N,A}) + F_{w,t} \cdot \frac{2}{3} (y_{N,A}) \quad \text{Ec. 1}$$

$$M_u = F_{w,c1} \cdot \left\{ Y + \left[\frac{((h_w - y_{N,A}) - Y) \cdot (2 \cdot \sigma_{w,c,y} + \sigma_{w,c,u})}{3 \cdot (\sigma_{w,c,y} + \sigma_{w,c,u})} \right] \right\} + \quad \text{Ec. 2}$$

$$+ F_{w,c2} \cdot \frac{2}{3} \left[\frac{(h_w - y_{N,A}) \cdot \epsilon_{w,c,y}}{\epsilon_{w,c,u}} \right] + F_{w,t} \cdot \frac{2}{3} (y_{N,A})$$

donde $Y = \frac{\epsilon_{w,c,y} \cdot y_{N,A}}{\epsilon_{w,t}}$.

$$M_u = F_{w,c} \cdot \frac{2}{3} (h_w - y_{N,A}) + F_{w,t} \cdot \frac{2}{3} (y_{N,A} - h_{frp}) + F_{frp,t} \cdot y_{N,A} \quad \text{Ec. 3}$$

$$M_u = F_{w,c1} \cdot \left\{ Z + \left[\frac{((h_w - y_{N,A}) - Z) \cdot (2 \cdot \sigma_{w,c,y} + \sigma_{w,c,u})}{3 \cdot (\sigma_{w,c,y} + \sigma_{w,c,u})} \right] \right\} + \quad \text{Ec. 4}$$

$$+ F_{w,c2} \cdot \frac{2}{3} \left[\frac{(h_w - y_{N,A}) \cdot \epsilon_{w,c,y}}{\epsilon_{w,c,u}} \right] + F_{w,t} \cdot \frac{2}{3} (y_{N,A})$$

donde $Z = \frac{\epsilon_{w,c,y} \cdot y_{N,A}}{\epsilon_{frp,t}}$.

2.4.2. Modelo de Argüelles (modelo alternativo)

La principal diferencia de este modelo [70] con respecto del modelo anterior es que la fibra neutra no se encuentra en el centro de la sección de forma predefinida, pudiendo variar según las relaciones entre los módulos elásticos de tracción y compresión (Figura 2.10). Además, al añadir el refuerzo de FRP en el modelo, la fibra neutra desciende en el rango elástico con respecto de una viga sin refuerzo, lo cual se corresponde con el comportamiento mecánico de un elemento reforzado.

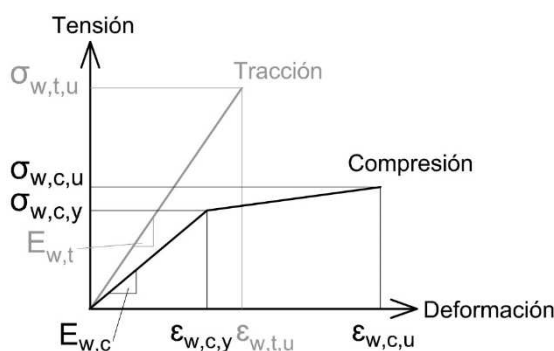


Figura 2.10. Comportamiento de tensión-deformación de la madera para el modelo de Argüelles [70].

En este caso, además de tener en cuenta la deformación máxima en la parte inferior de la viga ($\epsilon_{w,t,i}$ para una viga sin refuerzo y $\epsilon_{frp,t,i}$ para una reforzada), se considera la deformación $\epsilon_{w,t,l}$, a una distancia $h_{w,l}$ desde el borde inferior del canto de la viga h_w .

Del mismo modo, la Figura 2.11 muestra la distribución de tensiones para el rango elástico lineal, para una sección sin y con refuerzo de FRP, obtenida mediante el principio de compatibilidad de deformaciones y de la sección equivalente. En la Figura 2.12 se representa el modelo cuando el elemento se encuentra en rango plástico.

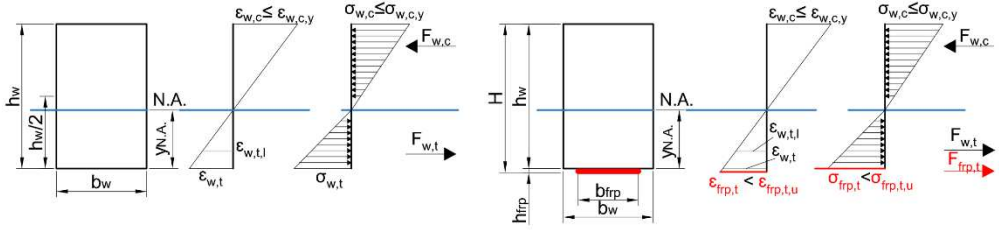


Figura 2.11. Nomenclatura y diagramas de la relación entre la tensión y la deformación para el modelo en rango elástico de Argüelles [70]. Izq.: Sección de una viga no reforzada. Der.: Sección de una viga reforzada con refuerzo longitudinal. Color rojo: Refuerzo de FRP.

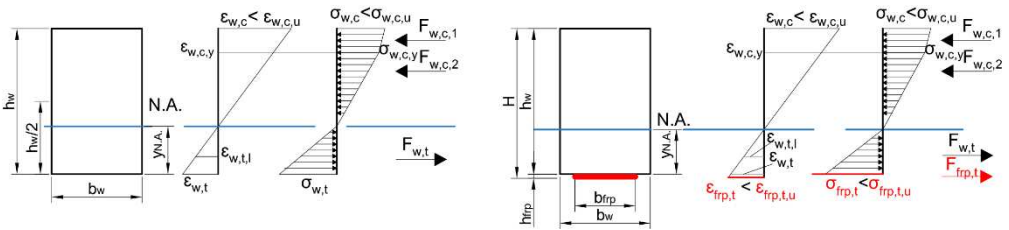


Figura 2.12. Nomenclatura y diagramas de la relación entre la tensión y la deformación para el modelo en rango elástico de Argüelles [70]. Izq.: Sección de una viga no reforzada. Der.: Sección de una viga reforzada con refuerzo longitudinal. Color rojo: Refuerzo de FRP.

En este caso, se emplean las mismas ecuaciones anteriormente descritas (Ecs. 1-4) para calcular el momento último teórico a flexión para una sección sin o con refuerzo, en el rango elástico y plástico. Sin embargo, como se ha mencionado, este modelo no solo utiliza la deformación en la cara inferior de la viga ($\epsilon_{w,t,b,u,i}$ o $\epsilon_{frp,t,b,u,i}$), sino también la deformación a tracción a una distancia $h_{w,l}$. Esto permite, empleando las relaciones de compatibilidad de deformaciones, calcular la posición de la fibra neutra ($y_{N,A}$). Una vez hallada dicha posición, se lleva a cabo una optimización de la relación E_t/E_c para que satisfaga el equilibrio en las Ecs. 1-4 (dependiendo del caso de cálculo).

3. Materiales y métodos

3.1. Madera

Hombre y tecnología han evolucionado a lo largo de su existencia de forma paralela, con la necesidad de dominar y hacer uso de los materiales que la naturaleza les ofrece. La madera ha sido un material empleado incluso anterior a la Edad de Piedra, facilitando la elaboración de armas así como la construcción de las primeras cabañas (primeros usos constructivos). El tratado más antiguo sobre construcción en madera data del siglo I a.C. de Marco Vitruvio.

La madera es un tejido exclusivo de los vegetales leñosos con tejidos diferenciados y especializados de carácter ortótropo, encontrado principalmente en el tronco del árbol. Básicamente, la madera está compuesta por fibras de celulosa unidas con lignina.

La clasificación de maderas se puede realizar según distintos criterios, aunque de forma genérica se suelen dividir entre coníferas (gimnospermas) y frondosas (angiospermas). Otra división común suele ser entre maderas blandas (*softwoods*) o duras (*hardwoods*), siendo incompleta, ya que existen coníferas mucho más duras que algunas frondosas y viceversa.

Una de las principales diferencias entre coníferas y frondosas es su composición a nivel microscópico. Las primeras contienen dos tipos de células, los rayos transversales y las fibras longitudinales o traqueidas. Las frondosas, por otro lado, contienen vasos para el transporte del agua, carentes en las coníferas, desarrollando esta función las traqueidas.

En el mundo existen alrededor de 16000 especies de madera, de las cuales 2000 son de carácter comercial. En España se comercializan unas 150 especies de madera, de las cuales 50 son coníferas y 100 son frondosas.

3.1.1. Descripción general

Para poder realizar un análisis físico-mecánico en profundidad de la estructura de la madera es necesario distinguir tres niveles: estructura de la pared celular (estructura submicroscópica); la agregación de células para formar madera limpia (estructura microscópica) y la consideración de la madera comercial con defectos (estructura macroscópica) [70].

Estudiar la composición de la estructura de la pared celular, así como su comportamiento, explica la variación por humedad existente entre la dirección transversal y la longitudinal. Por otro lado, entender cómo se forma la madera limpia explica por qué la madera es más rígida en la dirección longitudinal que en la transversal (20 a 40 veces mayor). A nivel macroscópico se distinguen los nudos, desviación de fibra, etc., calificados como defectos que influyen directamente en la resistencia mecánica de la madera. Un ejemplo claro es que la resistencia a tracción en dirección paralela a la fibra pueda alcanzar valores de 100 MPa en una madera libre de defectos, mientras que este valor desciende hasta los 10-20 MPa en maderas de baja calidad comercial (con alto contenido de defectos).

Estructura submicroscópica

La base de la estructura de la pared celular es la celulosa, formando cadenas de 1 a 5 μm . La unión de las cadenas de celulosa da lugar a la fibrilla elemental (formada por 40-100 cadenas de celulosa), que a su vez se agrupan para formar las microfibrillas (20 fibrillas elementales). Los espacios entre

fibrillas elementales permiten el paso de moléculas de agua. Tanto la unión de cadenas de celulosa como la de fibrillas elementales, son secundarias, es decir, fuerzas de Van der Waals. Por último, la fibra leñosa está compuesta por 250 microfibrillas.

Una vez formada la pared celular, se distinguen diferentes capas (Figura 3.1). La pared intercelular (PI) o laminilla media es una capa entre las células muy fina e isótropa que contiene lignina, hemicelulosa y sustancias pépticas. Posteriormente se encuentra la pared primaria (P), la cual contiene microfibrillas. Esta pared es bastante delgada, con más hemicelulosa pero menos lignina y sustancias pépticas que la pared intercelular. Una vez aparece la celulosa, la pared primaria se convierte en una capa anisótropa y no uniforme en su grosor. Seguidamente se encuentra la pared secundaria (S), en la cual se encuentran las fibras leñosas anteriormente descritas, colocadas de manera orientada. La hemicelulosa y celulosa aumentan en proporción con respecto a la pared primaria, disminuyendo la lignina y desapareciendo las sustancias pépticas. En esta pared se suelen distinguir 3 capas, las cuales tienen su propia organización en cuanto a la composición química, al espesor y al ángulo de las fibrillas:

- S1 es la capa más externa, con un espesor pequeño y con un ángulo entre las cadenas de celulosa y el eje de la célula en torno a 70° (pudiendo tener grandes variaciones);
- S2 es la capa de mayor grosor con las cadenas de celulosa orientadas con una menor desviación con respecto al eje de la célula ($<30^\circ$);
- S3 es la capa interna de la pared secundaria, en la que las cadenas de celulosa se disponen con una ligera pendiente pero sin orden estricto. Esta pared puede denominarse también como pared terciaria (T), ya que en ocasiones adquiere un engrosamiento mayor según la especie.

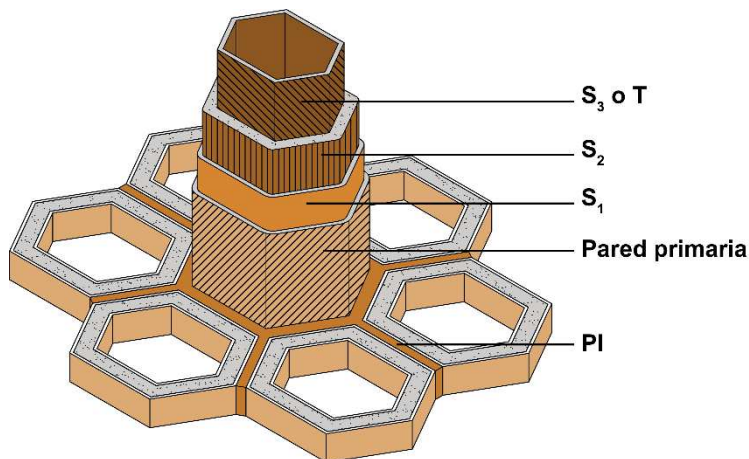


Figura 3.1. Capas que forman la pared celular. Estructura submicroscópica.

Como se observa en la Figura 3.1, la concepción de la constitución de las fibras de la madera resulta muy eficaz. La sección central hueca (lumen) de dichas fibras no solo permite la conducción de sustancias, sino además, una disminución en el peso del elemento global. La capa S₂ es la encargada de soportar las fuerzas a tracción, siendo ayudada por las capas S₁ y S₃ cuando se trata de fuerzas a compresión, actuando como zunchos de la capa S₂.

Estructura microscópica

El tejido leñoso está constituido principalmente por un tipo de células que cumple la función de soporte y conducción: las traqueidas. Se pueden encontrar traqueidas en sentidos longitudinal y transversal (Figura 3.2), ocupando las primeras entre el 90% y 95% del volumen leñoso. La traqueida es un tejido fibroso lignificado por donde circula la savia bruta, unicelular, muy alargada, con los extremos cerrados y con numerosas punteaduras areoladas y simples, por medio de las cuales se intercomunican. La longitud de estas células puede oscilar de 2 a 7 mm, variando según si se encuentran en sentido longitudinal o transversal. La longitud de las traqueidas define el uso de las especies para pulpa y papel. El diámetro radial puede presentar variaciones a lo largo de la longitud de la misma, siendo de entre 10 y 50 μm . Durante el proceso de duraminización, pueden aparecer traqueidas resinosas, es decir, traqueidas normales con inclusiones de resina (Figura 3.3).

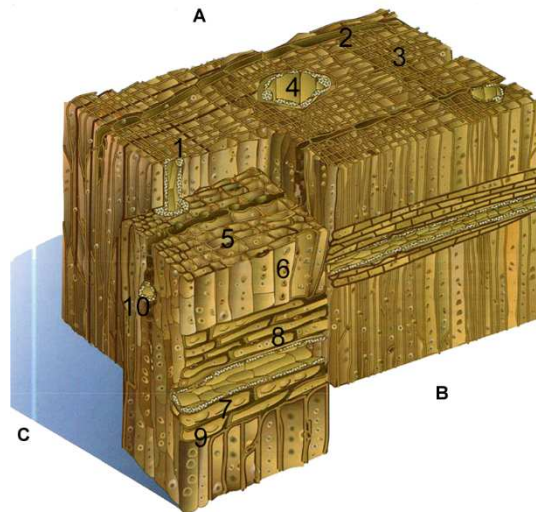


Figura 3.2. Estructura microscópica de la madera. A: Sección transversal. B: Sección radial. C: Sección tangencial. 1: Canal resinífero longitudinal. 2: Radio leñoso. 3: Traqueidas longitudinales. 4: Células epiteliales resinógenas. 5: Sección de punteadura areolada. 6: Punteaduras aeroladas en traqueidas longitudinales. 7: Punteadura en los campos de cruce. 8: Traqueidas radiales. 9: Células de parénquima radial. 10: Canal resinífero transversal. Fuente: Estructura microscópica de maderas coníferas – Julio O. Vargas.

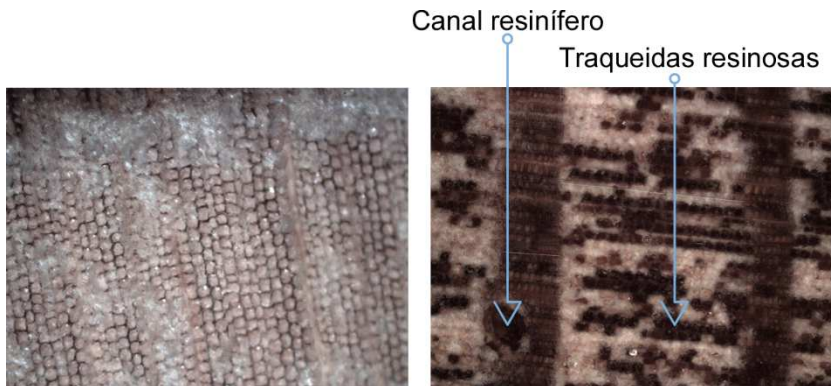


Figura 3.3. Imagen al microscopio (10x) extraída de dos vigas empleadas en esta Tesis Doctoral. Izquierda: Viga sin presencia de traqueidas resinosas. Derecha: Viga con presencia de traqueidas resinosas y canales resiníferos.

Por otro lado, como se observa en la Figura 3.2, se encuentran las células parenquimáticas, las cuales se encargan de la función de almacenamiento de sustancias vitales. Estas células presentan paredes más delgadas que las de las traqueidas circundantes, también dispuestas en sentido longitudinal o transversal. Los canales resiníferos (Figura 1.3) son estructuras tubulares

típicas, aunque no exclusivas de las coníferas. Este elemento anatómico está constituido por un espacio hueco en el que se vierte la resina segregada por las células glandulares o células resiníferas. Los canales resiníferos son esquizógenos, es decir, la cavidad, se forma debido a que un grupo de células pierde la laminilla intermedia por disolución, aumentando el área ocupada por los espacios intercelulares. Estos canales o conductos pueden ser naturales o traumáticos, pudiéndose presentar además en sentido vertical u horizontal con respecto de la dirección principal de la fibra. Su secreción se denomina “miera”, de cuya destilación se obtiene el aguarrás o esencia de trementina.

Además, a este nivel se pueden distinguir los ciclos anuales de crecimiento de la madera. La madera de verano o madera tardía es más densa que la madera formada al principio de la estación (madera de primer crecimiento o madera de primavera). De ahí que cuanto mayor es la proporción de madera tardía, mayor serán su dureza y densidad. Esta estructura, también conocida como anillos, es el resultado de la división celular que tiene lugar en el cambium. Durante el inicio del periodo de crecimiento, con una adecuada disponibilidad hídrica, la tasa de división celular es relativamente rápida, provocando que las células dispongan de menos tiempo para la formación de la pared celular. Conforme dicha disponibilidad hídrica disminuye, la tasa de reproducción celular decrece, permitiendo que las células dispongan de mayor tiempo para engrosar las paredes, dando lugar a una transición gradual de madera de primavera a madera de verano.

Estructura macroscópica

La estructura macroscópica se puede estudiar a simple vista o con un aumento de 10x como máximo. Debido a la heterogeneidad intrínseca de la madera, para analizarla a este nivel es necesario establecer tres planos o secciones, definidos en la Figura 3.4.

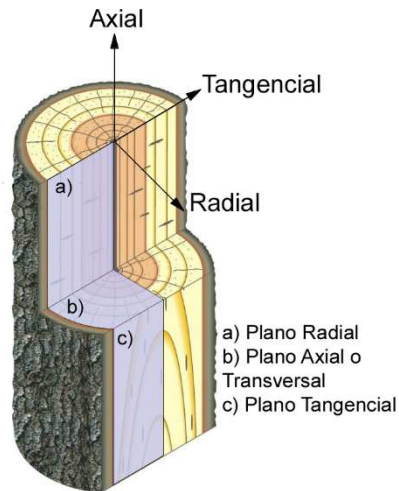


Figura 3.4. Secciones o planos principales de la madera a nivel macroscópico. Fuente: <http://docplayer.org/58524456-Tk2-biegebemessung-prof-dr-ing-michael-maas-rechteck-h-b-2-cm-3-2.html>

El plano radial pasa por un radio y el eje del tronco o rama, perpendicular a los anillos de crecimiento. En este plano se observa el tamaño de los radios, tipo de grano y el lustre o brillo de la madera. El plano o sección tangencial es un corte paralelo al eje del tronco y tangente a los anillos de crecimiento. Esta sección permite observar la presencia y magnitud de las líneas vasculares, así como los radios leñosos (si son de tamaño mediano a grande). Por último, el plano transversal es perpendicular al eje del tronco. Examinar un tronco de madera en esta última sección permite distinguir diferentes estructuras generales (Figura 3.5):

- **Corteza externa o súber**, la cual es un tejido floemático muerto cuya función es la de protección contra agentes atmosféricos;
- **Corteza interna o líber**, la cual es un tejido floemático vivo a través del cual se transporta la savia elaborada que se ha formado en la copa producto de la fotosíntesis a las distintas partes del árbol;
- **Cambium**, siendo la zona de formación y multiplicación celular del leño, lo cual se traduce en el crecimiento del diámetro del tronco al formar las distintas capas concéntricas o xilema hacia el interior, y células de floema o corteza hacia el exterior;

- **Xilema o tejido leñoso**, el cual es el tejido principal de sostén y conducción de agua de los tallos y raíces. Se puede encontrar en la literatura al xilema como sinónimo de madera.

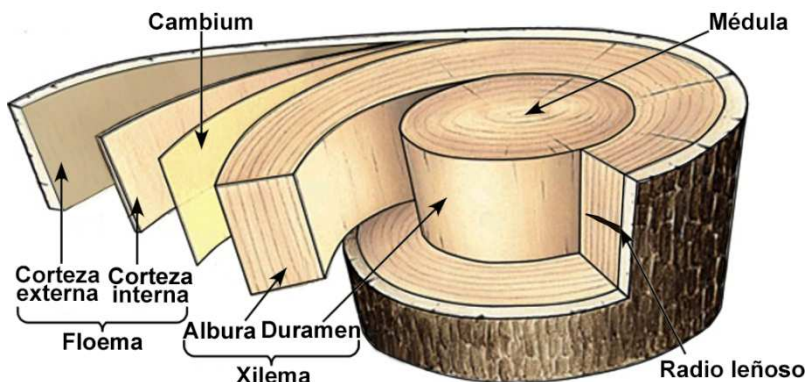


Figura 3.5. Partes de la sección transversal de un tronco de madera. Fuente: <http://mundobiologico-geral.blogspot.com/p/morfologia-vegetal.html>.

Como se observa en la Figura 3.5, dentro del xilema o leño se distinguen diferentes partes:

- **Anillos de crecimiento:** ya descritos anteriormente, se originan debido a la formación de nuevas células en el cambium cuando se presentan condiciones favorables para el crecimiento. Además, se puede distinguir entre madera de primavera o de verano cuya diferencia está marcada por el color y cuya anchura es inversamente proporcional a la densidad del anillo.
- **Albura:** se encuentra en la parte externa del tejido leñoso y contiene células vivas que almacenan sustancias de reserva. Suele tener un color más claro que el duramen y es más susceptible de ser atacada por organismos biológicos.
- **Duramen:** rodea a la médula, encontrándose en la parte interna del leño. Esta parte ya no contiene células vivas en el árbol en crecimiento y las reservas que existían se han convertido en compuestos fenólicos propios del duramen. El cambio de albura a duramen supone generalmente un oscurecimiento de la madera mediante la deposición de varias clases de productos de infiltración, tales como aceites, gomas, resinas, taninos, etc., que aparecen impregnando la pared de las células, así como dentro del lumen.

- **Médula:** Se encuentra en la parte más interna del tronco (no teniendo que estar situada en el centro del mismo). Está formada principalmente por tejidos o células parenquimatosas blandas, susceptible al ataque de organismos biológicos. De ella parten los radios leñosos o medulares hacia la corteza.
- **Radios leñosos:** Atraviesan los anillos de crecimiento, sirviendo de trabazón a las fibras longitudinales.

3.1.2. Clasificación visual

La clasificación de la madera mediante inspección visual es un método que influye directamente en su valor de mercado. Así mismo, la calidad está intrínsecamente ligada a la resistencia mecánica, suponiendo que cuanto mayor calidad tenga una madera, mayor será su resistencia. Las vigas empleadas en esta Tesis fueron extraídas de la Facultad de Derecho de la Universidad de Granada, con una antigüedad de 200 años. La madera fue clasificada como *Pinus sylvestris* procedente del sur de España. Las vigas de madera antigua presentan una elevada heterogeneidad, unida a la variación de sus propiedades físico-mecánicas debido el paso del tiempo (tanto positiva como negativamente).

De forma general, cada país tiene su propia normativa de clasificación. En España hay dos normativas de clasificación para la madera aserrada (madera de coníferas y de frondosas). La norma UNE 56544:2011, empleada en esta Tesis, establece que para anchos mayores de 70 mm, el elemento solamente se puede clasificar en dos calidades: MEG (Madera Estructural de Gran escuadría) o Rechazo. Una vez clasificada la madera, las normas UNE 338:2016 y UNE 1912:2012 establecen que una madera clasificada como MEG se corresponde con una clase resistente C18. En esta Tesis se ha comprobado que, aunque una viga sea clasificada como MEG, no siempre implica una mayor resistencia que una Rechazada, ya que las normas no tienen en cuenta factores como la posición de los nudos, cruciales según el tipo de esfuerzo que vaya a soportar el elemento de madera. Este hecho se puede observar en capítulos posteriores. La clasificación visual tiene en cuenta los siguientes defectos de la madera (Figura 3.6):

- **Nudos:** Originados por las ramas del árbol, constituyendo el defecto de mayor importancia. La existencia de nudos es mucho más crítica en zonas sometidas a esfuerzos de tracción que a compresión. Se tiene en cuenta su dimensión pero no su posición relativa en el elemento de madera.
- **Fendas:** Son fisuras o agrietamientos en dirección radial y axial, producidas principalmente por el secado de la madera. En menor medida pueden generarse debido a diferentes tensiones de crecimiento durante el desarrollo del árbol. Las fendas de secado son las únicas aceptadas por la normativa española, con restricciones dimensionales.
- **Acebolladuras:** Se producen debido a la falta de adherencia entre las capas de madera y a un crecimiento a distintas velocidades entre anillos vecinos. La normativa no acepta este defecto.
- **Desviación de la fibra:** Es la variación de la dirección de la fibra con respecto al eje de la pieza. Se acentúa ante la presencia de nudos, pudiendo afectar tanto a piezas sometidas a flexión como a tracción. La normativa española acepta la desviación, hasta un valor del 16,7%.
- **Gemas:** Este defecto surge durante el aserrado, presentándose como una falta de madera en las aristas de la pieza. La normativa acepta gemas de hasta 430 mm.

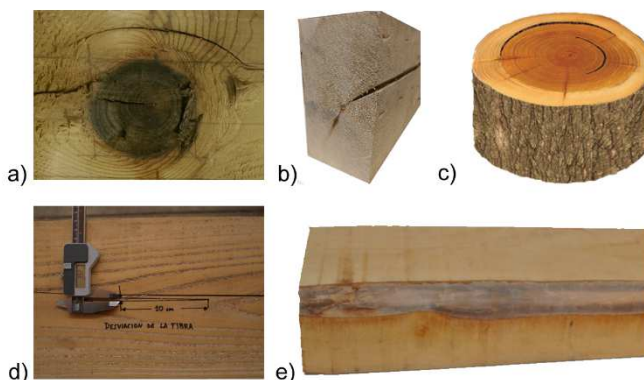


Figura 3.6. Principales defectos que se analizan para clasificar un elemento de madera.

a: Nudo. b: Fenda. c: Acebolladura. d: Desviación de la fibra. e: Gema. Fuentes (c,d,e): <https://sites.google.com/site/tecnologiadelamadera/enfermedades-y-defectos/defectos>. <http://normamadera.tknika.net/es/content/desviaci%C3%B3n-de-la-fibra>. <http://tallerdetallaenmadera.blogspot.com/2012/01/maderas.html>

Esta clasificación se llevó a cabo en los dos tamaños de vigas empleados en esta Tesis, denominados como vigas de pequeña y gran escuadría, respectivamente. Las vigas de pequeña escuadría tienen una sección de $(75 \pm 1,5) \times (145 \pm 1) \text{ mm}^2$, con una longitud de $1288 \pm 2 \text{ mm}$. Las vigas de gran escuadría se mecanizaron con una sección de $(147 \pm 11) \times (222 \pm 6) \text{ mm}^2$ y con una longitud de $4500 \pm 2 \text{ mm}$.

En primer lugar se clasificaron 51 vigas de pequeña escuadría, de las cuales 17 fueron clasificadas como MEG, siendo las fendas (13 vigas), los nudos (12 vigas) y la presencia de carcoma (9 vigas) los motivos de la clasificación como Rechazo. Así mismo, se obtuvo la densidad de todas las vigas. Con el fin de realizar un análisis riguroso posterior al refuerzo y rotura de las vigas, se elaboró una ficha técnica individual [71], en la que se recogieron los resultados de la clasificación visual, cálculo de densidades e imágenes con la posición detallada de los nudos. Los resultados de la clasificación y la densidad de cada viga se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Resultado de la clasificación visual de las 51 vigas de pequeña escuadría según la norma UNE 56544:2011. R: Rechazo.

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

Posteriormente, se llevó a cabo el mismo procedimiento para 10 vigas de gran escuadría, clasificándose todas como Rechazo (presencia de nudos, fundamentalmente). De igual modo se realizaron fichas técnicas individualizadas [72]. La Tabla 3.2 recoge los motivos de rechazo de la clasificación visual y la densidad de cada viga.

Tabla 3.2. Resultado de la clasificación visual de las 10 vigas de gran escuadría según la norma UNE 56544:2011.

Viga	Motivo	Densidad (kg/m ³)	Viga	Motivo	Densidad (kg/m ³)
P28	Nudo	560,46	SN6	Nudo	571,12
P10w	Nudo	468,72	P28w	Nudo	522,52
P7	Nudo	578,83	P48e	Nudo	658,11
P17n	Nudo	520,86	SN8	Nudo	561,53
P31w	Fenda	563,10	P14e	Carcoma	571,89

Como se observa en la Tabla 3.2, estas vigas estaban identificadas con una nomenclatura que especifica su situación original en la estructura de la cubierta. La letra P identifica la viga como un par de cubierta. El número indica la posición de dicho par dentro de la misma y las letras w/e/n su orientación (*West*, *East* o *North*). La nomenclatura SN quiere decir sin nombre, debido a que hubo elementos que no se identificaron durante la rehabilitación.

Como es sabido, la madera es un material higroscópico, tendiendo a absorber o perder agua según las condiciones del ambiente. La variación del contenido de humedad en la madera produce una variación en sus dimensiones, conocido como hinchazón y merma. Estos movimientos se dan únicamente cuando su contenido de humedad se encuentra por debajo del punto de saturación de las fibras (en torno al 30%). Por encima de este valor se produce un aumento de peso, con un volumen prácticamente constante. Es de especial importancia tener en cuenta que las variaciones dimensionales dependen de la dirección (axial, radial o tangencial) debido a la anisotropía de la madera. Debido a esto, es de gran importancia conocer y controlar la humedad de los elementos de estudio. Para ello, se determinó el contenido de humedad por desecación en estufa (Figura 3.7) a temperatura 103 ± 2 °C siguiendo las indicaciones de la norma UNE 13183-1:2002, sobre 13 piezas prismáticas de 100 x 100 x 100 mm³.



Figura 3.7. Probeta de madera colocada en la estufa antes del proceso de secado.

El cálculo de la humedad expresada en porcentaje de su peso anhidro (H) se realizó según la Ec. 5,

$$H = \frac{(M_h - M_s)}{M_s} \cdot 100 \quad \text{Ec. 5}$$

siendo M_h la masa de la madera en estado húmedo o inicial y M_s la masa en estado anhidro. Las probetas se pesaron en intervalos de dos horas, hasta conseguir que la variación entre pesadas no fuera superior al 0,1%. La humedad media obtenida fue de $7,3 \pm 1,6\%$, pudiéndose comprobar una relación entre el contenido de resina de la probeta y la humedad relativa. Las probetas con menor contenido de resina presentaron un mayor contenido en humedad, como es lógico, debido al carácter saturador que tiene la resina en la madera.

Con el fin de evitar que la humedad fuese un factor que afectase a la aplicación del refuerzo y a la resistencia de las vigas, éstas se acondicionaron en una cámara a 20 ± 1 °C y con una humedad relativa de $65 \pm 5\%$ antes de proceder a su ensayo. Así mismo durante el proceso de refuerzo, se controló la humedad de todas las vigas, teniendo un contenido de humedad medio de 8,5%.

3.1.3. Resistencias a compresión y flexión

La madera, en comparación con otros materiales como el hormigón o el acero [70], presenta las siguientes características mecánicas:

- Elevada resistencia a flexión en comparación a su peso;
- Buena capacidad de resistencia a la tracción (libre de defectos) y a la compresión paralelas a la fibra;
- Escasa resistencia a cortante, aunque en general es suficiente para las exigencias estructurales;
- Bajas resistencias cuando el esfuerzo es perpendicular a la dirección de la fibra;
- Bajo módulo elástico.

Teniendo en cuenta que la madera es un material anisótropo, es lógico que sus propiedades mecánicas varíen según la dirección de aplicación del esfuerzo. Como ya se comentó en el Capítulo 2.3 y ha quedado detallado anteriormente en este Capítulo, la madera está compuesta principalmente por fibras dispuestas en una dirección. Tanto la resistencia a tracción como la de compresión se ven altamente afectadas por esta direccionalidad. Sin embargo, esto beneficia a la resistencia a flexión.

Respecto de la resistencia a compresión paralela a la fibra, según los valores característicos de madera estructural clasificada, se pueden alcanzar valores entre 16 y 29 N/mm² (clases resistentes C14 y C50, respectivamente). En madera antigua estos valores difieren enormemente, ya que la heterogeneidad de la madera aumenta con la edad. Esto hace que se puedan obtener resistencias a compresión de hasta 60-70 N/mm² para determinadas muestras de vigas con elevada densidad. A estas resistencias elevadas, en muchos casos, la capacidad está limitada por el pandeo de las fibras más que por su propia resistencia al aplastamiento.

Se realizaron ensayos a compresión en dirección de la fibra con el fin de caracterizar la madera y conocer sus propiedades, tanto para la comparación con elementos reforzados como para el cálculo de elementos a flexión empleando modelos analíticos.

Como ocurre con las propiedades transversales, la resistencia a compresión perpendicular a la fibra es muy inferior, con valores entre 2,0 y 3,2 N/mm² (C14 y C50, respectivamente). En la Figura 3.8 se observa un comportamiento típico ante este tipo de esfuerzos, los cuales tienden a comprimir las pequeñas cavidades existentes en las fibras, lo que conlleva a que el fallo por aplastamiento no produzca una rotura clara.

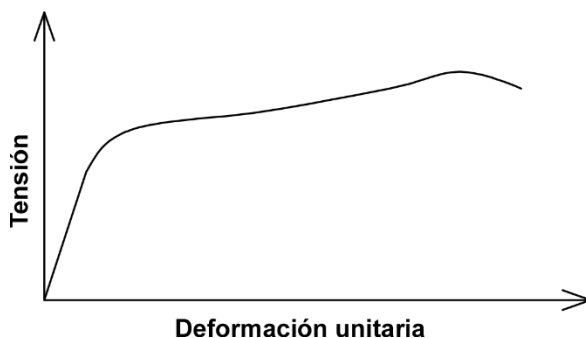


Figura 3.8. Relación entre tensión y deformación de un elemento sometido a compresión en dirección perpendicular a la fibra [70].

Es importante tener en cuenta este esfuerzo en las zonas de apoyo de vigas, así como en zonas donde se concentre toda la carga en pequeñas superficies.

Por otro lado, el valor característico de la resistencia a flexión es el que da nombre a cada clase resistente, teniendo una variación entre 14 y 50 N/mm² (C14 y C50, respectivamente). Este esfuerzo es originado por un momento flector, el cual produce en la sección de la pieza tensiones de compresión y tracción paralelas a la fibra. La Figura 3.9 muestra un esquema de la distribución de tensiones a lo largo de una sección sometida a flexión, en la que la tensión máxima a compresión σ_c se encuentra en la parte superior y la tensión máxima a tracción σ_t en la parte inferior.

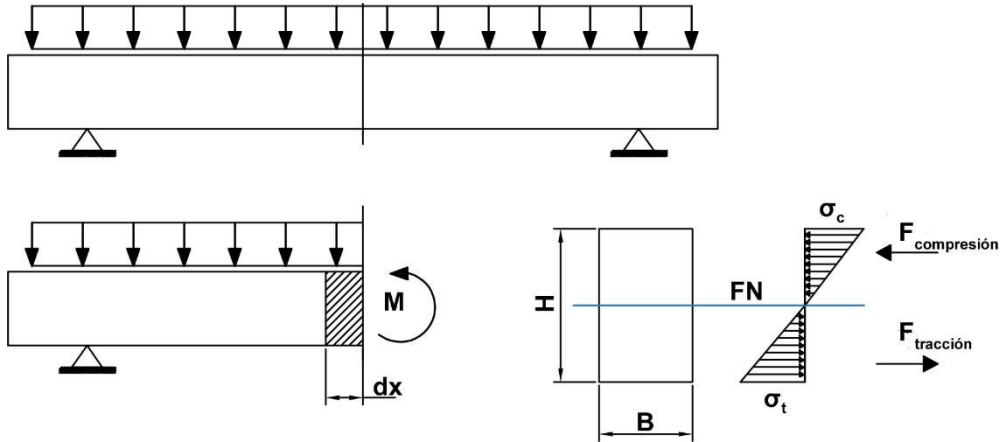


Figura 3.9. Elemento de madera sometido a un esfuerzo de flexión. Distribución de tensiones a lo largo de la sección del elemento [70].

En el caso de la madera, y en especial madera antigua, el modelo simplificado de distribución de tensiones representado en la Figura 3.9 puede diferir en gran medida de la realidad. Un aspecto importante es la existencia de nudos que afectan, según su posición, a la resistencia, siendo críticos cuando se encuentran en zona de tracciones y menos relevantes cuando se encuentran en zona sometida a compresión. Como se indicó en el Capítulo 2.4, es necesario tener en cuenta la alta sensibilidad de la resistencia a tracción a los defectos. Este hecho se traduce en que el valor de tensión máxima de las fibras traccionadas será mayor en elementos sometidos a flexión que en elementos sometidos a tracción axial. La resistencia a flexión es de vital importancia en piezas como vigas, viguetas de forjado, pares de cubierta, etc.

3.2. CFRP

En el Centro Técnico de la Unión Carbide Parma, ahora *GrafTech International Holding, Inc.*, Roger Bacon creó fibras de alto rendimiento de carbono en 1958. El proceso de fabricación, el cual resultó ser ineficiente, consistía en el calentamiento de filamentos de rayón proveniente de la celulosa hasta carbonizarlos. Las fibras resultantes tenían malas propiedades mecánicas, conteniendo solo un 20% de carbono.

En 1960, Akio Shindo de la Agencia de Ciencia Industrial Avanzada y Tecnología de Japón desarrolló un proceso empleando como materia prima el poliacrilonitrilo (PAN), con un contenido del 55% de fibra de carbono. Reino Unido en 1963 aprovechó el alto potencial de este material y empresas como Rolls-Royce entraron al mercado americano con motores para aviones. Los resultados fueron desastrosos ya que se empujó la técnica demasiado lejos y demasiado rápido, vendiendo la planta de producción de fibra de carbono a *Bristol Composites*.

Durante la década de 1970 la técnica de producción fue mejorando, teniendo su mayor impulso con la introducción de fibras de carbono a partir de brea de petróleo. Estas fibras contenían en torno al 85% de fibras de carbono, con una excelente resistencia a flexión.

Las mayores demandas en la actualidad provienen de las industrias aeronáutica y aeroespacial, de la industria eólica, así como de la industria automotriz. En 2007, Airbus confirmó que emplearía material compuesto de fibra de carbono en sus A350, mientras que Boeing la emplearía para su modelo 787, cuyo sub-modelo 787-10 tiene la sección central delantera del fuselaje fabricada en una sola pieza de fibra de carbono.

La fibra de carbono es cada vez más demandada en la industria del transporte y del deporte de alta competición (barcos, bicicletas, raquetas de tenis, etc.) debido a sus excelentes propiedades mecánicas y ligereza.

En sectores como la construcción, el empleo de la fibra de carbono continúa en auge, siendo un material que aunque de forma lenta, se ha introducido en el mercado del refuerzo de estructuras (principalmente de hormigón y acero). En el refuerzo de estructuras de madera, la fibra de carbono aún continúa siendo un material novedoso, poco utilizado pero con gran potencial de aplicación.

3.2.1. Descripción general

Un hilo de carbono está compuesto por miles de filamentos de carbono, que son tubos delgados compuestos casi exclusivamente de carbono. La primera

generación de fibras de carbono (T300 y AS4) tenía un diámetro de 7,8 μm , los cuales se han reducido hasta los 5 μm actuales, según el material de fabricación.

Por otro lado, un material compuesto presenta dos elementos principales: el refuerzo y la matriz, cuya combinación origina un material con mejores características resistentes que pueden tener ambos materiales de forma aislada. La fibra de carbono se emplea principalmente para reforzar materiales compuestos, conocidos como plásticos reforzados con fibra de carbono o CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Plastic*). Generalmente, el polímero empleado para su fabricación (matriz) es una resina termoestable tipo epoxi, pudiéndose emplear otros polímeros como poliéster, éster vinílico o nailon.

La fibra de carbono se puede clasificar de diferentes formas, dependiendo de la temperatura de tratamiento térmico final, según su tejido y número de filamentos, según su material precursor o según las propiedades de la fibra:

- Ultra-alto módulo, tipo UHM (módulo > 450 GPa);
- De alto módulo, tipo HM (módulo entre 350-450 GPa);
- De módulo intermedio, tipo IM (módulo entre 200-350 GPa);
- Módulo bajo, también conocida como de alta resistencia a la tracción, tipo HT (módulo < 100 GPa, con una resistencia a la tracción > 3 GPa);
- Super alta resistencia, tipo SHT (resistencia a la tracción $> 4,5$ GPa).

Las técnicas que se emplean para la fabricación de materiales poliméricos son entre otras: moldeo manual (*hand lay up*), esparado (*spray lay up*), pultrusión (de la cual se obtienen los laminados empleados en esta Tesis Doctoral), bobinado de hilo, compresión, BMC (*Bulk Moulding Compound*), SMC (*Sheet Molding Compound*), etc.

3.2.2. Resistencia a tracción

Mecánicamente, la propiedad por excelencia de la fibra de carbono es su elevada resistencia a la tracción en comparación con su baja densidad. El

comportamiento mecánico de cualquier material compuesto sometido a tracción es similar, con una relación tensión-deformación lineal hasta la rotura, de tipo frágil (Figura 3.10-der.) Existen en el mercado diferentes materiales compuestos fabricados con distintas fibras, entre las que pueden distinguirse la fibra de vidrio, aramida, basalto, fibra de carbono, fibra de boro, etc. La Figura 3.10-izq. muestra las diferentes relaciones entre tensión y deformación de los tipos de fibra de mayor uso comercial.

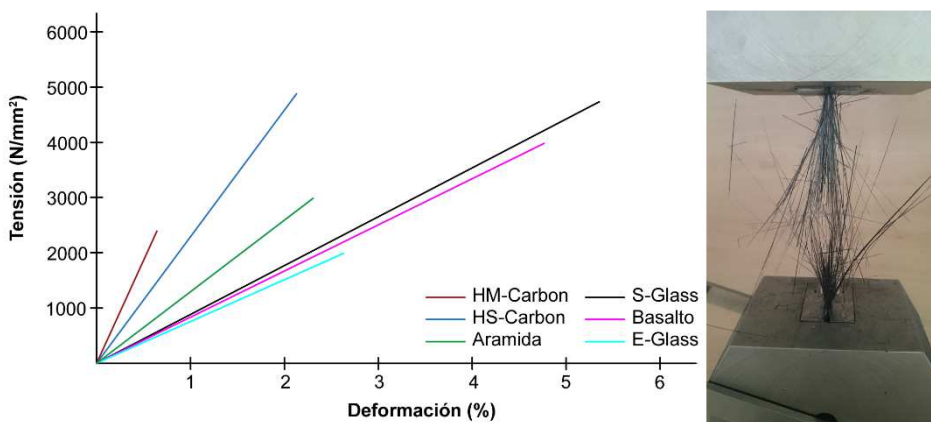


Figura 3.10. Comportamiento a tracción de los FRP. Izq.: Relación tensión-deformación de diferentes tipos de fibras [73]. Der.: Rotura frágil a tracción de un laminado de CFRP empleado en esta Tesis Doctoral de la casa comercial SIKAR®.

Como se observa en la Figura 3.10, los materiales compuestos reforzados con fibra de carbono son los que mayor módulo elástico alcanzan, siendo el tipo HS-Carbon el que mayor tensión a tracción posee. Sin embargo, es importante notar que otros tipos de fibras como el S-Glass y el basalto, aunque distan en valores de módulo elástico con respecto a la fibra de carbono, no lo hacen tanto en términos de tensión máxima a tracción. Las deformaciones y tensiones máximas representadas hay que tomarlas con relatividad, ya que dependen de la deformación máxima que permita el material sobre el que se aplique el refuerzo. Si la deformación máxima es, por ejemplo un 1%, el HS-Carbon alcanzaría unos 2500 MPa, mientras que el S-Glass y el basalto únicamente llegarían a unos 1000 MPa. Este hecho es de vital importancia a la hora de elegir un tipo de material compuesto para reforzar una estructura.

