



Universidad de Valladolid



PROGRAMA DE DOCTORADO EN ARQUITECTURA

TESIS DOCTORAL:

**FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE VIGAS
DÚO REFORZADAS DE MADERA DE “*POPULUS
SP.*” Y “*PINUS PINASTER AIT.*”**

Presentada por *Jose Antonio Balmori Roiz* para optar al
grado de
Doctor por la Universidad de Valladolid

Dirigida por:
Dr. Luis-Alfonso Basterra Otero



AUTORIZACIÓN DEL DIRECTOR/A DE TESIS

(Art. 7.2 de la Normativa para la presentación y defensa de la Tesis Doctoral en la UVa)

D./D^a LUIS-ALFONSO BASTERRA OTERO, con D.N.I./Pasaporte 09250913Z
Profesor del departamento de CONSTRUCCIONES ARQUITECTÓNICAS IT MMC TE
Centro ETS ARQUITECTURA
Dirección a efecto de notificaciones AVDA/SALAMANCA, 18.- 47014 - VALLADOLID
e-mail basterra@arq.uva.es

como Director de la Tesis Doctoral titulada **FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE VIGAS DÚO REFORZADAS DE "POPULUS SP." Y "PINUS PINASTER AIT."**

.....
realizada por D./D^a **JOSÉ ANTONIO BALMORI ROIZ**

.....
alumno/a del Programa de Doctorado en Arquitectura

.....
autoriza su presentación, considerando que el doctorando ha satisfecho con aprovechamiento el periodo de doctorado, ha realizado una estancia de cuatro meses en una universidad extranjera, ha completado su documento de actividades, ha publicado un artículo relacionado con la tesis en una revista científica de relevancia (JCR-Q1) y ha redactado la memoria de la tesis con un nivel suficiente para ser leída y defendida ante el correspondiente tribunal.

Valladolid, a la fecha de la firma electrónica

El/La Director/a de la Tesis,

BASTERRA OTERO
LUIS ALFONSO -
09250913Z

Firmado digitalmente por
BASTERRA OTERO LUIS ALFONSO
- 09250913Z
Fecha: 2019.05.10 19:36:03
+02'00'

basterra@arq.uva.es

SR/SRA. PRESIDENTE/A DE LA COMISIÓN DE DOCTORADO



AUTORIZACIÓN DE LA COMISIÓN ACADÉMICA RESPONSABLE DEL PROGRAMA DE DOCTORADO A LA PRESENTACIÓN DE TESIS DOCTORAL

(Art. 7.3.b de la Normativa para la presentación y defensa de la Tesis Doctoral en la Uva)

La Comisión Académica del Programa de Doctorado en ARQUITECTURA
presidida por el Dr. /Dra. D. /D^a. JUAN LUIS DE LAS RIVAS profesor/a del Departamento de URBANISMO Y REPRESENTACIÓN DE LA ARQ. con sede en la Facultad/Escuela DE ARQUITECTURA en sesión de 3 de Junio de 2019 ha acordado, una vez evaluada y leídos los informes recabados (art. 7.2), autorizar la presentación de la siguiente Tesis Doctoral al considerar que cumple todos los requisitos establecidos en la legislación vigente:

Título: Fabricación y caracterización de vigas Dfco repetidas de "Populus SP." y "Pinus Pinaster AIT"

Autor/a: D./D^a. JOSE ANTONIO BALMORI ROIZ
con D.N.I. nº 72099980.V
Director/es: D./D^a. ALFONSO BASTERIA OTERO

Valladolid, 12 de Junio de 2019

El/La Presidente/a de la Comisión Académica


Fdo.: J. L. de las Rivas

SR/SRA. PRESIDENTE/A DE LA COMISIÓN DE DOCTORADO

A mi abuelo

Agradecimientos

Han sido muchos los que me han apoyado y ayudado para que esta tesis doctoral finalmente haya visto la luz. No quisiera olvidarme de nadie, y por ello lo primero expresar mi agradecimiento a todos aquellos que saben o sienten que de algún modo han contribuido en esta tesis, pese a no estar presentes de forma explícita en estas breves líneas.

Ha sido un orgullo poder realizar esta tesis en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas, Ingeniería del Terreno, Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la Universidad de Valladolid; espero que esta investigación esté a la altura de la calidad humana y profesional de todos los compañeros. Agradecer profundamente a todos los miembros del GIR en Estructuras y Tecnología de la Madera -Luis, Alfonso, Mila, David, Gama, Roberto, Leandro y Gemma-, el incondicional apoyo e incontables horas de trabajo y ensayo compartidas durante todos estos años. He crecido y aprendido con vosotros cada día, y sin quererlo os habéis convertido en mi segunda familia.

Especial agradecimiento a mi director de tesis, el Dr. Luis-Alfonso Bastera, Catedrático del Dpto. de Construcciones Arquitectónicas de la Universidad de Valladolid. Cuando más lo necesitaba confié en mí para iniciar esta aventura como investigador, a la vez que interveníamos en el Patrimonio de Castilla y León como arquitectos. Sin su ayuda nunca hubiese tenido la oportunidad de luchar por mis sueños.

Agradecer también el apoyo económico brindado para el desarrollo de la investigación presentada en esta tesis doctoral por el Ministerio de Ciencia e Innovación (BIA2012-21233), en el marco del Plan Nacional de I+D+i, a la Junta de Castilla y León, por el apoyo financiero del programa de apoyo a proyectos de investigación cofinanciado por la Unión Europea a través del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (VA051A10-2), y a la Universidad de Valladolid, por su programa de formación de personal docente e investigador predoctoral, del que he disfrutado los últimos tres años. Al Dr. Jorge Branco, del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Minho (Portugal), por abrirme las puertas de su laboratorio durante mi estancia. Y al Dr. Rafa Díez y los demás miembros del laboratorio de maderas del CIFOR-INIA, por su inestimable ayuda.

Por último, pero no por ello menos importante, gracias a mi familia, sin cuyo apoyo y cariño nada de esto hubiese sido posible. Especialmente a Traute & Jürgen Wiegand por depositar su confianza en nosotros, abriéndonos el camino a mi hermana y a mí cuando más lo necesitábamos.

Resumen

Esta tesis doctoral pretende desarrollar un producto industrializado de madera reforzada que permita emplear con usos estructurales maderas de rápido crecimiento y bajas prestaciones mecánicas, o de baja calidad, actualmente rechazadas.

La actual exigencia social de realizar construcciones sostenibles y eficientes energéticamente, recogida en la directiva europea 2018/844/EU, posiciona a la madera como uno de los materiales de construcción con mayor proyección de crecimiento en el futuro cercano. Sin embargo, las especies gestionadas con fines de uso estructural son limitadas y sus masas forestales, pese a someterse a una gestión ordenada y planificada, son finitas en extensión y su explotación se ve condicionada por los tiempos de crecimiento propios de cada especie. Por ello, para dar respuesta a la creciente demanda de madera de un modo sostenible en el tiempo, es preciso introducir en la industria maderera nuevas especies de rápido crecimiento y, además, optimizar los recursos de las especies tradicionales. Las bajas prestaciones mecánicas de las maderas de rápido crecimiento, y la influencia negativa de las singularidades propias de la madera en aquellas de calidad rechazo, limitan actualmente su aplicación intensiva en usos estructurales. La fabricación de productos de madera industrializada con materiales de refuerzo introducidos en su línea de encolado pretende aumentar las prestaciones mecánicas de estas maderas, enfocándose especialmente en el aumento de la rigidez, para posibilitar su introducción en la construcción y rehabilitación de estructuras de edificación.

En todos los ensayos de esta investigación se han utilizado dos especies de madera: el chopo (*Populus x euroamericana* I-214) y el pino pinaster (*Pinus pinaster* Ait.), presentes de forma extensa en toda Castilla y León y gestionadas artificialmente por el hombre en plantaciones intensivas en zonas de ribera (chopo) o en reforestaciones de terrenos áridos (pino pinaster). El cambio de uso de estas especies y la fabricación en industrias locales de un producto de segunda transformación puede generar unos nuevos recursos económicos, facilitando la creación de empleo “verde” y la fijación de población en zonas rurales. En la investigación experimental desarrollada se caracteriza el comportamiento de las dos especies de madera mencionadas; se analizan distintos tipos de refuerzo, de origen natural y de origen sintético; se estudia el comportamiento de distintos adhesivos estructurales de uso específico para madera; y se fabrican y ensayan varios lotes de vigas dúo reforzadas con distintos tipos de refuerzo, tanto en piezas de pequeña escala (1:25) como a escala estructural (1:2). Así mismo, se analiza el comportamiento a largo plazo (fluencia) de las piezas reforzadas.

Esta Tesis Doctoral es, por lo tanto, de carácter eminentemente experimental, con una carga importante de trabajo de laboratorio desarrollada principalmente en la Universidad de Valladolid (ETS Arquitectura y ETS Ingenierías Agrarias) y en la escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Minho (Portugal). Y tiene la vocación de desarrollarse y pasar a la industria, para lo que se ha realizado un estudio económico comparado.

Los resultados obtenidos en esta investigación son muy prometedores, alcanzando incrementos significativos en la rigidez de las piezas con bajos ratios de refuerzo (<2%), y con unos costes de fabricación viables.

Abstract

This doctoral thesis aims to develop a new industrialized reinforced timber product using local, fast-growing and low performance wood, or low quality, which is currently rejected for structural use.

Current social requirements for sustainable and energy efficient buildings in European Directive 2018/844/EU position timber as one of the construction materials with the greatest growing potential in the future. In Europe today, traditional structural timber species are grown in well managed forests, but their harvesting capacity is conditioned by the growth times of each species and their limited surface. Therefore, to respond to the growing demand for timber in a sustainable way over time, it is necessary to introduce new fast-growing wood species into the timber industry and, in addition, to optimize the resources of traditional species. The low mechanical performance of fast-growing woods, and the negative influence of its peculiarities in the rejection timber, currently limit its intensive application to structural uses. The manufacture of industrialized timber products with reinforcement materials introduced in the glue-line aims to increase their mechanical performance, focusing on improving stiffness, to allow for their introduction in the construction and rehabilitation of building structures.

In this research, two wood species have been assessed: poplar (*Populus x euroamericana* I-214) and maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.), grown extensively throughout Castilla y León and cultivated in intensive plantations in riparian zones (poplar) or in reforestations of arid lands (maritime pine). From a social point of view, a change of use of these species and the manufacture involved may generate new economic resources, facilitating the creation of "green" employment and the establishment of population in rural areas.

In the experimental research developed, the behaviour of both wood species is characterized; different types of reinforcement are analysed, from natural origin and synthetic origin; the behaviour of different structural adhesives of specific use for wood is studied; and several batches of reinforced duo beams are manufactured and tested with different types of reinforcement, both in small scale (1:25) and structural scale (1: 2) pieces. Likewise, the long-term behaviour (creep) of reinforced parts is analysed.

This experimental research is supported by an important laboratory work developed mainly at the University of Valladolid (ETS Architecture and ETS Agrarian Engineering) and at the School of Civil Engineering at the University of Minho (Portugal). And it has the vocation to develop and move to the industry, for which a comparative economic study has been carried out.

The results obtained in this research are very promising, reaching significant increases in the rigidity of the pieces with low reinforcement ratios (<2%), and with reasonable manufacturing costs.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	I
RESUMEN.....	III
SUMMARY	V
ÍNDICE	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE TABLAS.....	XVII
NOMENCLATURA.....	XXI
1. INTRODUCCIÓN, JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.1.1. Antecedentes	1
1.1.2. Contexto socioeconómico	2
1.1.3. Mejora estructural de la madera de baja calidad	4
1.2. Justificación de la investigación.....	5
1.3. Objetivos.....	6
1.3.1. Objetivos generales	6
1.3.2. Objetivos específicos.....	7
1.3.3. Otros objetivos indirectos	8
2. ANÁLISIS DOCUMENTAL Y ESTADO DEL ARTE	11
2.1. La madera.....	11
2.2. La madera de <i>Populus</i>	12
2.2.1. Descripción botánica de la especie.....	13
2.2.2. Características físicas y elastomecánicas de la madera del género <i>Populus</i>	19
2.2.3. Usos, rendimientos y sostenibilidad	26
2.3. La madera de <i>Pinaster</i>	28
2.3.1. Descripción botánica de la especie.....	29
2.3.2. Características físicas y elastomecánicas de la madera de pino pinaster.....	34
2.3.3. Usos, rendimientos y sostenibilidad	36
2.4. Sistemas compuestos.....	38
2.5. Fibras de refuerzo estructural	39
2.5.1. Fibra de vidrio	40
2.5.2. Fibra de carbono.....	41
2.5.3. Fibra de aramida.....	41
2.5.4. Propiedades mecánicas	44
2.6. Adhesivos	45
2.6.1. Tipos de adhesivos.....	47
2.6.2. Comportamiento de las uniones adhesivas con FRP	48
2.7. Refuerzo de la madera con fibras.....	52
2.7.1. Aplicación de FRP.....	53
2.7.2. Fibra de vidrio GFRP.....	55
2.7.3. Fibra de carbono CFRP	65
2.7.4. Otros tipos de fibras.....	74

2.7.5.	Comportamiento frente al fuego de la madera reforzada con FRP	75
2.7.6.	Comportamiento frente a la fluencia de la madera reforzada con FRP	77
3.	MATERIAL Y EQUIPOS	81
3.1.	Instrumental y equipamiento	81
3.1.1.	Equipos de ensayo	81
3.1.2.	Equipos de acondicionamiento	84
3.1.3.	Control ambiental y de los materiales.....	85
3.1.4.	Xilohigrómetros	85
3.1.5.	Balanzas de precisión.....	85
3.1.6.	Microscopio.....	86
3.1.7.	Instrumentación de medida de precisión	86
3.1.8.	Equipo de medida volumétrica.....	90
3.1.9.	Equipos de adquisición de datos	90
3.1.10.	Cámara fotográfica	91
3.1.11.	Otro equipamiento	91
3.2.	Materiales	93
3.2.1.	Maderas	94
3.2.2.	Fibras naturales.....	96
3.2.3.	Fibras sintéticas	98
3.2.4.	Adhesivos estructurales.....	103
3.2.5.	Probetas para ensayos a flexión en pequeñas dimensiones [1:25]	106
3.2.6.	Probetas para ensayos a flexión en dimensiones estructurales [1:2].....	108
3.2.7.	Probetas para ensayo de fluencia	111
4.	MÉTODOS	113
4.1.	Métodos específicos	113
4.1.1.	Estimación de propiedades elastomecánicas de la madera	113
4.1.2.	Estudio y caracterización de fibras naturales	116
4.1.3.	Estudio y caracterización de fibras sintéticas.....	117
4.1.4.	Estudio y caracterización de los adhesivos estructurales.....	125
4.1.5.	Ensayos a flexión en vigas de pequeñas dimensiones [1:25]	136
4.1.6.	Ensayos a flexión en vigas de dimensiones estructurales [1:2].....	138
4.1.7.	Ensayo de fluencia.....	140
4.2.	Métodos estadísticos	144
5.	ESTUDIO TEÓRICO Y NUMÉRICO.....	147
5.1.	Modelo analítico	147
5.1.1.	Modelos tensión-deformación madera.....	149
5.1.2.	Modelos analíticos utilizados para el cálculo de la capacidad de carga.....	150
5.2.	Modelos analíticos utilizados para el cálculo de deformaciones.....	152
5.2.1.	Aplicación a la sección transformada.....	154
6.	RESULTADOS	159
6.1.	Caracterización de la madera	159
6.1.1.	Propiedades a compresión.....	159
6.1.2.	Propiedades a tracción paralela	166
6.1.3.	Propiedades a cortante.....	168
6.1.4.	Resumen de las propiedades de la madera caracterizada	169
6.2.	Caracterización previa de los materiales de refuerzo	171
6.2.1.	Fibra de lino	171
6.2.2.	Fibra de vidrio UNI1200	175
6.2.3.	Fibra de vidrio UNI 300	179
6.2.4.	Fibra de carbono UNI-230	182
6.2.5.	Laminados rígidos.....	184
6.2.6.	Discusión de los resultados.....	185
6.3.	Fibras naturales de refuerzo	187
6.3.1.	Resultados	188
6.3.2.	Discusión de los resultados.....	191
6.4.	Fibras sintéticas I: tejidos	192