3.2.3. Materiales empleados en esta Tesis Doctoral

En esta Tesis se han usado refuerzos de material compuesto de fibra de carbono (CFRP). Se han elaborado refuerzos con laminado y con tejido, así como varios tipos de resinas. También se ha usado una imprimación para aplicar a la madera antes del refuerzo, con objeto de evaluar su influencia sobre la adherencia CFRP-madera. Los materiales fueron suministrados por las multinacionales SIKA[®] S.A.U. y DRIZORO[®] S.A.U. A continuación se muestran dichos productos y sus características.

Laminados

Se emplearon dos tipos diferentes de laminados, uno para cada casa comercial. Dentro de cada una de éstas se eligieron dos laminados con idénticas propiedades, siendo el ancho de suministro su única variación. Esto permitió adaptar cada ancho de laminado de CFRP a las diferentes configuraciones de refuerzo. Los laminados utilizados por SIKA[®] y DRIZORO[®] (Figura 3.11), son polímeros armados con fibras de carbono pultrusionadas. Sus propiedades se recogen en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Propiedades de los laminados de fibra de carbono de SIKA® y DRIZORO® usados en esta Tesis.

Propiedades	SIKA®			DRIZORO®	
	Sika Carbodur® E-512	Sika Carbodur® E-812	Sika Carbodur® E-1014	DRIZORO® COMPOSITE 1405	DRIZORO® COMPOSITE 1410
Ancho (mm)	50	80	100	50	100
Espesor (mm)	1,2	1,2	1,4	1,4	1,4
Sección (mm ²)	60	96	140	70	140
Módulo de elasticidad (MPa)	170000			165000	
Densidad (g/cm ³)	1,55			-	
Contenido volum. de fibra (%)	≥70			68	
Resistencia última característica a tracción (MPa)	2300			2600	
Elongación de rotura (%)	≥1,35			1,6	



Figura 3.11. Imagen de los laminados empleados en esta Tesis. Izq.: SIKA Carbodur®. Der.: DRIZORO® COMPOSITE.

Tejidos

Se utilizaron tres tipos diferentes de tejido a base de fibra de carbono: un tejido unidireccional de SIKA®, un tejido unidireccional de DRIZORO® y un tejido bidireccional ortogonal de DRIZORO®. En la Tabla 3.4 se recogen las principales propiedades de los tejidos de ambas casas comerciales. En la Figura 3.12 se muestran imágenes de los mismos una vez recepcionados en el laboratorio.

Tabla 3.4. Propiedades de los tejidos de fibra de carbono de SIKA® y DRIZORO® usados en esta Tesis.

Propiedades	SIKA®	DRIZORO®	
	Tejido Unidireccional	Tejido Unidireccional	Tejido Bidireccional
	Sikawrap®-230C	DRIZORO® WRAP 200	DRIZORO® CARBOMESH 210
Orientación	0°	0°	0°/90°
Gramaje (g/m ²)	235 ± 10%	200	210 ± 5%
Espesor de diseño del tejido (mm)	0,129	0,111	0,06
Densidad (g/m ³)	1,82	-	1,8 ± 5%
Módulo de elasticidad de la fibra (MPa)	230000	230000	230000
Resistencia a la tracción de la fibra (MPa)	4000	3400	4900
Elongación de rotura de la fibra (%)	1,7	-	2,1

Unidireccional-Sika

Unidireccional-Drizoro

Bidireccional-Drizoro

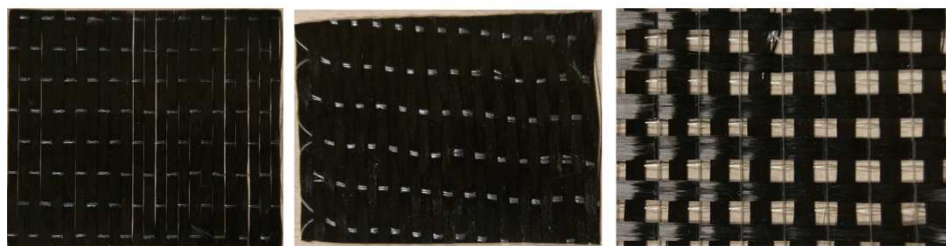


Figura 3.12. Imágenes de los tejidos empleados en esta Tesis. Izq.: Sikawrap®-230C. Centro: DRIZORO® WRAP 200. Der.: DRIZORO® CARBOMESH 210.

Resinas e imprimación

En total se emplearon cuatro tipos de resinas diferentes, todas de tipo epoxídico. De SIKA® se usaron las resinas Sikadur®-30 y Sikadur®-330 (de aquí en adelante, RS30 y RS330). De DRIZORO® se emplearon las resinas MAXEPOX® CARBOFIX y MAXEPOX® -CS (de aquí en adelante, RM-C y RM-CS). Por otro lado, de la empresa DRIZORO® se utilizó la formulación epoxi líquida MAXPRIMER®-CS, una imprimación de

adherencia y consolidación de soportes. SIKA® no tiene un producto similar en su catálogo. La Tabla 3.5 recoge las principales propiedades de cada tipo de resina. En las Figuras 3.13 y 3.14 se muestran imágenes de los diferentes productos una vez recepcionados.

Tabla 3.5. Propiedades de las resinas empleadas en esta Tesis. ¹Datos a 7 días y 20-23 °C.

Propiedades		SIKA®		DRIZORO®		
		Sikadur®-30	Sikadur®-330	MAXEPOX® CARBOFIX	MAXEPOX® -CS	MAXPRIME® -CS
Tipo de CFRP en el que se aplica en hormigón		Laminado	Tejido	Laminado	Tejido	-
Apariencia/ color	Comp. A	Blanco	Blanco	Pasta blanca	Líquido verde	Líquido pálido
	Comp. B	Negro	Gris	Pasta negra	Líquido amarillo	Líquido amarillo
Proporción A:B (peso)		3:1	4:1	2:1	4:1	4:1
Densidad (A+B) (g/cm ³)		1,65	1,30	1,74	-	-
Viscosidad a 23 °C (mPa·s)		-	6000	-	8200	320
Temperatura de aplicación min/max (°C)		8/35	10/35	10/-	15/35	15/35
Tiempo de vida de la mezcla a 20 °C (min.)		90	60	40	130	130
Rendimiento teórico (kg/m ²)		-	0,70-1,50	-	0,60-0,80	0,25
Propiedades mecánicas¹ (MPa)						
Resist. a compresión		80	-	80	-	-
Resist. a tracción		27	30	30	>29	-
Resist. a flexión		-	-	60	>39	-
Módulo elástico a compresión		9600	-	4450	-	-
Módulo elástico a tracción		11200	4500	-	-	-
Módulo elástico a flexión		-	3800	7750	-	-
Adherencia (hormigón)		>4,0	>4,0	>2,0	-	>1,5



Figura 3.13. Imágenes de las resinas suministradas por SIKA® empleadas en esta Tesis. Izq.: RS-30. Der.: RS-330.



Figura 3.14. Imágenes de las resinas e imprimación suministradas por DRIZORO® empleadas en esta Tesis. Izq.: Imprimación. Centro.: RM-CS. Der.: RM-C.

3.3. Elaboración de especímenes, matrices de ensayos e instrumentación

En este Apartado se recoge la elaboración de especímenes para los distintos ensayos realizados, así como las matrices de ensayo y la instrumentación de cada uno. En primer lugar se realizó un estudio de adherencia con el fin de analizar el comportamiento madera-resina-CFRP de los distintos productos, así como de la necesidad o no de aplicar una capa de imprimación previa al refuerzo. Una vez seleccionadas las resinas adecuadas, se realizó la elaboración y ensayo de vigas de 1,3 m con distintas configuraciones de refuerzo. Posteriormente, seleccionando las mejores configuraciones según los resultados obtenidos en vigas de 1,3 m, se llevó a cabo el refuerzo y ensayo de vigas de 4,5 m sin y con daño previo. Finalmente se realizó una actuación in-situ en un edificio histórico de Granada, con una de las configuraciones de refuerzo.

3.3.1. Estudio de adherencia

La adherencia entre dos materiales de diferente naturaleza es siempre uno de los aspectos más importantes a tratar en un refuerzo estructural. El fallo más común en elementos reforzados con fibra de carbono es el fallo por deslaminación. Este fallo es principalmente producido por la diferencia de deformaciones que existe entre la fibra de carbono y el elemento base, en este caso la madera, para un mismo estado tensional. La Figura 3.15 muestra conceptualmente esta divergencia en deformaciones.

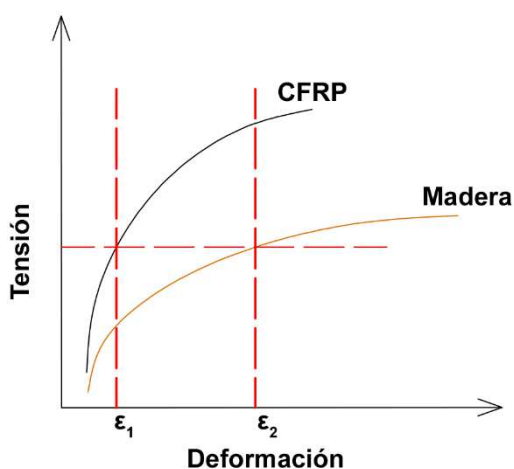


Figura 3.15. Diagrama conceptual de tensión-deformación de la madera y el CFRP.

La consecuencia directa del comportamiento representado en la Figura 3.15 es el fallo por adherencia o deslaminación. Tanto la resina empleada en la unión madera-CFRP como el método de aplicación de la misma, son de vital importancia para mantener a ambos materiales trabajando conjuntamente. Este hecho hace que el estudio de la adherencia entre la madera y el refuerzo de CFRP adquiera gran relevancia.

En este sentido, fue necesario aplicar la resina óptima para cada casa comercial y evaluar la necesidad de aplicar una capa de imprimación entre la madera y resina. Para ello se realizaron dos tipos de ensayos de adherencia: *pull-off* (arrancamiento) y *pull-out* (cortante). Las dimensiones de las probetas de madera de *pull-off* fueron 80 x 80 x 80 mm³, mientras que las de *pull-out* fueron 50 x 50 x 190 mm³ (Figura 3.16). La dimensión de las

piezas de CFRP para las probetas de *pull-off* se estableció en $80 \times 80 \text{ mm}^2$ de base. Para las probetas *pull-out* fue de $50 \times 220 \text{ mm}^2$. El espesor del CFRP depende del tipo y fabricante. La dimensión final de la probeta madera-CFRP se describe en la Figura 3.17.

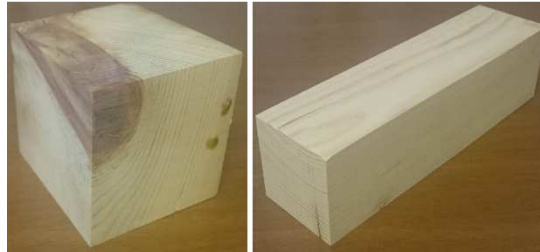


Figura 3.16. Probetas de madera para ensayos de adherencia. Izq.: *Pull-off*. Der.: *Pull-out*.

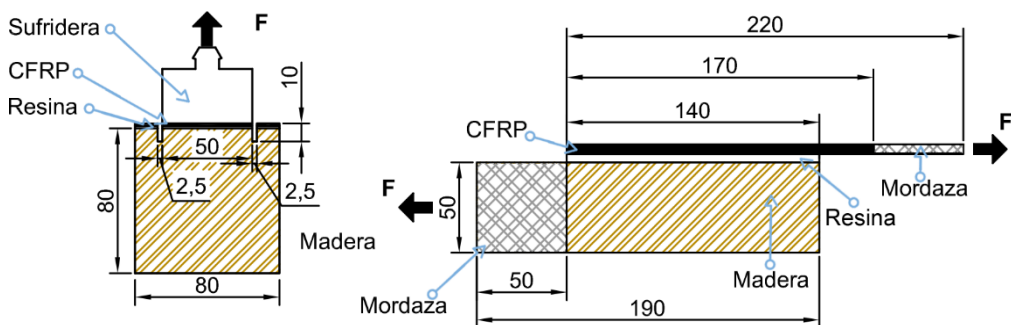


Figura 3.17. Esquema de ensayos del estudio de adherencia. Izq.: Ensayo *pull-off*. Der.: Ensayo *pull-out*. Dimensiones en mm.

Una vez definidas las dimensiones de las distintas probetas se estableció una matriz de ensayos, especificando las diferentes tipologías de CFRP y las resinas empleadas. Para la elaboración de probetas se utilizaron los laminados y los tejidos unidireccionales de CFRP, así como las resinas de ambas casas comerciales descritas anteriormente. Por otro lado, se aplicó la imprimación suministrada por DRIZORO[®], no disponiendo SIKA[®] de un producto similar. El total de ensayos realizados fue de 48 *pull-off* y 48 *pull-out*, cuya matriz de ensayos se recoge en la Tabla 3.7. De cada tipo se realizaron 3 probetas.

Tabla 3.6. Matriz de ensayos de adherencia. Ensayos *pull-off* y *pull-out*.

Ensayo	Nomenclatura	Tipo de refuerzo	Tipo de resina	Imprimación
<i>Pull-off</i>	AR-1a	SIKA® Carbodur – E 512	RS-30	NO
	AR-1ai			SI
	AR-1b		RS-330	NO
	AR-1bi			SI
	AR-1c	DRIZORO® COMPOSITE 1405	RM-C	NO
	AR-1ci			SI
	AR-1d		RM-CS	NO
	AR-1di			SI
	AR-2a	SikaWrap®- 230C	RS-30	NO
	AR-2ai			SI
	AR-2b		RS-330	NO
	AR-2bi			SI
	AR-2c	DRIZORO® WRAP 200	RM-C	NO
	AR-2ci			SI
	AR-2d		RM-CS	NO
	AR-2di			SI
<i>Pull-out</i>	TR-1a	SIKA® Carbodur – E 512	RS-30	NO
	TR-1ai			SI
	TR-1b		RS-330	NO
	TR-1bi			SI
	TR-1c	DRIZORO® COMPOSITE 1405	RM-C	NO
	TR-1ci			SI
	TR-1d		RM-CS	NO
	TR-1di			SI
	TR-2a	SikaWrap®- 230C	RS-30	NO
	TR-2ai			SI
	TR-2b		RS-330	NO
	TR-2bi			SI
	TR-2c	DRIZORO® WRAP 200	RM-C	NO
	TR-2ci			SI
	TR-2d		RM-CS	NO
	TR-2di			SI

Tabla 3.7. Matriz de ensayos de adherencia. Ensayos *pull-off* y *pull-out*.

Como se muestra en la Tabla 3.7, se asignó una nomenclatura a cada combinación de resina-CFRP, cuyo significado se define a continuación:

- **AR/TR:** Tipo de ensayo. AR: Arrancamiento o *pull-off*. TR: Tracción o *pull-out*.
- **1/2:** Tipo de CFRP. 1: laminado; 2: tejido.
- **a-d:** Tipo de resina. a: RS-30; b: RS-330; c: RM-C; d: RM-CS.
- **i:** La probeta lleva una capa de imprimación.

En la elaboración de todas las probetas se siguieron las recomendaciones del fabricante, en cuanto a tiempos de curado y proporciones de los componentes de las resinas se refiere. La Figura 3.18 define de forma esquemática el proceso de elaboración que se llevó a cabo.

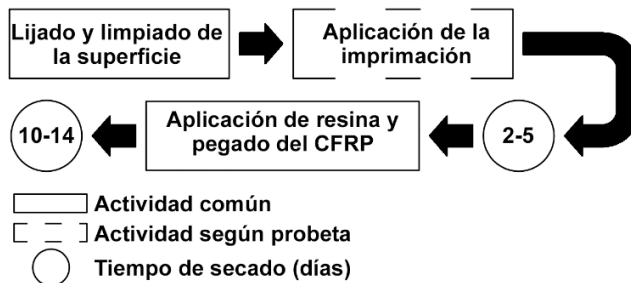


Figura 3.18. Proceso de elaboración de probetas de *pull-off* y *pull-out*.

Equipos e instrumentación – pull-off

Para realizar el ensayo de adherencia *pull-off* se empleó un adherómetro marca Elcometer[®] 506, con una capacidad máxima de fuerza a tracción de 8 kN y una precisión de $\pm 1\%$. Las sufrideras necesarias para realizar un ensayo de *pull-off* en este tipo de elementos deben tener un diámetro de 50 mm, lo que se traduce en una tensión máxima a tracción de 4 MPa. La Figura 3.19 muestra una imagen del adherómetro y sus diferentes partes.



Figura 3.19. Adherómetro Elcometer[®] 506.

Tras la elaboración de la probeta, empleando el cortador para sufridera suministrado por el fabricante, se realizó una hendidura de 10 ± 1 mm en el centro de la cara con refuerzo. Posteriormente se adhirió la sufridera a la probeta, empleando el producto Pattex[®] Nural 21 – Soldadura en frío. La elección de este producto se debió a la diferencia de acabado superficial existente entre el CFRP o resina y la sufridera de metal. Por último se acopló de forma mecánica la sufridera al actuador a través de las faldas de este, asegurando que la fuerza se aplicase perpendicularmente a la superficie de ensayo. La aplicación de la carga se realizó de forma manual, con una velocidad de carga constante de $0,05 \pm 0,01$ MPa/s hasta rotura.

Todas las probetas se monitorizaron con Emisión Acústica (EA). Las señales de EA se adquirieron con el equipo AMSY-5 de Vallen Systeme del grupo de investigación ADIME. El objetivo principal de esta monitorización fue el de establecer una correlación entre los distintos patrones de rotura y los resultados de EA obtenidos. Se utilizó el sensor resonante VS45-H de Vallen Systeme. En la Figura 3.20 se muestra la curva de sensibilidad y la banda de frecuencia digital seleccionada para los filtros de adquisición.

Para el registro de las señales de EA, se estableció una frecuencia de muestreo de 5 MHz, con un número de muestras de 4096 (es decir, una muestra cada $0,2 \mu\text{s}$). El *pre-trigger* se estableció en 300 muestras, debido a la pequeña dimensión de las probetas. Para cada canal se estableció un umbral de detección de 30,2 dB y se utilizaron preamplificadores con una ganancia de 34 dB. La Figura 3.21 muestra la configuración general de un ensayo *pull-off*. Todos los ensayos se grabaron con una cámara en alta definición.

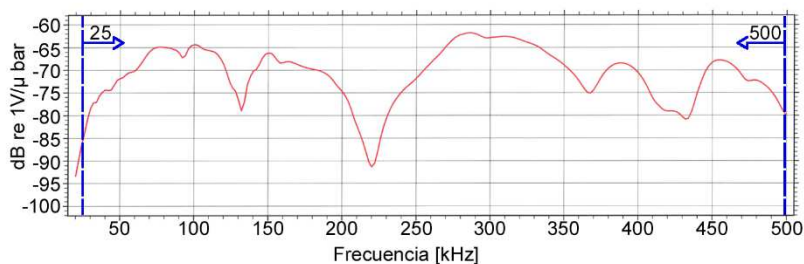
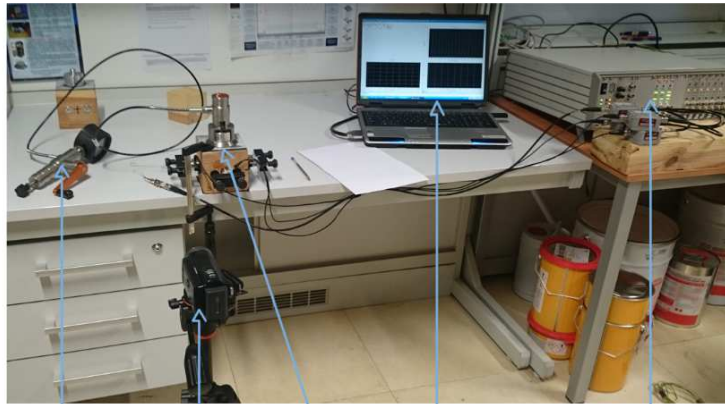


Figura 3.20. Curva de sensibilidad del sensor de EA VS45-H. Líneas azules: Frecuencias de corte de los filtros de adquisición.



Adherómetro Cámara Probeta Portátil Equipo EA

Figura 3.21. Configuración general de un ensayo *pull-off*.

Equipos e instrumentación – pull-out

Los ensayos *pull-out* se llevaron a cabo en una prensa eléctrica modelo S-110, con una fuerza máxima de 100 kN y un recorrido máximo de 650 mm. El ensayo se realizó mediante control de desplazamiento con una velocidad de 1,5 mm/min. El registro de carga se hizo con una frecuencia de 1 Hz.

Todos los ensayos *pull-out* se monitorizaron con EA empleando sensores VS45-H. Como se observa en la Figura 3.22-der., se colocaron dos sensores guardas en las mordazas con el fin de eliminar el posible ruido proveniente de las mismas. El filtrado digital se estableció en [25 - 500] kHz. De igual forma, todos los ensayos fueron grabados con una cámara de alta definición. En la Figura 3.22-izq. se puede ver la configuración general del ensayo.



Figura 3.22. Configuración general de un ensayo *pull-out*. Izq.: Vista general. Der.: Imagen de la probeta y los sensores de EA.

3.3.2. Vigas de 1,3 m

A partir del análisis del estudio de adherencia, cuyos resultados se presentan en el Capítulo 4.1, se decidió que la aplicación de una capa de imprimación entre la madera y la resina era ventajosa. Igualmente, se determinó qué resina se aplicaría para cada casa comercial. En concreto, la resina RS-30 para las vigas con refuerzo de SIKA[®] y la RM-CS para las de DRIZORO[®].

Como es ampliamente sabido, el punto débil de una viga de madera sometida a flexión es la cara sometida a mayores sollicitaciones de tracción, más aún si se trata de madera antigua. Este hecho, unido a que el CFRP trabaja mejor en tracción, hace que el refuerzo se aplique en las zonas de tracción de la madera, es decir, en la cara inferior y en las caras laterales hasta la fibra neutra de la viga. De las 51 vigas, 3 se dejaron sin reforzar como control (**NR**), 39 se reforzaron y el resto se reservaron para la realización de contra-ensayos si eran necesarios [74]. La Figura 3.23 muestra las disposiciones generales del refuerzo, así como las distintas configuraciones que se estudiaron:

- **Refuerzo longitudinal con laminado (LR):** este refuerzo se realizó con un laminado de CFRP colocado en la cara de máximas tracciones. La longitud de este tipo de refuerzo es igual a la distancia entre apoyos ($L = 1000$ mm). Se estudiaron dos anchos diferentes:
 - **LR-P** o ancho parcial ($b_{FRP} = 45$ mm);
 - **LR-F** o ancho completo ($b_{FRP} = 75$ mm).

- **Refuerzo con tejido en forma de U (UR):** este refuerzo se realizó envolviendo la viga con un tejido de CFRP hasta una altura $h_{FRP} = 75$ mm (fibra neutra teórica). La longitud de este tipo de refuerzo es igual a la distancia entre apoyos ($L = 1000$ mm).
- **Refuerzo mixto con tejido y laminado:** el refuerzo mixto se realizó colocando una lámina de CFRP de ancho parcial y un tejido de CFRP en forma de U. En la Figura 3.24 se puede ver gráficamente el proceso de colocación del tejido. Dentro de este grupo se estudiaron dos configuraciones:
 - **UR-P:** El tejido cubre continuamente la luz entre apoyos;
 - **BR:** El tejido cubre de forma discontinua o trenzada la luz entre apoyos, con un ancho de tira $w_{FRP} = 100$ mm.

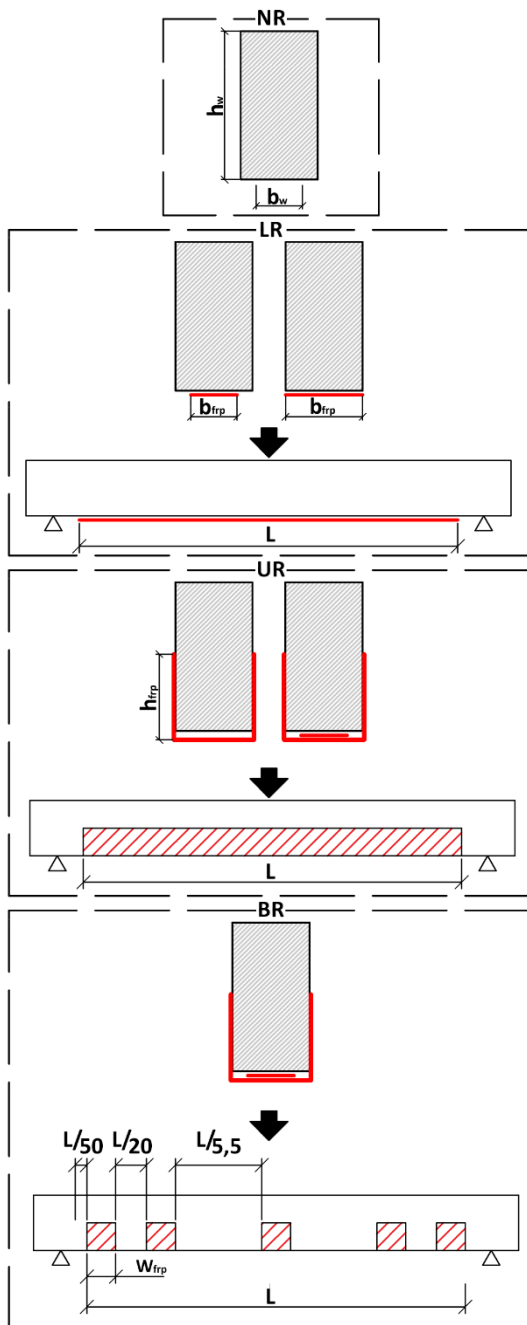


Figura 3.23. Esquema de las distintas configuraciones de refuerzo para vigas de pequeña esquadría. NR: Sin refuerzo. LR: Refuerzo longitudinal. LR-P: Refuerzo longitudinal parcial. LR-F: Refuerzo longitudinal completo. UR: Refuerzo en forma de U. UR-P: Refuerzo mixto con tejido en forma de U y laminado de ancho parcial. BR: Refuerzo trenzado.

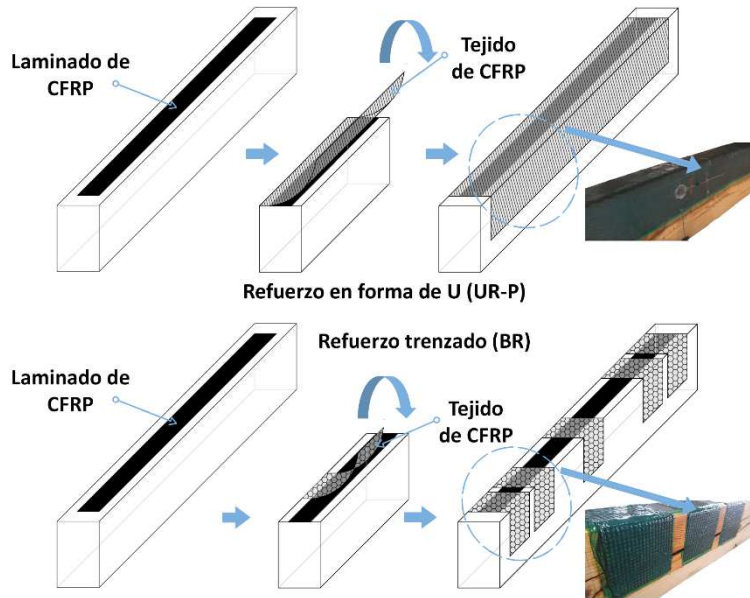


Figura 3.24. Descripción gráfica del proceso de colocación del tejido en las soluciones mixtas. Arriba: UR-P. Abajo: BR.

Una vez establecidas las diferentes configuraciones, se elaboró la matriz de ensayos. Se emplearon dos tipos de tejido de CFRP, unidireccional (**-U**) y bidireccional (**-B**). Este último estaba disponible solo en DRIZORO[®]. De cada tipo de refuerzo se elaboraron 3 probetas. La Tabla 3.8 recoge la matriz de ensayos a flexión así como la nomenclatura asignada a las distintas configuraciones de refuerzo.

Tabla 3.8. Programa experimental para los ensayos a flexión de vigas de 1,3 m. Tejido Uni.: Tejido unidireccional. Tejido Bidi.: Tejido bidireccional.

Tipo de refuerzo	Empresa suministradora de CFRP	Tipo de CFRP	Ancho de la lámina de CFRP	Nomenclatura
Sin refuerzo NR	-	-	-	NR
Refuerzo longitudinal LR	SIKA®	Laminado	45	LR-P-S
			75	LR-F-S
	DRIZORO®		45	LR-P-D
			75	LR-F-D
Refuerzo en forma de U UR	SIKA®	Tejido Uni.	-	UR-U-S
	DRIZORO®	Tejido Uni.	-	UR-U-D
	DRIZORO®	Tejido Bidi.	-	UR-B-D
Refuerzo mixto continuo UR-P	SIKA®	Laminado + Tejido Uni.	45	UR-P-U-S
	DRIZORO®	Laminado + Tejido Uni.	45	UR-P-U-D
	DRIZORO®	Laminado + Tejido Bidi.	45	UR-P-B-D
Refuerzo trenzado BR	SIKA®	Laminado + Tejido Uni.	45	BR-U-S
	DRIZORO®	Laminado + Tejido Uni.	45	BR-U-D
	DRIZORO®	Laminado + Tejido Bidi.	45	BR-B-D

Equipos e instrumentación

El programa experimental se llevó a cabo mediante ensayos a flexión a tres puntos, tal y como se representa en la Figura 3.25. El ensayo se realizó con carga continua hasta el fallo final, mediante control de desplazamiento con una velocidad de 1,5 mm/min. Todos los ensayos se realizaron en la prensa eléctrica de la empresa CONTROLS S.A. modelo S-110, con una capacidad máxima de 100 kN. La luz entre apoyos se estableció en 1000 mm. Se registraron la carga y el desplazamiento con una frecuencia de 1 Hz. El equipo de extensometría empleado fue el modelo P70 de la empresa CONTROLS S.A., registrando con una frecuencia de 0,25 Hz. Se adhirieron

4 galgas extensiométricas, dos colocadas en la cara inferior (máximas tracciones) y dos en las caras laterales, tal y como indica la Figura 3.25.

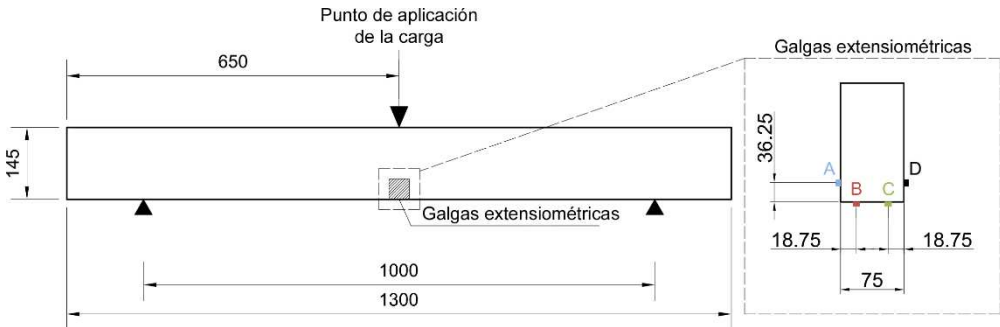


Figura 3.25. Representación esquemática de un ensayo a flexión a tres puntos y posición de las galgas extensiométricas en las distintas caras de la viga (A, B, C, D). Cotas en mm.

3.3.3. Vigas de 4,5 m

Las vigas de 4,5 m de longitud o vigas de gran escuadría tuvieron unas dimensiones lo más cercanas posibles a las de un elemento real que se pueda encontrar en una cubierta de parhilara. En total se usaron 10 vigas. Se realizó una selección de las configuraciones de refuerzo usadas en las vigas de pequeña escuadría (Capítulo 4.2). El refuerzo trenzado (BR) resultó ser la mejor configuración para reforzar una viga, debido a la alta capacidad mecánica y la elevada mejora en el comportamiento dúctil que aporta esta solución. Todo ello, con una reducción en la cantidad de material si se compara con las soluciones de refuerzo en U continuas (UR y UR-P). Por este motivo, se seleccionó el refuerzo BR para aplicarlo en vigas de gran escuadría, con una altura lateral del tejido en U de $h_{FRP} = 150$ mm. Se siguió el mismo proceso de colocación del tejido sobre el laminado descrito en la Figura 3.24. La segunda configuración seleccionada fue el refuerzo LR de ancho parcial ($b_{FRP} = 100$ mm), debido a que es la de mayor aplicación en el mercado en refuerzo de hormigón, resultando de elevado interés comparativo. La Figura 3.26 muestra ambas configuraciones de refuerzo usadas en las vigas de gran escuadría.

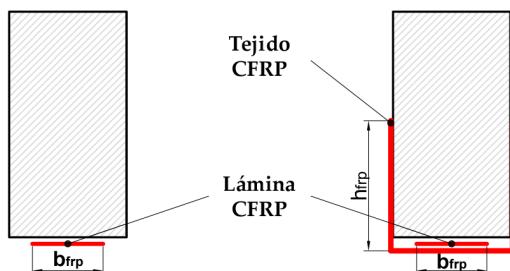


Figura 3.26. Esquema de las distintas configuraciones de refuerzo para vigas de gran escuadría. NR: Sin refuerzo. LR: Refuerzo longitudinal. BR: Refuerzo trenzado.

Ambas configuraciones, LR y BR, fueron ensayadas a flexión en 2 fases experimentales diferentes (Figura 3.27). Durante la **primera fase** se ensayaron a flexión las vigas extraídas directamente de la cubierta y que habían estado sometidas a cargas de servicio durante 200 años. Posteriormente en una **segunda fase**, una vez que las vigas alcanzaron su capacidad máxima a flexión y rompieron totalmente durante la primera fase en laboratorio, fueron reforzadas de nuevo (en algunos casos retirando el refuerzo previo) y ensayadas a flexión por segunda vez. El objetivo de esta segunda fase fue la evaluación de una posible reparación total o parcial de un elemento altamente dañado, empleando un refuerzo de CFRP.

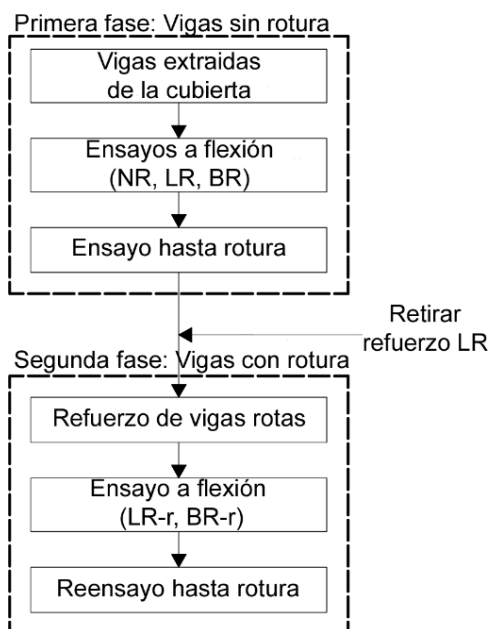


Figura 3.27. Fases del programa experimental de vigas de gran escuadría.

Como se ha comentado, en la primera fase se realizaron ensayos sobre 10 vigas: 4 reforzadas con una configuración LR, 4 con un refuerzo BR y 2 sin reforzar (NR), las cuales se usaron para comparación.

En la segunda fase del programa, se recuperaron las 2 vigas NR y las 3 vigas LR previamente rotas en la primera fase retirando la lámina de CFRP y la resina. Posteriormente, 4 de ellas se repararon con la configuración de refuerzo BR, denominándose BR-r. Esta reparación se realizó adaptando la posición y dimensiones de las tiras de tejido de CFRP a las grietas existentes en cada viga. Sin embargo, en todas las vigas se aplicó la misma área de material de refuerzo, con el fin de obtener una correcta comparación. Por último, por razones comparativas, la quinta viga rota para se reparó con el refuerzo longitudinal (LR-r). En la Figura 3.28 se muestran imágenes de algunas vigas tras su reparación en la Fase 2. En la Tabla 3.9 se detalla la nomenclatura de los diferentes especímenes, en ambas fases.



Figura 3.28. Fotografías de las vigas reparadas en la Fase 2. Izq.: Viga reparada con refuerzo LR-r. Centro: detalle de grietas existentes en una viga BR-r. Der.: Adaptación de la posición y dimensión del tejido a cada viga.

Tabla 3.9. Programa experimental para los ensayos a flexión de vigas de 4,5 m. Fases 1 y 2. Tejido Uni.: Tejido unidireccional. Tejido Bidi.: Tejido bidireccional.

Fase	Tipo de refuerzo	Empresa suministradora de CFRP	Tipo de CFRP	Número de especímenes	Nomenclatura
Fase 1. Sin rotura previa	Sin refuerzo NR	-	-	2	NR
	Refuerzo longitudinal LR	SIKA®	Laminado	2	LR-S
		DRIZORO®	Laminado	2	LR-D
	Refuerzo trenzado BR	SIKA®	Laminado + Tejido Uni.	2	BR-S
DRIZORO®		Laminado + Tejido Bidi.	2	BR-D	
Fase 2. Con rotura previa	Refuerzo longitudinal LR	DRIZORO®	Laminado	1	LR-r
	Refuerzo trenzado BR		Laminado + Tejido Bidi.	5	BR-r

Equipos e instrumentación

Todas las vigas de gran escuadría en ambas fases (sin y con rotura previa) se sometieron a ensayos de flexión en 3 puntos, como muestra la Figura 3.29. El ensayo se realizó con carga continua hasta el fallo final, mediante control de desplazamiento con una velocidad de 1,5 mm/min. Todas las vigas se ensayaron con una prensa de SERVOSIS S.L., modelo CH4-ST-100, con dos actuadores hidráulicos cuya capacidad máxima de carga es de 1000 kN cada uno. Se estableció una longitud entre apoyos de 4000 mm, registrando las deformaciones y flechas mediante galgas extensiométricas y LVDTs, respectivamente. El equipo de extensometría empleado fue de la casa comercial HBM modelo QUANTUMX MX 1615B. Para las vigas sin rotura previa, se establecieron tres grupos de sensores en tres puntos de medida, como muestra la Figura 3.29. Cada grupo se instrumentó con cuatro galgas extensiométricas y un LVDT. En el caso de las vigas reparadas, solo se

mantuvo el grupo de sensores situados en el centro de la luz entre apoyos (grupo 2).

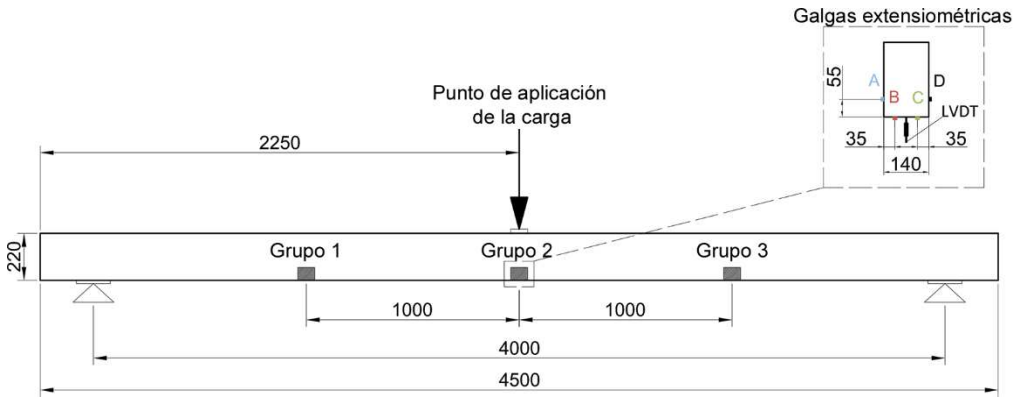


Figura 3.29. Representación esquemática de un ensayo a flexión a tres puntos y posición de las galgas extensiométricas (A, B, C y D) en las distintas caras de la viga.

4. Resultados y discusión

En este Capítulo se recogen los resultados de los especímenes y ensayos descritos anteriormente. En primer lugar se presentan los resultados de adherencia entre la madera y el refuerzo de CFRP. Estos resultados determinaron el tipo de resina finalmente empleada, así como la necesidad o no de aplicar una capa de imprimación. Posteriormente, se presentan los resultados de los ensayos a flexión en 3 puntos sobre vigas de pequeña escuadría. Finalmente, se analizan los resultados para las vigas de gran escuadría, sin y con rotura previa. Por último, se realiza una comparación global de resultados, dividida en tres partes:

- a) capacidad mecánica a flexión;
- b) comparación entre los resultados analíticos y experimentales;
- c) comparación de costes de materiales y tiempos de elaboración.

4.1. Adherencia madera-refuerzo

Tal y como se recoge en el Capítulo 3.3.1, se realizaron ensayos *pull-off* y *pull-out* con el fin de evaluar la adherencia entre la madera y el CFRP, comparando diferentes resinas comerciales. Este hecho es de vital

importancia, para asegurar la correcta transmisión de esfuerzos entre los dos materiales.

4.1.1. Ensayos *pull-off*

En las probetas *pull-off* se pueden distinguir las siguientes capas, descritas gráficamente en la Figura 4.1.

- Sustratos:
 - **Sustrato 1:** Refuerzo de CFRP. En el caso de las probetas con tejido, el sustrato 1 se considera la unión entre la capa externa de resina y el tejido (Figura 4.1).
 - **Sustrato 2:** Madera.
- Adhesivos:
 - **Adhesivo 1:** Unión entre la sufridera metálica y el sustrato 1.
 - **Adhesivo 2:** Unión entre el sustrato 1 y el sustrato 2.
 - **Adhesivo 3:** Capa de imprimación que se aplica entre el adhesivo 2 y el sustrato 2, en las probetas que contengan la letra “i” en su denominación.

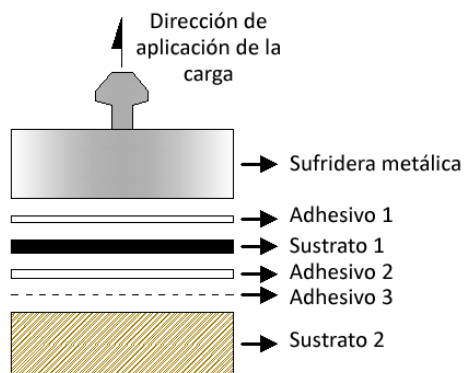


Figura 4.1. Esquema de los sustratos y adhesivos que forman una probeta de *pull-off*.

Observando la Figura 4.1, los fallos de las diferentes uniones adhesivas se pueden clasificar de tres formas tipos [75,76]:

- **Separación por adhesión:** Producida en la interfase adhesivo-sustrato.
- **Separación por cohesión:** Producida por la ruptura del adhesivo.
- **Rotura del sustrato:** Producida por el fallo del sustrato antes de que se produzca una separación adhesiva o cohesiva.

En la Figura 4.2 se definen de forma esquemática los diferentes tipos de fallo, según en qué adhesivo o sustrato se produzcan.

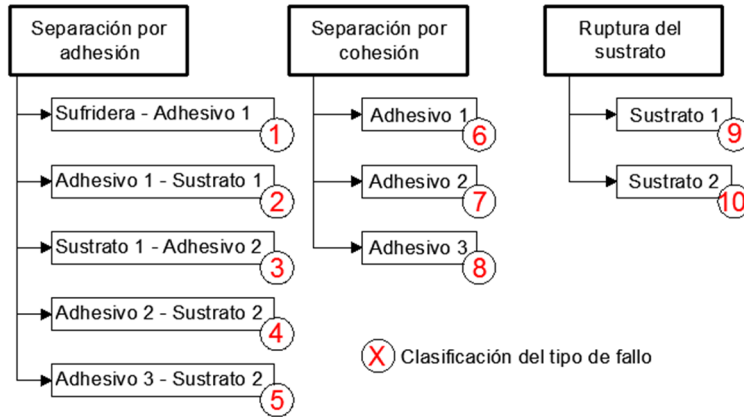


Figura 4.2. Clasificación de los distintos tipos de fallo en una unión adhesiva para las probetas *pull-off*.

En base a los ensayos realizados, los mecanismos de fallo se clasificaron en 4 tipos o modos:

- **Modo de fallo A (Tipos 1, 2 y 6):** Separación entre la sufridera y el sustrato 1 (CFRP). En este caso, no se pueden extraer conclusiones sobre la adherencia madera-CFRP.
- **Modo de fallo B (Tipo 9):** Rotura del sustrato 1, es decir, del CFRP.
- **Modo de fallo C (Tipos 3, 4, 5, 7 y 8):** Fallo entre el sustrato 1 (CFRP) y el sustrato 2 (madera), es decir, una mala adherencia madera-CFRP.
- **Modo de fallo D (Tipo 10):** Fallo del sustrato 2 (rotura de la madera). Este modo de fallo asegura una correcta adherencia entre

la madera y el CFRP, sin que este último falle. Es por tanto, el modo de fallo deseado.

En algunas ocasiones se producen modos de fallo mixtos, es decir no pueden clasificarse en su totalidad como uno de los modos anteriormente descritos. En estas situaciones, para realizar una clasificación lo más objetiva posible, se midieron las áreas de las superficies en las que se producen los distintos tipos de rotura. En la Figura 4.3 se muestran dos ejemplos. La probeta L1-AHD1-p-1 se clasificó en el modo de fallo C, teniendo un 95% de área en el modo C y un 5% en el modo D (de aquí en adelante 90%C + 10%D). La probeta L1-ALD1-3 falló en modo D (95%D + 5%C).