6.4.1. Resultados	193
6.4.2. Discusión de los resultados.....	196
6.5. Fibras sintéticas II: laminados rígidos.....	197
6.5.1. Resultados	197
6.5.2. Discusión de los resultados.....	202
6.6. Adhesivos estructurales	203
6.6.1. Ensayos previos de adhesivos (doble cortante)	203
6.6.2. Ensayos de cortante (laminados) sobre la línea cola.....	205
6.6.3. Ensayos de <i>pull off</i>	212
6.6.4. Discusión de los resultados.....	215
6.7. Ensayos a flexión en pequeñas dimensiones [1:25].....	216
6.7.1. Resultados en madera de chopo [1:25].....	217
6.7.2. Discusión de los resultados en madera de chopo [1:25]	223
6.7.3. Resultados en tablero de fibra DM [1:25].....	224
6.7.4. Discusión de los resultados en tablero de fibra DM [1:25]	231
6.8. Ensayos a flexión en dimensiones estructurales [1:2]	232
6.8.1. Resultados vigas dúo de chopo [1:2]	233
6.8.2. Resultados vigas dúo de Pino pinaster [1:2].....	239
6.8.3. Análisis de roturas.....	244
6.8.4. Discusión de los resultados.....	247
6.9. Ensayos de fluencia	248
6.9.1. Ensayos previos.....	250
6.9.2. Resultados de los ensayos de fluencia	252
6.9.3. Discusión de los resultados.....	256
7. ESTUDIO COMPARADO DE RESULTADOS	257
7.1. Materiales de refuerzo.....	257
7.2. Adhesivos	258
7.3. Vigas reforzadas.....	259
7.3.1. Rigidez	259
7.3.2. Resistencia.....	262
7.3.3. Propiedades mecánicas propuestas.....	264
8. ESTUDIO ECONÓMICO	267
8.1. Costes de fabricación de las vigas dúo	267
8.1.1. Vigas dúo de pino pinaster	268
8.1.2. Vigas dúo de chopo.....	269
8.2. Comparación propiedades mecánicas/precio con otros productos.....	269
8.2.1. Estudio de piezas a flexión	271
8.2.2. Estudio de piezas a compresión (pilares)	275
8.2.3. Estudio de piezas a tracción [tirantes]	278
8.3. Discusión del estudio de costes	282
8.3.1. Comparación propiedades mecánicas	282
8.3.2. Comparación de costes.....	283
9. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	285
9.1. Conclusiones	285
9.1.1. Conclusiones generales.....	285
9.1.2. Conclusiones específicas	286
9.2. Conclusions	288
9.2.1. General conclusions	288
9.2.2. Specific conclusions	289
9.3. Líneas futuras	291
9.4. Publicaciones y comunicaciones originadas por esta Tesis Doctoral.....	292
9.4.1. Publicación en revistas de alto impacto internacional.....	292
9.4.2. Publicación en libros.....	292
9.4.3. Comunicaciones en congresos	292
9.4.4. Divulgación local	293

10. BIBLIOGRAFÍA	295
10.1.Libros, revistas y comunicaciones	295
10.2.Enlaces webs.....	311
10.3.Normativa	312
11. ANEXO	315
I. Ensayos caracterización madera.....	315
II. Ensayos de fibras de refuerzo	317
III. Ensayos caracterización fibras tracción	319
IV. Ensayos de adhesivos	323
V. Ensayos flexión escala 1/25.....	330
VI. Ensayos flexión escala estructural (1/2)	339
VII. Ensayos de fluencia.....	342

Índice de figuras

Fig. 1.	Fotografía microscópica de un corte transversal en madera de conífera.....	12
Fig. 2.	Esquema de las diferentes capas constituyentes de la pared celular.....	12
Fig. 3.	Distribución del genero <i>Populus sp.</i> en la península ibérica (Fuente: IFN3. 2007).	14
Fig. 4.	Imágenes de las características del clon <i>Populus x euroamericana</i> (Dode) Guinier I-214 (fuente: Rueda et al. 2016).	18
Fig. 5.	Imagen de una chopera bajo populicultura intensiva en retícula 6x6 m (fuente: Asociación del Chopo de CyL).	18
Fig. 6.	Rendimientos clasificatorios correspondientes a las normas de clasificación visual UNE 56544 (1997), NF B 52-001 2007 y en máquina de flexión (Fuente: Casado et al. 2011).	22
Fig. 7.	Distribución del <i>Pinus pinaster</i> Ait (Fuente: IFN3. 2007) Azul ssp atlántica; verde ssp mesogeensis.....	30
Fig. 8.	Imágenes de las características del pino pinaster.	33
Fig. 9.	Imagen de masa de pino pinaster.	33
Fig. 10.	Grafico de la calidades de la madera de pino pinaster de procedencia Oña y Gredos.	35
Fig. 11.	Distribución de los cortes del tronco para la producción de piezas pa DÚO (MGB) y esquemas para la comprensión del aprovechamiento que el sistema DÚO hace de las características anisotrópicas de la madera (Fuente:Ahvenainen et al. 2007).	39
Fig. 12.	Comparación de las gráficas tensión-deformación de diferentes tipos de fibras utilizadas en refuerzos FRPa) <i>Carbon (High Modulus)</i> ; b) <i>Carbon (High Strength)</i> ; c) <i>Aramida</i> ; d) <i>S-glass</i> ; e) <i>E-glass</i> ; f) <i>Basalto</i> (Fuente: FIB 2007).	43
Fig. 13.	Relación tensión-deformación de fibras, matriz y FRP resultante (fuente:CNR-DT 200/2004).....	44
Fig. 14.	Esquema de la composición de una lamona de GFRP (Fuente:Stijn Matthys 2016)......	44
Fig. 15.	Comportamiento tensión-deformación de diferentes compuestos FRP comerciales en comparación con acero estructural (Fuente: Matthys 2013)	45
Fig. 16.	Imagen obtenida mediante microscopía fluorescente de una unión de madera-PUR (Fuente: Richter 2007)	46
Fig. 17.	Comportamiento de una unión reforzada. Gráficos de tensión deformación; a) madera; b) adhesivo estructural; c) barra FRP (Fuente: Steine,2012).....	48
Fig. 18.	Temperatura del ambiente y de la resina protegida por 50mm de madera de abeto (Fuente: Di María et al. 2017).	49
Fig. 19.	Tensión de la línea de encolado en función de la longitud de la unión (Fuente:Serrano 2017). ...	51
Fig. 20.	Influencia del tipo de adhesivo en la respuesta de tensión-deformación (Fuente: Serrano 2001). ...	51
Fig. 21.	Resistencia de la unión en comparación con la longitud encolada (Fuente: Lorenzis 2005).	51
Fig. 22.	Características comparadas de madera aserrada, madera laminada, y madera laminada reforzada con FRP (f_k = Valores característicos; f_m = Valores medios / n =número; f =valor) (Fuente: Alann 2006).	53
Fig. 23.	Resumen de las distintas disposiciones de refuerzo estudiados y recogidos en el estado del arte de esta tesis.....	55
Fig. 24.	Situación de laminados de refuerzo en la sección de madera (Fuente: Hernández et al. 1997). .	57
Fig. 25.	Disposición de los refuerzos ensayados (Fuente: Johns y Lacroix 2000))	58
Fig. 26.	Diferentes disposiciones de refuerzo utilizadas por Alam Parvez (2004).	59
Fig. 27.	Disposición del refuerzo sobre la viga laminada (Fuente: Ribeiro et al. 2009).	60
Fig. 28.	Configuraciones de ensayo (fuente: Raftery y Harte 2011).	60
Fig. 29.	Configuraciones de refuerzo de vigas laminadas (Fuente: Yang et al. 2016).	61
Fig. 30.	Tipos de refuerzo GFRP a flexión utilizados por Corradi et al. (2018).	62
Fig. 31.	Disposición de los refuerzos en las piezas (Fuente: Gentile et al. 2002).....	63
Fig. 32.	Configuración de las vigas reforzadas con GFRP (Fuente: Raftery et al. 2014)	64
Fig. 33.	Geometría del modelo de ensayos de 'picos de corte' (medidas en mm).	65
Fig. 34.	Esquemas de refuerzo con bandas de CFRP (Fuente: Borri et al. 2005).....	66
Fig. 35.	Esquema y dimensiones de las vigas de madera reforzadas (Fuente: Schober et al. (2005)). ...	66
Fig. 36.	Esquema de configuraciones de refuerzo de las vigas ensayadas (Fuente: Jasieńko y Nowak (2007).	67
Fig. 37.	Valores de carga de rotura de las vigas ensayadas (Fuente: Jasieńko y Nowak 2007).	68
Fig. 38.	Disposición de los refuerzos internos CFRP (Fuente: D'Ambrisi 2014)..	69
Fig. 39.	Refuerzo CFRP utilizado sobre piezas de madera aserradas (Fuente: De la Rosa et al. 2016). ..	70
Fig. 40.	Esquemas de refuerzo con barras de CFRP (Fuente: Borri et al. 2005).....	72
Fig. 41.	Empalme de dos vigas laminadas con barras de CFRP.	73