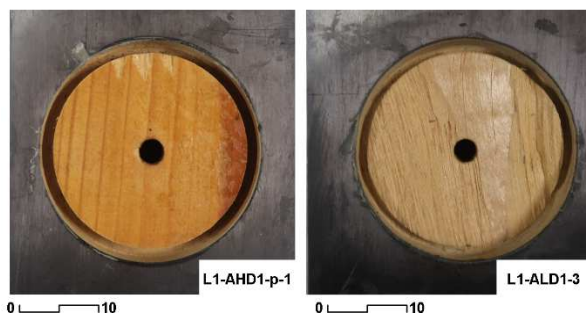


Figura 4.3. Probetas de *pull-off* en las cuales se producen dos tipos de fallo. Izq.: Predomina el modo de fallo C. Der.: Predomina el modo de fallo D. Distancias en mm.

Análisis de Emisión Acústica

Se llevó a cabo un procesamiento de los datos de EA en dos fases:

Fase 1: Filtrado de las señales erróneamente registradas.

Fase 2: Clasificación de las señales en tres grupos según su contenido en frecuencia.

Fase 1. Durante un ensayo, se generan muchas de señales de EA. Son ensayos de mucha actividad acústica. Esto provoca que algunas de ellas se registren mal, por errores o falta de rapidez del sistema de adquisición y registro. Estas señales se caracterizan por tener un largo periodo de baja amplitud antes del tiempo de llegada real. La Figura 4.4 muestra un ejemplo

de señales tipo, una registrada correctamente (izquierda) y una mal registrada (derecha).

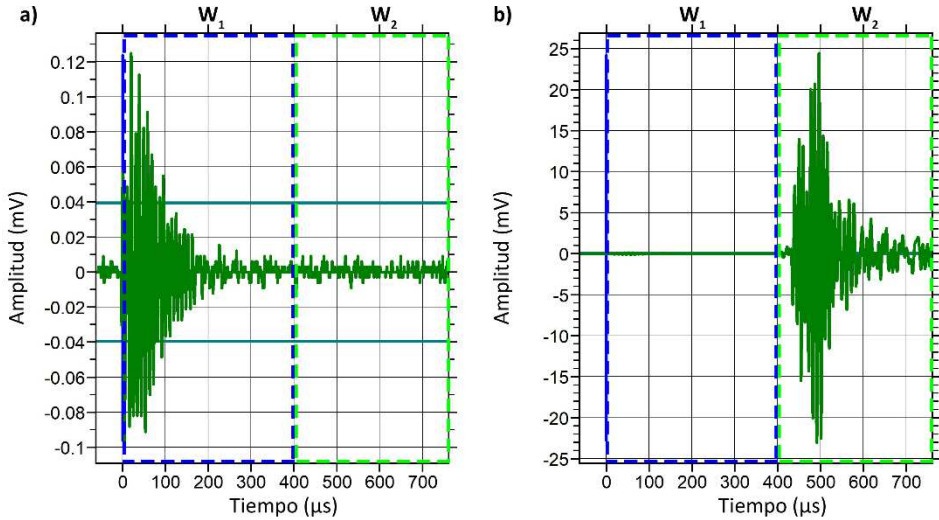


Figura 4.4. Ejemplo de dos señales de EA. a: Señal bien registrada. b: Señal mal registrada.

Con el fin de filtrar automáticamente las señales mal registradas se estableció el siguiente procedimiento. En primer lugar se establecieron dos ventanas temporales aplicadas sobre cada señal:

- a) \mathbf{W}_1 : [0 - 400] μs . El tiempo de 400 μs se estableció como el doble de las duraciones medias de todas las señales registradas para todos los ensayos (200 μs).
- b) \mathbf{W}_2 : [400 - 750] μs . Desde el final de la ventana \mathbf{W}_1 hasta el final de la longitud de señal registrada.

Posteriormente, se calculó el valor medio cuadrático (RMS) temporal de cada señal en las dos ventanas temporales \mathbf{W}_1 ($\text{RMS}(\mathbf{W}_1)$) y \mathbf{W}_2 ($\text{RMS}(\mathbf{W}_2)$) de la forma

$$\text{RMS}(W_x) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_T s^2(t) dt} \quad ; \quad \text{RMS}_{12} = \text{RMS}(W_1) - \text{RMS}(W_2) \quad \text{Ec. 6}$$

donde $s(t)$ es una señal de EA, cuya integral se extiende al rango de duración T de la ventana. El RMS se expresa en dB. Con estos valores, se define y calcula el valor RMS_{12} (Ec. 6) como la diferencia entre ambos.

Mediante el parámetro RMS_{12} , únicamente las señales que cumplan el criterio descrito en la Ec. 7 fueron consideradas como señales adquiridas correctamente.

$$Pasa\ si \begin{cases} RMS_{12} < RMSlim_{12up} \\ RMS_{12} > RMSlim_{12down} \end{cases} \quad Ec. 7$$

Las señales que no cumplieron este criterio fueron eliminadas. La Figura 4.5 muestra un ejemplo de la evolución del parámetro RMS_{12} durante un ensayo concreto. Los puntos verdes se corresponden con señales que cumplieron el criterio, mientras que aquellas que no lo cumplieron se representan en puntos rojos. Para aplicar el criterio descrito en la Ec. 7, se deben establecer dos parámetros, $RMSlim_{12up}$ y $RMSlim_{12down}$ (Ec. 8). Estos parámetros representan los límites inferior y superior de las señales registradas durante un ensayo (Figura 4.5a). El límite superior se estableció visualmente para cada ensayo mediante la observación de la forma de onda de las señales. El valor de este límite no es crítico, ya que en la parte superior de la gráfica se observaron muy pocas señales mal registradas. Por otro lado, el límite inferior se estableció bajo el criterio de obtener una distribución simétrica del grupo de señales con respecto del valor medio del RMS_{12} , de la forma:

$$RMSlim_{12down} = RMSlim_{12up} - (2 \times MR_{12}) \quad Ec. 8$$

donde

$$MR_{12} = \frac{\sum RMS_{12}}{\sum N_{hits}} \quad Ec. 9$$

MR_{12} es el valor medio del RMS_{12} calculado para todas las señales registradas durante un ensayo en particular. La Figura 4.5b muestra un ejemplo del parámetro MR_{12} para el mismo ensayo de la Figura 4.5a.

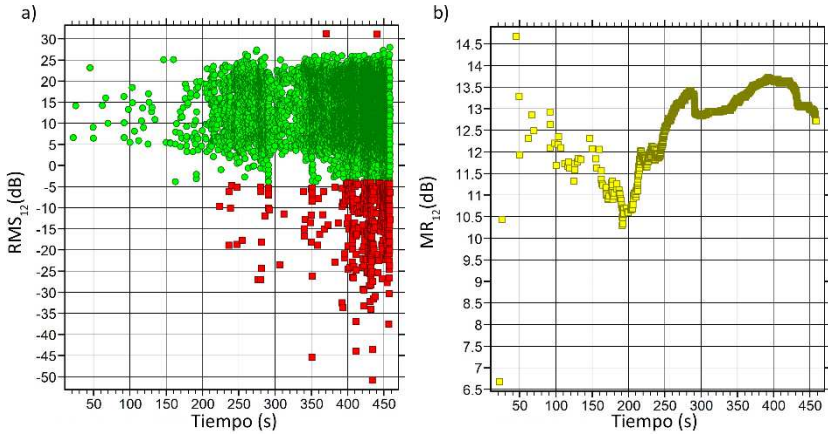


Figura 4.5. RMS_{12} (a) y MR_{12} (b) para el ensayo L1-ALD1-p-3. Puntos verdes: Señales que pasan el filtro. Puntos rojos: Señales que no pasan el filtro.

Fase 2. Posteriormente se llevó a cabo una clasificación de las señales filtradas en tres grupos, según la magnitud relativa de su espectro de energía en tres bandas concretas de frecuencia. Para ello, se empleó el RMS espectral (energía espectral), definida en la Ec. 10 y calculada en el primer ciclo de la señal posterior al primer cruce de umbral, es decir, en la ventana \mathbf{W}_0 : $[0 - 20] \mu s$ (Figura 4.6). Se seleccionó esta ventana tan estrecha para evitar en la medida de lo posible la influencia de las diferentes reflexiones y otros efectos de propagación de la onda en el cálculo del espectro de energía. El RMS espectral se calculó de la forma:

$$RMS(B_x) = \sqrt{\frac{1}{\Delta f} \int_{\Delta f} S^2(f) df} \quad \text{Ec. 10}$$

donde $S(f)$ es el espectro de la señal de EA $s_{W_0}(t)$ en la banda de frecuencia B_x de ancho Δf . $s_{W_0}(t)$ es la señal original $s(t)$ en la ventana W_0 .

Se seleccionaron tres rangos de frecuencia, correspondiendo con tres de las resonancias del sensor y se calculó el RMS espectral en cada banda:

- **Banda (B_1):** $[60 - 120]$ kHz. Frecuencias bajas. $RMS_0(B_1)$.
- **Banda (B_2):** $[140 - 160]$ kHz. Frecuencias medias. $RMS_0(B_2)$.
- **Banda (B_3):** $[270 - 330]$ kHz. Frecuencias altas. $RMS_0(B_3)$.

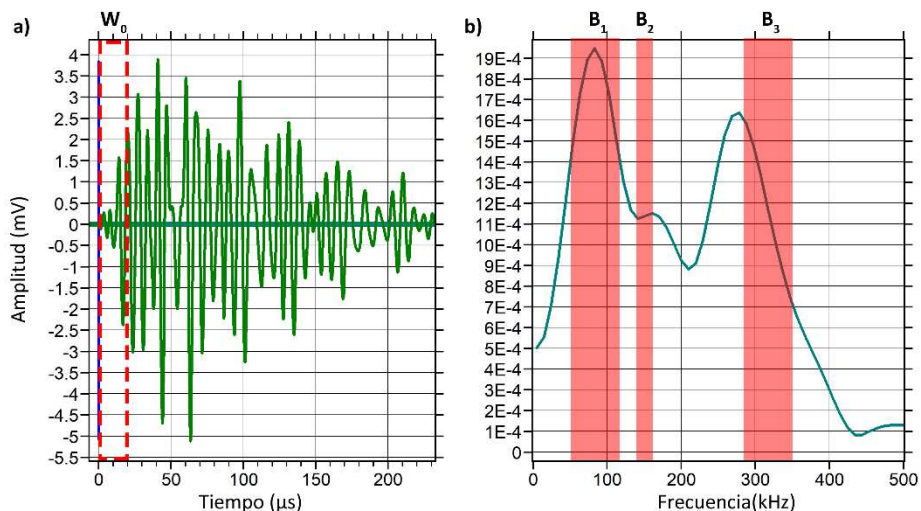


Figura 4.6. Ejemplo de una señal de EA. a: Definición de la ventana temporal W_0 . b: Espectro y definición de las bandas B_1 , B_2 y B_3 .

Establecidas las bandas de frecuencia, las señales se clasificaron en 3 grupos, como señales predominantes en bajas frecuencias (Grupo 1), en medias frecuencias (Grupo 2) y en altas frecuencias (Grupo 3), respectivamente (Ecs. 11 - 13).

$$\text{Grupo 1} \rightarrow \text{Si } RMS_0(B_1) > RMS_0(B_2) \text{ y } RMS_0(B_1) > RMS_0(B_3) \quad \text{Ec. 11}$$

$$\text{Grupo 2} \rightarrow \text{Si } RMS_0(B_2) > RMS_0(B_1) \text{ y } RMS_0(B_2) > RMS_0(B_3) \quad \text{Ec. 12}$$

$$\text{Grupo 3} \rightarrow \text{Si } RMS_0(B_3) > RMS_0(B_1) \text{ y } RMS_0(B_3) > RMS_0(B_2) \quad \text{Ec. 13}$$

Resultados mecánicos

En las Tablas 4.1 y 4.2 se recogen los resultados de carga máxima, carga máxima media y las desviaciones máximas y mínimas con respecto de la media de cada grupo, así como el tipo de rotura en cada ensayo de arrancamiento. La Figura 4.7 muestra los resultados de carga máxima media y las desviaciones máximas y mínimas.

Los resultados se analizan por separado para laminados y tejidos pues su comportamiento es muy diferente. Además, el análisis se realiza:

- Comparando los materiales de las dos casas comerciales (resinas y CFRP);
- Comparando los resultados de probetas con y sin imprimación;
- Comparando los resultados de las distintas resinas según su densidad. Las resinas RS-30 y RM-C son de alta densidad (AHD1 y AHD2, respectivamente), mientras que las restantes RS-330 y RM-CS, son de baja densidad (ALD1 y ALD2, respectivamente).

Tabla 4.1. Resultados mecánicos de los ensayos de *pull-off* para laminados. Carga máxima, carga máxima media entre los tres ensayos, desviación máxima y mínima y tipo de rotura.

Nomenclatura para laminados	Tipo de resina	Número de probeta	Carga máxima (kN)	Carga máxima media (kN)	Desv. max./min.	Modo de fallo
L1-AHD1	RS-30 (HD)	1	4,10	4,95	1,10/0,85	D
		2	4,71			D
		3	6,05			D
L1-AHD1-p		1	2,87	4,09	0,78/1,22	95%C + 5%D
		2	4,87			90%C + 10%D
		3	4,54			95%A + 5%B
L1-ALD1	RS-330 (LD)	1	5,26	6,08	0,79/0,82	85%C + 15%B
		2	6,87			D
		3	6,11			95%D + 5%C
L1-ALD1-p		1	4,34	4,09	1,62/1,87	85%A + 15%B
		2	2,22			95%C + 5%D
		3	5,71			D
L2-AHD2	RM-C (HD)	1	3,71	2,82	0,91/1,50	95%B + 5%C
		2	1,30			C
		3	3,44			C
L2-AHD2-p		1	2,67	3,58	0,60/0,91	85%B + 15%C
		2	4,18			60%B + 40%C
		3	3,89			C
L2-ALD2	RM-CS (LD)	1	7,36	4,99	2,37/1,30	B
		2	3,69			B
		3	3,93			C
L2-ALD2-p		1	4,63	4,22	0,67/1,08	90%B + 10%C
		2	4,89			95%B + 5%C
		3	3,14			90%B + 10%C

Tabla 4.2. Resultados mecánicos de los ensayos de *pull-off* para tejidos. Carga máxima, carga máxima media entre los tres ensayos, desviación máxima y mínima y tipo de rotura.

Nomenclatura para tejidos	Tipo de resina	Número de probeta	Carga máxima (kN)	Carga máxima media (kN)	Desv. max./min.	Modo de fallo
F1-AHD1	RS-30 (HD)	1	3,69	5,16	0,87/1,47	A
		2	5,77			D
		3	6,03			D
F1-AHD1-p		1	6,54	6,66	0,35/0,22	75%D + 25%C
		2	6,44			D
		3	7,01			D
F1-ALD1	RS-330 (LD)	1	4,54	4,87	0,86/0,53	D
		2	5,73			D
		3	4,34			D
F1-ALD1-p		1	5,07	5,76	1,07/0,69	D
		2	6,83			D
		3	5,38			D
F2-AHD2	RM-C (HD)	1	0,98	1,28	0,27/0,30	B
		2	1,32			B
		3	1,55			B
F2-AHD2-p		1	1,18	1,66	0,33/0,48	B
		2	1,98			B
		3	1,81			75%B + 25%C
F2-ALD2	RM-CS (LD)	1	5,71	5,22	0,50/0,31	D
		2	4,91			D
		3	5,03			D
F2-ALD2-p		1	3,55	4,48	0,56/0,93	D
		2	5,05			D
		3	4,85			D

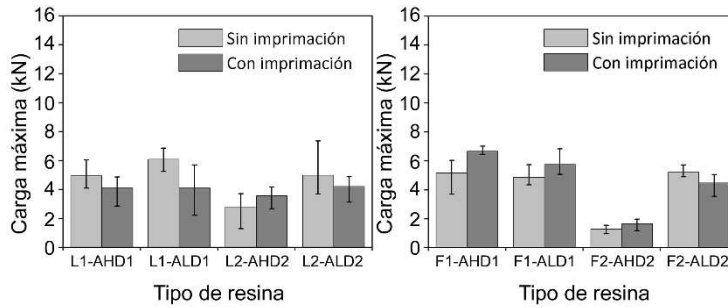


Figura 4.7. Carga máxima media entre los tres los ensayos de *pull-off*. Izq.: Laminados. Der.: Tejidos.

Laminados

Para las probetas con laminado se observa cómo, en líneas generales, para las resinas de SIKA® (L1) se obtienen mejores resultados que para las resinas de DRIZORO® (L2). El 50% de las probetas elaboradas con productos SIKA® se clasifican en el modo de fallo D (rotura de la madera), mientras que en el caso los productos DRIZORO®, ninguna probeta tiene este tipo de fallo. Para ambas casas comerciales, solo un 33% de las probetas presentan un fallo de tipo C (deslaminación madera-CFRP). Por otro lado, el modo de fallo B (rotura del laminado) no se da en el laminado de SIKA®, demostrando una buena calidad del material. Sin embargo, para el 67% de las probetas de DRIZORO® este fallo (B) es el predominante, mientras que el 33% restante fallan por deslaminación madera-CFRP (modo C). Esto corrobora los resultados mecánicos obtenidos.

En cuanto al efecto de la imprimación, para las probetas con material de SIKA® se obtienen mejores resultados sin la aplicación de la misma. Sin embargo, las probetas con materiales de DRIZORO® no muestran resultados decisivos sobre los beneficios de aplicar una imprimación.

Respecto de las densidades de las resinas se observa como las resinas de baja densidad (ALD) proporcionan mejores resultados de carga de rotura que las de alta densidad (AHD). Esto puede ser debido a que una resina más fluida permite impregnar de una forma más eficaz las fibras y poros de la madera, consiguiendo una mejor adherencia madera-CFRP en laminados.

Tejidos

En lo referente a los tejidos de CFRP (F1 y F2 para SIKA® y DRIZORO®, respectivamente), excluyendo las probetas con la resina AHD2, el resto proporcionan resultados similares, con valores de carga de rotura superiores a los de laminado. En el caso de las probetas con la resina AHD2 (RM-C, con la mayor densidad), los resultados de carga son notablemente bajos. Esto se debe principalmente a que al ser una resina tan densa (tipo mortero), no impregna correctamente las fibras de tejido, evitando que se forme un bloque resina-tejido-resina que permitiría una correcta transmisión de esfuerzos a la madera.

En el caso del tejido de SIKA®, el 92% de las probetas se clasifican en el modo D, obteniéndose ligeramente mejores resultados con la resina AHD1. Además, en ambos casos (resinas AHD1 y ALD1) los resultados son mejores cuando se aplica imprimación.

Por otro lado, se observan grandes diferencias entre los dos adhesivos de DRIZORO®. El 100% de las probetas con la resina ADH2 se clasifican con el modo de fallo B, no pudiéndose atribuir este hecho a una mala calidad del tejido, sino a la falta de permeabilidad anteriormente descrita. Todas las probetas con resina ALD2 (RM-CS) se clasifican como modo D, consiguiendo por lo tanto una buena adherencia entre la madera y el CFRP. Los beneficios de aplicar imprimación en este caso no quedaron claros.

Resultados de Emisión Acústica

Laminados

La Figura 4.8a,b muestra los *hits* de EA acumulados durante un ensayo *pull-off* para las dos probetas con fallo tipo A, es decir, despegue sufridera-CFRP. Los hits de EA se muestran clasificados en los 3 grupos anteriormente definidos. Queda claro que ambas probetas muestran un patrón de EA muy similar, con señales de los Grupos 1 y 2 presentes desde el comienzo del ensayo, y con prácticamente ningún rastro de *hits* de EA del Grupo 3. La Figura 4.8c,d muestra una imagen del estado final de estas probetas tras el ensayo.

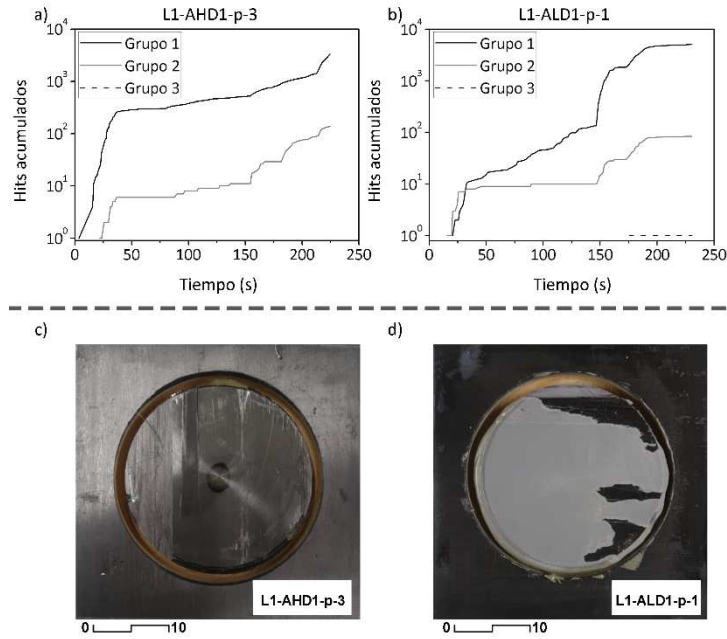


Figura 4.8. Probetas con un fallo de tipo A. Laminado de CFRP. a, b: *Hits* acumulados frente al tiempo. c, d.: Imagen del fallo. Distancias en mm.

La Figura 4.9a-d presenta los *hits* de EA acumulados para las probetas que fallaron por rotura del CFRP (modo B). Este tipo de fallo únicamente aparece en las muestras de material de DRIZORO[®], demostrando una peor calidad del laminado con respecto de SIKA[®]. En este caso, se observa un patrón de EA muy diferente según si el adhesivo es HD o LD. Las muestras con adhesivos AHD muestran una baja cantidad de *hits* del Grupo 2 con respecto de los adhesivos ALD. Además, cuando se usan adhesivos de alta densidad, apenas aparecen *hits* clasificados en el Grupo 3. La Figura 4.9e,f muestra una imagen de la apariencia de estas probetas después del ensayo.

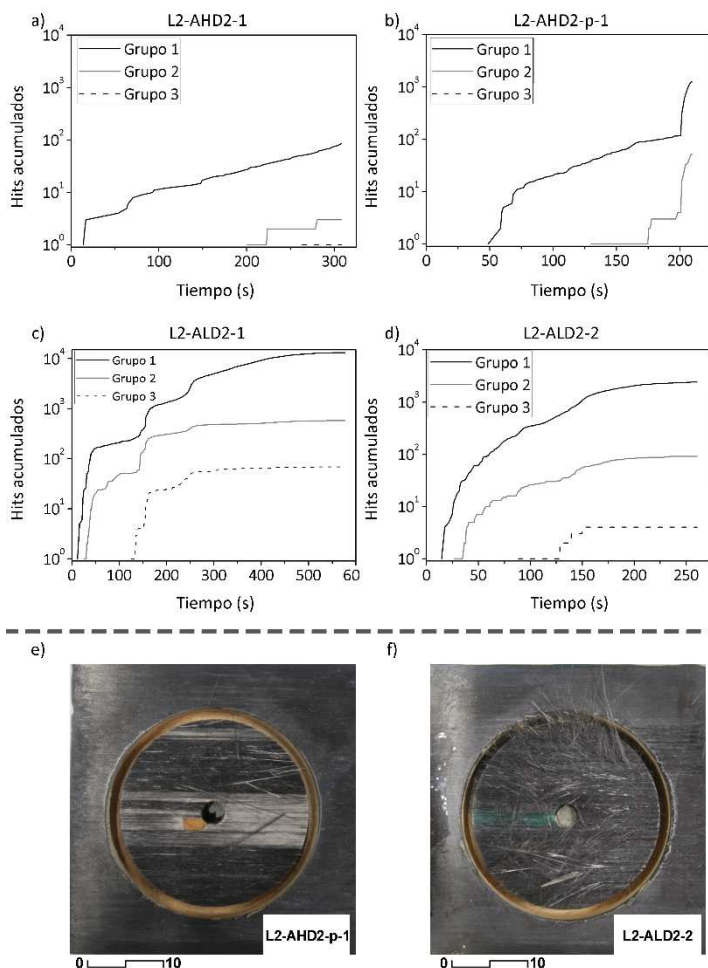


Figura 4.9. Probetas con un fallo de tipo B. Laminado de CFRP. a-d: *Hits* acumulados frente al tiempo. e, f: Imagen del fallo. Distancias en mm.

Los *hits* de EA acumulados de las probetas con un modo de fallo C (deslaminación madera-CFRP) se presentan en la Figura 4.10. En el caso del adhesivo AHD, las señales del Grupo 2 aparecen claramente después que las señales del Grupo 1. De forma similar, apenas se observan *hits* del Grupo 3 cuando se emplean adhesivos AHD. En la Figura 4.11 se observan imágenes del modo de fallo C.

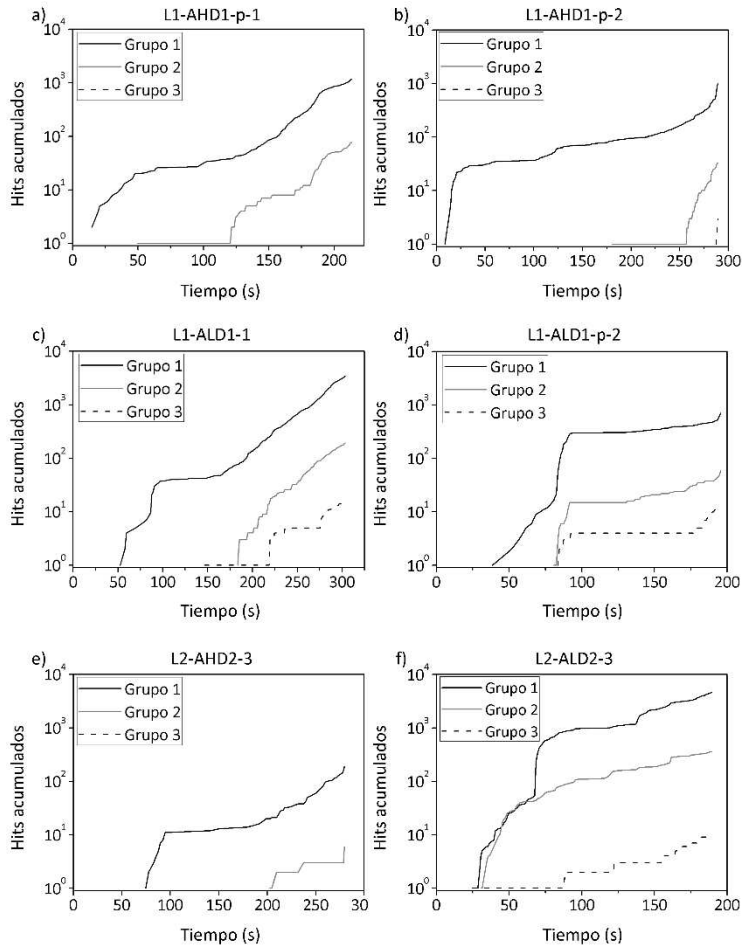


Figura 4.10. *Hits* acumulados frente al tiempo de probetas con un fallo de tipo C. Laminado de CFRP.



Figura 4.11. Imagen del fallo tipo C. Laminado de CFRP. Distancias en mm.

Por último, la Figura 4.12a-d muestra los resultados de EA de las probetas cuyo fallo final es causado por la rotura de madera (modo de fallo D). Se puede observar que para el adhesivo AHD, los *hits* acumulados de los Grupos

1 y 2 tienen un súbito incremento en el inicio del ensayo, seguido por un ligero y continuo incremento posterior. Se registraron algunas pocas señales del Grupo 3 al final del ensayo. Sin embargo, cuando se emplean adhesivos ALD, el patrón de EA presenta un incremento mucho más regular en los tres grupos durante el ensayo (incluyendo el Grupo 3). La Figura 4.12e,f muestra dos ejemplos de probetas que fallaron por rotura de la madera, demostrando una buena adherencia madera-CFRP y una buena calidad del CFRP en estos casos.

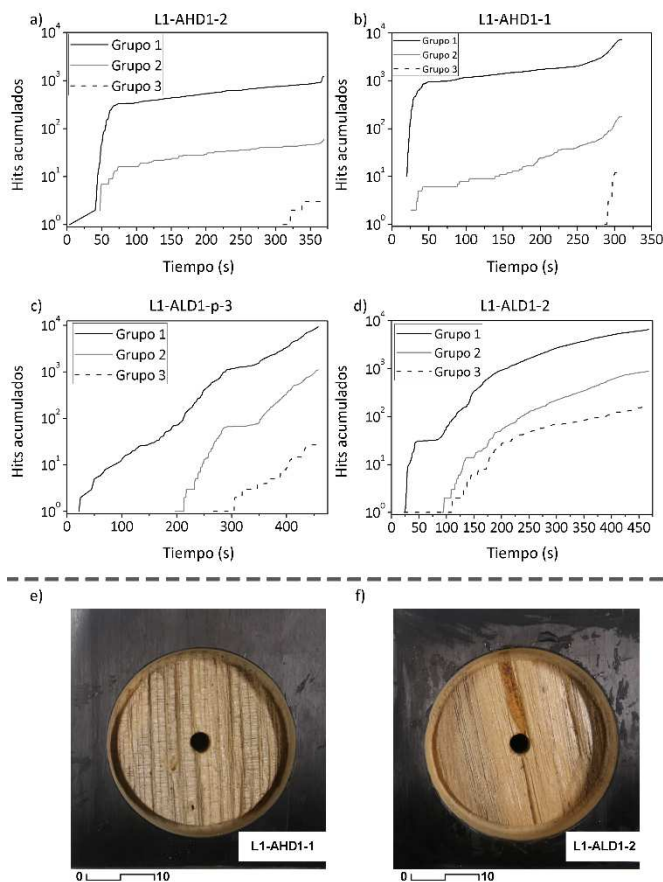


Figura 4.12. Probetas con un fallo de tipo D. Laminado de CFRP. a-d: *Hits* acumulados frente al tiempo. e, f: Imagen del fallo. Distancias en mm.

Tejidos

La Figura 4.15a muestra los *hits* de EA acumulados para la única probeta que tuvo un modo de fallo final de tipo A. En este caso, se registraron muy pocos *hits* en el Grupo 2, ubicados justo al final del ensayo. De forma similar, no se registraron *hits* del Grupo 3. La Figura 4.13b muestra el estado posterior al ensayo de la probeta.

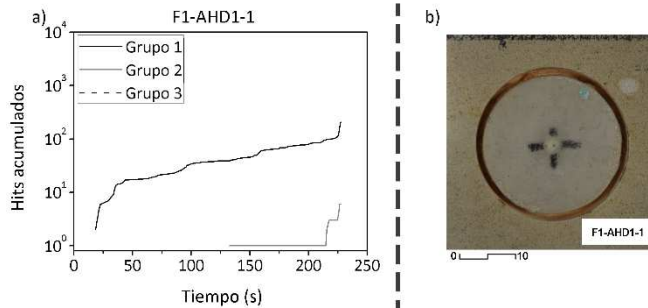


Figura 4.13. Probetas con un fallo de tipo A. Tejido de CFRP. a: *Hits* acumulados frente al tiempo. b: Imagen del fallo. Distancias en mm.

La Figura 4.14a,b representa los resultados de EA de las probetas en las que se observó rotura del tejido de CFRP (modo de fallo B). Únicamente las probetas F2 con adhesivo AHD tienen este modo de fallo, debido a la alta densidad de este adhesivo. Ambos ejemplos muestran un patrón de EA similar, donde las señales de los Grupos 1 y 2 aparecen desde el principio, con un repentino incremento y un suave crecimiento posterior. Al contrario que otras probetas con adhesivo HD, las señales del Grupo 3 aparecen en una fase temprana del ensayo. La Figura 4.14c,d muestra dos probetas que fallaron debido a la rotura del tejido.

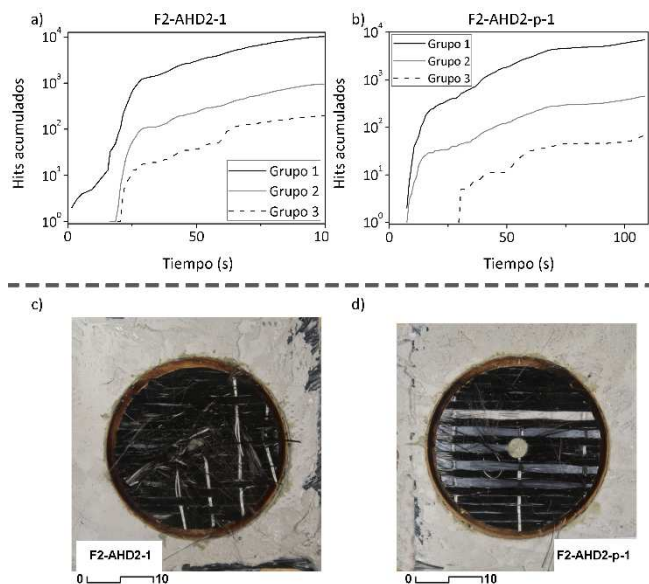


Figura 4.14. Probetas con un fallo de tipo B. Tejido de CFRP. a, b: *Hits* acumulados frente al tiempo. c, d: Imagen del fallo. Distancias en mm.

Por último, los resultados de EA de las probetas con un modo de fallo D (rotura de la madera) se muestran en la Figura 4.15. Los *hits* de los Grupos 1 y 2 presentan un patrón similar para todas las probetas, con una clara distinción entre los adhesivos AHD y ALD. El número de *hits* crece más regularmente para todos los grupos, con una mayor pendiente que las probetas que tienen un modo de fallo B. Las señales del Grupo 3, aparecen en todos los casos. La Figura 4.16 presenta cuatro ejemplos que fallaron por rotura de la madera.

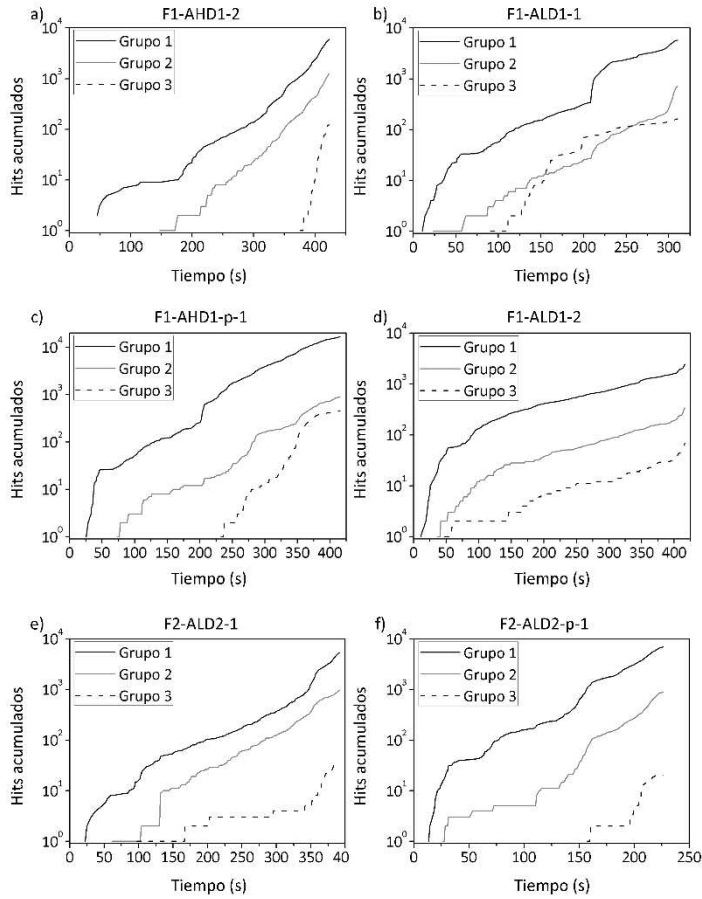


Figura 4.15. *Hits* acumulados frente al tiempo de probetas con un fallo de tipo D. Tejido de CFRP.

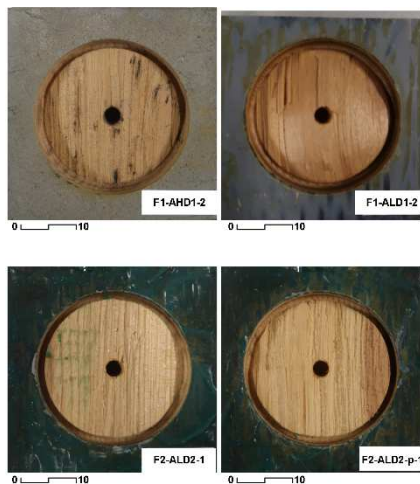


Figura 4.16. Imagen del fallo tipo D. Tejido de CFRP. Distancias en mm.

4.1.2. Ensayos *pull-out*

La clasificación de los modos de fallo para este tipo de ensayo se lleva a cabo de forma similar a las de *pull-off*, cambiando únicamente el modo de fallo A (este ensayo no tiene sufridera) de la forma:

- **Modo A:** No se produce ningún tipo de fallo, ni adhesivo ni cohesivo. Este fallo se produce debido al tipo de ensayo y únicamente puede darse de forma parcial. Una parte de la unión madera-CFRP falla y la otra quede intacta.



Figura 4.17. Ejemplo de la probeta L1-AHD1-2 con un fallo parcial de tipo C (70%) y modo A (30%).

En este tipo de ensayo es difícil que se produzca el fallo D (rotura de la madera), y de producirse, es una rotura en la superficie de contacto adhesivo-madera, debido principalmente a que se trata de esfuerzos de cizalla. En las Tablas 4.3 y 4.4 se recogen los resultados de carga máxima, carga máxima media entre los tres ensayos y las desviaciones máximas y mínimas con respecto de la media de cada grupo, así como el tipo de rotura. La Figura 4.18 muestra los resultados de carga máxima media y las desviaciones máximas y mínimas.

Tabla 4.3. Resultados mecánicos de los ensayos de *pull-out* para laminados. Carga máxima, carga media entre los tres ensayos, desviación máxima y mínima y tipo de rotura.

Nomenclatura para laminados	Tipo de resina	Número de probeta	Carga máxima (kN)	Carga máxima media (kN)	Desv. max./min.	Modo de fallo
L1-AHD1	RS-30 (HD)	1	12,41	9,09	3,32/2,12	40%C + 30%B + 30%A
		2	7,90			70%C + 30%A
		3	6,97			C
L1-AHD1-p		1	8,57	9,99	2,08/1,42	90%C + 10%A
		2	9,33			60%D + 40%C
		3	12,07			90%C + 10%A
L1-ALD1	RS-330 (LD)	1	9,52	6,63	2,89/3,67	75%B + 25%C
		2	7,41			72%B + 28%C
		3	2,96			90%C + 10%B
L1-ALD1-p		1	6,71	8,67	3,09/1,96	60%B + 40%C
		2	7,55			80%C + 20%B
		3	11,76			88%C + 6%B + 6%D
L2-AHD2	RM-C (HD)	1	5,78	4,38	1,41/1,85	B
		2	4,82			B
		3	2,53			B
L2-AHD2-p		1	5,20	7,80	2,39/2,60	B
		2	8,00			B
		3	10,19			B
L2-ALD2	RM-CS (LD)	1	4,76	8,38	1,99/3,62	70%B + 30%A
		2	10,37			70%B + 30%A
		3	10,01			B
L2-ALD2-p		1	10,97	10,24	0,74/1,10	B
		2	9,13			B
		3	10,60			B

Tabla 4.4. Resultados mecánicos de los ensayos de *pull-out* para tejidos. Carga máxima, carga media entre los tres ensayos, desviación máxima y mínima y tipo de rotura.

Nomenclatura para tejidos	Tipo de resina	Número de probeta	Carga máxima (kN)	Carga máxima media (kN)	Desv. max./min.	Modo de fallo
F1-AHD1	RS-30 (HD)	1	4,94	4,28	0,66/0,65	60%C + 40%A
		2	3,62			C
		3	4,27			C
F1-AHD1-p		1	9,80	8,88	0,92/0,93	56%C + 40%A
		2	7,95			C
		3	8,89			C
F1-ALD1	RS-330 (LD)	1	7,38	6,48	0,90/1,02	C
		2	6,60			C
		3	5,46			60%C + 40%A
F1-ALD1-p		1	9,87	8,88	0,99/1,78	80%C + 20%A
		2	9,67			C
		3	7,10			C
F2-AHD2	RM-C (HD)	1	6,76	7,04	0,47/0,28	C
		2	6,85			C
		3	7,51			60%C + 35%A
F2-AHD2-p		1	7,19	6,68	0,75/1,25	C
		2	7,43			55%C + 45%A
		3	5,43			C
F2-ALD2	RM-CS (LD)	1	5,88	10,60	3,44/4,72	D
		2	14,04			60%D + 40%C
		3	11,88			60%D + 40%A +
F2-ALD2-p		1	13,39	12,58	2,26/3,06	65%D + 35%C
		2	9,52			70%D + 30%C
		3	14,84			C

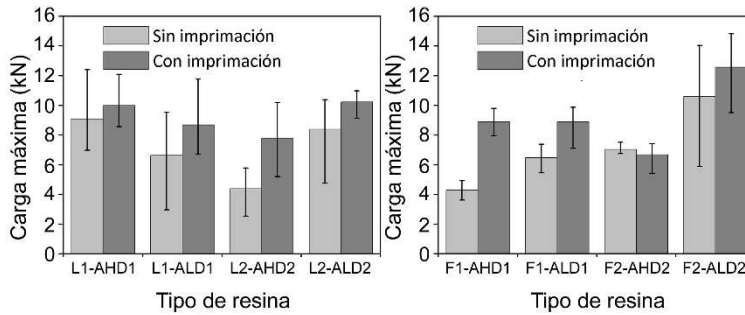


Figura 4.18. Carga media entre los tres ensayos de *pull-out*. Izq.: Laminados. Der.: Tejidos.

Laminados

En general, los resultados de carga máxima para laminados son similares tanto para SIKA[®] (L1) como para DRIZORO[®] (L2), salvo el caso del laminado de DRIZORO[®] aplicado con la resina densa RM-C y sin imprimación. En cuanto al material de SIKA[®], el 25% proporciona un modo de fallo B, el 67% de tipo C y el 8% un modo de fallo D. En el caso de DRIZORO[®] el 100% de los ensayos se clasifican en el modo de fallo B (rotura del laminado). Este hecho corrobora los resultados obtenidos en los ensayos *pull-off* en cuanto a la calidad del laminado.

Comparando los resultados obtenidos en probetas con y sin imprimación, se observa que en todos los casos la imprimación aumenta la carga máxima, siendo destacable el efecto positivo que produce la imprimación en el laminado de DRIZORO[®] con resina AHD2.

Respecto de las densidades de las distintas resinas, en las de SIKA[®] se obtienen mejores resultados para la resina AHD1 (RS-30), clasificándose en este caso el 83% de las probetas en el modo de fallo C. Pese a que todas las probetas de DRIZORO[®] tienen un fallo de tipo B, se observa una mejora notable al usar la resina ALD2. Este hecho confirma los resultados anteriores y demuestra que aunque el laminado fuese de peor calidad, esta resina mejora la adherencia CFRP-resina-madera.

Tejidos

El tejido de DRIZORO® (F2) proporciona mejores resultados que el de SIKA® (F1). El 100% de las probetas de SIKA® se clasifican como modo de fallo C. Este fallo se produce en el 50% de las probetas de DRIZORO®. El 50% restante de las probetas de DRIZORO® se clasifica como modo de fallo D, siendo además las probetas que mayores valores de carga máxima alcanzan.

De nuevo, la imprimación en este tipo de ensayos iguala o mejora la adherencia, siendo en algunos casos una mejora notable. Este es el caso del tejido de SIKA® con resina densa, en el que las probetas con imprimación alcanzan un 107% de mejora en la carga máxima con respecto de las que no tienen imprimación.

En el caso de las probetas con resinas de SIKA® sin imprimación, la resina ALD1 proporciona mejores resultados. Sin embargo, el efecto de la imprimación hace que ambas resinas proporcionen valores de carga máxima similares. Por otro lado, pese a que las probetas con la resina AHD2 obtienen resultados aceptables, la ALD2 conduce a resultados de carga muy superiores. Además, en todas las probetas de este tipo se produce rotura superficial en la madera, confirmando que este tipo de resina proporciona una adherencia madera-CFRP excelente.

4.2. Ensayos en vigas de pequeña escuadría

Una vez determinada la resina de cada casa comercial que mejor adherencia proporciona, así como la ventaja de usar una capa de imprimación, se elaboraron 42 vigas de pequeña escuadría, las cuales se ensayaron a flexión en 3 puntos. Los resultados de estos ensayos se detallan a continuación para cada configuración de refuerzo (NR, LR, UR, UR-P y BR), mostrando asimismo las curvas tensión-tiempo y tensión-deformación. Posteriormente se realiza una comparación entre las distintas disposiciones de refuerzo.