Fig. 42.	Tipos de refuerzo con barras de CFRP investigado (Fuente: Johnsson et al. 2006).	73
Fig. 43.	Refuerzo con tejido BFRP sobre madera aserrada (Fuente: De la Rosa 2013).	74
Fig. 44.	Secciones con las disposiciones y dimensiones de las piezas reforzadas (Fuente: Rafferty et al. 2015).	75
Fig. 45.	Métodos de cálculo de la resistencia al fuego de la madera (tiempo).	76
Fig. 46.	Evolución de temperatura en refuerzos FRP protegidos del fuego (Fuente: Zigler et al. 2015).	77
Fig. 47.	Grafica tiempo/deformación y especímenes ensayados (Fuente: Plevris et al. 1995).	78
Fig. 48.	Efecto del refuerzo FRP en los efectos de fluencia en coMParción con especímenes sin refuerzo (Fuente: Davids et al.)	79
Fig. 49.	Grafica tiempo / deformacion compativa entre piezas con y sin refuerzo (Fuente: Yahyaei-Moayyed et al. 2011).	80
Fig. 50.	Máquina de ensayos INSTRON 1195.	82
Fig. 51.	Máquina INSTRON Mod. UM 18-400/SW.	82
Fig. 52.	Máquina INSTRON Mod. MEN-102/100.	82
Fig. 53.	Máquina universal de ensayos marca IBERTEST mod. ELIB-100 MODERN.	83
Fig. 54.	Actuador hidráulico tracción 25kN.	83
Fig. 55.	Actuador hidráulico compresión 100kN.	83
Fig. 56.	Cámara climática ARALAB Fitoclima 1000.	84
Fig. 57.	Extensómetro IBERTEST Mod. IB-MFA 2.	87
Fig. 58.	Dimensiones bandas extensométricas utilizadas tipo lineales (LY41- 10/120 y LY41- 6/120), y tipo roseta (XY31- 6/120) de la marca HBM (Fuente: Catalogo HBM 2015)	89
Fig. 59.	Banda extensométrica LY41-10/120 colocada en una de las vigas.	90
Fig. 60.	Sistema de adquisición de datos QuamtumX-MX840B.	91
Fig. 61.	Sistema de adquisición de datos CanHead CB1010.	91
Fig. 62.	Croquis de las bancadas de acero.	91
Fig. 63.	Útil para la aplicación de la resina sobre la banda de refuerzo.	93
Fig. 64.	Preparación de las probetas de Poisson.	95
Fig. 65.	Probetas con sus distintas direcciones obtenidas de cada una de las piezas.	95
Fig. 66.	Probeta a tracción según norma ISO 13061-6:2014.	96
Fig. 67.	Probetas a cortante según norma UNE 56543:1988	96
Fig. 68.	Tejido de lino Fidflax Uni 300 HS 50.	98
Fig. 69.	Tejido de fibra de vidrio Fidglass Uni 300 HT 73.	99
Fig. 70.	Tejido de fibra de vidrio Owens Corning Fiberglass LTx1200/S300.	99
Fig. 71.	Tejido de fibra de carbono SikaWrap-230 C/45.	99
Fig. 72.	Dimensiones nominales en mm de las vigas serie 0 ensayadas.	107
Fig. 73.	Dimensiones nominales en mm de las vigas serie 1 ensayadas.	107
Fig. 74.	Dimensiones nominales en mm de las vigas serie 2 ensayadas.	108
Fig. 75.	Dimensiones nominales en mm de las vigas dúo reforzadas ensayadas.	109
Fig. 76.	Proceso de cepillado por las cuatro caras de cada pieza.	109
Fig. 77.	Detalle de la sección de las vigas dúo fabricadas.	110
Fig. 78.	Labores de cajado del rebaje para la introducción del refuerzo GFRP.	110
Fig. 79.	Encolado de las vigas dúo con resina epoxi.	111
Fig. 80.	Prensado de las vigas dúo con resina epoxi.	111
Fig. 81.	Ensayo a compresión de probetas.	113
Fig. 82.	Esquema de la instrumentación realizada.	114
Fig. 83.	Ensayo a tracción paralela de las probetas de madera.	115
Fig. 84.	Ensayo a cortante de las probetas de madera según norma UNE 56543:1988.	115
Fig. 85.	Dimensiones nominales en mm de la probeta ISO 13934-1 utilizada.	116
Fig. 86.	Probetas de chapa de madera de limitado espesor ensayadas.	116
Fig. 87.	Hilo de tejido ensayado con el con el equipo estereomicroscopio MOTIC SMZ-168.	118
Fig. 88.	Imagen del procedimiento de ensayo.	119
Fig. 89.	Proceso de deshilado y pesado del tejido.	119
Fig. 90.	Dimensiones nominales en mm de la probeta ISO 13934-1 para tejidos.	121
Fig. 91.	Dimensiones nominales en mm de la probeta ISO 527-5/B para matricez rígidas GFRP.	121
Fig. 92.	Despiece de probetas según ISO 527-5/B a partir de las bandas de refuerzo GFRP 1200/2400.	122
Fig. 93.	Corte de probetas por chorro de agua, mediante máquina de control numérico.	122
Fig. 94.	Medición de probetas con un calibre Mitutoyo.	123
Fig. 95.	Simbología empleada en la nomenclatura de las probetas.	123
Fig. 96.	Realización del marcado en las cabezas de las probetas.	123
Fig. 97.	Ajuste y cierre neumático.	124
Fig. 98.	Colocación del extensómetro.	124
Fig. 99.	Rotura de la probeta.	125
Fig. 100.	Estado de la probeta tras el ensayo.	125
Fig. 101.	Configuración de un ensayo a doble cortante a compresión.	126
Fig. 102.	Características de las probetas de cortante.	126

Fig. 103.	Detalle del útil y configuración de un ensayo a cortante de la línea de encolado. Dimensione en mm.	128
Fig. 104.	Características y dimensiones nominales en mm de las probetas de <i>pull-off</i>	130
Fig. 105.	Detalle del útil y configuración de un ensayo a tracción (<i>pull-off</i>) de la línea de encolado.	131
Fig. 106.	Imagen microscópica de una una unión encolada (Fuente:FPL 2010)	132
Fig. 107.	Comprobación del correcto acabado de las superficies (Fuente: FPL 2010)	132
Fig. 108.	Prueba de granallado sobre una banda de refuerzo de fibra (2400 gr/m ²).	134
Fig. 109.	Imágenes microscópicas de distintos tipos de partículas de granallado empleadas sobre los laminados.	135
Fig. 110.	Prueba de lijado sobre una muestra de banda de refuerzo de fibra (2400 gr/m ²).	135
Fig. 111.	Imágenes microscópicas distintos gramajes de lija empleados sobre los laminados.	136
Fig. 112.	Análisis de adherencia mediante el hendido con cuña.	136
Fig. 113.	Esquema de distancias (dimensiones en mm) entre puntos de carga y apoyos de vigas dúo escala 1:25 según UNE EN 408:2012.	137
Fig. 114.	Ensayo de vigas dúo de pequeñas en la máquina universal de ensayos Ibertest.	138
Fig. 115.	Esquema de distancias (dimensiones en mm) entre puntos de carga y apoyos según UNE EN 408:2012.	139
Fig. 116.	Medición de la deformación con el extensómetro.	139
Fig. 117.	Rotura de viga ensayada.	139
Fig. 118.	Muestras extraídas de vigas dúo ensayadas para obtención de humedad según UNE EN 13183-1:2002 . Dimensiones en mm.	140
Fig. 119.	Esquema de apoyo de la carga sobre las vigas (dimensiones en mm).....	141
Fig. 120.	Esquema de monitorización de una viga dúo.	142
Fig. 121.	Instrumentación utilizada durante los ensayos.	142
Fig. 122.	Ciclo de carga/descarga del ensayo de fluencia de acuerdo a UNE-EN 380:1998	143
Fig. 123.	Puesta en carga de las vigas dúo por escalones de carga.	144
Fig. 124.	Sucesión de fases tensionales de una pieza de madera sometida a flexión hasta su rotura. a) Fase elástica; b) Fase elasto-plástica con inicio de plastificación en compresión; c) Fase rotura con plastificación completa en compresión y fallo en tracción.	148
Fig. 125.	Gráfica tensión-deformación (tipo) con valores de límite elástico y resistencia última para madera.	148
Fig. 126.	Distribución estrés deformación propuesto por Neely (1898) (Fuente: Buchanan, A. H (1984)).	149
Fig. 127.	Distintos modelos analíticos de tensiones para madera: a) Modelo elástico; b) Modelo Moe (1961) ; c) Modelo Nwokoye (1975) ; d) Modelo Zakic (1973) ; e) Modelo Bazán-Buchanan (1990) ; f) Modelo Zaw (2005) ; g) Modelo Argüelles (2000)	150
Fig. 128.	Modelo elástico con una sección sin refuerzo (izq.) y reforzada (dcha.).....	151
Fig. 129.	Modelo Nwokoye (EC5) con una sección sin refuerzo (izq.) y reforzada (dcha.).....	151
Fig. 130.	Modelo Bazan-Buchanan con una sección sin refuerzo (izq.) y reforzada (dcha.)	152
Fig. 131.	Distribución de tensiones normales en la sección	153
Fig. 132.	Distribución de tensiones y deformaciones en la sección compuesta.	153
Fig. 133.	Sección 'Dúo' homogénea y con refuerzo de fibra.	155
Fig. 134.	Sección 'Dúo' homogénea y sección reforzada equivalente.	155
Fig. 135.	Sección 'Dúo' reforzada con fibras en la sección traccionada y sección equivalente.	156
Fig. 136.	Condiciones de carga propuestas por la UNE-408:2012	157
Fig. 137.	Diagramas de cortantes y momentos.	157
Fig. 138.	Gráfico fuerza-deformación de los distintos tipos de probeta de chopo ensayados a compresión.	160
Fig. 139.	Gráfico fuerza-deformación de los distintos tipos de probeta de pinaster ensayados a compresión.	161
Fig. 140.	Probeta tipo 1 (compresión axial 0°) ensayada.	162
Fig. 141.	Probeta tipo 2 (compresión 90°, radial) ensayada.	162
Fig. 142.	Probeta tipo 3 (compresión 90°, radial) ensayada.	163
Fig. 143.	Probeta tipo 4 (compresión 45°, longitudinal); tipo 5 (compresión 45°, radial); y tipo 6 (compresión 45°, tangencial) ensayadas.	163
Fig. 144.	Probetas de madera de chopo instrumentadas para su ensayo a tracción axial.	166
Fig. 145.	Ejecución de los ensayos a tracción paralela.	167
Fig. 146.	Probetas de madera ensayadas para la obtención de las propiedades de resistencia a cortante.	168
Fig. 147.	Gráfico tensión deformación con valores medios obtenidos experimentalmente para la madera de chopo (<i>Populus x euroamericana</i> I-214).	170
Fig. 148.	Gráfico tensión deformación con valores medios obtenidos experimentalmente para la madera de pino pinaster (<i>Pinus pinaster</i> Ait.).	170
Fig. 149.	Mediciones de los filamentos de fibra de vidrio de lino realizadas en la micrografía "toma 2" (50x).	172
Fig. 150.	Recuento de filamentos de fibra de lino con imágenes estereomicroscópica.	173

Fig. 151.	Mediciones de los filamentos de fibra de vidrio UNI-1200 realizadas en la micrografía "toma 5" (50x).	175
Fig. 152.	Recuento de filamentos con imágenes estereomicroscópica.	176
Fig. 153.	Material y equipos empleados en la obtención del volumen de los tejidos.	177
Fig. 154.	Deshilado y pesada de trama y urdimbre en tejido de fibra de vidrio UNI1200.	178
Fig. 155.	Mediciones de los filamentos de fibra de vidrio UNI-300 realizadas en la micrografía "toma 5" (50x).	180
Fig. 156.	Tejido de fibra de carbono UNI-230.	182
Fig. 157.	Gráfico de puntos con los valores de módulo de elasticidad de las probetas de materiales naturales.	189
Fig. 158.	Gráfico de cajas y bigotes con los valores de módulo de elasticidad para los distintos materiales naturales.	189
Fig. 159.	Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para refuerzos naturales.	190
Fig. 160.	Gráfico de puntos con los valores de tensión de rotura de los refuerzos naturales ensayados.	191
Fig. 161.	Gráfico de caja y bigotes de la tensión de rotura de los refuerzos naturales ensayados.	191
Fig. 162.	Gráfico de puntos con los valores de módulo de elasticidad obtenidos para los distintos tejidos ensayados.	194
Fig. 163.	Gráfico de cajas y bigotes con los valores de módulo de elasticidad para los distintos tejido ensayados.	195
Fig. 164.	Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para tejidos de refuerzo sintético.	195
Fig. 165.	Gráfico de cajas y bigotes con los valores de tensión de rotura para los distintos tejido ensayados.	196
Fig. 166.	Gráfico de cajas y bigotes con los valores de tensión de rotura para los distintos tejido ensayados.	196
Fig. 167.	Gráfico de punto con los valores de módulo de elasticidad de los laminado de fibra de vidrio ensayados.	199
Fig. 168.	Gráfico de caja y bicotes con los valores de módulo de elasticidad a tracción para los distintos laminados.	199
Fig. 169.	Gráfico módulo de elasticidad a tracción comparativo de los laminados de fibra de vidrio.	200
Fig. 170.	Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para laminados de refuerzo de fibra de vidrio.	201
Fig. 171.	Gráfico de punto con los valores de tensión de rotura de los laminado de fibra de vidrio ensayados.	202
Fig. 172.	Gráfico caja y bigotes de la tensión de rotura de los distintos laminados de fibra de vidrio ensayados.	202
Fig. 173.	Ensayo probetas doble cortante sobre platillo, a compresión.	204
Fig. 174.	Representación de los principales tipo de rotura observados en las probetas de doble cortante.	204
Fig. 175.	Fallo principal de cada tipo de probeta ensayado.	205
Fig. 176.	Representación de los principales tipo de rotura observados en las probetas (línea de rotura en rojo).	205
Fig. 177.	Roturas tipo detectadas durante los ensayos de cortante.	206
Fig. 178.	Gráfico de caja y bigotes de la resistencia a cortante en probetas de chopo para cada tipo de adhesivo al 12% HEH.	207
Fig. 179.	Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para probetas de chopo al 12%HEH.	207
Fig. 180.	Gráfico de caja y bigotes de la resistencia a cortante en probetas de chopo para cada tipo de adhesivo, tras 6 ciclos de envejecimiento.	208
Fig. 181.	Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para probetas de chopo, tras ciclos de envejecimiento.	209
Fig. 182.	Gráfico de la resistencia a cortante en probetas de pinaster para cada tipo de adhesivo (ensayo al 12% HEH).	210
Fig. 183.	Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para probetas de pinaster al 12%HEH.	210
Fig. 184.	Roturas tipo detectadas durante los ensayos de <i>pull-off</i> .	212
Fig. 185.	Gráfico de caja y bigotes de la resistencia a tracción perpendicular (<i>pull-off</i>) en probetas de chopo para cada tipo de adhesivo (ensayo al 12% HEH).	213
Fig. 186.	Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para probetas de chopo al 12%HEH.	213
Fig. 187.	Gráfico de la resistencia a tracción perpendicular (<i>pull-off</i>) en probetas de chopo para cada tipo de adhesivo, tras 6 ciclos de envejecimiento.	214
Fig. 188.	Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para probetas de chopo <i>pull-off</i> tras ciclos de envejecimiento.	214
Fig. 189.	Gráfico de fuerza-deformación de las vigas dúo de chopo [1:25].	218
Fig. 190.	Gráfico con los valores de MOEg de las distintas vigas dúo de chopo [1:25].	218
Fig. 191.	Gráfico caja-bigotes de los valores de MOEg para las vigas dúo de chopo [1:25].	219
Fig. 192.	Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para vigas dúo de madera de chopo escala 1:25.	220
Fig. 193.	Gráfico con los valores de MOR de las distintas vigas dúo de madera de chopo [1:25].	221
Fig. 194.	Gráfico caja-bigotes de los valores de MOR para las vigas dúo de chopo [1:25].	221
Fig. 195.	Gráfica con la densidad obtenida para las vigas dúo de madera de chopo [1:25].	222