En materiales como el hormigón armado, evaluar las mejoras que aporta el refuerzo (es decir, las barras corrugadas) es relativamente sencillo debido a

la cierta homogeneidad de este material. Sin embargo, y como se ha comentado previamente, la madera (y en especial la madera antigua) es un material muy heterogéneo en términos de propiedades físicas y mecánicas. La densidad es una de las propiedades físicas que más afecta a la capacidad máxima a flexión (MOR). Una alta densidad puede asociarse a una viga con un alto contenido en resina o grandes nudos. Si estos nudos están situados en las zonas de compresión, no afectan apenas a la capacidad a flexión del elemento. Por el contrario, una baja densidad puede relacionarse con una viga afectada por humedad, grandes fendas o por agentes xilófagos. Por ello, es necesario tener en cuenta las variaciones de densidad entre las diferentes vigas. Debido a esto, se ha empleado un factor de corrección de la densidad (DC) definido de la forma:

$$DC = \frac{\rho_m}{\rho_{beam}} \quad \text{Ec. 14}$$

donde ρ_m es la densidad media de todas las vigas ensayadas a flexión y ρ_{beam} es la densidad de una viga en particular. El objetivo principal de esta corrección es el de comparar de una forma más justa las diferentes configuraciones de refuerzo. De este modo, el MOR corregido se define como

$$MOR \text{ corregido} = DC \cdot MOR \quad \text{Ec. 15}$$

donde MOR es la capacidad a flexión real obtenida en el ensayo.

Igualmente se ha realizado una clasificación de los tipos de grietas según la que se establece en [7], la cual se muestra en la Figura 4.19.

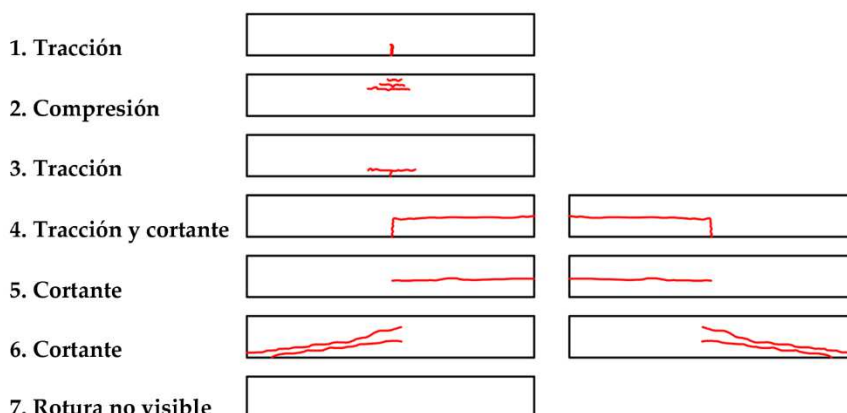


Figura 4.19. Clasificación de los tipos de fallos de una viga de madera a flexión [32].

4.2.1. Vigas sin refuerzo (NR)

La Figura 4.20 y la Tabla 4.5 muestran los resultados de tensión frente al tiempo, así como la clasificación visual, densidad, capacidad máxima a flexión (MOR), MOR corregido, módulo elástico a flexión (MOE), flecha máxima y tipo de fallo para cada viga sin refuerzo. Estas vigas se usan como especímenes de control. Se observa una clara heterogeneidad entre las distintas vigas, debido principalmente a la presencia de defectos y a las diferentes densidades de las mismas.

Tabla 4.5. Resultados mecánicos obtenidos en los ensayos a flexión de las vigas sin refuerzo (NR). Clasificación visual, MOR (capacidad máxima a flexión), densidad, MOR corregido con la densidad, MOE (módulo elástico a flexión), flecha máxima y tipo de fallo (según la clasificación de la Figura 4.19 [32]).

Nombre	Clasificación visual	MOR (MPa)	Densidad (kg/m ³)	MOR corregido (MPa)	MOE (MPa)	Flecha máxima (mm)	Tipo de fallo
NR-1	Rechazo	26	692	21	13411	10	3
NR-2	Rechazo	44	654	38	14978	19	4
NR-3	MEG	33	640	30	7508	15	5
Media NR	-	34	662	30	11966	15	

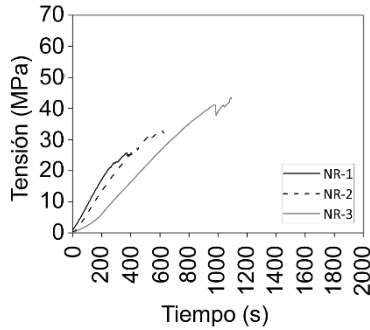


Figura 4.20. Tensión a flexión frente al tiempo de las vigas sin refuerzo (NR).

En primer lugar, se observa como la clasificación visual no es una forma del todo viable para estimar la capacidad mecánica de un elemento de madera sometido a flexión. Esto se debe, en gran parte, a la influencia de la posición de los nudos, un aspecto que no contempla el método de clasificación visual. La viga NR-2 por ejemplo, clasificada como Rechazo, tuvo un MOR corregido un 27% mayor que la viga NR-3, clasificada como MEG. La Figura 4.21 muestra imágenes de la rotura frágil de este tipo de vigas, la cual se produce por tensiones de tracción o cortante. En concreto, la viga NR-1 claramente falla en la zona de tracciones debido al gran nudo de 150 mm de diámetro situado en el centro de la viga. En el caso de la viga NR-3, el nudo se encuentra situado en la zona de compresiones y alejado del centro, por lo que no afecta negativamente a la capacidad a flexión de la viga.



Figura 4.21. Imágenes de las roturas de las vigas del grupo NR. Arriba: NR-1. Abajo: NR-3.

La Figura 4.22 muestra la tensión a flexión frente a las deformaciones medidas por las galgas extensiométricas situadas en el centro de la viga. Los resultados muestran una gran dispersión entre las deformaciones medidas,

debido a la presencia de nudos o defectos cercanos a la posición de las galgas, y a la heterogeneidad de la madera. Como consecuencia, la galga -A de las vigas NR-1 y NR-2 no pudo medir adecuadamente las deformaciones. En el caso de la viga NR-3, pese a tener una baja desviación de la fibra, las deformaciones medidas se ven altamente afectadas por el gran nudo que se observa en la Figura 4.21.

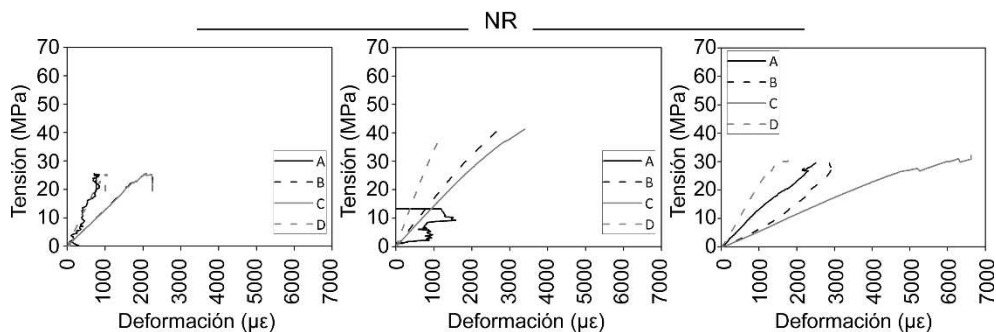


Figura 4.22. Tensión frente a la deformación medida durante los ensayos a flexión del grupo NR. Izq.: NR-1. Centro: NR-2. Der.: NR-3.

4.2.2. Vigas con refuerzo longitudinal con laminado (LR)

Se estudiaron dos anchos diferentes de CFRP, 45 y 75 mm (LR-P y LR-F, respectivamente). En primer lugar se presentan los resultados mecánicos de las vigas elaboradas con materiales de SIKKA[®] (-S) y posteriormente las elaboradas con materiales de DRIZORO[®] (-D). La Tabla 4.6 y la Figura 4.23 muestran los resultados mecánicos para el caso de SIKKA[®]. Además, en la tabla se incluye la media de cada grupo y la variación en % con respecto a las vigas sin refuerzo (NR).

Tabla 4.6. Resultados mecánicos obtenidos en los ensayos a flexión de las vigas con refuerzo longitudinal con laminado (LR). Clasificación visual, MOR (capacidad máxima a flexión), densidad, MOR corregido con la densidad, MOE (módulo elástico a flexión), flecha máxima y tipo de fallo (según la clasificación de la Figura 4.19 [32]).
Casa comercial: SIKA®.

Nombre	Clasificación visual	MOR (MPa)	Densidad (kg/m ³)	MOR corregido (MPa)	MOE (MPa)	Flecha máxima (mm)	Tipo de fallo
LR-P-S-1	Rechazo	31	476	38	11824	14	6
LR-P-S-2	Rechazo	29	486	34	8417	16	6
LR-P-S-3	Rechazo	31	497	36	14912	10	6
Media LR-P-S	-	30	486	36	11718	13	
Variación respecto NR (%)		-11		20	-2	-10	
LR-F-S-1	Rechazo	45	588	44	14017	14	5
LR-F-S-2	MEG	50	594	48	16890	18	5
LR-F-S-3	Rechazo	37	718	29	22812	16	6
Media LR-F-S	-	44	633	41	17096	16	
Variación respecto NR (%)		29		36	50	9	

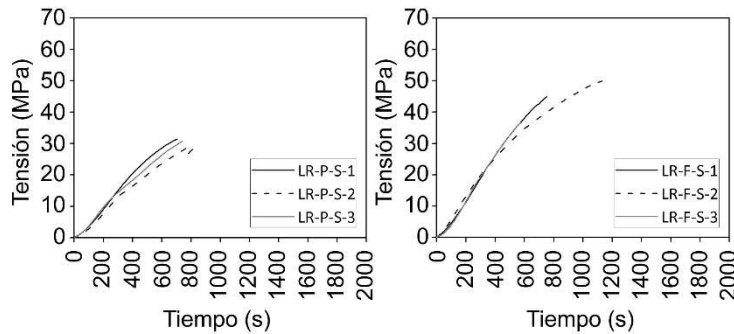


Figura 4.23. Tensión a flexión frente al tiempo de las vigas con refuerzo longitudinal con laminado (LR). Casa comercial: SIKA®.

Cabe mencionar que, de forma general el refuerzo en ambos grupos mejora la capacidad mecánica en comparación con las vigas sin refuerzo. Con respecto a las vigas LR-P-S, se comprueba el efecto del factor corrector de densidad, debido a que las tres vigas tienen una densidad de hasta 176 kg/m³ menor que las vigas sin refuerzo. Una vez que se aplica dicha corrección, la mejora del MOR corregido con respecto de las vigas NR es de un 20% de

media. En cuanto al MOE y la flecha máxima, ambas son menores que en las vigas sin refuerzo, debido principalmente a la presencia de carcoma y defectos.

Por otro lado, con el refuerzo LR-F-S se consigue una mejora del 36% del MOR corregido (respecto de las vigas sin refuerzo), así como mejoras de un 50% y 9% para el MOE y la flecha máxima, respectivamente. La viga LR-F-S-3 tiene un gran incremento en su rigidez, debido principalmente a su elevada densidad (un 22% mayor que la viga con menor densidad de su grupo). La Figura 4.24 muestra imágenes de los tipos de rotura para las vigas LR-P-S y LR-F-S, las cuales son mayormente por cortante.



Figura 4.24. Imágenes de las roturas de las vigas del grupo LR. Arriba: LR-P-S-1. Centro: LR-F-S-2. Abajo: LR-F-S-3. Casa comercial: SIKA®.

Por último, en la Figura 4.25 se presenta el análisis de las deformaciones. La alta estabilización de las deformaciones debido al refuerzo es evidente, especialmente en las galgas situadas en las caras laterales. Estas galgas se encuentran directamente en la madera, con defectos a su alrededor. El refuerzo LR-F-S aporta un mayor MOR en comparación con el LR-P-S (como era de esperar debido al mayor % de CFRP). Además la rigidez sufre un incremento notable para el refuerzo LR-F-S. Esto se traduce en que para la misma carga, la diferencia en deformaciones que tiene que absorber la resina epoxi es mayor para la disposición LR-F-S, debido a las diferencias

entre la rigidez de la madera y el CFRP, por lo que es más vulnerable a la delaminación CFRP-madera. Desde el punto de vista económico, es importante tener en cuenta que la solución LR-P ahorra un 40% del material de refuerzo en comparación con la disposición LR-F.

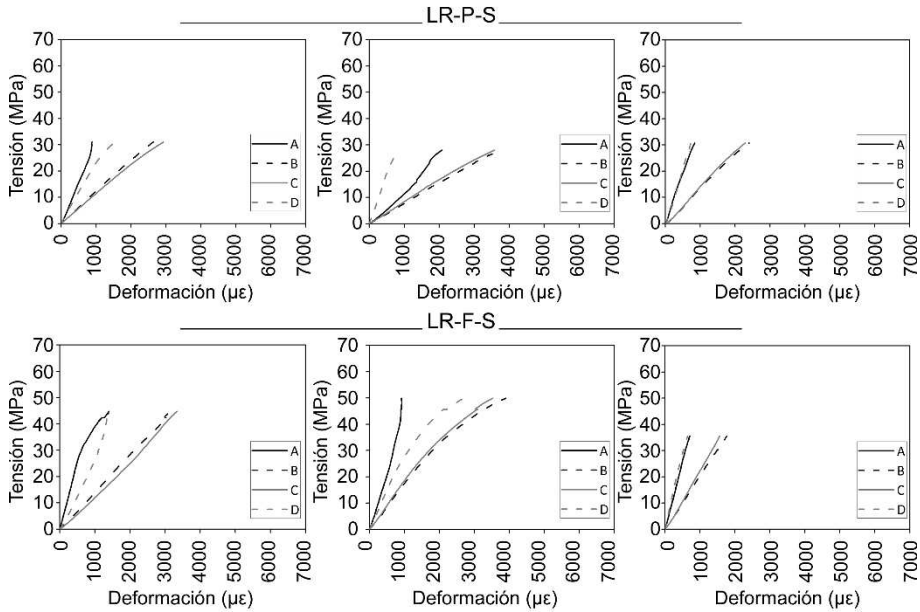


Figura 4.25. Tensión frente a la deformación medida durante los ensayos a flexión del grupo LR. Arriba-Izq.: LR-P-S-1. Arriba-Centro: LR-P-S-2. Arriba-Der.: LR-P-S-3.

Abajo-Izq.: LR-F-S-1. Abajo-Centro: LR-F-S-2. Abajo-Der.: LR-F-S-3. Casa comercial: SIKA®.

Se presentan ahora los resultados obtenidos con los productos de DRIZORO®, denominados en este caso LR-P-D y LR-F-D. La Tabla 4.7 muestra los resultados mecánicos de la clasificación visual, densidad, MOR y MOR corregido, módulo elástico (MOE), flecha máxima y tipo de fallo. La Figura 4.26 representa los resultados de tensión a flexión frente al tiempo.

Tabla 4.7. Resultados mecánicos obtenidos en los ensayos a flexión de las vigas con refuerzo longitudinal con laminado (LR). Clasificación visual, MOR (capacidad máxima a flexión), densidad, MOR corregido con la densidad, MOE (módulo elástico a flexión), flecha máxima y tipo de fallo (según la clasificación de la Figura 4.19 [32]). Casa comercial: DRIZORO®.

Nombre	Clasificación visual	MOR (MPa)	Densidad (kg/m ³)	MOR corregido (MPa)	MOE (MPa)	Flecha máxima (mm)	Tipo de fallo
LR-P-D-1	MEG	33	521	36	14096	16	5
LR-P-D-2	Rechazo	52	695	43	12281	21	6
LR-P-D-3	MEG	65	781	48	24397	16	5
Media LR-P-D	-	50	666	42	16925	18	
Variación respecto NR (%)		47		43	41	21	
LR-F-D-1	MEG	46	594	45	13186	16	6
LR-F-D-2	MEG	31	536	33	15617	13	6
LR-F-D-3	Rechazo	33	463	41	14375	19	6
Media LR-F-D	-	37	531	40	14393	16	
Variación respecto NR (%)		8		33	20	8	

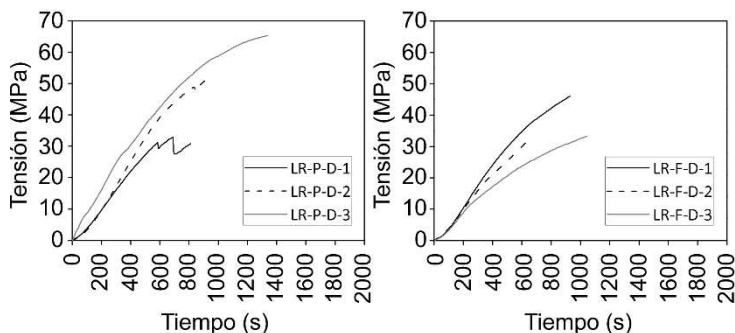


Figura 4.26. Tensión a flexión frente al tiempo de las vigas con refuerzo longitudinal con laminado (LR). Casa comercial: DRIZORO®.

Como se muestra en la Figura 4.26, de nuevo la capacidad mecánica mejora para todos los casos con respecto de las vigas sin refuerzo, obteniéndose resultados similares que para los productos SIKA®. La mejora del MOR corregido para los grupos LR-P-D y LR-F-D es del 43% y 33%, respectivamente. La mejora del MOE es del 41% y 20% y la mejora de flecha máxima del 21% y 8%, respectivamente. Para ambos grupos, el tipo de fallo

está causado por esfuerzos cortantes, como se observa en la Figura 4.27, principalmente debido a importantes nudos presentes en todos los casos.

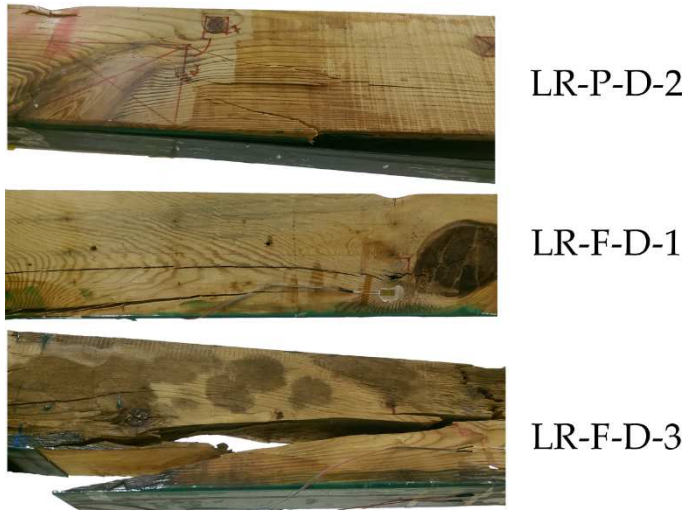


Figura 4.27. Imágenes de las roturas de las vigas del grupo LR. Arriba: LR-P-D-2. Centro: LR-F-D-1. Abajo: LR-F-D-3. Casa comercial: DRIZORO®.

La Figura 4.28 muestra los resultados del análisis de tensión frente a deformación. Del mismo modo que en las vigas LR-P-S y LR-F-S, se observa que el refuerzo LR-P-D (45 mm) proporciona una capacidad mecánica máxima similar a la del ancho completo (75 mm). Además, las vigas reforzadas con la disposición de ancho parcial alcanzan, de forma general, mayores valores de deformación para la misma tensión, siendo éste un comportamiento deseado para prevenir la delaminación CFRP-madera.

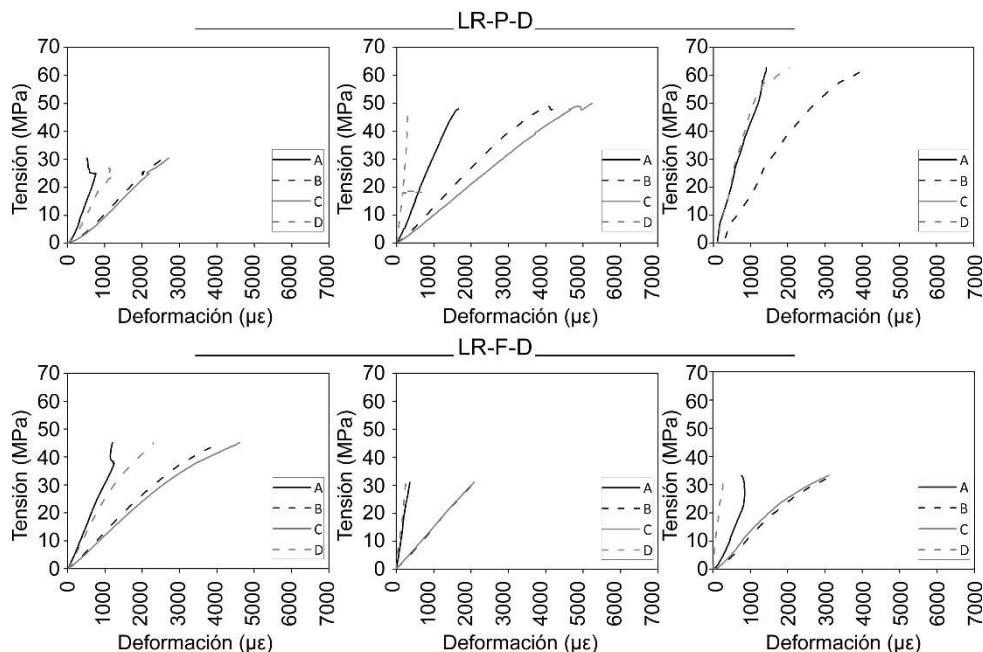


Figura 4.28. Tensión frente a la deformación medida durante los ensayos a flexión del grupo LR. Arriba-Izq.: LR-P-D-1. Arriba-Centro: LR-P-D-2. Arriba-Der.: LR-P-D-3. Abajo-Izq.: LR-F-D-1. Abajo-Centro: LR-F-D-2. Abajo-Der.: LR-F-D-3. Casa comercial: DRIZORO®.

4.2.3. Refuerzo con tejido en forma de U (UR)

El uso de tejidos para envolver el elemento de madera tiene un gran interés práctico, gracias a su facilidad para adaptarse a formas complejas que comúnmente se encuentran en construcciones antiguas de madera. Sin embargo, este tipo de refuerzo envolviendo a la viga con tejido de CFRP en forma de U no siempre puede ser utilizado en la práctica. Esto es debido a que las caras laterales no son siempre accesibles, por ello, el tejido es mucho más utilizado en el refuerzo de pilares.

Para esta disposición de refuerzo, se consideraron dos tipos de tejidos, unidireccional y bidireccional (UR-U y UR-B, respectivamente). SIKAR® no tiene entre sus productos tejido bidireccional, por lo que únicamente se utilizó el de DRIZORO®. La Tabla 4.8 presenta los resultados mecánicos indicando la variación de los mismos con respecto de las vigas NR. La Figura

4.29 muestra los resultados de tensión a flexión frente al tiempo para los refuerzos de ambas marcas comerciales.

Tabla 4.8. Resultados mecánicos obtenidos en los ensayos a flexión de las vigas con refuerzo de tejido (UR). Clasificación visual, MOR (capacidad máxima a flexión), densidad, MOR corregido con la densidad, MOE (módulo elástico a flexión), flecha máxima y tipo de fallo (según la clasificación de la Figura 4.19 [32]).

Nombre	Clasificación visual	MOR (MPa)	Densidad (kg/m ³)	MOR corregido (MPa)	MOE (MPa)	Flecha máxima (mm)	Tipo de fallo
UR-U-S-1	MEG	56	538	59	10351	26	6
UR-U-S-2	Rechazo	37	547	39	11526	27	6
UR-U-S-3	Rechazo	40	539	43	11474	19	6
Media UR-U-S	-	44	541	47	11117	24	
Variación respecto NR (%)		30		59	-7	62	
UR-U-D-1	MEG	48	553	50	10374	28	6
UR-U-D-2	Rechazo	57	606	54	13294	21	6
UR-U-D-3	Rechazo	52	539	56	13482	21	6
Media UR-U-D	-	52	566	53	12383	23	
Variación respecto NR (%)		54		79	3	59	
UR-B-D-1	MEG	35	671	30	13503	13	6
UR-B-D-2	Rechazo	35	471	43	10301	14	6
UR-B-D-3	Rechazo	33	457	41	11261	18	4
Media UR-B-D	-	34	533	38	11688	15	
Variación respecto NR (%)		0		27	-2	3	

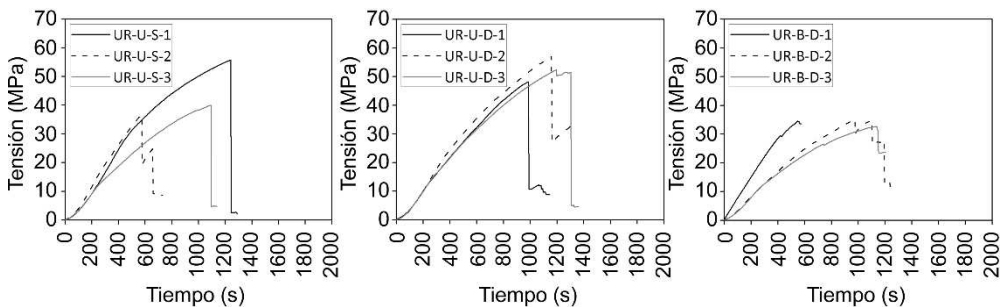


Figura 4.29. Tensión a flexión frente al tiempo de las vigas con refuerzo de tejido (UR).

Para todos los casos se observa una clara mejora en cuanto a la capacidad mecánica se refiere, en comparación con las vigas NR. Además, el tejido de CFRP confiere al elemento de madera un comportamiento dúctil o, dicho de otro modo, el elemento no falla de una forma frágil. Esta es la mayor diferencia con respecto del refuerzo LR, la cual es de enorme interés práctico.

Las vigas reforzadas con tejido unidireccional (UR-U) mejoran el MOR corregido en un 59% para el material de SIKAR[®] y un 79% para el de DRIZORO[®]. El MOE medio no presenta un incremento considerable, siendo inferior al conseguido con la disposición LR. Por contra, se observa un notable incremento en la flecha máxima (62% y 59% para productos SIKAR[®] y DRIZORO[®], respectivamente). En términos generales, los refuerzos UR-U-S- y UR-U-D muestran un comportamiento mecánico similar, sin diferencias significativas entre ambos suministradores de CFRP.

El tejido bidireccional no aporta una gran mejora en cuanto a propiedades mecánicas se refiere, con un incremento del MOR corregido del 27% con respecto de las vigas sin refuerzo. Las variaciones del MOE y flecha máxima son mínimas. En este tipo de vigas, todos los fallos son clasificados como fallos a cortante. En la Figura 4.30 se muestran algunos ejemplos.

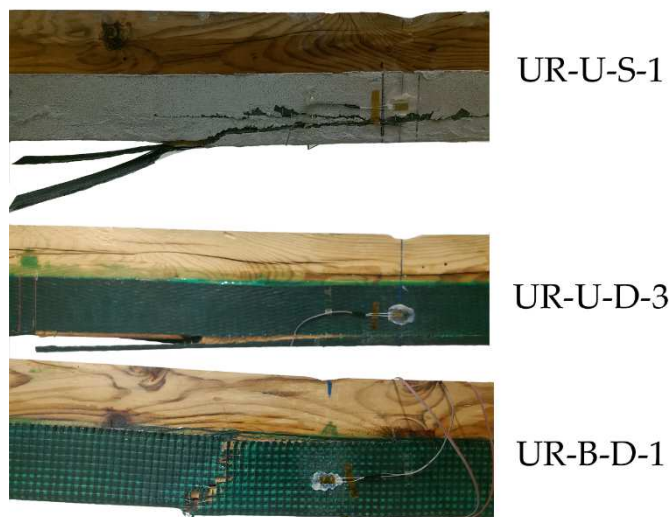


Figura 4.30. Imágenes de las roturas de las vigas del grupo UR. Arriba: UR-U-S-1. Centro: UR-U-D-3. Abajo: UR-B-D-1.

En las Figuras 4.31 y 4.32 se presentan los resultados del análisis de deformaciones. Es importante remarcar de nuevo la gran adaptación del tejido de CFRP con las deformaciones de la madera. Esta cualidad es de gran interés, debido a que permite que ambos materiales trabajen de forma conjunta, haciendo que la resina no tenga que absorber grandes diferencias en deformaciones.

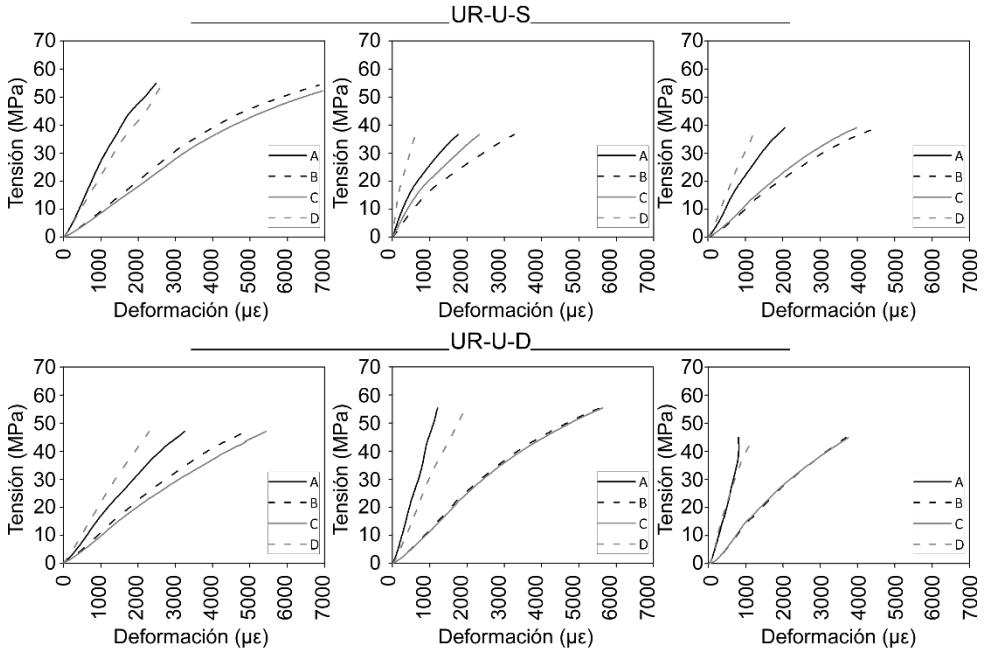


Figura 4.31. Tensión frente a la deformación medida durante los ensayos a flexión del grupo UR. Tejido unidireccional. Arriba-Izq.: UR-U-S-1. Arriba-Centro: UR-U-S-2. Arriba-Der.: UR-U-S-3. Abajo-Izq.: UR-U-D-1. Abajo-Centro: UR-U-D-2. Abajo-Der.: UR-U-D-3.

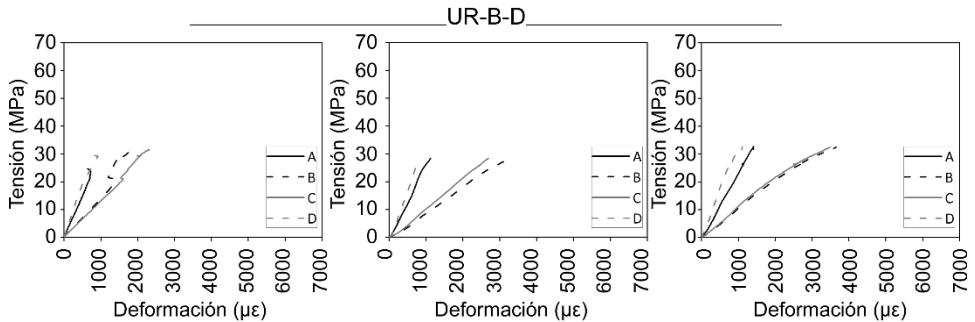


Figura 4.32. Tensión frente a la deformación medida durante los ensayos a flexión del grupo UR. Tejido bidireccional. Izq.: UR-B-D-1. Centro: UR-B-D-2. Der.: UR-B-D-3.

4.2.4. Refuerzo mixto con tejido y laminado. Refuerzo continuo (UR-P)

En este Apartado se presentan los resultados del refuerzo mixto continuo con tejido y laminado. Este refuerzo consiste básicamente en una lámina de ancho parcial de CFRP colocada en la cara inferior de la viga (cara de máximas tracciones), cubierta por tejido de CFRP en forma de U. Del mismo modo que para el grupo UR, se usó tejido unidireccional y bidireccional. La Tabla 4.9 y la Figura 4.33 muestran los resultados mecánicos para esta configuración de refuerzo.

Tabla 4.9. Resultados mecánicos obtenidos en los ensayos a flexión de las vigas con refuerzo mixto continuo (UR-P). Clasificación visual, MOR (capacidad máxima a flexión), densidad, MOR corregido con la densidad, MOE (módulo elástico a flexión), flecha máxima y tipo de fallo (según la clasificación de la Figura 4.19 [32]).

Nombre	Clasificación visual	MOR (MPa)	Densidad (kg/m ³)	MOR corregido (MPa)	MOE (MPa)	Flecha máxima (mm)	Tipo de fallo
UR-P-U-S-1	Rechazo	47	464	58	14868	30	6
UR-P-U-S-2	Rechazo	59	529	64	14215	17	6
UR-P-U-S-3	MEG	59	629	54	13045	30	6
Media UR-P-U-S	-	55	541	59	14043	26	
Variación respecto NR (%)		61		97	17	75	
UR-P-U-D-1	Rechazo	44	543	46	11783	28	4
UR-P-U-D-2	Rechazo	48	695	40	17715	22	2
UR-P-U-D-3	MEG	55	686	46	15940	18	6
Media UR-P-U-D	-	49	641	44	15146	23	
Variación respecto NR (%)		43		48	27	54	
UR-P-B-D-1	MEG	59	522	65	12994	23	6
UR-P-B-D-2	Rechazo	45	514	50	17746	21	5
UR-P-B-D-3	Rechazo	39	525	43	12889	15	4
Media UR-P-B-D	-	48	520	53	14543	20	
Variación respecto NR (%)		40		77	22	33	

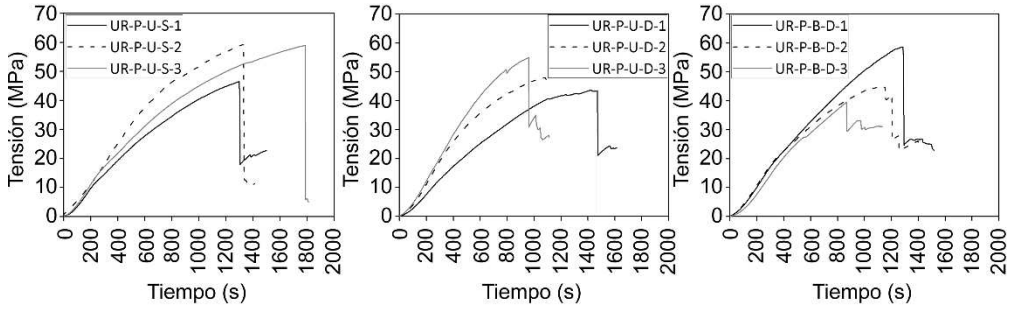


Figura 4.33. Tensión a flexión frente al tiempo de las vigas con refuerzo mixto continuo (UR-P).

De nuevo, se observan mejoras claras en términos de sus propiedades mecánicas. Además, todas las vigas de esta configuración muestran un claro comportamiento dúctil. Esto confirma los beneficios del uso del tejido de CFRP en combinación con un laminado de CFRP adherido en la cara de máximas tracciones del elemento de madera.

Esta disposición de refuerzo aporta además una alta estabilidad en el comportamiento mecánico de las vigas reforzadas, con una mejora del MOR corregido de un 97%, 48% y 77% para UR-P-U-S, UR-P-U-D y UR-P-B-D, respectivamente. Añadir tejido bidireccional a un elemento de madera con una lámina de CFRP contribuye claramente a la rigidez longitudinal, permitiendo la correcta absorción de esfuerzos cortantes. Este hecho se traduce directamente en una mayor capacidad mecánica a flexión. El incremento del MOE es de un 17%, 27% y 22% respectivamente, para las vigas UR-P-U-S, UR-P-U-D y UR-P-B-D. Se alcanzan mejoras en la flecha máxima de un 75%, 54% y 33%, respectivamente.

En la mayoría de los casos, el tipo de fallo sigue un patrón de rotura por cortante (Figura 4.34). Las vigas reforzadas con tejido unidireccional (UR-P-U-S y UR-P-U-D) fallaron debido a que, una vez alcanzada cierta tensión, el tejido no tenía la suficiente capacidad como para sujetar el laminado, conllevando el posterior colapso. Sin embargo, en el caso de las vigas reforzadas con tejido bidireccional (UR-P-B-D), debido a su propia distribución en dos direcciones, el tejido no solo aporta beneficios en cuanto al cortante, sino que también lo hace en la sujeción del laminado. Este doble

aporte del tejido bidireccional previene el fallo por deslaminación madera-CFRP.

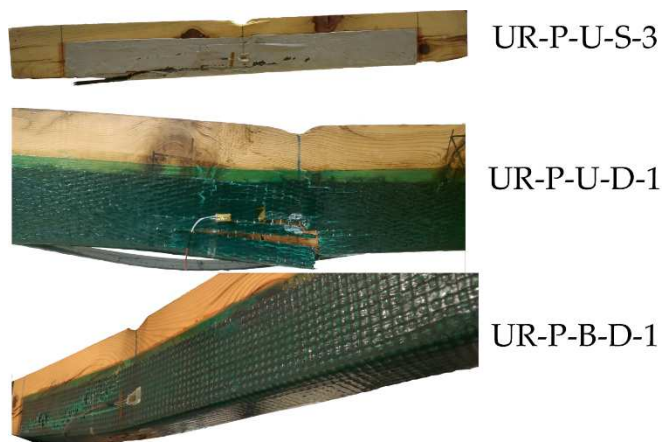


Figura 4.34. Imágenes de las roturas de las vigas del grupo UR-P. Arriba: UR-P-U-S-3. Centro: UR-P-U-D-1. Abajo: UR-P-B-D-1.

Las Figuras 4.35 y 4.36 muestran los resultados del análisis de deformaciones. En todos los casos, se observa una mejora tanto en rigidez como en estabilidad de deformaciones. Otro aspecto a tener en cuenta es que en la mayoría de las vigas se observa una cierta plastificación a compresión en el centro de la viga, lo que significa que el elemento estuvo cerca de su capacidad máxima a compresión. Este hecho tiene una tremenda importancia en términos de optimización del material base, la madera. Por último, no se observa una diferencia sustancial entre tejidos unidireccionales y bidireccionales, en cuanto a deformaciones máximas se refiere.

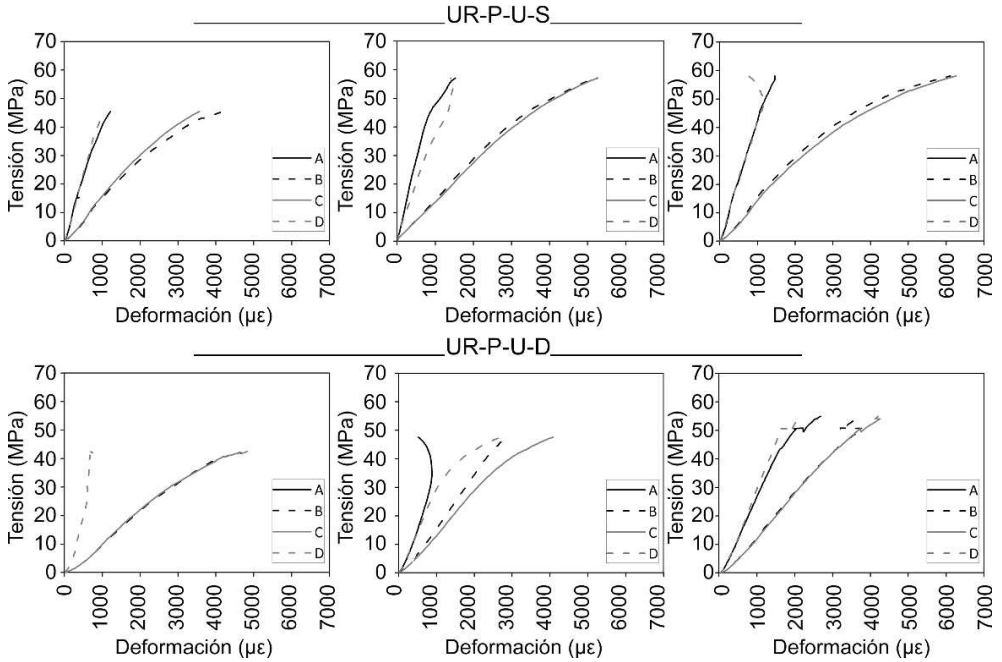


Figura 4.35. Tensión frente a la deformación medida durante los ensayos a flexión del grupo UR-P. Tejido unidireccional. Arriba-Izq.: UR-P-U-S-1. Arriba-Centro: UR-P-U-S-2. Arriba-Der.: UR-P-U-S-3. Abajo-Izq.: UR-P-U-D-1. Abajo-Centro: UR-P-U-D-2. Abajo-Der.: UR-P-U-D-3.

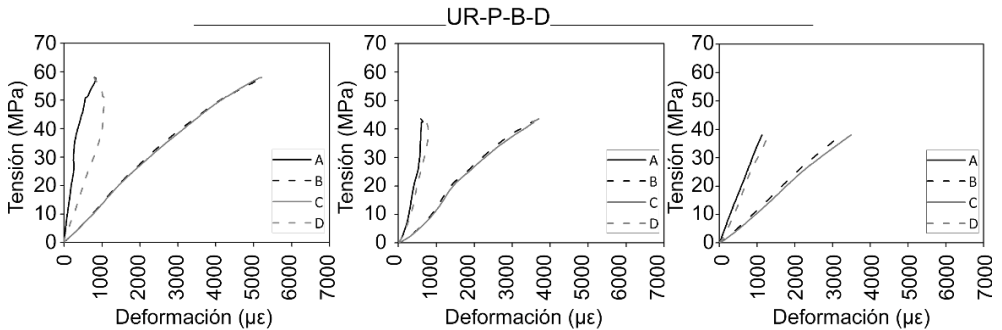


Figura 4.36. Tensión frente a la deformación medida durante los ensayos a flexión del grupo UR. Tejido bidireccional. Izq.: UR-P-B-D-1. Centro: UR-P-B-D-2. Der.: UR-P-B-D-3.

4.2.5. Refuerzo mixto con tejido y laminado. Refuerzo trenzado (BR)

Por último, se presentan los resultados del refuerzo mixto trenzado. La diferencia entre esta disposición y la tratada en el Apartado anterior, es que

en este caso el tejido se coloca discontinuamente. La Tabla 4.10 y la Figura 4.37 muestran los resultados mecánicos para esta configuración.

Tabla 4.10. Resultados mecánicos obtenidos en los ensayos a flexión de las vigas con refuerzo trenzado (BR). Clasificación visual, MOR (capacidad máxima a flexión), densidad, MOR corregido con la densidad, MOE (módulo elástico a flexión), flecha máxima y tipo de fallo (según la clasificación de la Figura 4.19 [32]).

Nombre	Clasificación visual	MOR (MPa)	Densidad (kg/m ³)	MOR corregido (MPa)	MOE (MPa)	Flecha máxima (mm)	Tipo de fallo
BR-U-S-1	MEG	50	578	50	14360	21	6
BR-U-S-2	Rechazo	43	692	36	18807	17	6
BR-U-S-3	Rechazo	38	463	47	12611	20	6
Media BR-U-S		44	578	44	15259	19	
Variación respecto NR (%)		28		49	28	31	
BR-U-D-1	MEG	41	688	34	16871	23	6
BR-U-D-2	Rechazo	46	521	51	18492	25	4
BR-U-D-3	Rechazo	33	429	44	18657	20	4
Media BR-U-D		40	546	43	18006	23	
Variación respecto NR (%)		18		45	50	53	
BR-B-D-1	MEG	58	550	61	13440	27	6
BR-B-D-2	Rechazo	43	628	39	17592	19	6
BR-B-D-3	Rechazo	54	628	49	16875	23	4
Media BR-B-D		52	602	50	15969	23	
Variación respecto NR (%)		52		68	33	57	

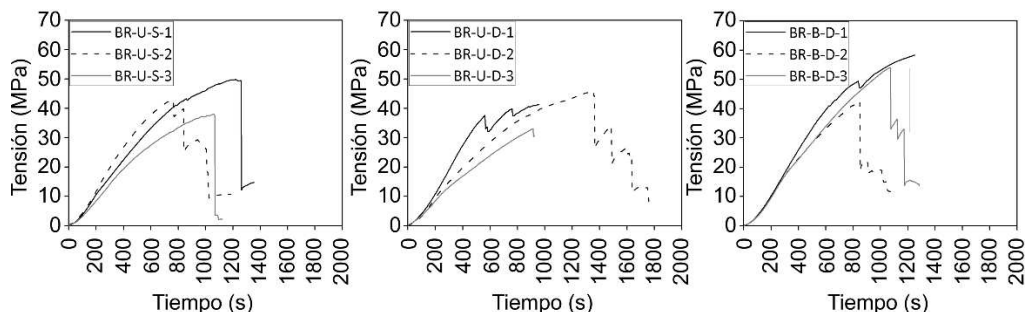


Figura 4.37. Tensión a flexión frente al tiempo de las vigas con refuerzo trenzado (BR).

Respecto de las vigas sin refuerzo, de nuevo se consigue una mejora notable en las propiedades mecánicas. Como ocurre con la disposición continua, las vigas reforzadas con esta configuración mixta trenzada muestran un comportamiento dúctil más marcado. Esto puede deberse a que la separación entre tejidos les permite trabajar mejor en movimientos transversales, así como conseguir una mejor adaptabilidad entre la madera y el refuerzo, ante esfuerzos de cortante y flexión.

Otro aspecto a tener en cuenta en este tipo de refuerzo con respecto a su homólogo continuo es el ahorro del material, ya que se usa un 50% menos de tejido. El MOR corregido tiene un incremento del 49%, 45% y 68% para las vigas BR-U-S, BR-U-D y BR-B-D, respectivamente. El MOE, con valores algo mayores a la disposición UR-P, sufre una mejora de un 28%, 59% y 33% respectivamente, para los grupos BR-U-S, BR-U-D y BR-B-D. La flecha máxima alcanza un incremento del 31%, 53% y 57%, respectivamente, con valores similares a la solución UR-P.