Fig. 196.	Gráfica Fuerza – Extensómetro de las tres tipologías de viga dúo de tablero de fibras ensayadas.	225
Fig. 197.	Gráfico comparativo con los valores MOEG para las distintas vigas dúo de tablero (DM) ensayadas.	226
Fig. 198.	Gráfico de caja y bigotes comparativo entre módulos de elasticidad de las diferentes vigas dúo de tablero de fibras (DM) ensayadas.	227
Fig. 199.	Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para vigas dúo de tablero de fibras.	227
Fig. 200.	Gráfica Fuerza – Carrera de las tres tipologías de viga dúo de tablero de fibras (DM) ensayadas.	228
Fig. 201.	Gráfico comparativo con los valores MOR para las distintas vigas dúo de tablero (DM) ensayadas.	229
Fig. 202.	Gráfico de caja y bigotes comparativo entre módulos de rotura de las diferentes vigas dúo de tablero de fibras (DM) ensayadas.	229
Fig. 203.	Sección de una de las piezas con refuerzo sencillo (300 gr/m ²).	230
Fig. 204.	Sección de una de las piezas con refuerzo doble (600 gr/m ²).	230
Fig. 205.	Rotura típica de las vigas dúo con refuerzo sencillo (UNI-300).	230
Fig. 206.	Rotura tipo de las vigas dúo con refuerzo doble (UNI-600).	231
Fig. 207.	Rotura anómala con fallo de la línea de encolado.	231
Fig. 208.	Acopio de vigas dúo [1:2] para su ensayo en el laboratorio de maderas de Palencia.	232
Fig. 209.	Gráfica Fuerza-Deformación de las vigas dúo de chopo [1:2].	235
Fig. 210.	Gráfico de puntos con valores de MOEG de vigas dúo de chopo.	236
Fig. 211.	Gráfico cajas-bigotes del MOEG de vigas dúo chopo [1:2].	236
Fig. 212.	Gráfico de puntos con valores de MOR de vigas dúo de chopo.	237
Fig. 213.	Gráfico cajas-bigotes del MOR de vigas dúo chopo.	237
Fig. 214.	Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para vigas dúo de madera de chopo [1:2].	238
Fig. 215.	Gráfica Fuerza-Deformación de las vigas dúo de pino pinaster [1:2].	240
Fig. 216.	Gráfico de puntos con valores de MOEG de vigas dúo de pinaster.	241
Fig. 217.	Gráfico cajas-bigotes del MOEG de vigas dúo pinaster.	241
Fig. 218.	Gráfico de puntos con valores de MOR de vigas dúo de pinaster.	242
Fig. 219.	Gráfico cajas-bigotes del MOR de vigas dúo pinaster [1:2].	243
Fig. 220.	Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para vigas dúo de madera de pino pinaster [1:2].	244
Fig. 221.	Diferentes tipos de rotura producidos en varias vigas dúo ensayadas a flexión.	244
Fig. 222.	Tipos de fallo de las vigas dúo (a partir del gráfico de De la Rosa et al. 2013).	245
Fig. 223.	Presencia de nudos de tamaño limitado en las vigas dúo de chopo ensayadas.	246
Fig. 224.	Nudos presentes en las vigas de pino pinaster.	247
Fig. 225.	Comportamiento reológico de la madera (Argüelles et al, 2000).	248
Fig. 226.	Curvas de Madison y del EC 5 para representar el comportamiento reológico de la madera.	249
Fig. 227.	Test de monitorización desarrollado en el laboratorio de maderas de Palencia.	250
Fig. 228.	Taco de madera de chopo con banda extensométrica de compensación.	251
Fig. 229.	Determinación de la línea neutra a partir de las deformaciones medidas con las bandas extensométricas.	251
Fig. 230.	Gráfico de humedad ambiental durante el transcurso del ensayo.	252
Fig. 231.	Gráfico de humedad de equilibrio higroscópico teórico en la madera a partir de los datos de temperatura y humedad recogidos por las sondas termohigrométricas.	252
Fig. 232.	Gráfica flecha-tiempo de los LVDT, en escala logarítmica.	254
Fig. 233.	Gráfica flecha-tiempo de los LVDTs.	255
Fig. 234.	Gráfico deformación-tiempo de las bandas extensométricas.	255
Fig. 235.	Comparación de módulo de elasticidad y costes para todos los refuerzos ensayados.	257
Fig. 236.	Comparación de la resistencia a cortante y costes de los adhesivos para madera de chopo.	258
Fig. 237.	Comparación de la resistencia a cortante y costes de los adhesivos para madera de pino pinaster.	259
Fig. 238.	Representación gráfica de las flechas teórica y analítica para vigas dúo de chopo.	261
Fig. 239.	Representación gráfica de las flechas teórica y analítica para vigas dúo de pino pinaster.	261
Fig. 240.	Representación gráfica de las flechas teórica y analítica para vigas dúo de tablero de fibras DM (1:25).	262
Fig. 241.	Representación gráfica del modelo tensión-deformación de las vigas dúo ensayadas.	263
Fig. 242.	Esquema del forjado tipo propuesto para comparar las distintas maderas industrializadas a compresión.	271
Fig. 243.	Comparación entre resistencia a flexión y costes de los distintos productos analizados.	275
Fig. 244.	Esquema del pilar tipo propuesto para comparar las distintas maderas industrializadas a compresión.	275
Fig. 245.	Comparación entre resistencia a compresión y costes de los distintos productos analizados.	277
Fig. 246.	Cercha española propuesta para comparar las distintas maderas industrializadas a tracción.	278
Fig. 247.	Profundidad mínima del ensamblaje entre par y tirante por embarbillado simple (CTE).	281
Fig. 248.	Comparación entre resistencia a tracción y costes de los distintos productos analizados.	282

Índice de tablas

Tabla 1.	Clones admitidos dentro del Catálogo Nacional como materiales de base relativo al género <i>Populus L.</i>	15
Tabla 2.	Características del clon <i>Populus x euroamericana</i> (Dode) Guinier I-214 (según Rueda et al. 2016).	17
Tabla 3.	Propiedades mecánicas de <i>Populus x euramericana</i> I-214 (Fuente: Casado et al. 2010).....	21
Tabla 4.	Clases resistentes, según EN 338, y propuesta de clases para el <i>Populus x euroamericana</i>	23
Tabla 5.	Propiedades físicas y elastomecánicas del género <i>Populus</i> , según diversos autores.	23
Tabla 6.	Características del <i>Pinus pinaster</i> Ait (Fuentes: Ceballos y Ruíz de la Torre 1979 ; López, G. 2013).	32
Tabla 7.	Caracterización mecánica de la madera de <i>P. pinaster</i> a partir de la clasificación visual.	34
Tabla 8.	Correspondencia entre clases resistentes y calidades (EN 1912) para madera serrada de pino <i>pinaster</i>	34
Tabla 9.	Propiedades físicas y elastomecánicas del <i>Pinus pinaster</i> Ait., según diversos autores.	36
Tabla 10.	Propiedades de diferentes tipos de fibras utilizadas en refuerzos FRP (Fuentes: Alann 2006, Jacob et al. 2007, FIB 2007).	42
Tabla 11.	Propiedades de diferentes tipos de resinas termoestables utilizadas como matriz en compuestos FRP de uso estructural (Fuentes: Jacob et al. 2007 , FIB 2007)	43
Tabla 12.	Propiedades mecánicas típicas de refuerzos unidireccionales de GFRP, CFRP y AFRP (Fuente: FIB 2007).	45
Tabla 13.	Clasificación de adhesivos estructurales para madera según el nivel de exposición ambiental (Fuente: FPL 2010)	47
Tabla 14.	Origen y propiedades en acopio de la madera de chopo utilizada en esta investigación.	94
Tabla 15.	Origen y propiedades en acopio de la madera de pino <i>pinaster</i> utilizada en esta investigación. ..	94
Tabla 16.	Propiedades de la madera utilizada como refuerzo declaradas en origen.	97
Tabla 17.	Propiedades declaradas por la marca de fibra de lino Fidia.	98
Tabla 18.	Resumen de las propiedades de los distintos tejidos de fibra sintéticas utilizados, declaradas por la marca.	100
Tabla 19.	Resumen de las propiedades de tejidos y resina utilizados en GFRP UNI-300., declaradas por la marca.	100
Tabla 20.	Resumen de las propiedades de los tejidos y resina utilizados en GFRP UNI-1200, declaradas por la marca.	101
Tabla 21.	Resumen de las propiedades declaradas por la marca del laminado CFRP.....	102
Tabla 22.	Resumen de las principales características y propiedades de los adhesivos epoxi estudiados. Sombreados los adhesivos seleccionados para ensayos de compatibilidad con probetas madera y FRP.....	103
Tabla 23.	Resumen de las vigas testigo de pequeñas dimensiones de la Serie 0 ensayadas.....	106
Tabla 24.	Resumen de las vigas dúo reforzadas de pequeñas dimensiones de la Serie 1 ensayadas.	107
Tabla 25.	Características técnicas DMF FIBRALAC (Fuente: Catálogo Finsa)	108
Tabla 26.	Resumen de vigas dúo de tablero DM de la SERIE 2 ensayadas.	108
Tabla 27.	Vigas dúo de dimensión nominal 80x140x2500mm ensayadas.	109
Tabla 28.	Tipo y número de probetas de cortante ensayadas a doble cortante.	125
Tabla 29.	Tipo y número de probetas de cortante ensayadas según norma ISO 6238: 2018.	127
Tabla 30.	Características de los ciclos de envejecimiento realizados.	128
Tabla 31.	Tipo y número de probetas de <i>pull-off</i> ensayadas según norma EN-ISO 4624:2016.	130
Tabla 32.	Tabla para la selección del tipo de partícula abrasiva en función del material.....	133
Tabla 33.	Características de las partículas abrasivas seleccionadas.	134
Tabla 34.	Vigas dúo de madera de chopo y tablero de fibras DM ensayadas.....	137
Tabla 35.	Vigas dúo de dimensión nominal 80x140x2500mm ensayadas.	138
Tabla 36.	Dimensiones, humedad y temperatura medidos antes de cada ensayo.	140
Tabla 37.	Procedimiento de carga para el ensayo de fluencia.	143
Tabla 38.	Valores medios de los ensayos a compresión en probetas de chopo.....	159
Tabla 39.	Valores medios de los ensayos a compresión en probetas de pino <i>pinaster</i>	160
Tabla 40.	Valores medios de las constantes elásticas de la madera de chopo obtenidas a partir de los ensayos realizados.	164
Tabla 41.	Valores medios de las constantes elásticas de la madera de pino obtenidas a partir de los ensayos realizados.	164
Tabla 42.	Constantes elásticas de chopo referenciadas por otros investigadores.	165
Tabla 43.	Constantes elásticas de pino referenciadas por otros investigadores.	166

Tabla 44.	Valores medios de los resultados de los ensayos a tracción paralela sobre probetas de madera de chopo.....	167
Tabla 45.	Valores medios de los resultados de los ensayos a cortante sobre probetas de madera de pino pinaster.	167
Tabla 46.	Valores medios de los resultados de los ensayos a cortante sobre probetas de madera de chopo.	168
Tabla 47.	Valores medios de los resultados de los ensayos a cortante sobre probetas de madera de pino pinaster.	169
Tabla 48.	Valores medios de las principales propiedades mecánicas de las maderas ensayadas.....	169
Tabla 49.	Número de hilos / cm de fibra de lino.	171
Tabla 50.	Determinación del diámetro medio del filamento de fibra de lino.....	172
Tabla 51.	Número medio de filamentos por hilo del tejido de fibra de lino.	173
Tabla 52.	Obtención del área eficaz mediante medición del volumen en tejido de fibra de lino.	173
Tabla 53.	Obtención de la relación tejido unidireccional / MAT para fibra de lino.....	174
Tabla 54.	Obtención del área a través del peso para tejido de fibra lino.	174
Tabla 55.	Número de hilos / cm de fibra de vidrio UNI-1200.....	175
Tabla 56.	Determinación del diámetro medio del filamento UNI-1200.....	176
Tabla 57.	Número medio de filamentos por hilo del tejido de fibra vidrio UNI 1200.	176
Tabla 58.	Obtención del área eficaz mediante medición del volumen en tejido de fibra vidrio UNI 1200	177
Tabla 59.	Obtención de la relación tejido unidireccional / MAT para fibra de vidrio UNI-1200.....	178
Tabla 60.	Obtención del área a través del peso para tejido de fibra vidrio UNI 1200.	178
Tabla 61.	Número de hilos / cm de fibra de vidrio UNI-300.	179
Tabla 62.	Determinación del diámetro medio del filamento UNI-300.....	180
Tabla 63.	Número medio de filamentos por hilo del tejido de fibra vidrio UNI 300.	180
Tabla 64.	Obtención del área eficaz mediante medición del volumen en tejido de fibra vidrio UNI 300.	181
Tabla 65.	Obtención de la relación tejido unidireccional / MAT para fibra de vidrio UNI-300.	181
Tabla 66.	Obtención del área a través del peso para tejido de fibra vidrio UNI 300.	182
Tabla 67.	Número de hilos / cm de fibra de carbono UNI-230.....	182
Tabla 68.	Obtención del área eficaz mediante medición del volumen en tejido de fibra de carbono UNI-230.	183
Tabla 69.	Obtención de la relación tejido unidireccional / MAT para fibra de carbono UNI 230.....	183
Tabla 70.	Obtención del área a través del peso para tejido de fibra de carbono UNI-230.	184
Tabla 71.	Obtención del porcentaje fibra longitudinal de los laminados de fibra de vidrio ensayados.....	184
Tabla 72.	Proporción trama / urdimbre de los tejidos de refuerzo (Ver Apartado 6.2).	185
Tabla 73.	Densidad de los laminados a partir del porcentaje de volumen de fibra y resina.	185
Tabla 74.	Dimensiones medias de los distintos tipos de probetas de laminado de fibra de vidrio ensayadas.	185
Tabla 75.	Resumen de los valores medios de los resultados obtenidos del área eficaz de hilo para los distintos tipos de tejido.....	185
Tabla 76.	Resumen de los valores medios de los resultados obtenidos del área eficaz para los distintos tipos de tejido.	186
Tabla 77.	Determinación del gramaje (peso por unidad de superficie) de los distintos tejidos.....	186
Tabla 78.	Otras propiedades de los distintos tejidos.....	186
Tabla 79.	Dimensiones medias de los distintos tipos de probetas de materiales naturales y orgánicos ensayadas.....	187
Tabla 80.	Resultados de tensión de rotura y módulo de elasticidad a tracción para los distintos materiales naturales.	188
Tabla 81.	Estudio de homogeneidad entre grupos de refuerzos naturales.....	190
Tabla 82.	Dimensiones medias de los distintos tipos de probetas de tejidos sintéticos ensayadas.....	192
Tabla 83.	Resultados de tensión de rotura y módulo de elasticidad a tracción para los distintos tejidos ensayados.....	193
Tabla 84.	Estudio de homogeneidad entre grupos de refuerzos sintéticos.	195
Tabla 85.	Resultados de tensión de rotura y módulo de elasticidad a tracción para los distintos laminados ensayados.....	197
Tabla 86.	Comparación de los módulos de elasticidad entre refuerzos.....	200
Tabla 87.	Estudio de homogeneidad entre grupos de laminados de refuerzo de fibra de vidrio.	201
Tabla 88.	Tensión de rotura y tipo de fallo de las probetas ensayadas a cortante de madera de chopo.	206
Tabla 89.	Estudio de homogeneidad entre grupos de adhesivos para probetas de chopo al 12%HEH.	208
Tabla 90.	Estudio de homogeneidad entre grupos de adhesivos para probetas de chopo ciclos de envejecimiento.	209
Tabla 91.	Tensión de rotura y tipo de fallo de las probetas ensayadas a cortante de madera de pinaster..	209
Tabla 92.	Estudio de homogeneidad entre grupos de adhesivos para probetas de pinaster al 12% HEH. .	211
Tabla 93.	Valores medios de tensión de rotura y tipo de fallo de probetas de chopo ensayadas a tracción perpendicular.	212
Tabla 94.	Estudio de homogeneidad entre grupos de adhesivos para probetas pull-off de chopo al 12%HEH.....	214