La Figura 4.38 muestra algunos ejemplos de los fallos para las vigas con refuerzo trenzado. Básicamente el patrón de fallo es similar al de las vigas con refuerzo continuo, con la diferencia de que la comentada separación permite que aunque una tira o pieza de tejido transversal falle, las colindantes sean capaces de absorber los esfuerzos cortantes y de sujetar el laminado hasta una cierta carga. Este hecho es clave para prevenir al máximo la deslaminación CFRP-madera y por lo tanto la rotura frágil del elemento. En términos constructivos, esta solución dota al elemento de una mayor seguridad estructural que el resto de configuraciones de refuerzo analizadas anteriormente.

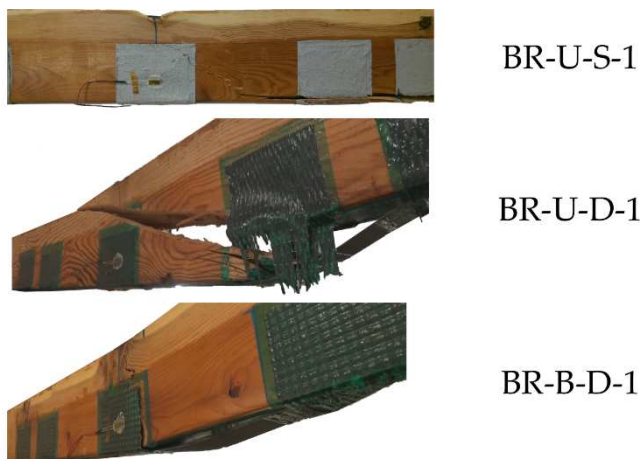


Figura 4.38. Imágenes de las roturas de las vigas del grupo BR. Arriba: BR-U-S-1. Centro: BR-U-D-1. Abajo: BR-B-D-1.

Por último, en las Figuras 4.39 y 4.40 se muestra el análisis de deformaciones de las vigas BR. De nuevo se observa un aumento en la rigidez y en la estabilidad de deformaciones para todos los casos. Gran parte de las vigas experimentan plastificación en la zona de compresiones, significando que la madera casi agota toda su capacidad mecánica a compresión. Este hecho confirma los grandes beneficios de las soluciones mixtas, permitiendo que el material base pueda trabajar completamente, evitando así su infrauso. Tanto el tejido unidireccional como bidireccional proporcionan valores de deformación similares entre sí y similares a la configuración de refuerzo UR-P.

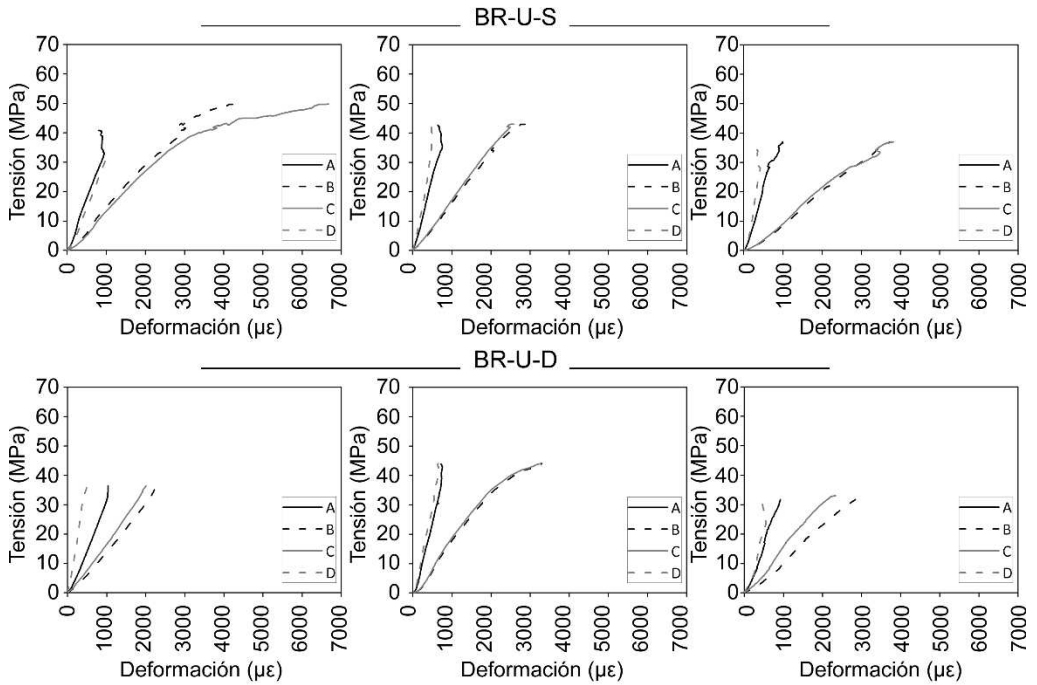


Figura 4.39. Tensión frente a la deformación medida durante los ensayos a flexión del grupo BR. Tejido unidireccional. Arriba-Izq.: BR-U-S-1. Arriba-Centro: BR-U-S-2. Arriba-Der.: BR-U-S-3. Abajo-Izq.: BR-U-D-1. Abajo-Centro: BR-U-D-2. Abajo-Der.: BR-U-D-3.

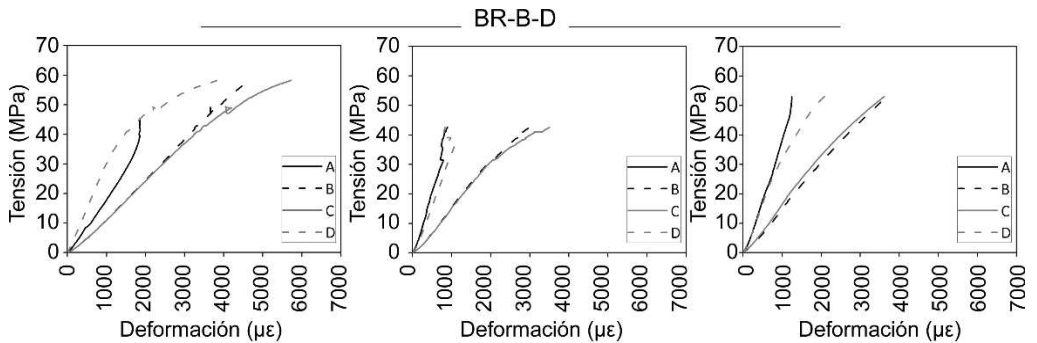


Figura 4.40. Tensión frente a la deformación medida durante los ensayos a flexión del grupo BR. Tejido bidireccional. Izq.: BR-B-D-1. Centro: BR-B-D-2. Der.: BR-B-D-3.

4.3. Ensayos en vigas de gran escuadría sin rotura previa

Se recogen en esta Sección los resultados de la primera fase de ensayos a flexión sobre diez vigas de gran escuadría sin rotura previa. Para ello se seleccionaron dos configuraciones de refuerzo:

- **Refuerzo longitudinal LR:** Este grupo se escogió debido a que es la configuración más comúnmente usada. Además, se dispuso un laminado de ancho parcial (100 mm), cubriendo proporcionalmente el mismo ancho que para las vigas pequeñas. En particular, se reforzaron cuatro vigas, dos con materiales SIKA[®] (-S) y dos con materiales DRIZORO[®] (-D).
- **Refuerzo trenzado BR:** Este refuerzo se seleccionó por los buenos resultados proporcionados para vigas de pequeña escuadría, especialmente en cuanto a ductilidad y ahorro de material. Se reforzaron cuatro vigas, dos con materiales SIKA[®] (-S) y dos con materiales DRIZORO[®] (-D). En el caso de SIKA[®] se usó tejido unidireccional. En el caso de DRIZORO[®] se empleó tejido bidireccional.

Los resultados se presentan en dos partes. En primer lugar, los resultados mecánicos, y en segundo lugar los resultados de la monitorización con EA.

4.3.1. Ensayos de flexión

De igual forma que para las vigas de pequeña escuadría, se aplicó el coeficiente corrector dependiente de la densidad DC definido en la Ec. 14, usando la densidad media de las diez vigas ensayadas. Todas las vigas se clasificaron visualmente como Rechazo.

Vigas sin refuerzo (NR)

La Tabla 4.11 y Figura 4.41 presentan los resultados de clasificación visual, densidad, MOR, MOR corregido, módulo elástico a flexión (MOE), flecha máxima y tipo de fallo, así como la tensión a flexión frente al tiempo, de las dos vigas sin reforzar. Estas vigas se emplean como especímenes de control. Pese a que la densidad en ambas vigas es prácticamente la misma, se sigue observando cierta heterogeneidad en sus propiedades mecánicas.

En el caso de vigas grandes, los defectos pierden algo de relevancia en comparación con la sección de madera. Sin embargo, el MOR corregido para este grupo es de 16 MPa, ya que, pese a influir en menor proporción que en las vigas pequeñas, los nudos siguen siendo el foco de concentración de

tensiones en las zonas de tracción, produciendo una rotura prematura y frágil (Figura 4.42). El MOE medio y la flecha máxima media son de 7812 MPa y 35 mm, respectivamente.

Tabla 4.11. Resultados mecánicos obtenidos en los ensayos a flexión de las vigas sin refuerzo de gran escuadría (NR). MOR (capacidad máxima a flexión), densidad, MOR corregido con la densidad, MOE (módulo elástico a flexión), flecha máxima y tipo de fallo (según la clasificación de la Figura 4.19 [32]).

Nombre	MOR (MPa)	Densidad (kg/m ³)	MOR corregido (MPa)	MOE (MPa)	Flecha máxima (mm)	Tipo de fallo
NR-1	18	523	19	9239	35	3
NR-2	13	571	13	6384	35	4
Media NR	16	547	16	7812	35	

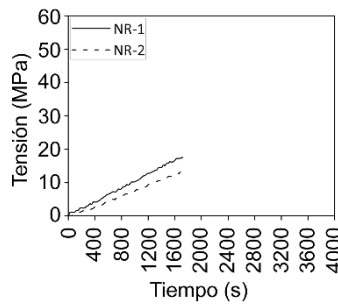


Figura 4.41. Tensión a flexión frente al tiempo de las vigas sin refuerzo de gran escuadría (NR).

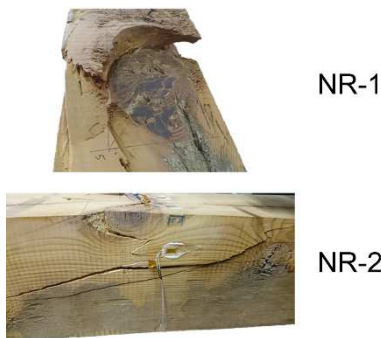


Figura 4.42. Imágenes de las roturas de las vigas sin refuerzo de gran escuadría (NR). Arriba: NR-1. Abajo: NR-2.

La Figura 4.43 muestra el análisis de deformaciones para las vigas NR. En este tipo de vigas de gran tamaño, cada viga se instrumentó con 3 grupos de galgas. El grupo 2 se situó en el centro de la viga, en la zona de máximas tracciones. Para ambas vigas y para todos los grupos de galgas se observa heterogeneidad en la medición de deformaciones, manteniéndose en todo momento en rango lineal. La galga 2B para la viga NR-2, midió deformaciones irregulares a partir de cierto estado tensional, debido principalmente a la presencia de nudos.

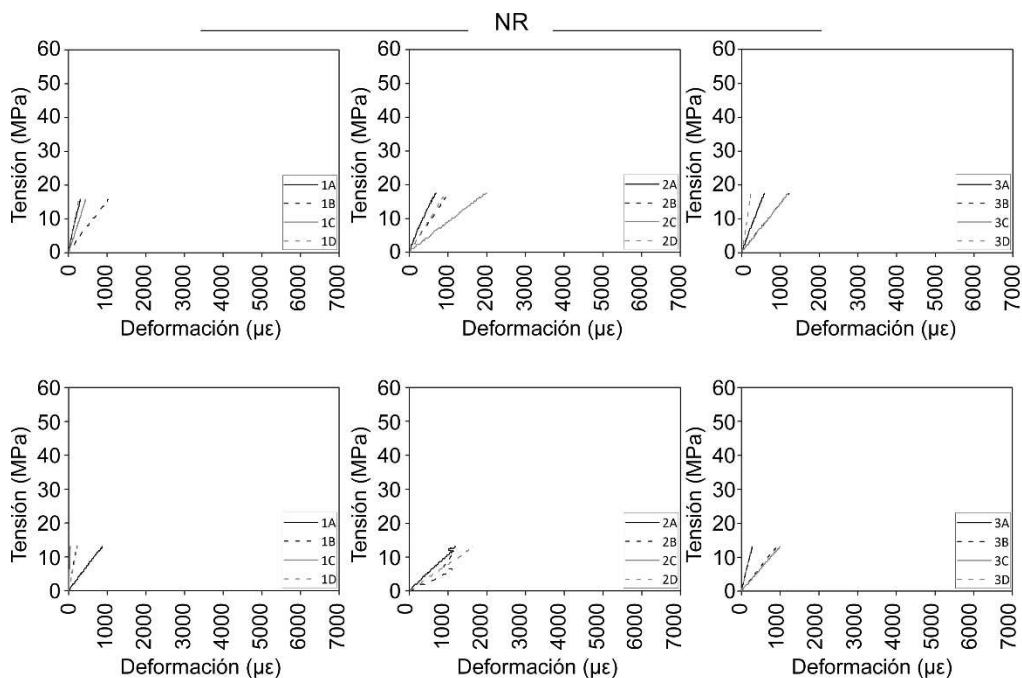


Figura 4.43. Tensión frente a la deformación medida durante los ensayos a flexión de las vigas sin refuerzo de gran escuadría (NR). Arriba: NR-1. Abajo: NR-2. Izq.: Grupo de galgas 1. Centro: Grupo de galgas 2. Der.: Grupo de galgas 3.

Vigas con refuerzo longitudinal con laminado (LR)

Los resultados mecánicos de las vigas con refuerzo longitudinal LR se muestran en la Tabla 4.12 y la Figura 4.44. Se presentan los resultados para los materiales de SIKA® y para los materiales de DRIZORO®, así como la variación en % de las diferentes propiedades mecánicas con respecto de las vigas NR.

Tabla 4.12. Resultados mecánicos obtenidos en los ensayos a flexión de las vigas con refuerzo longitudinal de gran escuadría (LR). MOR (capacidad máxima a flexión), densidad, MOR corregido con la densidad, MOE (módulo elástico a flexión), flecha máxima y tipo de fallo (según la clasificación de la Figura 4.19 [32]).

Nombre	MOR (MPa)	Densidad (kg/m ³)	MOR corregido (MPa)	MOE (MPa)	Flecha máxima (mm)	Tipo de fallo
LR-S-1	56	572	54	15393	75	4
LR-S-2	33	579	32	12534	50	4
Media LR-S	45	576	43	13964	63	
Variación respecto NR (%)	181		169	79	80	
LR-D-1	34	562	34	13483	63	4
LR-D-2	35	521	37	11559	56	4
Media LR-D	35	542	35	12521	60	
Variación respecto NR (%)	119		119	60	71	

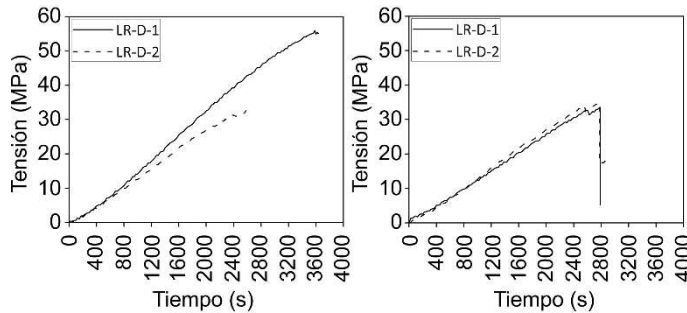


Figura 4.44. Tensión a flexión frente al tiempo de las vigas con refuerzo longitudinal de gran escuadría (LR). Izq.: Casa comercial: SIKA®. Der.: Casa comercial: DRIZORO®.

En el caso de vigas de gran escuadría reforzadas con un laminado de CFRP de ancho parcial, se observa la clara mejora sobre la capacidad a flexión en ambas vigas. Además, de forma general se observa una estabilización en cuanto a las propiedades mecánicas y comportamiento en comparación con las vigas sin reforzar. Es importante destacar la alta capacidad a flexión que alcanza la viga LR-S-1. Tras la inspección visual, se observó que esta viga apenas tenía nudos en las zonas de máxima sollicitación a tracción (al contrario que las tres restantes del grupo LR). Los motivos de rechazo fueron

principalmente los nudos situados en zonas que durante el ensayo a flexión se encontraban a compresión. Este hecho confirma, una vez más, que la clasificación visual no es un buen método para evaluar la resistencia a flexión de un elemento de madera. El MOR corregido tiene un incremento del 169% y del 119% para las vigas con productos SIKA® y DRIZORO®, respectivamente, con respecto de las vigas NR. El MOE presenta una mejora del 79% y 60%, respectivamente. En cuanto a la flecha máxima, para SIKA® y DRIZORO® se alcanza una mejora del 80% y 71%, respectivamente. Las Figuras 4.45 y 4.46 muestran las roturas de las vigas del grupo LR. Todas las vigas presentan un comportamiento frágil ante rotura, con el fallo final provocado por tensiones a cortante. Como diferencia principal entre casas comerciales, se observa que la deslaminación en las vigas reforzadas con productos SIKA® se produce desde el inicio de la grieta en la cara inferior hasta el final del refuerzo (zona de apoyos inferiores). Sin embargo, para los productos de DRIZORO®, la deslaminación se produce en la zona central (con mayor o menor longitud), pero sin que en los extremos se llegue a despegar de la madera, teniendo lugar un deslizamiento del laminado en estas zonas.

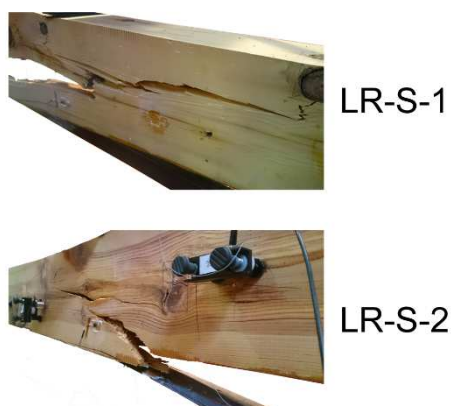


Figura 4.45. Imágenes de las roturas de las vigas con refuerzo longitudinal de gran escuadría (LR). Arriba: LR-S-1. Abajo: LR-S-2. Casa comercial: SIKA®.

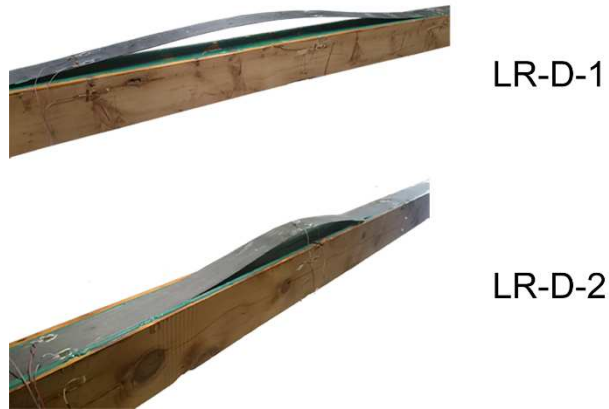


Figura 4.46. Imágenes de las roturas de las vigas con refuerzo longitudinal de gran escuadría (LR). Arriba: LR-D-1. Abajo: LR-D-2. Casa comercial: DRIZORO®.

Se observa que las deformaciones del grupo LR son altas (Figuras 4.47 y 4.48). Además, se produce un aumento de rigidez en todos los grupos de galgas, en especial en las galgas del grupo 2.

Por otro lado, se observa una estabilización en el comportamiento en deformaciones en las zonas libres de nudos, al menos hasta los valores que alcanzan las vigas NR. Es importante resaltar cierta plastificación a compresión en la viga LR-S-1 (grupo 2, galgas B y C), debido a la alta capacidad a flexión que alcanza y de la inexistencia de nudos en las zonas de máximas tracciones. Para el resto de las vigas, en el grupo 2 se comprueba como las deformaciones a partir de cierto estado tensional divergen, debido a la presencia de nudos cercanos.

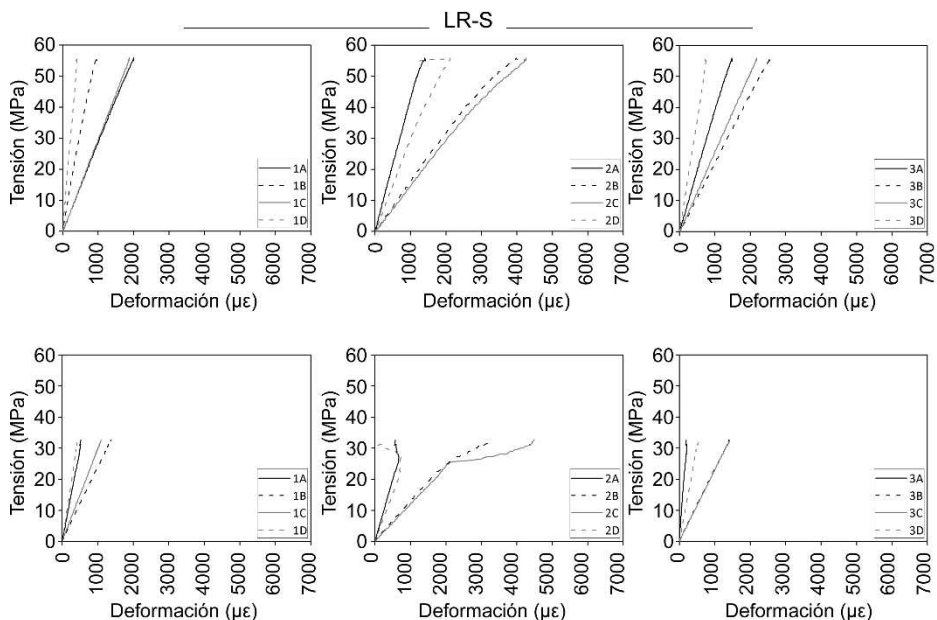


Figura 4.47. Tensión frente a la deformación medida durante los ensayos a flexión de las vigas con refuerzo longitudinal de gran escuadría (LR). Arriba: LR-S-1. Abajo: LR-S-2. Izq.: Grupo de galgas 1. Centro: Grupo de galgas 2. Der.: Grupo de galgas 3. Casa comercial: SIKA®.

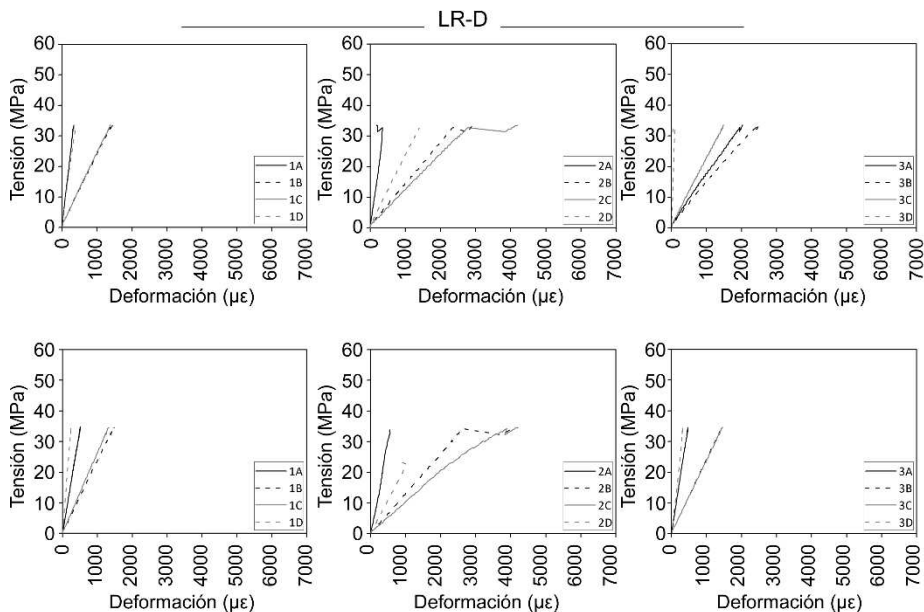


Figura 4.48. Tensión frente a la deformación medida durante los ensayos a flexión de las vigas con refuerzo longitudinal de gran escuadría (LR). Arriba: LR-D-1. Abajo: LR-D-2. Izq.: Grupo de galgas 1. Centro: Grupo de galgas 2. Der.: Grupo de galgas 3. Casa comercial: DRIZORO®.

Vigas con refuerzo trenzado (BR)

En la Tabla 4.13 y la Figura 4.49 se presentan los resultados mecánicos y la tensión a flexión frente al tiempo de las vigas con refuerzo trenzado (BR), tanto para productos SIKA® como DRIZORO®. Este tipo de refuerzo presenta una mayor estabilidad en cuanto a las propiedades mecánicas, en comparación con los grupos LR y NR.

Tabla 4.13. Resultados mecánicos obtenidos en los ensayos a flexión de las vigas con refuerzo trenzado de gran escuadría (BR). MOR (capacidad máxima a flexión), densidad, MOR corregido con la densidad, MOE (módulo elástico a flexión), flecha máxima y tipo de fallo (según la clasificación de la Figura 4.19 [32]).

Nombre	MOR (MPa)	Densidad (kg/m ³)	MOR corregido (MPa)	MOE (MPa)	Flecha máxima (mm)	Tipo de fallo
BR-S-1	41	563	40	12606	80	6
BR-S-2	47	523	50	13296	68	6
Media BR-S	44	543	45	12951	74	
Variación respecto NR (%)	175		181	66	111	
BR-D-1	43	469	50	16858	60	4
BR-D-2	38	658	32	14132	59	6
Media BR-D	41	564	41	15495	60	
Variación respecto NR (%)	156		156	98	70	

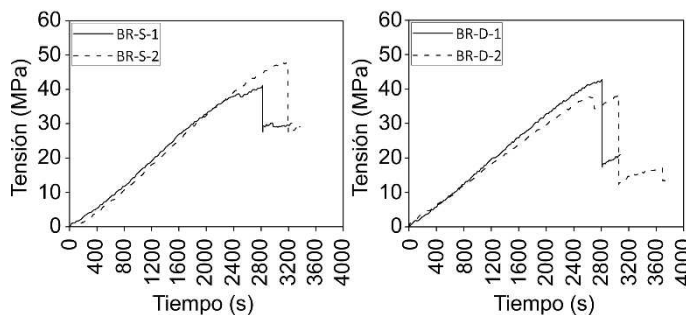


Figura 4.49. Tensión a flexión frente al tiempo de las vigas con refuerzo trenzado de gran escuadría (BR). Izq.: Casa comercial: SIKA®. Der.: Casa comercial: DRIZORO®.

Se observa una gran mejora en las propiedades mecánicas con respecto de las vigas sin refuerzo y de las vigas con refuerzo longitudinal. Como ocurre en las vigas de 1,3 m, una vez que se alcanza la tensión máxima a flexión, las vigas no agotan completamente su capacidad mecánica, sino que se mantienen a un cierto valor de tensión. En concreto, la tensión permanece aproximadamente en un 37% y 57% para las vigas BR-S-1 y BR-S-2, respectivamente, en relación a la tensión máxima alcanzada. El descenso para las vigas BR-D-1 y BR-D-2 es del orden de un 40% y 33%, respectivamente. Después de este descenso, la capacidad a flexión de las vigas crece ligeramente, hasta cierto estado tensional en el que, o bien se produce una mínima caída, o directamente no se consigue el colapso total del elemento reforzado. En otras palabras, se consigue una clara mejora de ductilidad en comparación con el refuerzo LR. El aumento del MOR corregido es del 175% y 156% para las vigas con productos SIKA® y DRIZORO®, respectivamente. El MOE tiene una mejora del 66% y 98%, respectivamente. En cuanto a la flecha máxima, se alcanzan valores con un incremento con respecto de las vigas NR del 111% y 70% para las vigas con productos SIKA® y DRIZORO®, respectivamente.

El tipo de fallo observado en las cuatro vigas es similar, es decir, por cortante, debido a que el tejido no agota su capacidad mecánica. Las Figuras 4.50 y 4.51 muestran las roturas de las cuatro vigas. Es importante recordar que ninguna viga llega al colapso total. Además, en las vigas reforzadas con material DRIZORO® se observa que el laminado sufre un deslizamiento entre tejidos tras el fallo principal.

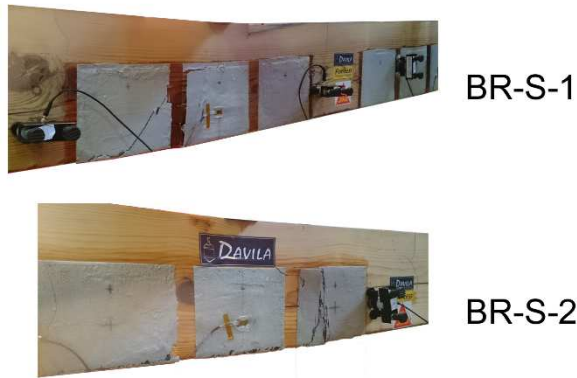


Figura 4.50. Imágenes de las roturas de las vigas con refuerzo trenzado de gran escuadría (BR). Arriba: BR-S-1. Abajo: BR-S-2. Casa comercial: SIKAR®.

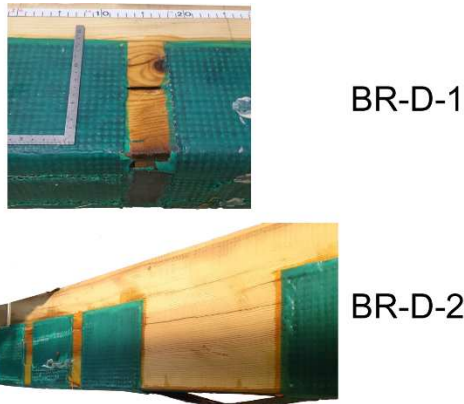


Figura 4.51. Imágenes de las roturas de las vigas con refuerzo trenzado de gran escuadría (BR). Arriba: BR-D-1. Abajo: BR-D-2. Casa comercial: DRIZORO®.

Por último se muestran los resultados del análisis de deformaciones para el grupo de vigas BR (Figuras 4.52 y 4.53). Además de observarse una clara mejora en la rigidez, las deformaciones medidas son más estables y alcanzan valores mayores que para los grupos LR y NR. Todas las vigas plastifican en la zona de compresiones en mayor o menor medida, según se observa en las galgas del grupo 2. Esto significa que esta disposición del refuerzo permite que las propiedades mecánicas de la madera alcancen casi su límite último, aprovechando por lo tanto toda la capacidad del elemento base, lo que es de enorme interés estructural.

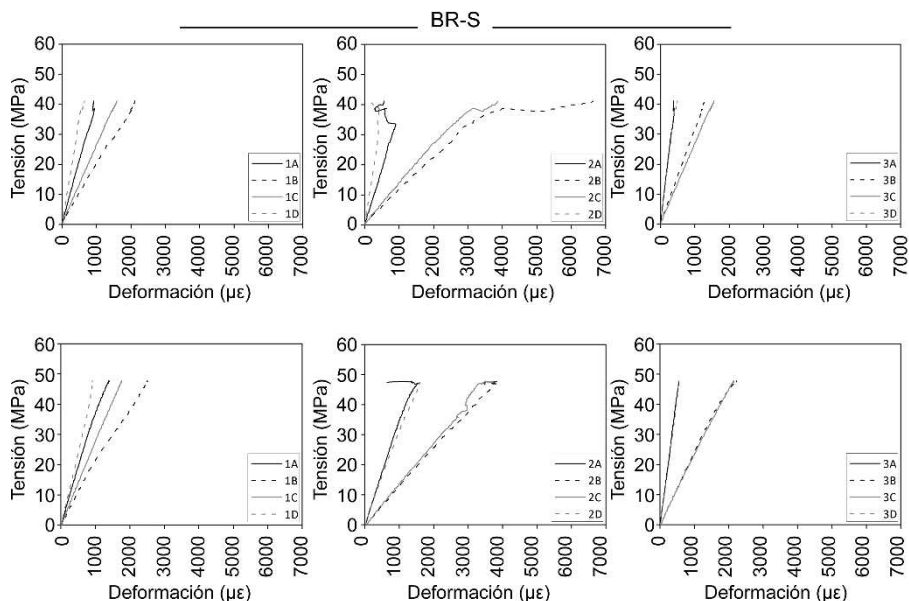


Figura 4.52. Tensión frente a la deformación medida durante los ensayos a flexión de las vigas con refuerzo trenzado de gran escuadría (BR). Arriba: BR-S-1. Abajo: BR-S-2. Izq.: Grupo de galgas 1. Centro: Grupo de galgas 2. Der.: Grupo de galgas 3. Casa comercial: SIKA®.

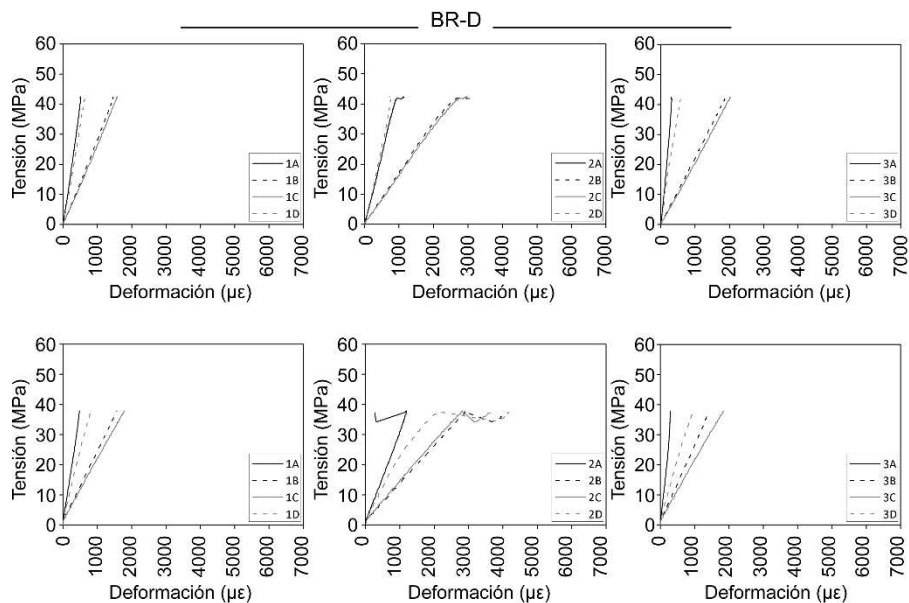


Figura 4.53. Tensión frente a la deformación medida durante los ensayos a flexión de las vigas con refuerzo trenzado de gran escuadría (BR). Arriba: BR-D-1. Abajo: BR-D-2. Izq.: Grupo de galgas 1. Centro: Grupo de galgas 2. Der.: Grupo de galgas 3. Casa comercial: DRIZORO®.

4.3.2. Análisis de Emisión Acústica

El análisis de emisión acústica se llevó a cabo en dos fases:

1. **Medida de la atenuación acústica:** Se realizó en las diez vigas antes de los ensayos a flexión.
2. **Análisis de los datos de los ensayos a flexión:** Se divide en 4 pasos:
 - a. Filtrado de las señales mal registradas.
 - b. Localización lineal de fuentes de EA.
 - c. Corrección por atenuación.
 - d. Clasificación de los eventos de EA localizados.

Fase 1. Medida de la atenuación acústica

Para este estudio se colocó un sensor de EA en el centro de seis intervalos de longitud $[-60, 60]$ cm. Estos intervalos cubrieron totalmente la zona de la viga monitorizada durante los ensayos a flexión. Se realizaron roturas de mina (*Pencil Lead Breaks* o PLBs, con minas 2H de 0,5 mm) en puntos situados cada 20 cm sobre la línea central de la cara lateral de la viga, siguiendo la norma ASTM E976. Se realizaron 3 PLBs en cada punto y se obtuvo la amplitud de pico en dB de cada señal de EA registrada. La Figura 4.54 describe el ensayo de atenuación.

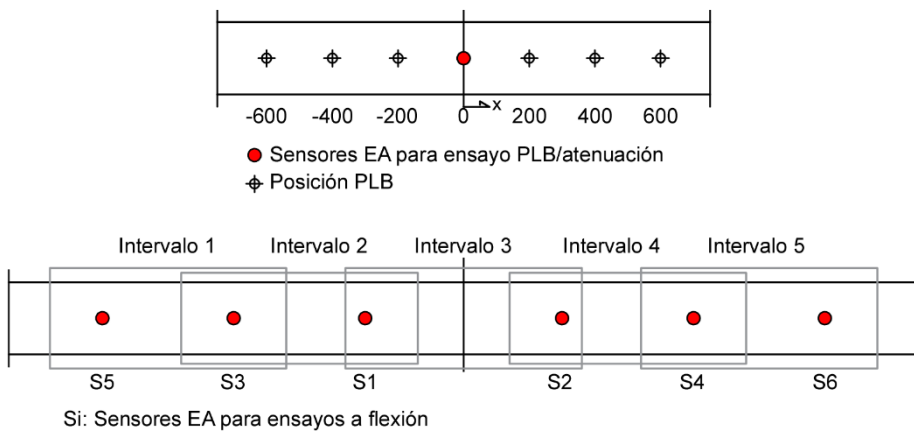


Figura 4.54. Descripción del ensayo de atenuación.

Las señales de EA se adquirieron con el equipo Vallen Systeme AMSY-5 del grupo de investigación ADIME, usando el mismo tipo de sensores empleados

en los ensayos *pull-off*, es decir, un sensor multi-resonante VS45-H. La frecuencia de muestreo se estableció en 5 MHz. Se fijaron un número de muestras y un *pre-trigger* de 4096 y 300 muestras, respectivamente.

Los resultados de este estudio de atenuación se muestran en la Figura 4.55 para cada viga en particular. Cada punto representa la amplitud de pico media de las tres señales de EA obtenidas para los seis intervalos. Sobre las amplitudes de los PLBs, se ha trazado una curva polinómica de ajuste de grado 2 en el intervalo [-40, 40] cm. Como puede verse, se obtiene una curva de ajuste diferente a izquierda y derecha del punto central, denominada como $f(x)$ y $f+(x)$, respectivamente. Se observan grandes diferencias entre todos los especímenes, así como una elevada atenuación en todos los casos, inherente a un material altamente absorbente como la madera. Estas diferencias se deben principalmente a las grandes variaciones en la densidad y a la existencia de defectos en cada elemento. De igual modo, se obtiene una atenuación asimétrica con respecto de la posición central del sensor, demostrando la enorme heterogeneidad de la madera.

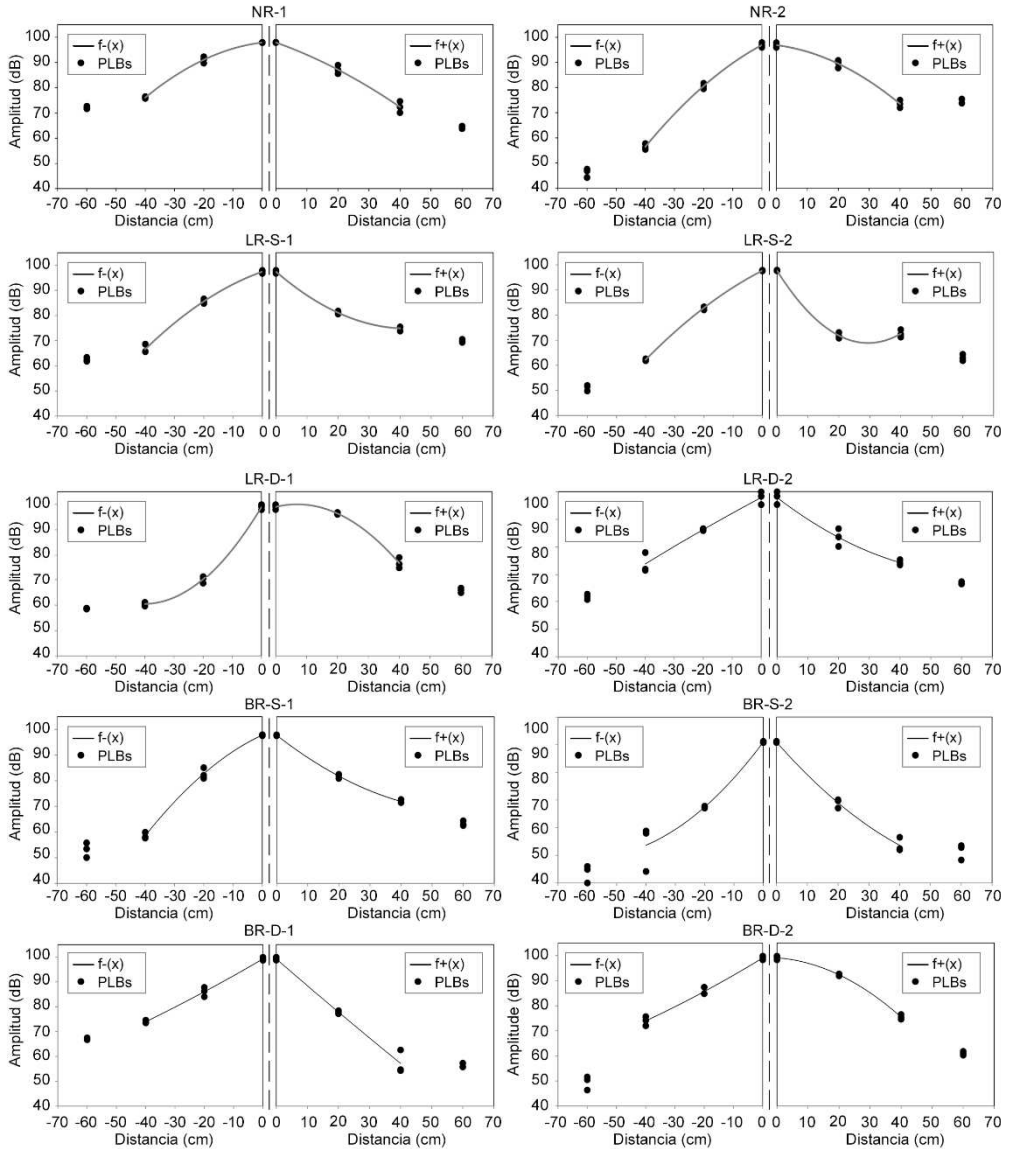


Figura 4.55. Resultados del estudio de atenuación mediante el uso de PLBs.

Para un análisis posterior de las señales de EA durante los ensayos a flexión (Fase 2), se evaluó y cuantificó la atenuación en dos bandas particulares de frecuencia B_1 y B_2 . Por ello, se calculó el valor medio cuadrático espectral (RMS espectral) dado por la Ec. 10 para una banda B_x particular de ancho Δf . El espectro de la señal se calculó solamente en una ventana temporal estrecha, con objeto de evitar al máximo la influencia de las reflexiones de las ondas acústicas. En concreto se usaron las siguientes bandas:

- a) **Banda (B₁):** [60 - 120] kHz. Frecuencias bajas. RMS₀ (B₁).
- b) **Banda (B₂):** [270 - 330] kHz. Frecuencias altas. RMS₀ (B₂).

La Figura 4.56 muestra el RMS espectral en dB de las señales de EA obtenidas durante la rotura de PLBs para todas las vigas, en ambas bandas de frecuencia B₁ y B₂. Con estos datos, se obtienen las curvas de ajuste independientemente para cada banda de frecuencias, denominadas f-(x)_{B₁} y f+(x)_{B₁} para B₁ y f-(x)_{B₂} y f+(x)_{B₂} para B₂. Como era de esperar, la atenuación es mucho mayor en altas (B₂) que en bajas frecuencias (B₁).

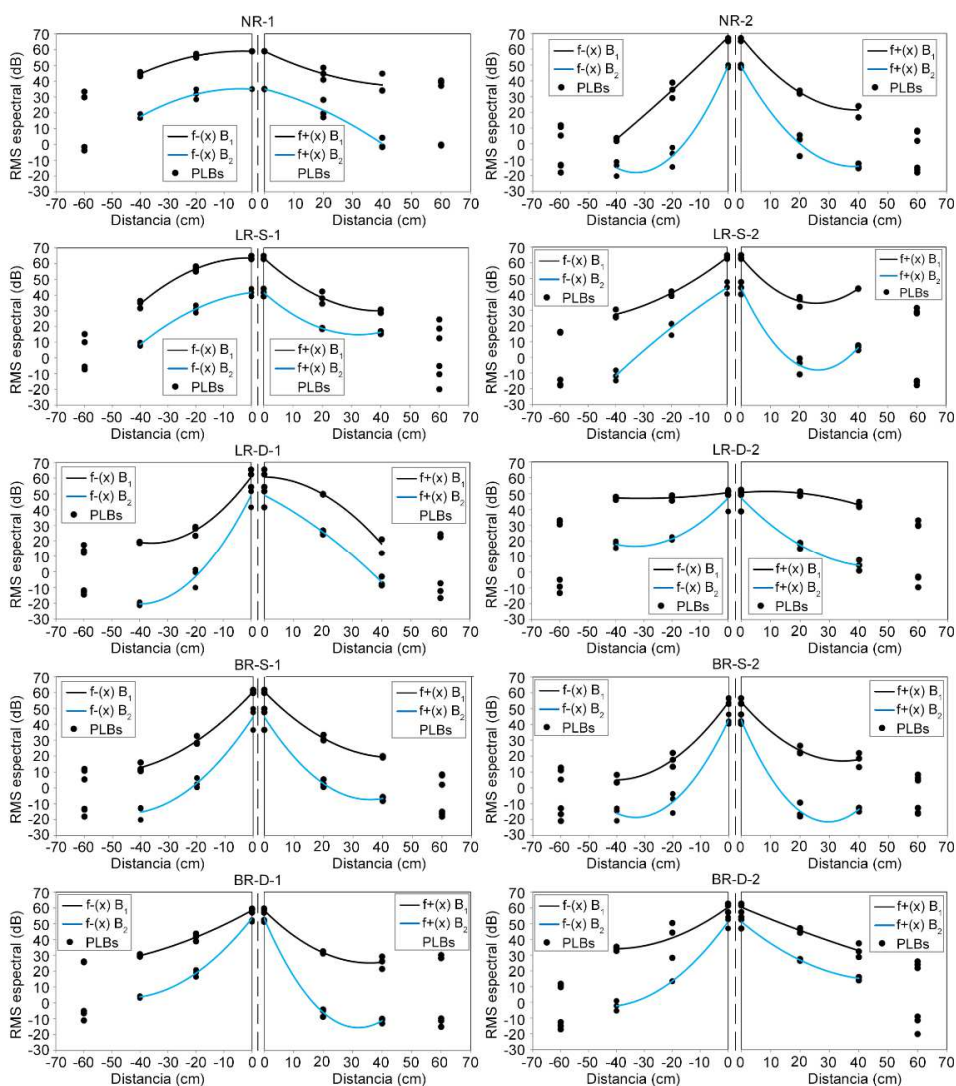


Figura 4.56. RMS espectral de las señales de EA obtenidas de las roturas de PLBs en cada banda de frecuencia.

Fase 2. Análisis de los datos de los ensayos a flexión

Como se ha comentado anteriormente, el análisis de la Fase 2 se dividió en 4 pasos.

a) **Filtrado de señales mal registradas.** Se siguió el mismo proceso que para el filtrado de las señales mal registradas durante los ensayos *pull-off*, estableciendo las dos ventanas temporales W_1 y W_2 como sigue:

- **W_1 :** $[0 - 2MD]$ μs , donde MD es la duración media de todas las señales registradas durante el ensayo. MD fue de 183 y 225 μs para las vigas NR-1 y NR-2, respectivamente; 164, 121, 147 y 206 μs para las LR-S-1, LR-S-2, LR-D-1 y LR-D-2, respectivamente; 174, 115, 257 y 205 μs , para las vigas BR-S-1, BR-S-2, BR-D-1 y BR-D-2, respectivamente.
- **W_2 :** $[2MD - 750]$ μs . Desde el fin de W_1 hasta el final de la señal registrada.

Posteriormente, el proceso de filtrado siguió los mismos pasos descritos en el ensayo *pull-off*, calculando el RMS temporal para cada ventana (RMS (W_1)) y W_2 (RMS (W_2)), obteniendo el valor RMS_{12} (Ec. 6), y finalmente aplicando el criterio descrito en la Ec. 7. La Figura 4.57 muestra un ejemplo del resultado del filtrado de señales, así como un ejemplo de la evolución del parámetro MR_{12} a lo largo de un ensayo para el caso particular de la viga BR-D-2.

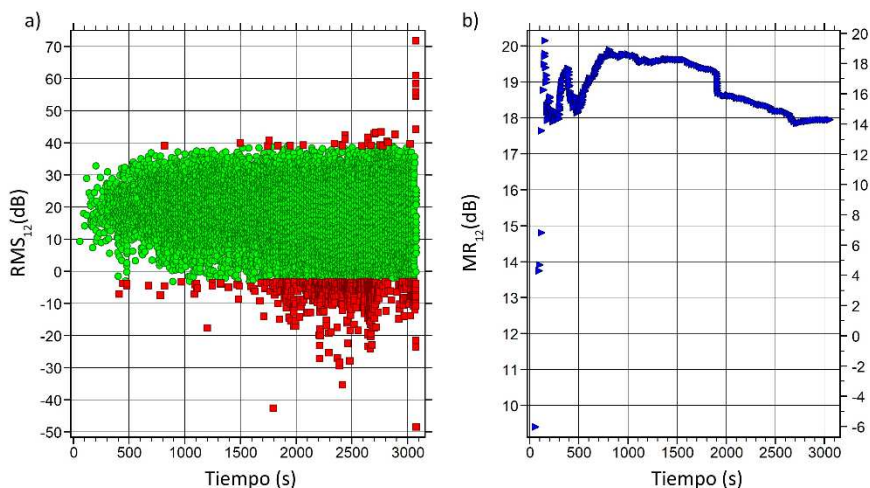


Figura 4.57. RMS₁₂ (a) y MR₁₂ (b) de la viga BR-D-2. Puntos verdes: Señales que pasan el filtro. Puntos rojos: Señales que no pasan el filtro.

b) Localización lineal de fuentes de EA. Mediante el uso de la teoría de localización de fuentes de EA clásica, se realizó una localización lineal de las señales que pasaron el filtro anterior, empleando los 6 sensores que se colocaron en cada viga [77]. La localización lineal está justificada puesto que la viga es un elemento prácticamente lineal (largo/canto > 20). Además, una localización lineal aporta una aproximación suficientemente razonable para evaluar el estado estructural. La separación entre sensores se decidió a partir de los resultados de atenuación anteriormente descritos.

Debido a la heterogeneidad del material, la cual dificulta enormemente el proceso de localización, se realizó una optimización de la velocidad de propagación de la onda. Dicha optimización se realizó para cada viga y antes de los ensayos a flexión. Para ello, una vez conocida la posición de los sensores, se realizaron 3 roturas de mina (2H – 0,5 mm) en los mismos puntos que para el estudio de atenuación. Conocidas las coordenadas de los puntos donde se rompen las minas, se procedió a determinar la velocidad de propagación de la onda más óptima, es decir, la que posicione las roturas de mina con el mínimo error. Las velocidades obtenidas tras este proceso de optimización se presentan en la Tabla 4.14. Se observa una alta dispersión entre vigas, tal y como era de esperar.

Tabla 4.14. Resultados de la velocidad de propagación optimizada medida en cada viga antes del ensayo a flexión.

Nombre	Velocidad (cm/ms)	Nombre	Velocidad (cm/ms)
NR-1	471,17	LR-D-2	450,44
NR-2	571,16	BR-S-1	367,46
LR-S-1	443,65	BR-S-2	446,07
LR-S-2	344,16	BR-D-1	435,53
LR-D-1	385,93	BR-D-2	375,21

- c) **Corrección por atenuación.** Se calculó la energía espectral del primer *hit* de los eventos localizados en el Paso b, para cada banda de frecuencia, es decir, $RMS_0(B_1)$ y $RMS_0(B_2)$ en dB. Usando el resultado de la localización de cada evento, x , y las curvas de ajuste de atenuación de la Figura 4.55 para cada banda de frecuencia, $f^-(x)_{B_1}$ y $f^+(x)_{B_1}$ para B_1 y $f^-(x)_{B_2}$ y $f^+(x)_{B_2}$ para B_2 , se calculó la energía espectral corregida por atenuación. Estas energías se denominaron como $RMSC_0(B_1)$ y $RMSC_0(B_2)$, respectivamente.
- d) **Clasificación de los eventos de EA localizados.** Tras aplicar la corrección por atenuación, se realizó una clasificación de las señales filtradas en dos grupos, según la relativa importancia de su energía espectral corregida en las dos bandas de frecuencia consideradas. Concretamente, las señales fueron clasificadas en el Grupo 1 como señales predominantes en baja frecuencia y en el Grupo 2 como predominantes en alta, es decir,

$$\text{Grupo 1} \rightarrow \text{Si } RMSC_0(B_1) > RMSC_0(B_2) \quad \text{Ec. 16}$$

$$\text{Grupo 2} \rightarrow \text{Si } RMSC_0(B_2) > RMSC_0(B_1). \quad \text{Ec. 17}$$

Como ejemplo, para demostrar la importancia de hacer la corrección por atenuación, la Figura 4.58 muestra las señales clasificadas en ambos grupos durante el ensayo de la viga BR-B-D-2 con los valores de RMS_0 sin corrección de la atenuación (izquierda), y con corrección $RMSC_0$ (derecha). La Figura 4.58 representa la amplitud del primer *hit* de los eventos localizados. Se observa una clara diferencia en los resultados. Cuando no se

realiza la corrección, prácticamente todos los eventos son clasificados en el Grupo 1, es decir, como eventos de baja frecuencia. Esto se debe a que las componentes de alta frecuencia de las señales se pierden drásticamente debido al efecto de la atenuación. Sin embargo, cuando se tiene en cuenta el efecto de la atenuación, un gran número de señales, especialmente las cercanas al fin del ensayo, son clasificadas en el Grupo 2, es decir, señales de alta frecuencia. Este hecho demuestra la importancia de realizar la corrección del efecto de la atenuación, tal y como se propone en esta Tesis.

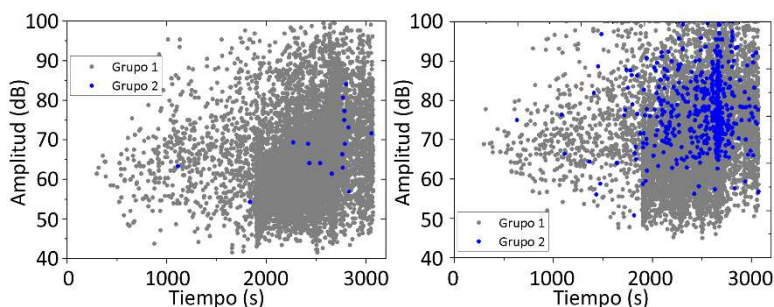


Figura 4.58. Amplitud frente al tiempo de los primeros *hits* de los eventos de EA localizados en la viga BR-D-2. Izq.: Sin corrección de la atenuación. Der.: Con corrección de la atenuación.

Resultados de Emisión Acústica

En las Figuras 4.59 - 4.61, se presentan las curvas de *hits* acumulados frente al tiempo para las distintas vigas. Estas figuras muestran el primer *hit* de los eventos localizados y clasificados en los Grupos 1 y 2. En la misma figura se representa la ratio de carga aplicada en %, respecto de la carga máxima alcanzada por cada viga.

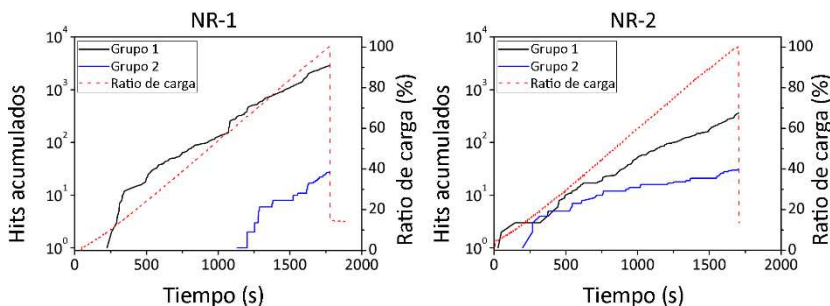


Figura 4.59. *Hits* acumulados frente al tiempo de las vigas sin refuerzo NR. Línea negra: Grupo 1. Línea azul: Grupo 2. Línea roja: Ratio de carga.

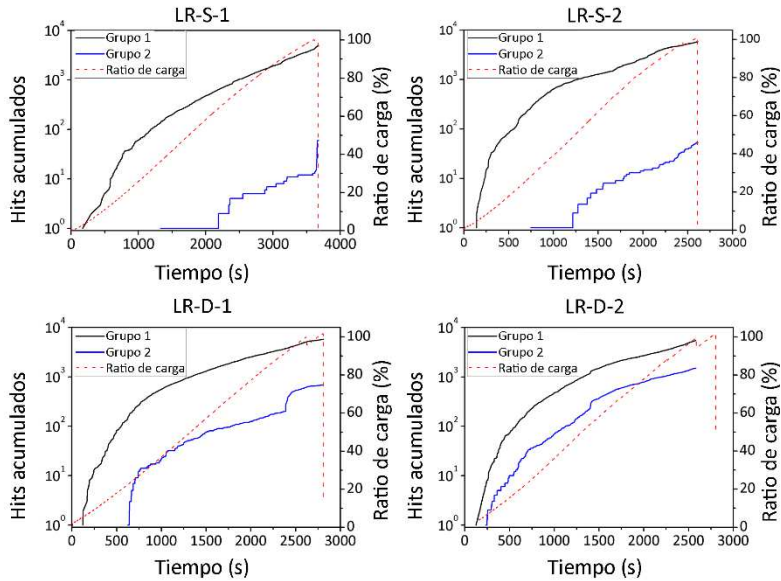


Figura 4.60. *Hits* acumulados frente al tiempo de las vigas con refuerzo longitudinal LR. Línea negra: Grupo 1. Línea azul: Grupo 2. Línea roja: Ratio de carga.

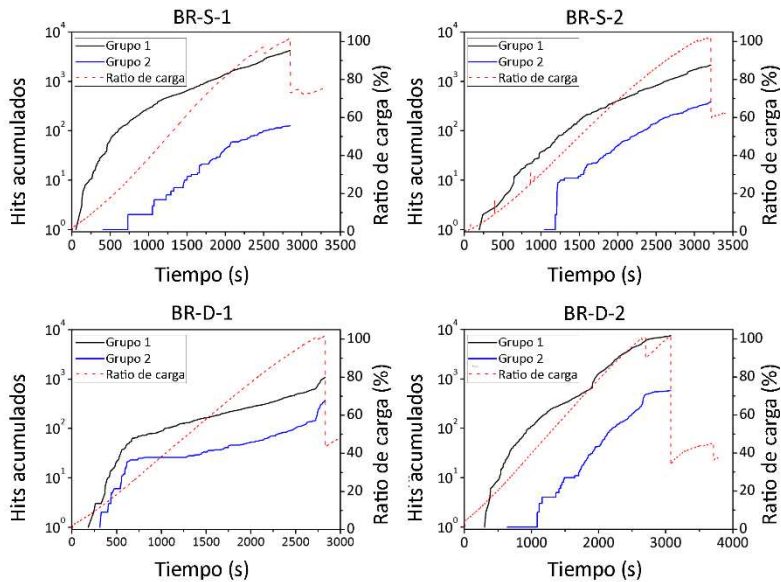


Figura 4.61. *Hits* acumulados frente al tiempo de las vigas con refuerzo trenzado BR. Línea negra: Grupo 1. Línea azul: Grupo 2. Línea roja: Ratio de carga.

Como es sabido, cambios bruscos en la pendiente de *hits* acumulados de EA están altamente relacionados con cambios importantes en el estado de deformaciones de la estructura. Este hecho se corrobora totalmente en todas

las vigas monitorizadas con EA. Por otro lado, como puede verse, para todas las vigas los *hits* del Grupo 1 son más cuantiosos que los del Grupo 2.

Analizando las vigas sin refuerzo, es destacable que el Grupo 2 de señales en la viga NR-1 comienza en torno al 60% de la carga, mientras que en la viga NR-2 comienza en torno al 20%. Si se compara con los resultados mecánicos, la viga NR-1 tiene un MOR corregido un 46% mayor que la viga NR-2.

En el caso de las vigas del grupo LR, se observa un comportamiento diferente al de las vigas NR. En primer lugar, el Grupo 1 de señales comienza con una pendiente muy elevada, para posteriormente tender a una pendiente más regular y suave. Este comportamiento es contrario al de las vigas sin refuerzo, las cuales presentan cambios bruscos a lo largo de todo el ensayo. Esto demuestra que el refuerzo produce una distribución más homogénea de tensiones, y por lo tanto de deformaciones, a lo largo del elemento. En el caso de las señales del Grupo 2, para las vigas reforzadas con productos SIKA® se observa un inicio en torno al 40%-60% de la carga, con una cantidad y comportamiento de *hits* acumulados similar a la viga NR-1. Por otro lado, las señales del Grupo 2 de las vigas con material DRIZORO® presentan un crecimiento más constante hasta un cierto nivel de carga y un mayor número de *hits* acumulados en comparación con las del grupo LR-S. Este hecho, pese a no verse reflejado en el MOR, se ve reflejado en el tipo de rotura final. Como se ha visto anteriormente, tras la rotura las vigas LR-S sufrieron una deslaminación en gran parte de la viga, mientras que las vigas LR-D sufrieron una deslaminación parcial en la zona central de la viga. Este comportamiento hace intuir que los *hits* clasificados en el Grupo 2 pueden ser buenos indicadores de las zonas de fallo por adherencia madera-CFRP (deslaminación).

Por ese motivo, en las Figuras 4.62, 4.64 y 4.66 se presentan los resultados de la localización lineal de los *hits* clasificados en el Grupo 2, los cuales podrían estar asociados principalmente al fallo de adherencia entre madera y CFRP. Las Figuras 4.63, 5.65 y 4.67 muestran imágenes de las zonas donde se localizaron mayor cantidad de *hits* del Grupo 2 para cada viga.

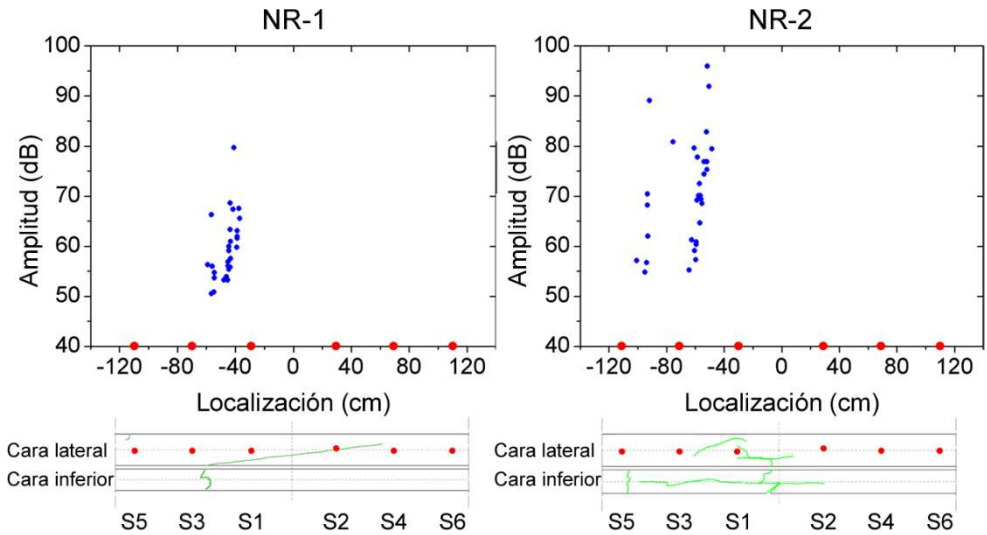


Figura 4.62. Hits localizados durante los ensayos a flexión del Grupo 2 para las vigas sin refuerzo (NR). Puntos rojos: Posición de los sensores de EA. Línea verde: Grietas de la madera al final del ensayo.

La Figura 4.62 muestra los resultados de localización de las vigas sin refuerzo. Se observa una muy baja cantidad de *hits* del Grupo 2. Además, los *hits* localizados en la viga NR-2 alcanzan mayor amplitud de pico que los *hits* de la viga NR-1. En la viga NR-1, los *hits* son localizados entre los sensores 1 y 3. En esta zona se encuentra un gran nudo situado en la cara inferior (Figura 4.63a). Este nudo es el que provoca el fallo final de la viga, siendo bordeado por una grieta (Figura 4.62-izq-cara inferior), que se prolonga por la cara lateral hasta alcanzar la zona donde se encuentra el sensor 4. En la viga NR-2 hay dos zonas de *hits* localizados. En estas zonas se encuentran grietas generadas alrededor de nudos, como se observa en la Figura 4.63b. En este caso la fractura se origina en el centro de la viga, propagándose hacia la zona de sensores 1-3-5 principalmente.

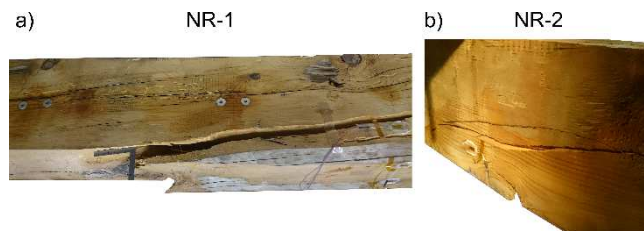


Figura 4.63. Imágenes de las roturas en las zonas de *hits* localizados del Grupo 2. Vigas NR.

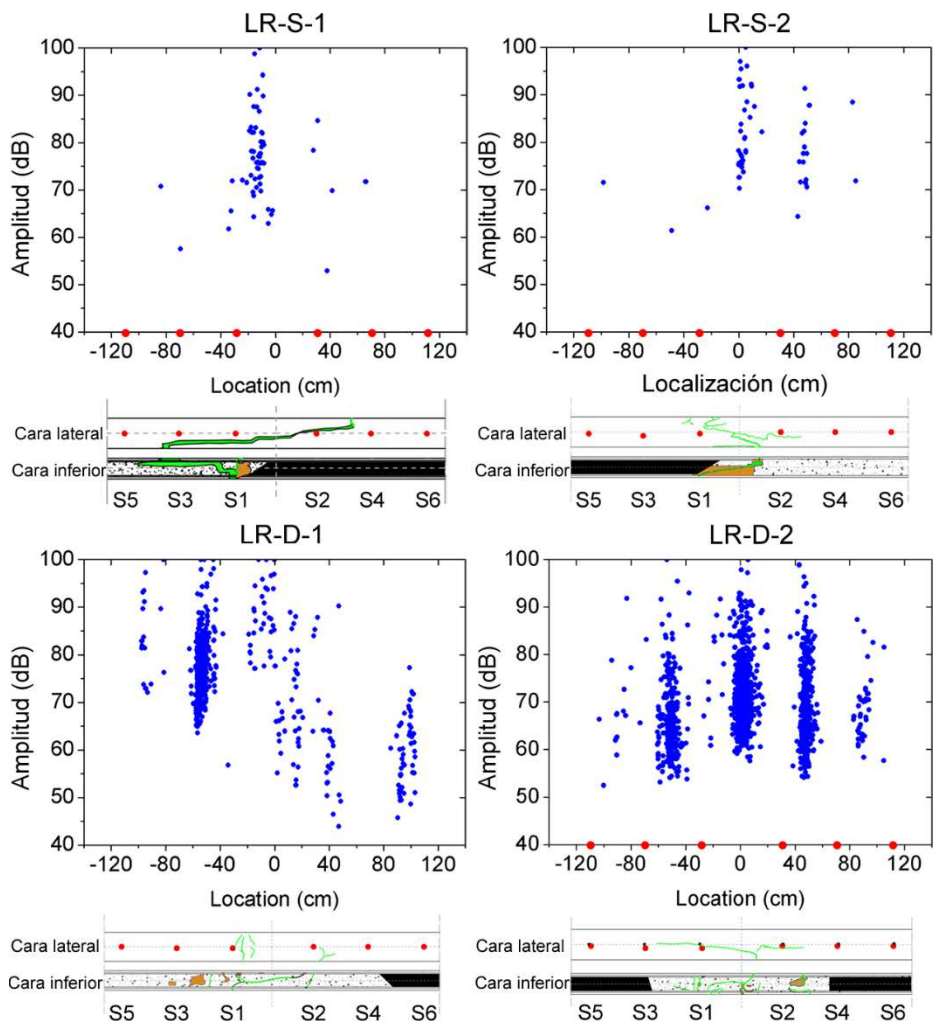


Figura 4.64. Hits localizados durante los ensayos a flexión del Grupo 2 para las vigas con refuerzo longitudinal (LR). Puntos rojos: Posición de los sensores de EA. Línea verde: Grietas de la madera al final del ensayo. Zona naranja: Rotura de la interfase madera-resina. Zona punteada: Deslaminación CFRP-madera. Zona negra: Laminado de CFRP.

La Figura 4.64 representa los resultados para el grupo de vigas LR. En todos los casos, las mayores concentraciones de *hits* localizados del Grupo 2 se encuentran justo en las zonas donde se produce rotura en la interfase madera-resina, factor que desencadena súbitamente la posterior deslaminación del CFRP. Además, las vigas con productos SIKA® muestran una menor cantidad de *hits* localizados en comparación con las vigas con productos de DRIZORO®.

La Figura 4.64 además muestra una catalogación de los fallos que se producen en cada viga. En las zonas de color naranja se produce una rotura en la interfase madera-resina, la cual provoca la subsecuente deslaminación madera-CFRP (zona punteada) y las grietas en la propia madera, representadas como líneas verdes. Pese a que todas las vigas fallan por deslaminación madera-CFRP, es importante recordar que en las vigas con productos SIKA® dicha deslaminación despega el laminado hasta la zona de apoyos de la viga. Por el contrario, en las vigas con productos DRIZORO®, la deslaminación se produce en la zona central, con un deslizamiento del laminado de CFRP en los extremos.

La viga LR-S-1 tiene una zona en torno al sensor 1 con alta concentración de *hits* localizados. En la Figura 4.65a se observa una imagen de dicha zona, en la cual se produce una rotura en la interfase madera-resina, provocando la posterior y súbita deslaminación. En el caso de la viga LR-S-2, los *hits* localizados se concentran en el centro de la viga y en torno a 40 cm (cerca del sensor 2). La Figura 4.65b muestra en este caso la zona central de la viga, en la que de nuevo se produce una rotura importante en la interfase madera-resina, que provoca el posterior colapso de la viga.

Por otro lado, la viga LR-D-1 presenta *hits* localizados a lo largo de toda la zona de evaluación, con una alta concentración de ellos en torno a -50 cm. De nuevo, al observar esta zona de la viga se advierte una gran zona en la cual se produce rotura en la interfase madera-resina (Figura 4.65c). Para finalizar el grupo de vigas LR, la viga LR-D-2 muestra 3 zonas con una alta concentración de *hits* localizados, una en el centro y dos simétricas en -50 y 50 cm. Es la zona central en la que se encuentran la mayor cantidad de *hits* localizados, observándose en la Figura 4.65d una importante rotura entre madera y resina, así como importantes grietas en la madera.

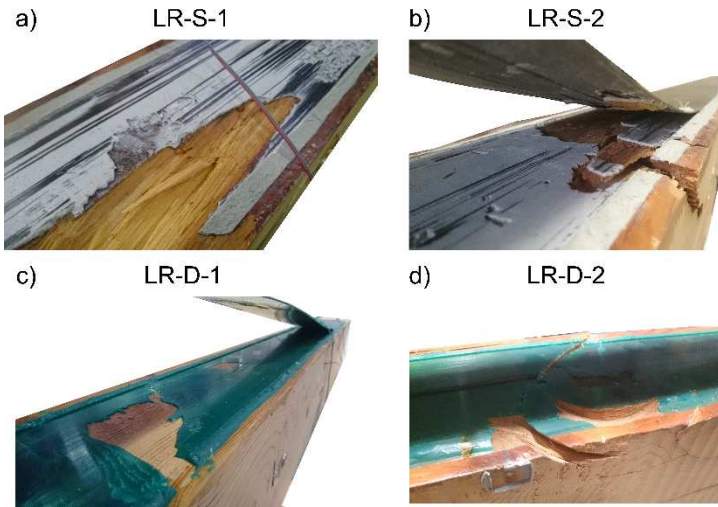


Figura 4.65. Imágenes de las roturas en las zonas de *hits* localizados del Grupo 2. Vigas LR.

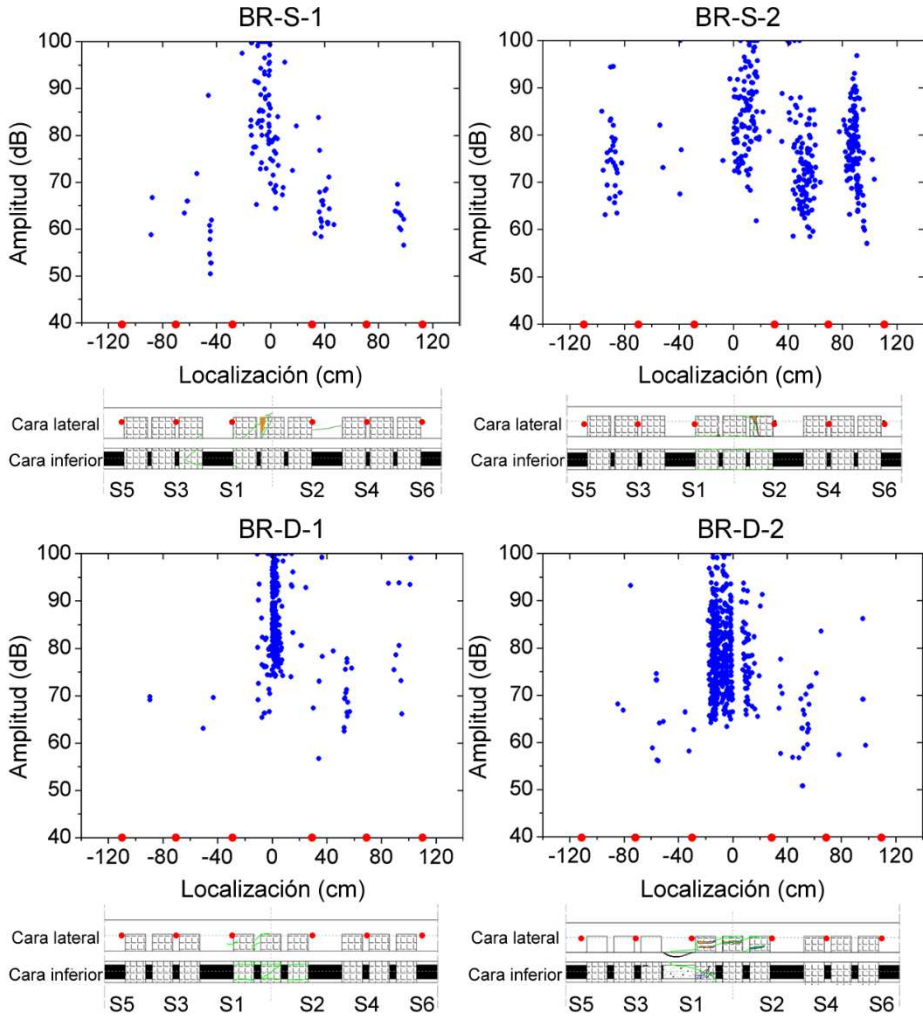


Figura 4.66. Hits localizados durante los ensayos a flexión del Grupo 2 para las vigas con refuerzo trenzado (BR). Puntos rojos: Posición de los sensores de EA. Línea verde: Grietas de la madera al final del ensayo. Zona naranja: Rotura de la interfase madera-resina. Zona punteada: Deslaminación CFRP-madera. Zona negra: Laminado de CFRP. Trama de cuadros: Tejido de CFRP.

Por último, la Figura 4.66 muestra los resultados de *hits* localizados para las vigas del grupo BR. De nuevo, las vigas reforzadas con productos SIKA® generan menos cantidad de *hits* localizados del Grupo 2 que las vigas reforzadas con productos DRIZORO®. Es importante recordar que los resultados de EA que se presentan son hasta que la viga alcanza su carga máxima, y que los refuerzos trenzados no rompen súbitamente, sino que

siguen admitiendo un cierto nivel de carga posterior. Esto hace que las primeras grietas se produzcan al fallar el tejido por cortante.

En la viga BR-S-1 se observa una zona clara de *hits* localizados en torno al centro de la viga. En la Figura 4.67a se puede ver una imagen de la zona central, en la que se produce una rotura entre la madera-resina-tejido. La viga BR-S-2 presenta una mayor cantidad de *hits* localizados en comparación con la viga BR-S-1. Además, en esta viga hay 3 grupos con una alta concentración de *hits*. Estos grupos se encuentran en la parte derecha de la viga, en torno a 10, 50 y 90 cm. La Figura 4.67b muestra una imagen de esas zonas. En la zona de 10 cm (cercana al sensor 2), se produce una rotura madera-resina-tejido. Sin embargo, no se aprecian grietas o fisuras en el resto de zonas con *hits* localizados. En este caso, al no agotarse la capacidad mecánica del elemento reforzado, estas concentraciones de *hits* podrían asociarse a una nucleización interna de fisuras, que no llegan a hacerse visibles.

Respecto de la viga BR-D-1, los *hits* localizados se concentran principalmente en el centro de la viga, zona dónde se producen las fisuras y grietas entre madera-resina-tejido. En la Figura 4.67c se observan dichas fisuras, en un tono casi blanco (propio de esta resina al alcanzar su tensión máxima). La concentración de *hits* en la viga BR-D-2 es mucho mayor que para la viga BR-D-1, aunque sigue estando principalmente localizada en el centro de la viga. En este caso se produce una mayor rotura de las interfases madera-resina-tejido, como se muestra en la Figura 4.67d. Además, esta rotura provoca grietas en la madera en las zonas entre las tiras de tejido de CFRP. Esta viga es la que menor MOR corregido alcanza del grupo de vigas trenzadas.

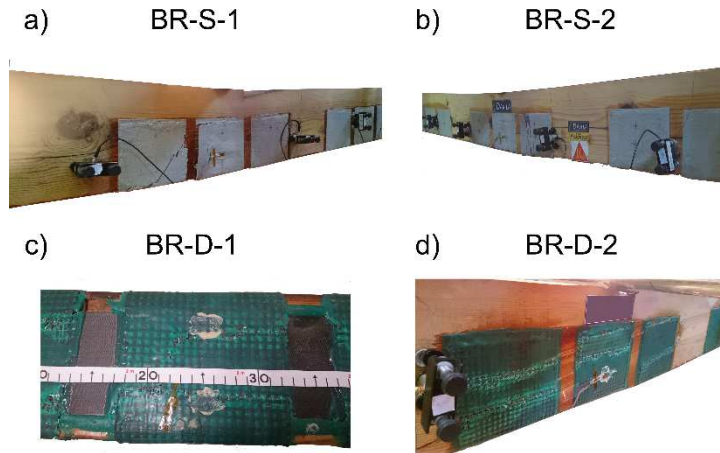


Figura 4.67. Imágenes de las roturas en las zonas de *hits* localizados del Grupo 2. Vigas BR.

4.4. Ensayos en vigas de gran escuadría reparadas

En una segunda fase se realizaron ensayos sobre las vigas ya ensayadas en la primera fase. Estas vigas ya habían agotado toda su capacidad mecánica. En concreto, se volvieron a ensayar las dos vigas sin refuerzo y tres vigas con refuerzo longitudinal (Figura 4.68). Para ello, dicho refuerzo fue retirado antes de la reparación.

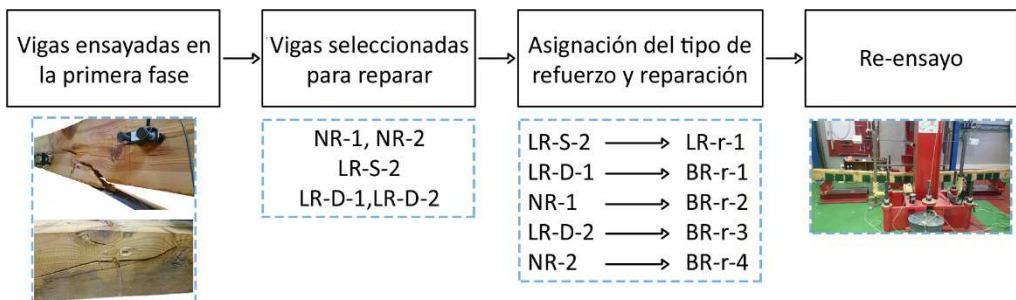


Figura 4.68. Esquema de reparación de las vigas ensayadas en la primera fase.

La Figura 4.68 muestra el tipo de refuerzo usado en cada viga durante la primera fase. En particular, la viga LR-S-2 se reparó volviéndola a reforzar con un laminado de CFRP (LR-r). Las cuatro vigas restantes se repararon con la configuración trenzada mediante el tejido bidireccional, denominándose BR-r.

En la Tabla 4.15 y en la Figura 4.69 se recogen los resultados mecánicos y la tensión a flexión frente al tiempo durante los ensayos sobre las vigas reparadas. Además, se presenta la variación porcentual con respecto de las vigas sin refuerzo y sin rotura previa.

Tabla 4.15. Resultados mecánicos obtenidos en los ensayos a flexión de las vigas reparadas. MOR (capacidad máxima a flexión), densidad, MOR corregido con la densidad, MOE (módulo elástico a flexión) y flecha máxima.

Nombre	MOR (MPa)	Densidad (kg/m ³)	MOR corregido (MPa)	MOE (MPa)	Flecha máxima (mm)
LR-r-1	12	579	11	9067	31
Variación respecto NR (%)	-25		-31	16	-11
BR-r-1	25	562	25	10825	75
BR-r-2	22	523	23	12927	73
BR-r-3	39	521	41	9952	79
BR-r-4	19	571	18	8595	64
Media BR-r	26	544	27	10575	73
Variación respecto NR (%)	63		69	35	109

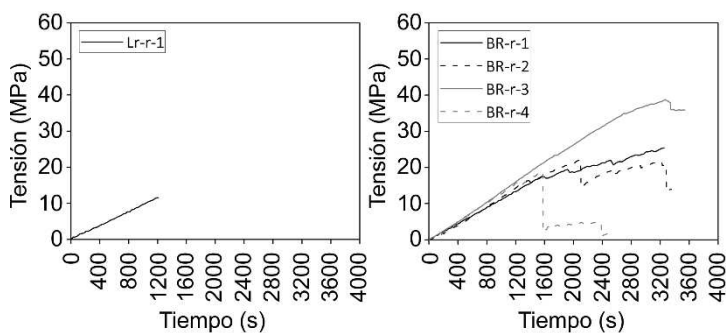


Figura 4.69. Tensión a flexión frente al tiempo de las vigas reparadas. Izq.: LR-r. Der.: BR-r.

Como se observa en la Figura 4.69-izq. y como estaba previsto, la viga reparada con refuerzo LR-r presenta un comportamiento lineal hasta una rotura final frágil. Esto demuestra que la solución de colocar una única lámina de CFRP para repararla no es suficiente como para recuperar

totalmente su capacidad a flexión. El MOR corregido es de un -31% con respecto de las vigas sin rotura previa NR, mientras que la flecha máxima y el MOE presentan una variación del -11% y 16%, respectivamente. Sin embargo, a pesar de que en líneas generales, se produce un descenso en las propiedades mecánicas (salvo para el MOE), la viga alcanza valores aceptables, máxime si se tiene en cuenta que se encontraba con un muy importante daño antes de su reparación.

Por otro lado, la Figura 4.69-der. muestra los resultados para las vigas reparadas con la configuración trenzada (BR-r). En primer lugar, hay que destacar que todas las vigas reparadas presentan un comportamiento lineal hasta los 16 MPa. Este valor se corresponde con el MOR corregido medio de las vigas sin refuerzo y sin daño previo (NR). Este hecho deja claro que este tipo de refuerzo permite recuperar y mejorar la capacidad mecánica de un elemento que se encuentra altamente dañado antes de la reparación.

Analizando los resultados mecánicos del grupo de vigas BR-r, el MOR corregido presenta una mejora del 69%. El MOE y la flecha máxima alcanzan mejoras del 35% y del 109%, respectivamente. Resulta de interés el análisis individualizado de las vigas BR-r-2 y BR-r-4, ya que se corresponden con las vigas sin refuerzo NR-1 y NR-2, respectivamente, ensayadas en la fase anterior. El resto de vigas reparadas provienen de vigas reforzadas ensayadas en la primera fase, con lo cual no se puede conocer con certeza la tensión a flexión que estas vigas habrían alcanzado en caso de no estar reforzadas en la primera fase.

En particular, la viga BR-r-2 (NR-1) alcanza un MOR corregido de 23 MPa, un 21% más que en el ensayo de la primera fase. El MOE y la flecha máxima presentan una mejora del 40% y 108%, respectivamente. La viga BR-r-4 (NR-2) tiene un MOR corregido de 18 MPa, lo que se traduce en un aumento del 38% con respecto del ensayo sin refuerzo y sin daño previo. El MOE y la flecha máxima alcanzan una mejora del 35% y 108%, respectivamente. Estos resultados representan un ejemplo claro de que un elemento altamente dañado, no solo puede ser totalmente reparado, sino que sus propiedades mecánicas pueden incluso verse notablemente incrementadas.

Además, es destacable la alta capacidad a flexión que alcanza la viga BR-r-3. Este hecho se asocia a que cada viga se reforzó adaptando la disposición del tejido a los diferentes defectos y grietas (manteniendo siempre el mismo porcentaje de fibra total aplicado en cada viga). Queda por lo tanto patente la importancia de un correcto diseño del refuerzo a aplicar en una reparación de un elemento altamente dañado.

La Figura 4.70 presenta imágenes de las roturas de cada viga reparada, tras ser ensayadas. Como es lógico, las tensiones se concentran en las zonas dañadas previamente. En el caso de la viga reparada con refuerzo laminado (LR-r), se produce una deslaminación con la reapertura de la grieta existente. Mediante inspección visual no se pudieron observar nuevas grietas.

El tipo de fallo en las vigas BR-r reparadas con refuerzo trenzado, es similar al fallo de las vigas de la primera fase sin daño previo. Se producen roturas en las interfases madera-resina-tejido, seguidas en algunos casos por una deslaminación parcial (BR-r-1 y BR-r-2). Por otro lado, la inspección visual permitió detectar el crecimiento de grietas existentes y la generación de nuevas grietas.

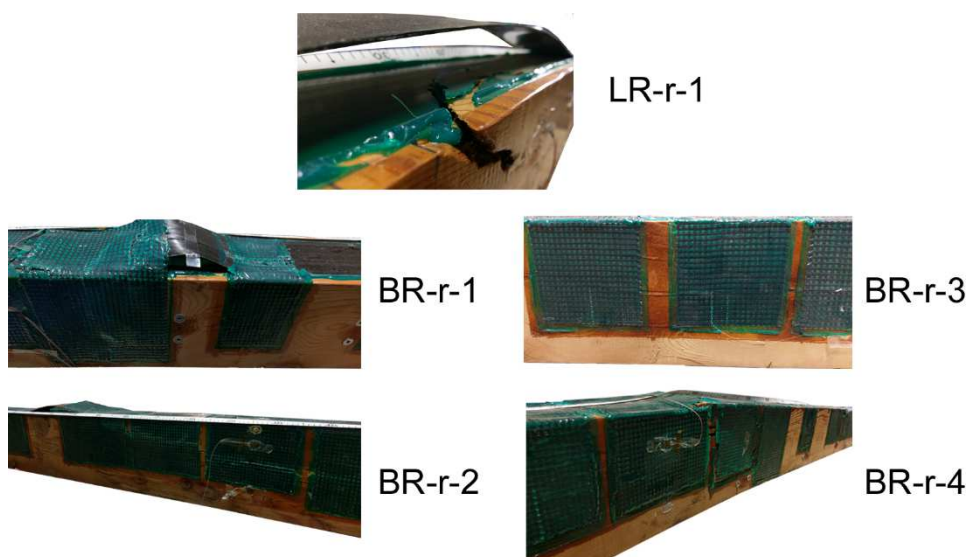


Figura 4.70. Imágenes de las roturas de las vigas reparadas de gran escuadría con rotura previa.

Por último, la Figura 4.71 presenta las deformaciones registradas con la galga B situada en la cara inferior del grupo 2 (zona de máximas tracciones). La viga LR-r muestra un comportamiento lineal hasta la rotura final. En el caso de las vigas BR-r, de nuevo hasta los 16 MPa (MOR medio corregido de las vigas sin refuerzo y sin rotura previa) se observa un comportamiento lineal para todas las vigas. A partir de este valor se producen cambios en la pendiente tensión-deformación. Tras un análisis visual y mecánico, este cambio en la pendiente se asocia a la reapertura de las grietas existentes y no a una plastificación del elemento reparado.

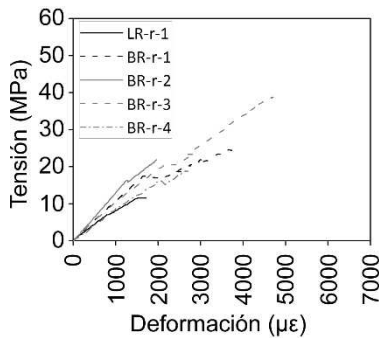


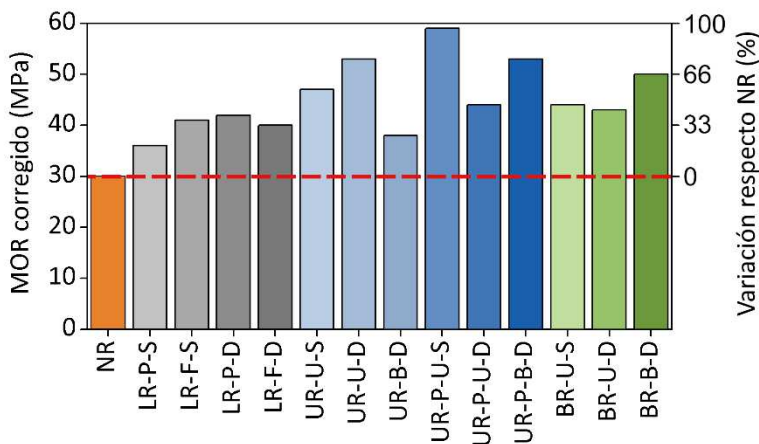
Figura 4.71. Tensión frente a la deformación medida durante los ensayos a flexión de las vigas reparadas de la galga 2B (grupo 2 – cara inferior).

4.5. Comparación global de resultados

En este Apartado se presenta una comparación entre las distintas configuraciones de refuerzo para vigas de pequeña y gran escuadría sin y con rotura previa. Igualmente se muestra una comparativa entre resultados analíticos y experimentales para el caso de las vigas de pequeña escuadría sin refuerzo y con refuerzo longitudinal. Por último, se analizan los costes de materiales y tiempos de elaboración para las distintas configuraciones y tamaños de vigas, considerándose las vigas de gran escuadría las más representativas desde un punto de vista práctico.

4.5.1. Comparación de los resultados experimentales

En la Figura 4.72 se muestra el MOR medio corregido de cada configuración de refuerzo para las vigas de pequeña escuadría. La línea roja horizontal indica el MOR medio corregido para las vigas sin refuerzo (NR).



Grupo	NR	LR-P-S	LR-F-S	LR-P-D	LR-F-D	UR-U-S	UR-U-D
MOR c. (MPa)	30	36	41	42	40	47	53
Grupo	UR-B-D	UR-P-U-S	UR-P-U-D	UR-P-B-D	BR-U-S	BR-U-D	BR-B-D
MOR c. (MPa)	38	59	44	53	44	43	50

Figura 4.72. MOR medio corregido para cada configuración de refuerzo en vigas de pequeña escuadría. Línea roja horizontal: MOR medio corregido del grupo NR.

Puede observarse en la Figura 4.72, que las vigas con la configuración de refuerzo LR alcanzan valores similares entre sí, independientemente del ancho del refuerzo. Teóricamente, a mayor cantidad de refuerzo, se deberían alcanzar mayores valores de MOR corregido. Sin embargo, una mayor cantidad de refuerzo conlleva también a una gran rigidización del elemento reforzado, siendo la resina la encargada de absorber las diferencias de deformaciones entre la madera y el CFRP. Cuanto mayor sean estas diferencias, mayor será el riesgo de que se produzca una deslaminación prematura entre ambos materiales. El análisis de las deformaciones de esta configuración de refuerzo que se realiza en el Apartado 4.2.1 muestra el

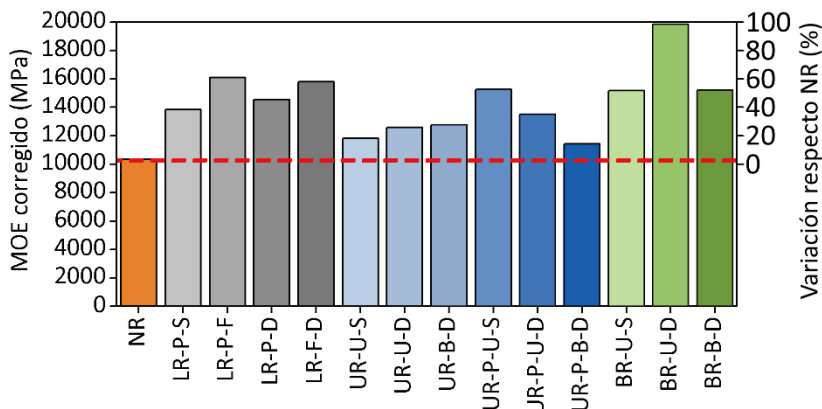
efecto negativo frente a la deslaminación que provoca el aumento de la rigidez de un elemento reforzado.

Por otro lado, las vigas reforzadas con tejido en las caras laterales (vigas de los grupos UR, UR-P y BR) presentan, en líneas generales, una mejora de la capacidad a flexión con respecto de la configuración LR. Del grupo de vigas UR, reforzadas únicamente con tejido, destaca el bajo MOR corregido obtenido para las vigas UR-B-D, es decir, usando tejido bidireccional.

El grupo de vigas reforzadas con tejido y laminado con una configuración continua (UR-P) es el que proporciona el mayor MOR corregido. En particular, las vigas reforzadas con productos SIKA[®], UR-P-U-S, alcanzan un valor de MOR corregido de 59 MPa, siendo este el valor más alto obtenido. Así mismo, es importante destacar el incremento en resistencia a flexión que ofrecen las vigas UR-P-B-D en comparación con su equivalente sin laminado UR-B-D.

Por último, se representan las vigas reforzadas con la configuración trenzada (BR). En este caso, para las vigas reforzadas con tejido unidireccional, no se aprecia diferencia relevante entre los refuerzos de ambas casas comerciales. Sin embargo, es destacable el resultado obtenido para las vigas reforzadas con tejido bidireccional, alcanzándose valores similares a la solución continua. Este resultado es muy importante, ya que la solución trenzada permite ahorrar un 50% del tejido de CFRP y además aporta ductilidad al elemento reforzado.

La Figura 4.73 presenta los valores de MOE corregido alcanzados para cada configuración de refuerzo en comparación en este caso, con el MOE medio corregido de las vigas sin refuerzo (NR).



Grupo	NR	LR-P-S	LR-F-S	LR-P-D	LR-F-D	UR-U-S	UR-U-D
MOE c. (MPa)	10350	13833	16099	14556	15783	11799	12587
Grupo	UR-B-D	UR-P-U-S	UR-P-U-D	UR-P-B-D	BR-U-S	BR-U-D	BR-B-D
MOE c. (MPa)	12764	15255	13497	11437	15184	19830	15195

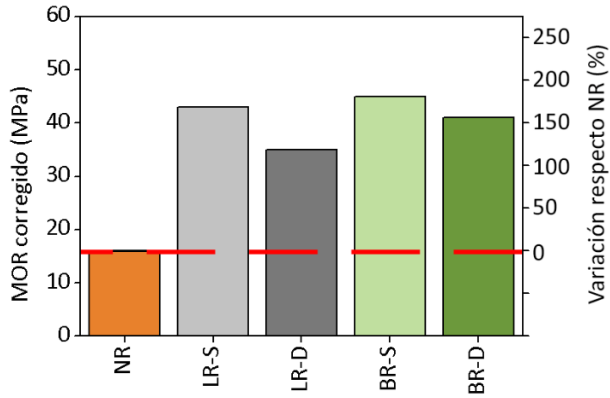
Figura 4.73 MOE medio corregido para cada grupo de vigas de pequeña escuadría. Línea roja horizontal: MOE medio corregido del grupo NR.

Puede observarse cómo se consigue un aumento del MOE corregido para cualquier solución de refuerzo. En otras palabras, en cualquier caso, el refuerzo permite incrementar la rigidez del elemento base. Con respecto del grupo LR, se observa como las vigas reforzadas con un laminado de ancho parcial alcanzan menor rigidez que las vigas reforzadas con un laminado de ancho completo. Como ya se ha comentado, este aumento no tiene por qué ser necesariamente positivo.

En el caso de las vigas reforzadas con tejido en forma de U, se distinguen dos grupos; los grupos con refuerzos continuos (UR y UR-P) y las vigas con refuerzo trenzado (BR). En cuanto al primer grupo, las vigas con este tipo de refuerzo proporcionan valores similares e inferiores a las vigas del grupo LR. Destacan las vigas UR-P-S, reforzadas con tejido y laminado con productos SIKA®. En cuanto a las vigas reforzadas con la configuración trenzada, se observa como igualan o mejoran al resto de grupos y soluciones de refuerzo. En particular, las vigas con laminado y tejido unidireccional de materiales DRIZORO® alcanzan el mayor valor de MOE, 19830 MPa. Esta

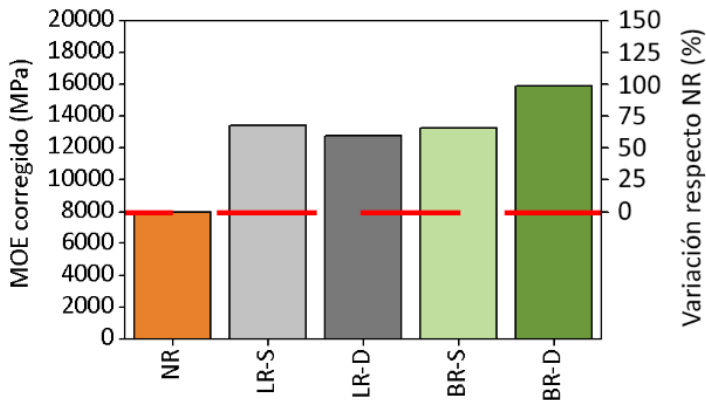
diferencia notable de las vigas BR-U-D con respecto del resto de grupos se asocia a un mejor estado de las vigas y a que los nudos de las mismas no se situasen en la cara de máximas tracciones.

Las Figuras 4.74 y 4.75 presentan el MOR y MOE corregido, respectivamente, para las vigas de gran escuadría sin rotura previa. De nuevo, la línea roja horizontal indica el respectivo valor medio de MOR y MOE corregidos para las vigas sin refuerzo (NR).



Grupo	NR	LR-S	LR-D	BR-S	BR-D
MOR c. (MPa)	16	43	35	45	41

Figura 4.74. MOR medio corregido para cada grupo de vigas de gran escuadría sin rotura previa. Línea roja horizontal: MOR medio corregido del grupo NR.



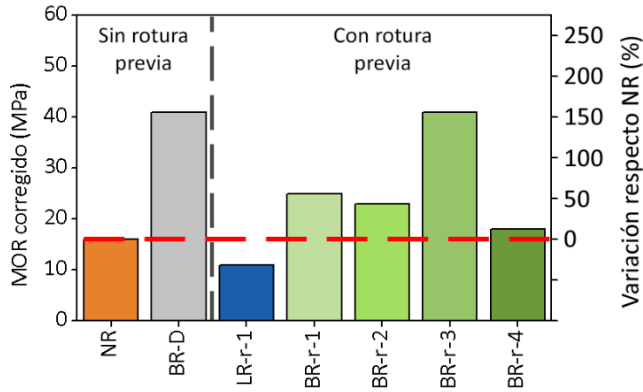
Grupo	NR	LR-S	LR-D	BR-S	BR-D
MOE c. (MPa)	7992	13453	12793	13247	15909

Figura 4.75. MOE medio corregido para cada grupo de vigas de gran escuadría sin rotura previa. Línea roja horizontal: MOE medio corregido del grupo NR.

Respecto del MOR corregido, en la Figura 4.74 se observa una mejora mínima del 119% con respecto de las vigas sin reforzar. En cuanto a los refuerzos con laminado LR, destacan las vigas reforzadas con productos SIKA® (LR-S). Este resultado se debe principalmente al alto valor de MOR que alcanza la viga LR-S-1 (54 MPa), y al igual que lo indicado anteriormente, debido al buen estado de la viga y a la inexistencia de nudos en las zonas de esfuerzos a tracción. Por otro lado, las vigas con refuerzo trenzado (BR) obtienen valores similares para las dos casas comerciales. Este refuerzo proporciona una prominente mejora del 181% y del 156% para los productos SIKA® y DRIZORO®, respectivamente.

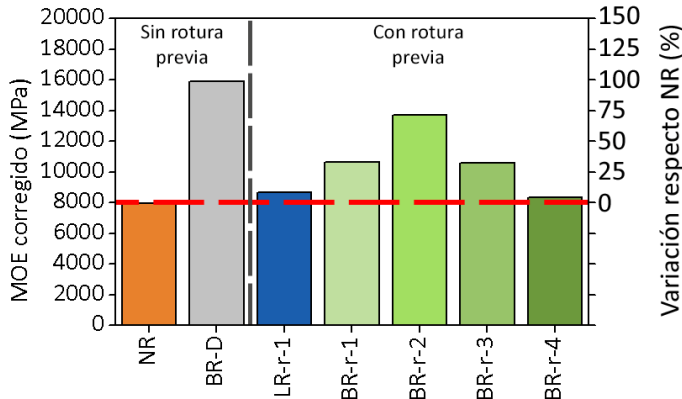
La mejora de rigidez que aporta cada tipo de refuerzo se presenta en la Figura 4.75. Este incremento del MOE es como mínimo del 60%. Se observa que las vigas con refuerzo longitudinal (LR) y las vigas con refuerzo trenzado con productos de SIKA® (BR-S) alcanzan valores similares. Por otro lado, es remarcable el valor que proporciona el refuerzo trenzado con materiales DRIZORO®, con un 99% de incremento del MOE con respecto de las vigas sin refuerzo.

Por último, las Figuras 4.76 y 4.77 presentan el MOR y el MOE corregidos para las vigas sin y con rotura previa. La línea vertical gris diferencia entre las vigas ensayadas en la primera y segunda fase. En particular, estas figuras muestran a modo de comparación los resultados obtenidos para las vigas sin refuerzo (NR) y con refuerzo trenzado con productos DRIZORO® (BR-D) ensayadas en la primera fase. La línea roja horizontal indica la variación con respecto del valor medio de las vigas sin refuerzo de la primera fase.



Grupo / Viga	NR	BR-D	LR-r-1	BR-r-1	BR-r-2	BR-r-3	BR-r-4
	Sin rotura previa		Con rotura previa				
MOR c. (MPa)	16	41	11	25	23	41	18

Figura 4.76. MOR medio corregido para cada grupo de vigas de gran escuadría sin y con rotura previa. Línea roja horizontal: MOR medio corregido del grupo NR sin rotura previa. Línea gris vertical: Separación entre vigas sin rotura (izq.) y con rotura previa (der.).



Grupo / Viga	NR	BR-D	LR-r-1	BR-r-1	BR-r-2	BR-r-3	BR-r-4
	Sin rotura previa		Con rotura previa				
MOE c. (MPa)	7992	15909	8677	10673	13696	10584	8341

Figura 4.77. MOE medio corregido para cada grupo de vigas de gran escuadría sin y con rotura previa. Línea roja horizontal: MOE medio corregido del grupo NR sin rotura previa. Línea gris vertical: Separación entre vigas sin rotura (izq.) y con rotura previa (der.).

En primer lugar, se observa que la viga reforzada únicamente con el laminado no consigue recuperar totalmente la capacidad mecánica de una

viga altamente dañada. Por otro lado, es reseñable que el resto de vigas reparadas con refuerzo trenzado alcanzan valores superiores al de las vigas sin refuerzo y sin daño previo. Es destacable el resultado obtenido para la viga BR-r-3, que aún siendo una viga altamente dañada y reparada, proporciona el mismo valor de MOR corregido que el MOR medio de las vigas con refuerzo trenzado ensayadas en la primera fase.

En la Figura 4.77 se observa que indistintamente de la solución que se tome para reparar una viga con alto nivel de daño, se mejora la rigidez con respecto de una viga sin refuerzo ensayada en la primera fase. Esta recuperación se consigue incluso para el refuerzo LR-r, el cual alcanza una mejora del 9% con respecto de las vigas NR sin rotura previa. Estos resultados son de elevado interés en elementos dañados, en los que el problema principal no sea la recuperación total de la capacidad mecánica, sino disminuir la deflexión que la viga pueda alcanzar. Por último, se aprecia que en ninguna de las vigas ensayadas en la segunda fase, se alcanzan valores similares a las vigas con refuerzo trenzado de la primera fase.

Analizando globalmente los resultados de MOR y MOE obtenidos, queda claro que para realizar una adecuada reparación de un elemento altamente dañado se ha de tener especial cuidado en:

- 1) El tipo de refuerzo a aplicar, (LR o BR) según la propiedad mecánica sobre la que se necesita tener especial atención;
- 2) El diseño del refuerzo bien sea LR o BR, aplicándolo en las zonas y con las dimensiones adecuadas para asegurar una correcta reparación del elemento dañado.

4.5.2. Comparación de los resultados analíticos y experimentales

Se ha realizado una comparación entre el modelo de Bazan-Buchanan y el modelo de Argüelles o modelo alternativo (Apartado 2.1.4). La principal diferencia entre ambos reside en que el primero considera que los módulos elásticos a tracción y compresión (E_t y E_c , respectivamente) son iguales, al contrario que ocurre con el modelo de Argüelles. En este Apartado se recoge

la comparación entre ambos modelos para las vigas de pequeña escuadría, y en particular para las vigas sin refuerzo (NR) y las vigas reforzadas con laminado de ancho parcial (LR-P-S y LR-P-D, con productos SIKA® y DRIZORO®, respectivamente).

Por otro lado, ha quedado patente el efecto negativo que la presencia de defectos en la zona de máximas tracciones proporciona a la capacidad a flexión. En gran medida, este efecto negativo se debe a que el área del defecto no trabaja, con lo cual no debería tenerse en cuenta en el cálculo de la sección de trabajo real o eficaz. La Figura 4.78 representa esquemáticamente la diferencia entre sección total y sección eficaz.

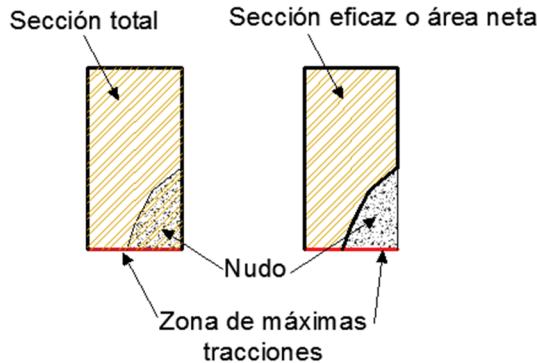


Figura 4.78. Esquema de la sección total y el área eficaz real de una sección de madera con defectos en la zona de máximas tracciones.

Con el fin de tener en cuenta la presencia de defectos en el cálculo de la sección, se considera un coeficiente reductor de la sección de trabajo eficaz. Esto es de especial importancia en el caso de madera antigua con grandes defectos. Por ello, se propone el coeficiente de reducción EAC (*Effective Area Coefficient*) según la Ec. 18,

$$EAC = \frac{A_n}{A_t} \quad \text{Ec. 18}$$

donde A_n es el área neta de la sección de la viga de madera (descontando los defectos) y A_t es el área total de la sección. Este factor se utiliza en la sección de cálculo de la resistencia a flexión, siendo en este caso la sección

central de la viga. El coeficiente de reducción EAC se aplica en el cálculo teórico del MOR de la forma:

$$MOR_{Teórico} = EAC \cdot MOR_t \tag{Ec. 19}$$

donde MOR_t es el MOR teórico calculado a través de las ecuaciones de equilibrio, antes de aplicar el coeficiente EAC. De la misma forma que en apartados anteriores, en los resultados del MOR experimental se aplica el factor DC, para la corrección de la densidad.

Un análisis analítico precisa de una serie de parámetros de entrada para su cálculo. En este caso, los parámetros clave son los asociados con las propiedades mecánicas del material de análisis. Por ello, se ha realizado una caracterización del material para cada viga en particular a través de ensayos a compresión. En concreto, se extrajeron tres probetas de cada viga. La Figura 4.79 muestra los resultados experimentales de dos de los tres ensayos a compresión llevados a cabo para cada viga.

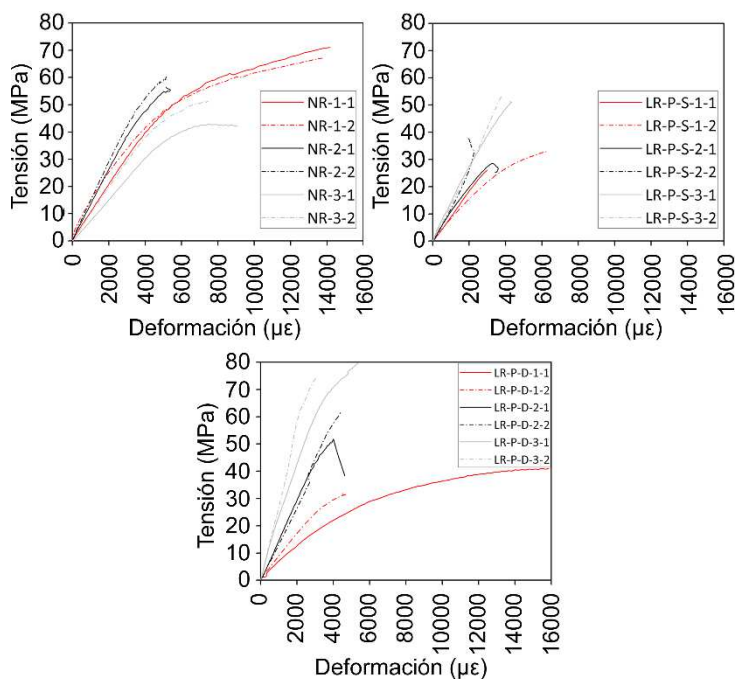


Figura 4.79. Tensión frente a deformación durante los ensayos a compresión de probetas de cada viga.

Como se percibe en la Figura 4.79, un cálculo analítico riguroso necesita de una adecuada caracterización del material, no pudiéndose emplear valores medios o genéricos. Es destacable la gran variabilidad en los resultados obtenidos, pese a ser madera de la misma procedencia. Esto se debe en gran parte a la heterogeneidad intrínseca de la madera y a su deterioro por el paso del tiempo. Además, estos resultados no varían únicamente en cuanto a resistencia máxima a compresión, sino también en su comportamiento dúctil. A modo de ejemplo, se puede observar como las probetas extraídas de la viga NR-2 presentan un comportamiento prácticamente elástico, con una rotura casi frágil, mientras que en las probetas de la viga NR-1 se obtiene un comportamiento claramente plástico, a partir del límite elástico.

La Tabla 4.16 muestra los valores medios de tensión de límite elástico ($\sigma_{w,c,y}$), tensión última ($\sigma_{w,c,u}$), límite de deformación elástica ($\varepsilon_{w,c,y}$), deformación última ($\varepsilon_{w,c,u}$) y módulo elástico medio a compresión ($E_{w,c}$) de cada viga que se emplearon para el cálculo analítico.

Tabla 4.16. Resultados de la caracterización de la madera a compresión para cada viga. Media de las tres probetas extraídas de cada viga.

Viga	$\sigma_{w,c,y}$ (MPa)	$\varepsilon_{w,c,y}$ (mε)	$\sigma_{w,c,u}$ (MPa)	$\varepsilon_{w,c,u}$ (mε)	$E_{w,c}$ (MPa)
NR-1	45,6	4,4	61,8	8,0	10329
NR-2	43,9	3,3	63,3	5,3	13473
NR-3	39,1	4,6	44,6	7,4	10593
LR-P-S-1	24,3	3,1	29,0	4,6	8476
LR-P-S-2	23,5	2,1	30,9	3,3	11398
LR-P-S-3	39,1	3,0	52,8	4,3	13210
LR-P-D-1	30,3	4,4	36,3	6,3	7612
LR-P-D-2	47,9	3,2	59,3	4,4	13937
LR-P-D-3	63,6	2,6	77,0	4,2	24450

En el caso del modelo de Argüelles, es importante recordar que se necesita la deformación medida en el lateral de la viga, lo que hace posible determinar la posición de la fibra neutra a través del principio de compatibilidad de

deformaciones. Como ejemplo, la Figura 4.80 muestra el cálculo de la posición de la fibra neutra para una viga, y su variación a lo largo del tiempo.

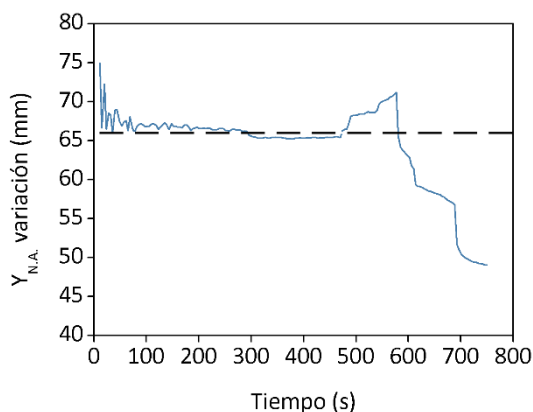


Figura 4.80. Eje neutro frente al tiempo durante el ensayo a flexión de la viga LR-P-D-1. Línea discontinua horizontal: Valor empleado en el modelo de Argüelles.

Como se muestra en la Figura 4.80, al comienzo del ensayo las deformaciones sufren grandes variaciones, hasta alcanzar cierta estabilidad. Esto se debe principalmente a la existencia de defectos y a las propiedades intrínsecas de la madera. Posteriormente, hay una fase en la cual la fibra neutra se mantiene prácticamente constante, siendo este el valor usado en el modelo analítico. Por último, y cercano ya a la rotura de la viga, se produce una caída brusca. Aunque este comportamiento podría sugerir la plastificación del material, no existe una asociación directa, ya que la presencia de nudos y defectos hace que las deformaciones ante tensiones altas dejen de comportarse linealmente. A pesar de ello, el cálculo de la fibra neutra proporciona una gran información, sirviendo como un buen indicador del daño en la viga sometida a flexión. Además, puede ser utilizado como un parámetro que advierte sobre cuando el elemento se encuentra cerca de alcanzar su capacidad máxima de carga.

Una vez que se tienen todos los parámetros necesarios para el cálculo analítico, se obtiene el MOR teórico (MOR_t), como se muestra en la Tabla 4.17. En concreto, los parámetros necesarios son:

- 1) Tensión a compresión de la madera (límite elástico y último);
- 2) Deformación a compresión de la madera (límite elástico y último);

- 3) Deformación medida en la cara inferior de la viga (máxima tensión a tracción);
- 4) Para el modelo de Argüelles, la deformación medida en la cara lateral de la viga ($h_{w,1}$);
- 5) Para las vigas reforzadas, la tensión a tracción y deformación última del material de CFRP.

Tabla 4.17. MOR teórico y experimental para ambos modelos analíticos. Ratio E_t/E_c .

Viga	Modelo teórico	MOR teórico (MPa)	MOR experimental (MPa)	Desviación (%)	E_t/E_c
NR-1	Bazan-Buchanan	21,5	25,7	16,3	1,0
	Argüelles	29,4		14,4	1,5
NR-2	Bazan-Buchanan	37,6	43,6	13,7	1,0
	Argüelles	42,3		3,0	1,2
NR-3	Bazan-Buchanan	26,4	32,9	19,8	1,0
	Argüelles	31,1		5,5	1,3
LR-P-S-1	Bazan-Buchanan	29,6	31,4	5,7	1,0
	Argüelles	30,6		2,6	0,8
LR-P-S-2	Bazan-Buchanan	24,5	28,7	14,6	1,0
	Argüelles	25,8		10,1	1,6
LR-P-S-3	Bazan-Buchanan	36,3	30,8	17,9	1,0
	Argüelles	35,4		14,9	0,8
LR-P-D-1	Bazan-Buchanan	32,0	32,9	2,7	1,0
	Argüelles	33,9		3,0	0,8
LR-P-D-2	Bazan-Buchanan	55,2	51,7	6,8	1,0
	Argüelles	55,7		7,7	1,1
LR-P-D-3	Bazan-Buchanan	72,2	65,4	10,4	1,0
	Argüelles	73,0		11,6	1,1

En el caso del modelo de Argüelles, la Tabla 4.17 muestra además la relación entre los módulos elásticos E_t/E_c . El módulo elástico a compresión E_c se obtiene directamente de los ensayos a compresión, usándose en el cálculo analítico. Sin embargo, debido a las diferencias comentadas entre un ensayo a flexión y tracción, no es posible obtener de este último un valor válido del módulo a tracción (E_t) para ser usado en el modelo analítico. Por ello, se

establece la ratio E_t/E_c . El valor E_t se obtiene a través de la ecuación $\sigma = E \cdot \varepsilon$, siendo ε la máxima deformación a tracción ($\varepsilon_{w,t,i}$ y $\varepsilon_{frp,t,i}$ para las vigas sin y con refuerzo, respectivamente). Posteriormente, una vez calculada la posición de la fibra neutra ($Y_{N.A.}$), se realiza un proceso iterativo con el fin de encontrar la ratio E_t/E_c que satisface las ecuaciones de equilibrio descritas anteriormente. La Figura 4.81 presenta los valores de desviación de los resultados del MOR teóricos frente a los experimentales para ambos modelos.

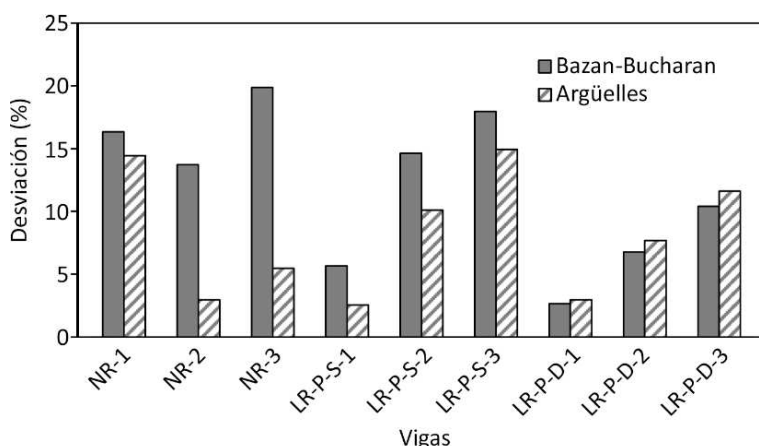


Figura 4.81. Valores de desviación entre el MOR teórico y experimental para ambos modelos analíticos.

En general, la Figura 4.81 muestra una mejora evidente en el cálculo de MOR teórico cuando se emplea el modelo de Argüelles. Se pueden distinguir dos grupos, según si la relación E_t/E_c es igual o cercana a 1 o no. En el primer caso ($E_t/E_c \approx 1$) los resultados obtenidos para ambos modelos son prácticamente similares, lo cual indica que el modelo de Argüelles para este supuesto es compatible con el modelo de Bazan-Buchanan. Por otro lado, cuando esta ratio obtenida con el modelo de Argüelles se aleja del valor unidad (véase la viga NR-3), se observa una importante reducción en la desviación entre el cálculo teórico y los resultados experimentales, en comparación con el modelo clásico. En casos como las vigas NR-2 y NR-3 se consiguen reducciones en la desviación obtenida del 357% y del 260%,

respectivamente. Esto es un claro indicador de que no tener en cuenta la diferencia entre módulos elásticos puede conllevar a importantes errores en el cálculo analítico.

Otro aspecto importante de la relación entre módulos elásticos es que no siempre el módulo elástico a tracción es mayor que el de compresión, o dicho de otra forma, la ratio $E_t/E_c \geq 1$. Se observa como en vigas como la LR-P-S-1 y la LR-P-D-1 esta relación es de 0,8 para ambas. La Figura 4.82 muestra una imagen de ambas vigas.

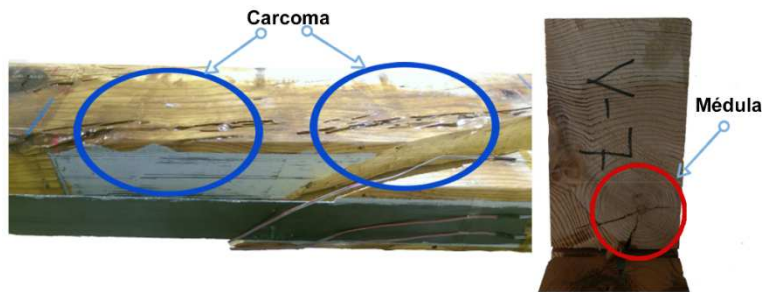


Figura 4.82. Imágenes de una viga en particular. Izq.: LR-P-S-1. Der.: LR-P-D-1.

Tal y como se observa en la Figura 4.82, ambas vigas se encuentran afectadas por defectos. En particular, la viga LR-P-S-1 tiene una gran parte afectada por carcoma en la zona de tensiones a tracción. Por otro lado, la viga LR-P-D-1 tiene en dicha zona la médula, asociada a un descenso en el módulo elástico. Esta correlación entre los resultados teóricos, experimentales y el estado de la viga son un claro indicador de la efectividad del modelo de Argüelles y de la ratio E_t/E_c , haciéndolo un modelo más general en comparación con el modelo clásico, ya que es válido para cualquier relación entre módulos elásticos.

4.5.3. Comparación de costes de materiales y tiempos de elaboración

Por último, se presentan los resultados pertenecientes al aspecto económico, en concreto los tiempos de elaboración y los costes del refuerzo. Por motivos de confidencialidad, los costes se reflejan en % con respecto del refuerzo LR.

Es importante mencionar que estos cálculos se realizaron bajo condiciones de laboratorio.

El cálculo de los tiempos y los costes se ha realizado por metro lineal. Además, dicho cálculo se ha normalizado según la sección de cada viga, con el fin de poder realizar una correcta comparación entre vigas de pequeña y gran esquadría. Para el cálculo del tiempo de elaboración, se han tenido en cuenta los tiempos de:

- Aplicación de la capa de imprimación;
- Colocación del refuerzo.

Se excluye el tiempo de preparación del material (corte del CFRP, limpieza, etc.) ya que es altamente variable. La Tabla 4.18 y la Figura 4.83 muestran los valores de esta comparativa.

Tabla 4.18. Tiempos de elaboración para los diferentes tipos de refuerzo y tamaño de vigas. Valores con respecto del refuerzo LR-P-S y normalizados según la sección de la viga reforzada.

Viga	Tiempo medio (%)	Viga	Tiempo medio (%)
Vigas de pequeña esquadría			
LR-P-S	100	UR-P-U-S	414
LR-F-S	145	UR-P-U-D	254
LR-P-D	102	UR-P-B-D	254
LR-F-D	107	BR-U-S	498
UR-U-S	407	BR-U-D	305
UR-U-D	186	BR-B-D	262
UR-B-D	219	-	
Vigas de gran esquadría			
LR-S	51	BR-S	228
LR-D	40	BR-D	102
-	-	BR-D-r	122

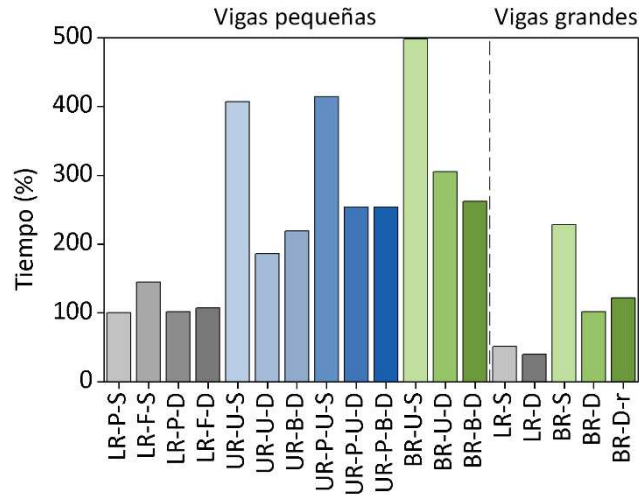


Figura 4.83. Variación de los tiempos de elaboración para los diferentes tipos de refuerzo y tamaño de vigas. Valores con respecto del refuerzo LR-P-S y normalizados según la sección de la viga reforzada.

De forma global, en la Figura 4.83 se observa que el tiempo de elaboración en vigas de pequeña escuadría es mayor que en el de gran escuadría (comparando mismos tipos de refuerzo). Esto es debido a que cuanto mayor sea la superficie a reforzar de forma continua, mayor es el rendimiento de los operarios, reduciéndose el tiempo por metro lineal.

Centrándose en las vigas de pequeña escuadría, y en particular en los refuerzos con laminado, no se aprecia una diferencia notable entre refuerzo parcial o completo, así como entre casas comerciales. En cuanto a las soluciones de refuerzo continuas (UR y UR-P), si se aprecia una clara diferencia entre casas comerciales, siendo las vigas reforzadas con productos SIKA[®] las que mayor tiempo de elaboración requieren. Esto es debido a que el tipo de resina empleado necesita de un mayor tiempo en su aplicación, cuando se realiza sobre tejido. Por otro lado, la inclusión de una lámina en este tipo de solución de refuerzo, no conlleva un notable aumento en los tiempos de elaboración, ya que el mayor tiempo es empleado en la colocación del tejido.

Las vigas con refuerzo trenzado (BR) presentan los mayores tiempos de elaboración. Este resultado se debe a que, pese a tener menos cantidad de material, el tejido debe colocarse en posiciones específicas, empleándose por

lo tanto más tiempo que si se aplicase de forma continua. De nuevo, la diferencia entre las vigas reforzadas con productos SIKA® y las reforzadas con productos DRIZORO®, está en la aplicación de la resina.

La segunda parte de la Figura 4.83 presenta los resultados de vigas grandes. En el caso de las vigas reforzadas con una lámina de CFRP, se obtienen valores del 51% y del 40% para vigas reforzadas con materiales SIKA® y DRIZORO®, respectivamente. Como se ha comentado, el rendimiento de colocar una lámina de un metro de longitud es mucho menor que el de colocar una de cuatro metros. En el caso de las vigas con refuerzo trenzado, se sigue produciendo la misma diferencia entre los tiempos de aplicación de las resinas de SIKA® y DRIZORO®.

Por último, las vigas de gran escuadría ensayadas en la segunda fase (BR-D-r) presentan un tiempo del 122%, mientras que el tiempo de elaboración de las vigas ensayadas en la primera fase (BR-D) es del 102%. El refuerzo aplicado en las vigas reparadas se diseña de forma individual para cada viga, con lo que su colocación lleva consigo el empleo de un mayor tiempo de elaboración.

La Tabla 4.19 y la Figura 4.84 muestran el cálculo de los costes del refuerzo, en los que se ha tenido en cuenta:

- El coste de la imprimación;
- El coste de la resina;
- El coste del material de CFRP (laminado y tejido);
- La mano de obra: Teniéndose en cuenta dos operarios, con un coste estimado de 16 €/h por operario.

Tabla 4.19. Costes de elaboración para los diferentes tipos de refuerzo y tamaño de vigas. Valores con respecto del refuerzo LR-P-S y normalizados según la sección de la viga reforzada.

Viga	Coste medio (%)	Viga	Coste medio (%)
Vigas de pequeña escuadría			
LR-P-S	100	UR-P-U-S	261
LR-F-S	148	UR-P-U-D	242
LR-P-D	137	UR-P-B-D	268
LR-F-D	170	BR-U-S	241
UR-U-S	170	BR-U-D	226
UR-U-D	117	BR-B-D	226
UR-B-D	129	-	
Vigas de gran escuadría			
LR-S	70	BR-S	138
LR-D	72	BR-D	116
-	-	BR-D-r	124

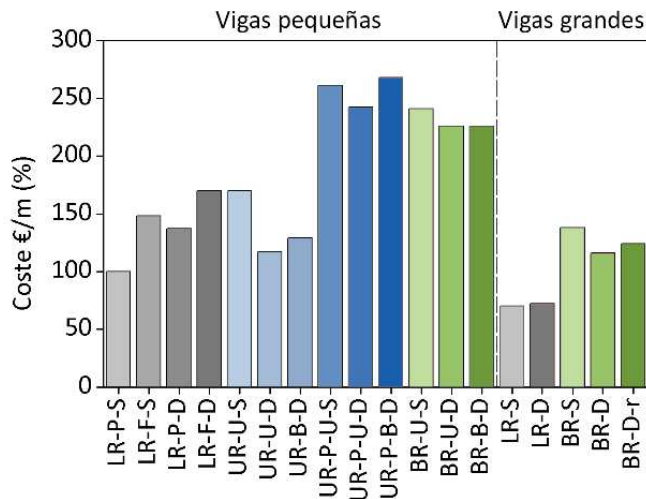


Figura 4.84. Variación de los costes de elaboración para los diferentes tipos de refuerzo y tamaño de vigas. Valores con respecto del refuerzo LR-P-S y normalizados según la sección de la viga reforzada.

Al igual que para los tiempos de elaboración, la Figura 4.84 presenta los resultados divididos en vigas de pequeña y gran escuadría. En líneas generales se observa que los costes en elementos de pequeño formato son mayores que para elementos de mayor tamaño.

Para las vigas de pequeña escuadría y reforzadas con la solución LR, se obtiene un coste mayor para las vigas reforzadas con productos DRIZORO® que para las reforzadas con productos SIKA®. En este caso, queda claro que un refuerzo parcial permite reducir costes en comparación con un refuerzo de ancho total.

Para las soluciones de refuerzo continuo, queda patente la gran diferencia de incluir, además del tejido en forma de U, una lámina. A modo de ejemplo, mientras que las vigas UR-U-S alcanzan un coste del 170%, el coste de las vigas UR-P-U-S es del 261%.

En el caso de las vigas con refuerzo de tejido en U, las vigas con productos SIKA® obtienen mayor coste que las reforzadas con productos DRIZORO®. Por otro lado, las vigas con tejido y laminado (UR-P) no presentan diferencias notables entre ambas casas comerciales.

En cuanto al refuerzo trenzado, se observa que el coste es muy similar, incluso inferior a las vigas con refuerzo continuo, pese a necesitar las primeras mayor tiempo de elaboración. Esto se debe al gran ahorro de material que supone esta solución de refuerzo frente al resto. En este caso tampoco se aprecia diferencia entre las vigas reforzadas con productos SIKA® y con productos DRIZORO®.

Las vigas de gran escuadría con refuerzo LR presentan valores entorno al 71% para ambas casas comerciales, siendo de nuevo menor que para las vigas de pequeña escuadría. Las vigas con refuerzo BR con productos de SIKA® tienen costes algo mayores que las vigas reforzadas con materiales DRIZORO®. De nuevo y como era de esperar, el coste es muy inferior en comparación con las vigas de pequeña escuadría. Comparando las vigas ensayadas en la primera y segunda fase (BR-D y BR-D-r, respectivamente), se aprecia un mayor coste para estas últimas. Este resultado se debe al incremento en el tiempo de elaboración, ya que el material empleado en ambos casos es similar.

5. Ejemplo de aplicación en obra

Una transferencia directa del conocimiento, de la investigación llevada a cabo en esta Tesis, fue la realización de un demostrador, a través de una intervención real de rehabilitación. La intervención se realizó en la Jefatura del MADOC - Edificio de la Capitanía General situado en la Plaza de la Cruz S/N (Figura 5.1), dentro de la obra general ejecutada por DÁVILA Restauración de Monumentos S.L. en la cubierta de madera de dicho edificio.

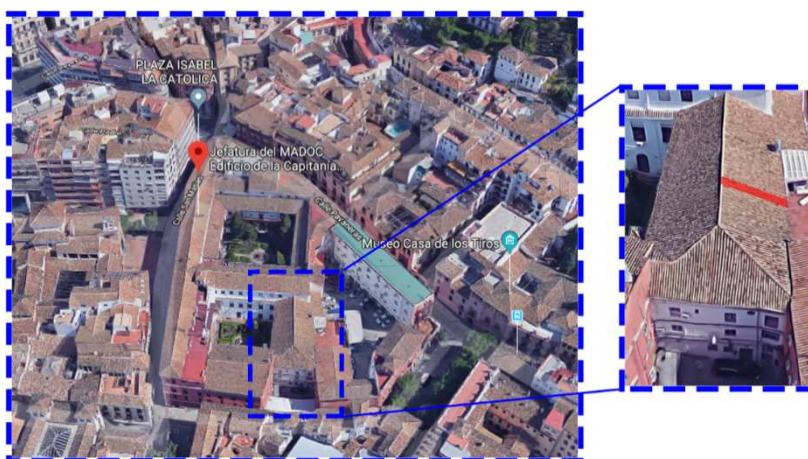


Figura 5.1. Vista general de la localización de la Jefatura del MADOC y detalle de la situación de la viga a reforzar. Línea roja: Viga a reforzar. Fuente: Google Maps®.

5.1. Descripción del elemento dañado

La actuación consistió en la reparación de un par de cubierta de 3380 mm de longitud, aplicando la solución de refuerzo trenzada con tejido bidireccional (BR) y con productos de DRIZORO®. El par presentaba dos problemas principales (Figura 5.2):

- 1) **Una gran grieta en la parte central**, originada en la zona de máximas tracciones y con un tipo de fallo por cortante;
- 2) **Una zona afectada por humedad** en el extremo que apoya en el durmiente.



Figura 5.2. Imagen de la rotura del par de cubierta en el edificio de Capitanía. Arriba: Vista general. Abajo: Detalle de la rotura y la llegada del par al durmiente.

La actuación se realizó en dos pasos:

1) Recuperación de la flecha:

Antes de aplicar el refuerzo, la viga debe recuperar en la medida de lo posible la posición inicial en cuanto a flecha se refiere. Para ello, es necesario apeado la zona de la cubierta bajo el par, liberándolo así de las cargas que recibe. Una vez apeado, y mediante gatos hidráulicos, es posible recuperar la posición del par, fijándolo con el uso de 10 varillas de fibra de vidrio (Figura 5.3). El objetivo de la inserción de estas varillas es el de sujetar el elemento durante la reparación, permitiendo al trabajador operar de forma segura bajo el par.



Figura 5.3. Imágenes del estado de la viga una vez fijada con las varillas de fibra de vidrio.

2) Aplicación del refuerzo:

Una vez fijado el par, se llevó a cabo la aplicación del refuerzo, siguiendo los procedimientos y técnicas óptimas de los ensayos realizados en laboratorio.

5.2. Diseño del refuerzo y ejecución

El par a reforzar, presentaba una gran grieta de 1940 mm de longitud, causa de un agotamiento de la capacidad mecánica del mismo, lo que originó posteriormente la rotura total del elemento. La cubierta en esta zona se encontraba con cierto hundimiento, provocando además que los pares colindantes tengan que soportar las cargas que el par afectado recogía. Además, mediante inspección visual se observó que los pares a ambos lados tenían síntomas de haber sido reparados parcialmente en intervenciones anteriores. La Figura 5.4 muestra un croquis del par en el estado de partida antes de la reparación.

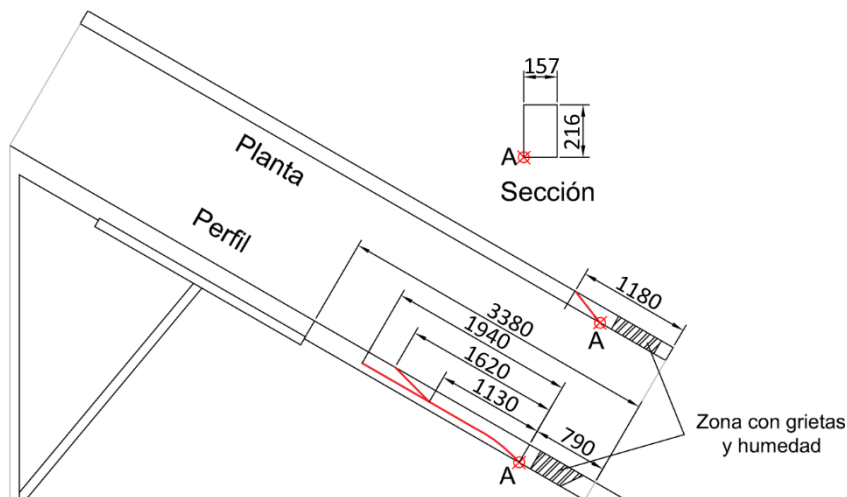


Figura 5.4. Croquis de situación del estado del par antes de la reparación. Línea roja: Grieta principal del par. Cotas en mm.

Una vez identificadas y medidas las distintas afecciones del par, se realizó un diseño del refuerzo a aplicar [78]. Para ello, y tomando como referencia la experiencia previa en los ensayos de vigas de gran escuadría en la segunda fase, se colocó un laminado de 100 mm de ancho en la cara inferior (zona de máximas tracciones). Con este ancho, se cubrió parcialmente la cara sometida a máximas tracciones en una proporción similar a las vigas reforzadas en laboratorio. En cuanto al diseño del tejido, se prestó especial atención a tres partes principales del par:

- 1) Zona afectada por humedad;

- 2) Inicio de grieta en la cara inferior;
- 3) Bifurcación y finales de grietas.

Con esto, fue posible establecer la posición y las dimensiones de las tiras de tejido que se han de colocar en el par en forma de U (Figura 5.5).

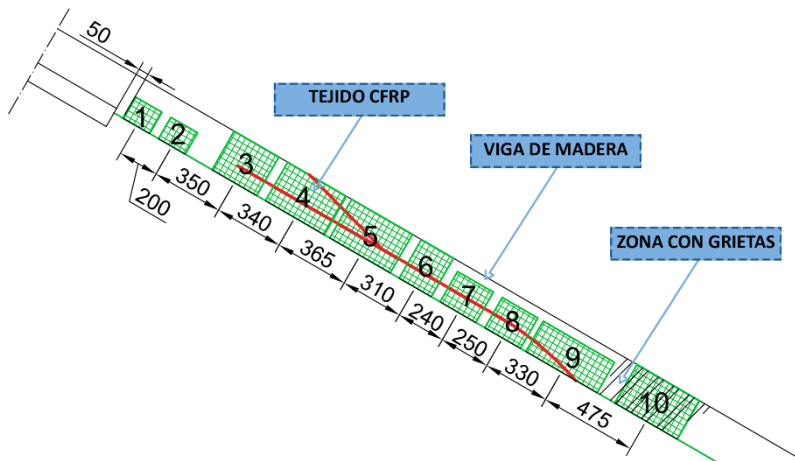


Figura 5.5. Esquema de distribución y colocación del tejido de CFRP de la viga a reparar. Cotas a los ejes de las tiras de tejido de CFRP. Dimensiones en mm.

Una vez establecido el diseño de refuerzo, el corte del material de CFRP se realizó en laboratorio por motivos de comodidad y operatividad en obra. Posteriormente se llevó todo el material al lugar de la obra, y se aplicó sobre el elemento de madera mediante un procedimiento similar al seguido en el laboratorio. En primer lugar se imprimó la viga, con un rendimiento de consumo muy parecido al de laboratorio. La Figura 5.6 muestra el estado del par antes y después de aplicarse la imprimación.



Figura 5.6. Imágenes del par antes y después de aplicar la capa de imprimación.

Mientras que en laboratorio, la imprimación solamente se aplicó a las zonas de refuerzo por motivos de eficacia y seguridad, en el caso de la reparación en obra se aplicó en toda la superficie del par a reforzar.

Una vez la imprimación cumplió los tiempos de curado, se colocó el laminado de CFRP. En este caso, existe una diferencia importante en cuanto a la colocación de la lámina de CFRP, ya que ésta se realiza estando debajo del elemento a reparar. Sin embargo, esta circunstancia se testó previamente en laboratorio durante la elaboración de algunas de las vigas de pequeña escuadría. La Figura 5.7 muestra una imagen una vez colocado el laminado de CFRP.



Figura 5.7. Estado de la viga tras la colocación de la lámina de CFRP.

Por cuestiones de operatividad, se esperó 24 horas para proceder a colocar el tejido. En este caso el replanteo de las piezas es de vital importancia, ya que cada una está hecha a medida para las diferentes partes y afecciones del par. De nuevo, la aplicación del tejido se realizó estando el operario debajo del elemento a reparar. La densidad de la resina permite que este hecho no suponga apenas diferencia en cuanto a tiempos, aunque si en cuanto a consumo de resina (mayor cantidad de resina desperdiciada por goteos). La Figura 5.8 muestra una imagen del último repaso de resina para evitar que quedasen oquedades indeseadas y el estado final del refuerzo.



Figura 5.8. Imágenes del último repaso de resina y del estado final del refuerzo.

5.3. Costes y tiempos de elaboración

Al igual que para las vigas elaboradas en laboratorio, en la ejecución del refuerzo “in situ” se realizó una medición de los tiempos de elaboración y costes. La Tabla 5.1 recoge las distintas tareas realizadas durante la intervención, así como la fecha de ejecución.

Tabla 5.1 Tareas y fechas de ejecución del refuerzo sobre el par de cubierta.

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 del tejido de CFRP	09/06/2017
Repaso de resina	12/06/2017

A continuación, se presenta una comparación entre la aplicación en obra y laboratorio. Esta comparativa se realiza teniendo en cuenta únicamente las vigas con refuerzo trenzado (BR), bien sean de pequeña o gran escuadría, sin o con rotura previa. Del mismo modo que en el Apartado 4.5, los resultados se presentan en % por motivos de confidencialidad.

Al tener todas las vigas la misma solución de refuerzo, la comparativa se realiza por m² de superficie reforzada, tomando como el 100% las vigas de pequeña escuadría con refuerzo BR y tejido bidireccional (BR-B-D).

Tabla 5.2. Comparativa de tiempos de elaboración y costes de los diferentes tipos de refuerzos de vigas de pequeña y gran escuadría, sin y con rotura previa y de la reparación “in situ” en Capitanía General.

Tarea	Vigas de pequeña escuadría		Vigas de gran escuadría (BR)		Reparación “in situ”
	BR-U-D	BR-B-D	Sin rotura	Con rotura	
Tiempos (%)	116	100	55	60	75
Costes (%)	101	100	73	78	72

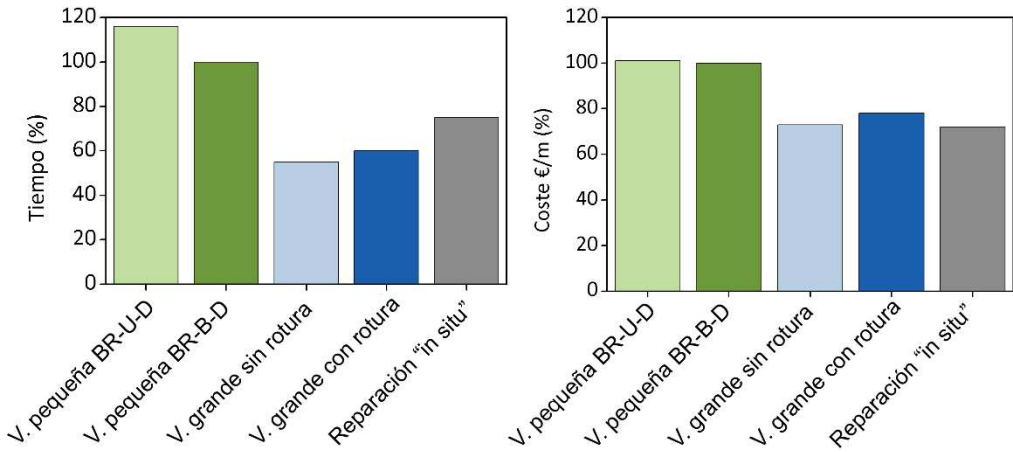


Figura 5.9. Gráfico comparativo de tiempos de ejecución y costes de los diferentes tipos de refuerzos en vigas de 1,3 m, 4,5 m sin y con rotura previa y en la actuación "in situ" en Capitanía General.

La Figura 5.9 sigue mostrando el mismo patrón que en los resultados obtenidos en el Apartado 4.5. Para las vigas de pequeña escuadría se requieren mayores tiempos de elaboración y costes que para las vigas de gran formato. Observando los tiempos de elaboración de las vigas de gran escuadría, se aprecia claramente una correcta correlación entre los tiempos necesarios para una viga sin rotura previa, con rotura previa y la actuación "in situ". Es lógico que esta última necesite de un mayor tiempo de elaboración que el resto, principalmente por los mayores inconvenientes o imprevistos que se presentan en obra.

Sin embargo, en cuanto a costes de €/m², no se aprecian diferencias importantes entre las vigas elaboradas en laboratorio y la viga reparada en obra. Esto se traduce en que, pese a emplear un mayor tiempo de elaboración, se realizó un correcto diseño del refuerzo, prestando especial atención a no sobredimensionar la cantidad de material necesario a usar.

6. Conclusiones

En esta Tesis Doctoral se ha realizado un análisis detallado de la aplicación de refuerzos de fibra de carbono para rehabilitación y reparación de vigas de madera. Se ha llevado a cabo una comparación experimental de diferentes soluciones de refuerzo, en vigas de diferente formato, con y sin rotura previa. Por otro lado, se han empleado y comparado dos modelos analíticos con los resultados experimentales. Además, se ha realizado una transferencia directa del conocimiento de la investigación llevada a cabo en esta Tesis, a través de un demostrador en una situación real de rehabilitación de una cubierta de madera. Todos los tiempos de elaboración y costes de materiales han quedado recogidos en la Tesis, con el fin de evaluar económicamente los distintos tipos de refuerzo y su viabilidad para introducirse en el mercado del sector de la construcción como alternativa a las soluciones de refuerzo y reparación tradicionales. Las conclusiones se presentan divididas según las actividades principales que se han desarrollado.

Adherencia madera-refuerzo

- En líneas generales, para los ensayos *pull-off*, las probetas con tejido de CFRP alcanzan mayores valores de carga máxima que las probetas con laminado. Esto se debe a que la resina impregna mejor

el tejido que el laminado, consiguiendo una mejor adherencia con la madera. En el caso de los laminados, ciertas probetas tienen un fallo de adherencia entre la madera y el CFRP, mientras que las probetas con tejido no presentan este tipo de fallo. Además, la mayoría de estas fallan por la rotura de la madera, lo cual es un excelente indicador de la buena adherencia madera-CFRP.

- Tanto laminados como tejidos proporcionan mejores resultados con las resinas de baja densidad, debido a la mayor capacidad de penetración y mejor impregnación de los poros y fibras de la madera. En el caso de los tejidos, la densidad de la resina es crucial, ya que esta debe impregnar perfectamente el material de CFRP para que se produzca una correcta transmisión de esfuerzos entre los diferentes materiales. En particular, la resina de alta densidad de DRIZORO® (RM-C), no permite una impregnación adecuada, provocando un fallo del tejido prematuro, con cargas de rotura muy inferiores al resto de probetas.
- En este tipo de ensayos, el uso de la imprimación tiene escasa influencia en la carga de rotura, y por lo tanto en la adherencia madera-CFRP. Sin embargo, los resultados obtenidos son diferentes, comparando laminados y tejidos.
- Con respecto de los resultados de EA, las señales clasificadas en el Grupo 1 (bajas frecuencias), tienen el mismo patrón para todas las probetas, por lo que no parecen ser relevantes para la evaluación de la adherencia. Sin embargo, las señales de los Grupos 2 y 3 presentan grandes variaciones dependiendo del modo de fallo y los materiales empleados.
- En las probetas que fallan por una mala adherencia CFRP-sufridera (modo de fallo A), bien sean con laminado o tejido, no se detectan señales de EA de alta frecuencia (Grupo 3). Se emite una pequeña cantidad de señales en medias frecuencias (Grupo 2). Esto es un claro indicador de que las señales clasificadas en ambos grupos (2 y 3) están relacionadas con mecanismos de daño, bien sean del CFRP (modo B), de la adherencia CFRP-madera (modo C) o de la rotura

de la madera (modo D). En el caso de los laminados, cuando se aplican con resinas de alta densidad, no se registran señales del Grupo 3 para los modos de fallo B y C (rotura del CFRP y deslaminación madera-CFRP, respectivamente). Esto se traduce en una mala adherencia madera-CFRP, debido a una transmisión de tensiones pobre entre ambos materiales. Por otro lado, cuando se usan resinas de baja densidad, para ambos modos de fallo (B y C) se observa una mayor emisión de señales del Grupo 2 (empezando a registrarse en fases tempranas del ensayo), y una mayor cantidad de señales del Grupo 3. Esto demuestra que un incremento en el contenido en frecuencia de las señales está relacionado con una mejor transmisión de tensiones entre materiales, y por lo tanto una mejor adherencia entre el CFRP y la madera. Las probetas con el modo de fallo D confirman este hecho, ya que las señales del Grupo 2 comienzan a registrarse desde prácticamente el inicio del ensayo. Por su parte, la cantidad de señales del Grupo 3 crece notablemente, sobre todo con el uso de resinas de baja densidad, para las que se obtiene una mejor adherencia.

- En el caso de probetas con tejido, solo se producen dos tipos de fallo, o por la rotura del tejido (modo B) o de la madera (modo D). Que no haya deslaminación madera-CFRP indica una buena adherencia, en líneas generales. El modo de fallo B únicamente se produce con la resina de alta densidad de DRIZORO®. En este caso, desde casi el principio del ensayo, se registra emisión en los tres grupos de frecuencia. Esto ocurre igualmente para las probetas con modo de fallo D. Sin embargo, los patrones de crecimiento en la emisión acústica son totalmente diferentes para ambos modos. En el caso del modo de fallo B, se produce un súbito incremento de emisión al principio del ensayo, debido a la rotura de las fibras de tejido. Conforme la carga aumenta, las fibras se van desenredando, produciendo un incremento de EA constante pero suavizado hasta que las fibras de tejido de CFRP se separan totalmente. Por otro lado, cuando el fallo se debe a la rotura de la madera, el incremento

al inicio del ensayo es mucho mayor, debido a la rotura progresiva y continua de las diferentes fibras de la madera. En las probetas con resina de alta densidad, se observa una menor emisión en los Grupos 2 y 3, al contrario que ocurre con las probetas con resina de baja densidad. Este hecho se correlaciona con los menores resultados de carga de rotura cuando se usan resinas de alta densidad.

- Como resumen de los resultados de EA para probetas *pull-off*, parece quedar claro que en el caso de los laminados, el incremento de la EA en los Grupos 2 y 3 (medias y altas frecuencias) es un buen indicador de una correcta adherencia madera-CFRP. En el caso de los tejidos, aparte del factor anterior, es necesario tener en cuenta el patrón de crecimiento de EA a lo largo del ensayo. Las señales de EA del Grupo 3 son más relevantes cuando se produce el fallo por la rotura de la madera (modo D). Por ello, la emisión en altas frecuencias puede asociarse con mecanismos de daño en la madera cuando se incrementa la carga aplicada.
- Con respecto de los ensayos *pull-out*, en general se obtienen mejores resultados de carga máxima para los laminados, en comparación con los tejidos. Es necesario destacar los bajos valores de carga máxima que alcanzan los laminados de DRIZORO® con resinas de alta densidad en comparación con los de baja. Esto se debe a la ya comentada peor impregnación de las primeras con la madera. Por otro lado, todas las probetas de DRIZORO® se clasifican en el modo de fallo B (rotura del laminado), confirmando la mala calidad de este laminado. Este hecho se transmitió a la empresa suministradora de fibra de carbono, cuestión que tuvieron en cuenta y les sirvió para cambiar el proceso de elaboración del CFRP y conseguir una mejor calidad del producto final.
- En estos ensayos, el uso de la imprimación mejora o iguala la carga máxima para todos los casos, siendo destacable el efecto positivo que produce la imprimación en resinas de alta densidad. Esto se traduce en que la imprimación permite compensar la falta de impregnación que tienen estas resinas con la madera.

- En el caso de las probetas con laminado de SIKA® no se aprecia una clara diferencia de carga máxima entre resinas de alta y baja densidad. Por otro lado, para los laminados de DRIZORO®, la resina de baja densidad proporciona claramente unos mejores resultados. Referente a los tejidos, las probetas con resinas de baja densidad proporcionan valores mucho mayores, de nuevo debido a la mala impregnación de las resinas de alta densidad con el propio tejido. Es importante destacar el enorme efecto positivo que produce el uso de la imprimación en las probetas de tejido de SIKA® con resina de alta densidad. Del mismo modo, es remarcable la elevada carga máxima que alcanzan las probetas de tejido de DRIZORO® con resina de baja densidad, siendo las únicas que fallan por rotura de madera (modo D).

Ensayos en vigas de pequeña escuadría

- Se ha realizado una comparación cuantitativa experimental de cuatro soluciones de refuerzo diferentes de CFRP, considerando el uso de láminas aplicadas sobre la cara a tracción del elemento y dos tipos de anchos (LR-P y LR-F), colocando un tejido en forma de U en toda la longitud del elemento de madera (UR), combinando ambas soluciones de refuerzo de forma continua (UR-P) y de forma discontinua o trenzada (BR). Las mejoras que proporciona el refuerzo son evidentes, incluso con el gran número de defectos que presentan las vigas de madera.
- Se ha comprobado que la clasificación visual no es un método fiable por sí solo, ya que no es posible asegurar que una viga clasificada como MEG (madera estructural de gran escuadría) tenga mayor capacidad mecánica a flexión que una rechazada. Por ello, se propone un nuevo factor de corrección en función de la densidad para ajustar la capacidad última a flexión (MOR), denominándose MOR corregido.
- El MOR corregido medio para cada grupo de vigas muestra que las soluciones LR-F-S y LR-F-D proporcionan mayores valores de

MOR que las soluciones de ancho parcial LR-P-S y LR-P-D, a cambio de un excesivo incremento en la rigidez. En otras palabras, para la misma carga a flexión, el diferencial de deformaciones que debe absorber la resina epoxi es mayor para la disposición LR-F, siendo más proclive al fallo por deslaminación. Por otro lado, el refuerzo de ancho parcial (45 mm) alcanza casi la misma carga a flexión máxima que el de ancho total (75 mm), mientras admite mayores deformaciones para la misma tensión, un comportamiento deseado contra la deslaminación.

- El uso de tejido envolviendo al elemento reforzado (UR) es muy apropiado para las formas complejas que se pueden presentar en madera antigua. En líneas generales se obtienen mayores valores de MOR corregido para la solución UR que para el refuerzo LR, a costa de una reducción en la rigidez del elemento reforzado. Sin embargo, el uso del tejido confiere al elemento de madera un comportamiento dúctil, evitando la rotura frágil y súbita del elemento.
- La solución UR-P, en general proporciona los mayores valores de MOR corregido, destacando la mejora del 97% alcanzada por la solución UR-P-S. La rigidez de las vigas reforzadas con esta solución mixta es similar a las del refuerzo LR, aportando una mayor estabilización y mayores valores máximos de las deformaciones (comparándose con las soluciones LR y UR). Además, la mayoría de las vigas revelaron plastificación en la zona de máximas compresiones, lo que refleja un agotamiento casi completo de la capacidad máxima a compresión de la madera. Este resultado es de enorme importancia en términos de optimización de la madera.
- Se ha propuesto una nueva solución mixta, denominada trenzada (BR). Esta solución parte de la solución UR-P, pero aplicando el tejido de forma discontinua, lo cual permite un ahorro del 50% de tejido de CFRP. En cuanto al MOR corregido, en líneas generales presenta valores similares a las soluciones UR y UR-P,

con escasa diferencia entre los tejidos unidireccionales de las dos casas comerciales. Sin embargo, la solución con tejido bidireccional (BR-B-D) presenta el valor de MOR más alto del grupo, con una diferencia del 15% con respecto de las vigas reforzadas con tejido unidireccional. Comparándose con la solución continua (UR-P-B-D), el valor de MOR es prácticamente similar, pero con un ahorro del material considerable.

En términos de rigidez (MOE), la solución BR aporta valores similares a la solución LR, confirmando que el aporte real de rigidez lo realiza el laminado. Es destacable la gran rigidez obtenida para la solución BR-U-D. Por otro lado, el tipo de refuerzo BR es el que mayor ductilidad proporciona al elemento reforzado, debido a que el tejido ofrece una notable mejora a esfuerzos cortantes, siendo por lo tanto la solución de mayor interés en términos de seguridad estructural.

- En general, se ha observado una remarcable heterogeneidad en las propiedades mecánicas de las tres probetas ensayadas para cada solución de refuerzo. Estas diferencias pueden deberse al pequeño número de muestras empleadas para cada tipología, así como a la gran dispersión propia del elemento base (debido principalmente a la existencia de defectos y diferencias de densidades entre especímenes).

Ensayos de vigas de gran escuadría. Sin y con rotura previa

- En los ensayos sin rotura previa, las vigas con la configuración LR alcanzan un mínimo de mejora del MOR corregido del 119%, mientras que dicho aumento es del 156% para las vigas con refuerzo BR. El aporte de rigidez es similar para todos los tipos de refuerzo, destacando el refuerzo trenzado con tejido bidireccional (BR-D), con una mejora del 99% con respecto de las vigas sin refuerzo. Del mismo modo que para las vigas pequeñas, la solución trenzada no solo consigue una gran mejora en las propiedades mecánicas, sino también en la ductilidad del

elemento base. Además, esta solución permite un mayor aprovechamiento de la madera, ya que las vigas plastificaron en la zona de máxima tensión a compresión.

- Durante la segunda fase, se repararon cuatro vigas previamente ensayadas con la solución BR (BR-r) y una con la LR (LR-r). En este caso, el refuerzo trenzado se diseñó específicamente para cada viga, usando el mismo % de fibra de carbono entre todas ellas. Esta Tesis concluye que en un elemento altamente dañado, un refuerzo LR no permite recuperar totalmente su capacidad mecánica a flexión (aunque si su rigidez). Sin embargo, una reparación llevada a cabo con la solución BR y con un adecuado diseño del refuerzo, permite no solo recuperar la capacidad mecánica del elemento sin daño, sino que mejora sus propiedades mecánicas. En concreto, se consiguen mejoras del MOR corregido, MOE corregido y flecha máxima del 69%, del 35% y del 109%, respectivamente.
- Esta Tesis propone el uso de la técnica de emisión acústica para una monitorización en tiempo real de elementos de madera reforzados y reparados con CFRP, para detectar prematuramente el fallo por deslaminación entre la madera y el CFRP. Para la monitorización se han usado sensores piezoeléctricos multi-resonantes en el rango de frecuencias de 20 kHz a 500 kHz. La clave en el éxito de la metodología de monitorización recae en el análisis de las señales de EA, dividida en los siguientes pasos:
 - Filtrado de señales de EA mal registradas, comparando el RMS temporal de las señales en dos ventanas temporales diferentes.
 - Cálculo del RMS espectral en una ventana estrecha de tiempo, justo en el inicio de la señal, en dos bandas de frecuencia concretas. Esto minimiza la influencia de reflexiones y efectos de propagación en las ondas acústicas.

- Corrección de la energía espectral de las señales de EA a través de curvas de atenuación obtenidas empíricamente para cada viga en particular.
- Clasificación de las señales en dos grupos, según la relativa importancia de su energía espectral corregida en las dos bandas de frecuencia consideradas: Grupo 1 (bajas frecuencias predominantes) y Grupo 2 (predominancia de altas frecuencias). Queda demostrado, que si no se lleva a cabo la corrección por atenuación, no se encuentran señales en el Grupo 2, debido a la alta atenuación de las ondas en la madera.
- Localización lineal de fuentes de EA del Grupo 2, las cuales en los ensayos *pull-off* se asociaron a posibles fallos por deslaminación madera-CFRP.
- Los eventos clasificados en el Grupo 1, apenas sufren cambios cuando el espécimen se encuentra cerca de la rotura final, no pudiéndose asociar a un mecanismo de fallo. Sin embargo, en líneas generales, los eventos del Grupo 2 sufren considerables incrementos. Ha sido comprobado que, la localización de las fuentes de EA del Grupo 2 tiene una alta correlación con la localización de las zonas con rotura madera-resina, siendo estas precursoras del fallo por deslaminación entre la lámina de CFRP y la madera. Este hecho se verifica en los ambos tipos de refuerzo, tanto para las vigas LR, en las que la deslaminación es un aspecto crítico, como en las vigas BR.

Comparativa de los modelos analíticos (clásico y alternativo) con los resultados experimentales

Debido a la anisotropía de la madera y la consecuente dispersión en sus propiedades mecánicas, es muy complicado establecer modelos analíticos precisos para predecir el comportamiento de elementos de madera altamente dañados antes de su reparación.

- En esta Tesis se ha comprobado que la ley constitutiva elastoplástica de la madera supone, que a través del método de equilibrio de la sección, los módulos elásticos a tracción y compresión son iguales, no es fiable; este es el modelo clásico de Bazan-Buchanan, que proporciona diferencias entre los resultados analíticos y experimentales de hasta el 19,8%. Como alternativa, se presenta un modelo más general para la madera, que tiene en consideración las diferencias que pueden darse entre los módulos elásticos a compresión y tracción, tal y como fue presentado por Argüelles en trabajos anteriores.
- El análisis incorpora un factor de corrección (EAC), el cual tiene en cuenta la presencia de nudos en la zona de máximas tracciones. Este factor se utiliza en la sección de cálculo de la resistencia a flexión, teniendo en cuenta que a la sección efectiva de trabajo se le debe descontar la superficie de los nudos (obtenida visualmente).
- Los resultados claramente demuestran que el empleo del modelo alternativo, permite reducir la desviación hasta en un 2,6%. Nótese de la importancia de la realización de ensayos de caracterización mecánica para cada viga individual. Debido a la enorme variabilidad en el comportamiento y calidad de la madera, el uso de valores medios puede inducir a considerables errores, independientemente del modelo analítico que se emplee para el cálculo. Estos errores son inaceptables en aplicaciones prácticas.
- Se ha establecido un procedimiento para el uso del modelo alternativo en situaciones reales, siendo necesario colocar galgas extensiométricas. Mediante las variaciones de carga que puede experimentar una viga a lo largo del tiempo, se puede obtener la relación entre las deformaciones de la cara inferior y lateral. De una forma sencilla, con esta relación se puede calcular la posición de la fibra neutra y, junto con las propiedades mecánicas del elemento, aplicar los modelos analíticos y predecir la carga máxima de rotura que la viga soportaría. Sin embargo, en situaciones reales, al igual que en otros materiales, no se recomienda calcular la capacidad

máxima a flexión más allá del límite elástico de la madera, debido a que su comportamiento plástico es complejo.

- Debe tenerse en cuenta que en estructuras reales, se aplican cargas cíclicas, por lo que las relaciones tensión-deformación variarán a partir del segundo ciclo. Por esta razón, es necesario seguir investigando en este ámbito, con el fin de desarrollar modelos analíticos de elementos de madera reforzados que permitan predecir la carga de rotura ante patrones de cargas cíclicas.

Evaluación de costes y tiempos de elaboración

- Se ha realizado una comparación de los tiempos de elaboración y costes de todas las soluciones de refuerzo, así como para todos los tamaños y estado de las vigas. En líneas generales, como es obvio, cuanto mayor sea la superficie a reforzar de forma continua, mayor es el rendimiento de los operarios, reduciéndose el tiempo y coste por metro lineal. Existe una clara diferencia entre los tiempos de elaboración de elementos reforzados con una lámina de CFRP (LR) y reforzados con tejido (bien sean UR, UR-P y BR), indistintamente del tamaño de la viga a reforzar. En cuanto a los costes (€/m), las soluciones mixtas presentan un coste mayor que las soluciones LR y UR.
- En el caso de las vigas con tejido de SIKA[®], se aprecia un notable incremento en cuanto a tiempo de elaboración. Esto se debe principalmente a la densidad de las resinas aplicadas. Mientras que la resina de SIKA[®] es más densa y su aplicación es con espátula, la resina de DRIZORO[®] se puede aplicar con brocha.
- Se ha comprobado que el refuerzo trenzado (BR), pese a usarse un 50% del tejido con respecto de la solución UR-P, no tiene una gran reducción en su coste. Esto es debido a que el trenzado exige un mayor tiempo de colocación del material, invertido principalmente en el replanteo de las tiras de tejido.
- En cuanto a las vigas grandes reparadas en la segunda fase, no se aprecia una diferencia de costes con respecto de las vigas reforzadas

en la primera fase. Las vigas reparadas necesitan de un mayor tiempo de elaboración (debido al diseño de refuerzo individualizado), sin embargo, la cantidad de material usado es la misma, por lo que el ligero incremento en coste es debido netamente al mayor tiempo empleado.

Ejemplo de aplicación en obra

En esta Tesis Doctoral se ha llevado a cabo una transferencia directa del conocimiento, mediante la realización de un demostrador en una intervención real de rehabilitación en una cubierta de madera.

- Se ha reparado un elemento altamente dañado, situado en la cubierta del edificio de la Capitanía General situado en la Plaza de la Cruz (Granada).
- Para la ejecución, se estableció un procedimiento de actuación, así como un diseño del refuerzo adaptado a las diferentes patologías y defectos que presentaba el par de cubierta, decidiéndose que se aplicaría la solución trezada.
- Los costes y tiempos de elaboración durante toda la intervención quedaron recogidos en la Tesis. En comparación con los refuerzos trezados ejecutados en laboratorio, el tiempo invertido en la aplicación “in situ” fue mayor, debido principalmente a la dificultad de acceso al par de cubierta. Sin embargo, al realizar un diseño con especial atención en no sobredimensionar el refuerzo, el coste final del elemento reforzado “in situ” es muy similar a las vigas reforzadas en laboratorio.
- Después de la ejecución del refuerzo, se han realizado inspecciones visuales periódicas, no observándose ninguna irregularidad hasta la fecha (última inspección realizada el 16 de marzo de 2018).

Bibliografia

1. Theakston, F. A feasibility study for strengthening timber beams with fiberglass. *Can. Agric. Eng.* **1965**, *7*, 17-19.
2. Kellogg, R.; Wangaard, F. Influence of fiber strength on sheet properties of hardwood pulps. *Tappi* **1964**, *47*, 361.
3. Rowlands, R.; Van Deweghe, R.; Laufenberg, T.L.; Krueger, G. Fiber-reinforced wood composites. *Wood Fiber Sci.* **1986**, *18*, 39-57.
4. Moulin, J.M.; Pluinage, G.; Jodin, P. Frg: Fibreglass reinforced gluelam—a new composite. *Wood Sci. Technol.* **1990**, *24*, 289-294.
5. Meier, U. Carbon fiber-reinforced polymers: Modern materials in bridge engineering. *Struct. Eng. Int.* **1992**, *2*, 7-12.
6. Plevris, N.; Triantafillou, T.C. Frp-reinforced wood as structural material. *J. Mater. Civ. Eng.* **1992**, *4*, 300-317.
7. Triantafillou, T.C.; Deskovic, N. Prestressed frp sheets as external reinforcement of wood members. *J. Struct. Eng.* **1992**, *118*, 1270-1284.
8. Triantafillou, T.C.; Deskovic, N. Innovative prestressing with frp sheets: Mechanics of short-term behavior. *J. Eng. Mech.* **1991**, *117*, 1652-1672.
9. Bazan, I.M.M. Ultimate bending strength of timber beams. Technical University of Nova Scotia, Canada, Halifax, 1980.
10. Buchanan, A.H. Bending strength of lumber. *J. Struct. Eng.* **1990**, *116*, 1213-1229.
11. Fiorelli, J.; Dias, A.A. Analysis of the strength and stiffness of timber beams reinforced with carbon fiber and glass fiber. *Mater. Res.* **2003**, *6*, 193-202.
12. Valluzzi, M.R.; Garbin, E.; Modena, C. Flexural strengthening of timber beams by traditional and innovative techniques. *J. Build. Appr.* **2007**, *3*, 125-143.
13. Vanerek, J.; Hradil, P. Evaluation of timber beams reinforced with frp fabrics. *Asia-Pacific Conference on FRP in Structures (APFIS 2007)* **2007**, 305 - 310.
14. de Jesus, A.M.; Pinto, J.M.; Morais, J.J. Analysis of solid wood beams strengthened with cfrp laminates of distinct lengths. *Constr. Build. Mater.* **2012**, *35*, 817-828.
15. Neubauerová, P. Timber beams strengthened by carbon–fiber reinforced lamellas. *Procedia Engineering* **2012**, *40*, 292-297.
16. Kim, Y.J.; Hossain, M.; Harries, K.A. Cfrp strengthening of timber beams recovered from a 32year old quonset: Element and system level tests. *Eng. Struct.* **2013**, *57*, 213-221.

17. Kim, Y.J.; Harries, K.A. Modeling of timber beams strengthened with various cfrp composites. *Eng. Struct.* **2010**, *32*, 3225-3234.
18. Borri, A.; Corradi, M.; Grazini, A. A method for flexural reinforcement of old wood beams with cfrp materials. *Compos. Pt. B-Eng.* **2005**, *36*, 143-153.
19. Johnsson, H.; Blanksvärd, T.; Carolin, A. Glulam members strengthened by carbon fibre reinforcement. *Mater. Struct.* **2007**, *40*, 47-56.
20. Yang, H.; Ju, D.; Liu, W.; Lu, W. Prestressed glulam beams reinforced with cfrp bars. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *109*, 73-83.
21. Luggin, W.; Bergmeister, K. In *Carbon-fiber reinforced and prestressed timber beams*, Proceedings of the 2nd International PhD Symposium, **1998**; pp 26-28.
22. Gilfillan, J.; Gilbert, S.; Patrick, G. The use of frp composites in enhancing the structural behavior of timber beams. *J. Reinf. Plast. Compos.* **2003**, *22*, 1373-1388.
23. Nowak, T.; Jankowski, L.; Jasieńko, J. Application of photoelastic coating technique in tests of solid wooden beams reinforced with cfrp strips. *Arch. Civ. Mech. Eng.* **2010**, *10*, 53-66.
24. Nowak, T.P.; Jasieńko, J.; Czepizak, D. Experimental tests and numerical analysis of historic bent timber elements reinforced with cfrp strips. *Constr. Build. Mater.* **2013**, *40*, 197-206.
25. Solarov, R.; Glišić, M. Glulam beams reinforced with frp strips and their application in architecture. *Spat.* **2014**, 1-6.
26. Buell, T.W.; Saadatmanesh, H. Strengthening timber bridge beams using carbon fiber. *J. Struct. Eng.* **2005**, *131*, 173-187.
27. Alam, P.; Ansell, M.P.; Smedley, D. Mechanical repair of timber beams fractured in flexure using bonded-in reinforcements. *Compos. Pt. B-Eng.* **2009**, *40*, 95-106.
28. Moayyed, M.Y.; Taheri, F. In *Creep response of glulam reinforced by a novel pre-stressed frp-wood composite system*, 11th World Conference on Timber Engineering, **2010**.
29. Triantafillou, T.C. Shear reinforcement of wood using frp materials. *J. Mater. Civ. Eng.* **1997**, *9*, 65-69.
30. Ajdukiewicz, A.; Brol, J.; Malczyk, A.; Wlaszczuk, M. Rehabilitation of the highest wooden tower in poland. *Struct. Eng. Int.* **2000**, *10*, 161-163.
31. Radford, D.; Van Goethem, D.; Gutkowski, R.; Peterson, M. Composite repair of timber structures. *Constr. Build. Mater.* **2002**, *16*, 417-425.

32. de la Rosa García, P.; Escamilla, A.C.; García, M.N.G. Bending reinforcement of timber beams with composite carbon fiber and basalt fiber materials. *Compos. Pt. B-Eng.* **2013**, *55*, 528-536.
33. Yang, Y.-l.; Liu, J.-w.; Xiong, G.-j. Flexural behavior of wood beams strengthened with hfrp. *Constr. Build. Mater.* **2013**, *43*, 118-124.
34. Fiorelli, J.; Dias, A.A. Glulam beams reinforced with frp externally-bonded: Theoretical and experimental evaluation. *Mater. Struct.* **2011**, *44*, 1431-1440.
35. Romani, M.; Blaß, H. In *Design model for frp reinforced glulam beams*, Proceedings of the International Council for Research and Innovation in Building and Construction (CIB), Working Commission W18 Timber Structures, Meeting, **2001**.
36. Brunner, M.; Schnueriger, M. In *Timber beams strengthened by attaching prestressed carbon frp laminates with a gradiented anchoring device*, Proceedings of the international symposium on bond behaviour of FRP in structures (BBFS 2005), **2005**; pp 465-471.
37. Baño, V.; Arriaga, F.; Soilán, A.; Guaita, M. Prediction of bending load capacity of timber beams using a finite element method simulation of knots and grain deviation. *Biosyst. Eng.* **2011**, *109*, 241-249.
38. Barbero, E.; Davalos, J.; Munipalle, U. Bond strength of frp-wood interface. *J. Reinf. Plast. Compos.* **1994**, *13*, 835-854.
39. Davalos, J.F.; Qiao, P.Z.; Trimble, B.S.; Jia, J.H. *Durability and fracture of frp-wood bonded interfaces.* **2000**; p 695-702.
40. Raftery, G.M.; Harte, A.M.; Rodd, P.D. Bond quality at the frp-wood interface using wood-laminating adhesives. *Int. J. Adhes. Adhes.* **2009**, *29*, 101-110.
41. Xie, Q.F.; Xue, J.Y.; Zhao, H.T.; Hu, J.F. Experimental study on bond behavior between cfrp sheet and wood. *Adv. in Civil Eng. Archit. Innov. Pts 1-6* **2012**, *368-373*, 2314.
42. Cleland, D.J.; Basheer, L. Pull-off adhesion testing for concrete repairs. *Mag. Concr. Res.* **2007**, *59*, 771-776.
43. Ramos, N.M.M.; Simoes, M.L.; Delgado, J.; de Freitas, V.P. Reliability of the pull-off test for in situ evaluation of adhesion strength. *Constr. Build. Mater.* **2012**, *31*, 86-93.
44. Szemerey-Kiss, B.; Torok, A. Failure mechanisms of repair mortar stone interface assessed by pull-off strength tests. *Bull. Eng. Geol. Environ.* **2017**, *76*, 159-167.
45. Adams, R.D.; Guild, F.J.; Karachalios, E.; Mahon, A.R. *The significance to ndt of defects in adhesively bonded structures.* **2000**; p 365-368.

46. Heslehurst, R.B. Optical ndt of adhesively bonded joints. *Mater. Eval.* **2009**, *67*, 837-842.
47. Barus, M.; Weleman, H.; Nassiet, V.; Pastor, M.L.; Cantarel, A.; Collombet, F.; Crouzeix, L.; Grunevald, Y.H. Ndt-based design of joint material for the detection of bonding defects by infrared thermography. *NDT E Int.* **2018**, *93*, 157-163.
48. Bossi, R.H. Introduction to technical focus issue on ndt of adhesive bonds. *Mater. Eval.* **2009**, *67*, 818-818.
49. Grosse, C.U.; Ohtsu, M. *Acoustic emission testing*. Springer Science & Business Media: **2008**.
50. Mizutani, Y. *Practical acoustic emission testing*. Tokyo, **2016**.
51. Ono, K. Application of acoustic emission for structure diagnosis. *Diagnostyka* **2011**, *2*, 3-18.
52. Gallego, A.; Martínez, E. *Emisión acústica. Niveles i y ii (ensayos no destructivos - aend)*. FC Editorial: **2016**.
53. Ono, K.; Gallego, A. Research and applications of ae on advanced composites. In *30th European Conference on Acoustic Emission Testing*, Granada, **2012**.
54. Martínez-Jequier, J.; Gallego, A.; Suárez, E.; Juanes, F.J.; Valea, Á. Real-time damage mechanisms assessment in cfrp samples via acoustic emission lamb wave modal analysis. *Compos. Pt. B-Eng.* **2015**, *68*, 317-326.
55. Degala, S.; Rizzo, P.; Ramanathan, K.; Harries, K.A. Acoustic emission monitoring of cfrp reinforced concrete slabs. *Constr Build Mater* **2009**, *23*, 2016-2026.
56. Piotrkowski, R.; Gallego, A.; Castro, E.; García-Hernandez, M.T.; Ruzzante, J.E. Ti and cr nitride coating/steel adherence assessed by acoustic emission wavelet analysis. *NDT & E Int.* **2005**, *38*, 260-267.
57. Gallego, A.; Gil, J.F.; Vico, J.M.; Ruzzante, J.E.; Piotrkowski, R. Coating adherence in galvanized steel assessed by acoustic emission wavelet analysis. *Scr. Mater.* **2005**, *52*, 1069-1074.
58. Degala, S.; Rizzo, P.; Ramanathan, K.; Harries, K.A. Acoustic emission monitoring of externally bonded frp-reinforced concrete. In *Health monitoring of structural and biological systems 2008*, Kundu, T., Ed. **2008**; Vol. 6935.
59. Abouhussien, A.A.; Hassan, A.A.A. Application of acoustic emission monitoring for assessment of bond performance of corroded reinforced concrete beams. *Struct. Health Monit.* **2017**, *16*, 732-744.
60. Pullin, R.; Eaton, M.J.; Pearson, M.R.; Pollard, C.; Holford, K.M. Assessment of bonded patch bridge repairs using acoustic emission and

- acousto-ultrasonics. In *Structural health monitoring ii*, Uhl, T., Ed. **2012**; Vol. 518, pp 57-65.
61. Gallego, A.; Benavent-Climent, A.; Suarez, E. Concrete-galvanized steel pull-out bond assessed by acoustic emission. *J. Mater. Civ. Eng.* **2015**, *28*, 04015109.
 62. Rescalvo, F.J.; Valverde-Palacios, I.; Suarez, E.; Gallego, A. Experimental and analytical analysis for bending load capacity of old timber beams with defects when reinforced with carbon fiber strips. *Compos. Struct.* **2018**, *186*, 29-38.
 63. Rescalvo, F.J.; Valverde-Palacios, I.; Suarez, E.; Gallego, A. Experimental comparison of different carbon fiber composites in reinforcement layouts for wooden beams of historical buildings. *Materials* **2017**, *10*, 1113.
 64. Rescalvo, F.J.; Suarez, E.; Abarkane, C.; Cruz-Valdivieso, A.; Gallego, A. Experimental validation of a cfrp laminated/fabric hybrid layout for retrofitting and repairing timber beams. *Mech Adv Mater Struct* **2018**, 1-8.
 65. Rescalvo, F.J.; Valverde-Palacios, I.; Suarez, E.; Gallego, A. Monitoring of carbon fiber-reinforced old timber beams via strain and multiresonant acoustic emission sensors. *Sensors* **2018**, *18*, 1224.
 66. Carta de atenas. **1931**.
 67. Esteban Chapapría, J. La carta de atenas (1931). El primer logro de cooperación internacional en conservación del patrimonio. In *Master Copa*, Valencia, 2005.
 68. Ley 8/2013 en Rehabilitación, regeneración y renovación urbanas. BOE, **2013**.
 69. Meier, U. Composite materials in bridge repair. *Appl. Comps. Mater.* **2000**, *7*, 75-94.
 70. Argüelles, R.; Arriaga, F.; Martínez, J.J. *Estructuras de madera, diseño y cálculo*. Asociación de Investigación Técnica de la Industria de la Madera y del Corcho (AITIM): **1996**.
 71. Moreno Bazán, A. Caracterización y adherencia entre madera antigua y fibra de carbono para refuerzo estructural. Resultados preliminares. . Proyecto Fin de Grado, Universidad de Granada, **2015**.
 72. Berbel Roman, E. Implantación del cfrp como refuerzo de madera antigua estructural de gran escuadría. Proyecto Fin de Grado, Universidad de Granada, **2016**.
 73. de la Rosa García, P. Análisis de elementos de madera reforzados con materiales compuestos. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, **2013**.

74. Jiménez Rubio, I. Refuerzo de vigas de madera antigua mediante cfrp. Ensayos a flexión. Proyecto Fin de Grado, Universidad de Granada, **2016**.
75. Bermejo López, R. Análisis del comportamiento a fatiga de uniones adhesivas de acero recubierto. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S.I. Industriales, **2016**.
76. Madrid, M. *Tecnología de la adhesión*; **1997**.
77. Martínez Jiménez, A.J. Evaluación de daño mediante el método de emisión acústica de vigas de madera antigua reforzadas con cfrp. Proyecto Fin de Grado, Universidad de Granada, **2016**.
78. Benítez Corral, F.J. Implantación de cfrp como refuerzo de madera antigua estructural. Proyecto Fin de Grado, Universidad de Granada, **2017**.