Tabla 95. Estudio de homogeneidad entre grupos de adhesivos para probetas pull-off de chopo tras envejecimiento.	215
Tabla 96. Número de vigas dúo de madera de chopo testigos [1:25].	216
Tabla 97. Número de vigas dúo de madera de chopo reforzadas [1:25].	216
Tabla 98. Ratio de refuerzo utilizado en cada serie de vigas dúo de chopo escala 1:25.	216
Tabla 99. Número de vigas dúo de tablero de fibra [1:25].	217
Tabla 100. Valores de MOR y MOEG para las vigas dúo de madera de chopo escala 1:25.	217
Tabla 101. Comparación de los módulos de elasticidad de las vigas dúo de chopo [1:25].	219
Tabla 102. Estudio de homogeneidad entre grupos de las vigas dúo de tablero de fibras.	220
Tabla 103. Comparación de los valores de MOR de las vigas dúo de chopo [1:25].	221
Tabla 104. Comparación de densidades de las vigas dúo de chopo [1:25].	222
Tabla 105. Resultados de módulo de elasticidad y módulo de rotura obtenidos para vigas dúo de chopo.	223
Tabla 106. Ratio de refuerzo utilizado en cada tipo de viga.	224
Tabla 107. Valores de MOEG y MOR para las vigas dúo reforzadas de tablero de fibras (DM).	224
Tabla 108. Valores medios de fuerza y deformación para las distintas tipologías de viga dúo de tablero de fibras (DM).	226
Tabla 109. Comparación de los módulos de elasticidad de las vigas dúo DM [1:25].	227
Tabla 110. Estudio de homogeneidad entre grupos de las vigas dúo de tablero de fibras.	228
Tabla 111. Valores medios de fuerza y deformación de rotura para las de viga dúo de tablero de fibras.	229
Tabla 112. Comparación de los módulos de rotura de las vigas dúo DM [1:25].	230
Tabla 113. Valores medios de módulo de elasticidad y módulo de rotura obtenidos para vigas dúo de tablero de fibras.	232
Tabla 114. Número de vigas dúo reforzadas [1:2].	233
Tabla 115. Propiedades mecánicas del refuerzo utilizado en cada serie de vigas dúo [1:2].	233
Tabla 116. Valores de MOR y MOEG para las vigas dúo [1:2].	233
Tabla 117. Valores medios de fuerza de rotura y flecha máxima de las vigas dúo de chopo [1:2].	235
Tabla 118. Comparación de los módulos de elasticidad de las vigas dúo de chopo [1:2].	236
Tabla 119. Comparación de los módulos de rotura de las vigas dúo de chopo [1:2].	238
Tabla 120. Estudio de homogeneidad entre grupos de las vigas dúo de pino pinaster [1:2].	238
Tabla 121. Valores de MOR y MOEG para las vigas dúo de pino pinaster [1:2].	239
Tabla 122. Fuerza de rotura y flecha máxima de las vigas dúo de pino pinaster [1:2].	240
Tabla 123. Comparación de los módulos de elasticidad de las vigas dúo de pino pinaster [1:2].	242
Tabla 124. Comparación de los módulos de rotura de las vigas dúo de pino pinaster [1:2].	243
Tabla 125. Estudio de homogeneidad entre grupos de las vigas dúo de pino pinaster [1:2].	244
Tabla 126. Influencia de singularidades y tipos de fallo de las vigas dúo de chopo [1:2].	245
Tabla 127. Influencia de singularidades y tipos de fallo de las vigas dúo de pino pinaster [1:2].	246
Tabla 128. Resultados de módulo de elasticidad y módulo de rotura obtenidos.	247
Tabla 129. Resultados obtenidos de los ensayos previos con bandas extensométricas.	251
Tabla 130. Valores de humedad de equilibrio higroscópico de las vigas dúo medido con xilohigrómetro.	253
Tabla 131. Deformaciones medidas durante la de puesta en carga de las vigas dúo testigo.	253
Tabla 132. Deformaciones medidas durante la de puesta en carga de las vigas dúo reforzadas.	253
Tabla 133. Resultados de incremento flecha por efecto de la fluencia recogidos con los LVDT en las vigas de chopo.	254
Tabla 134. Resultados de la deformación por fluencia recogidos por las bandas extensométricas en las vigas de chopo.	255
Tabla 135. Comparación de los valores de módulo de elasticidad teóricos y experimentales en vigas dúo estructurales.	259
Tabla 136. Comparación de los valores de módulo de elasticidad teóricos y experimentales en vigas dúo de DM (1:25)	260
Tabla 137. Comparación de resultados de flecha en las vigas dúo de chopo.	260
Tabla 138. Comparación de resultados de flecha en las vigas dúo de pino pinaster.	261
Tabla 139. Comparación de resultados de flecha en las vigas dúo de tablero DM (1:25).	262
Tabla 140. Comparación de los valores de módulo de elasticidad teóricos y experimentales en vigas dúo estructurales.	263
Tabla 141. Valores resistentes propuestos para vigas de madera de chopo	264
Tabla 142. Valores resistentes propuestos para vigas de madera de pino pinaster.	265
Tabla 143. Precios de materiales y mano de obra.	267
Tabla 144. Costes de fabricación de vigas dúo testigo de madera de pino pinaster (2500x140x80 mm).	268
Tabla 145. Coste de fabricación de vigas dúo reforzadas GFRP 1200 de madera de pino pinaster (2500x140x80 mm).	268
Tabla 146. Coste de fabricación de vigas dúo reforzadas GFRP 2400 de madera de pino pinaster (2500x140x80 mm).	268
Tabla 147. Costes de fabricación de vigas dúo testigo de madera de chopo (2500x140x80 mm).	269
Tabla 148. Coste de fabricación de vigas dúo reforzadas GFRP 1200 de madera de chopo (2500x140x80 mm).	269

Tabla 149. Coste de fabricación de vigas dúo reforzadas GFRP 2400 de madera de chopo (2500x140x80 mm).....	269
Tabla 150. Productos de madera seleccionados para comparas prestaciones mecánicas/precio.	270
Tabla 151. Comparación entre precios de maderas aserradas y laminadas.	270
Tabla 152. Precios de producción industrial de los dúos reforzados y sin reforzar.	271
Tabla 153. Valoración de cargas del forjado propuesto.	272
Tabla 154. Combinaciones de carga.	273
Tabla 155. Resumen de los valores resistentes y costes obtenidos para el forjado propuesto (flexión).....	273
Tabla 156. Resultados a flexión ordenados por propiedades mecánicas (de menor a mayor índice de agotamiento).....	273
Tabla 157. Resumen de los valores resistentes y costes obtenidos para el forjado propuesto con secciones variables.	274
Tabla 158. Resultados a flexión ordenados por precio (de menor a mayor).....	274
Tabla 159. Resumen de los valores resistentes y costes obtenidos para el pilar propuesto (compresión). ...	276
Tabla 160. Resultados a compresión ordenados por propiedades mecánicas (de menor a mayor índice agotamiento).....	276
Tabla 161. Resumen de los valores resistentes y costes obtenidos para el pilar propuesto con secciones variables.	277
Tabla 162. Resultados a compresión ordenados por precio (de menor a mayor).....	277
Tabla 163. Valoración de cargas de la cercha de cubierta propuesta.	278
Tabla 164. Resumen de los valores resistentes y costes obtenidos para el tirante propuesto (tracción).	279
Tabla 165. Resultados a tracción ordenados por propiedades mecánicas (de menor a mayor índice de agotamiento).....	280
Tabla 166. Resumen de los valores resistentes y costes obtenidos para el tirante propuesto con secciones variables.	280
Tabla 167. Resultados a tracción ordenados por precio (de menor a mayor).	281
Tabla 168. Resumen de las propiedades mecánicas de las vigas dúo reforzadas.	285
Tabla 169. Relación de prestaciones mecánicas/precio de los refuerzos sintéticos analizados.	286
Tabla 170. Summary of the mechanical properties of the reinforced duo girders.....	288
Tabla 171. List of mechanical benefits / price of synthetic reinforcers analyzed.	289
Tabla 172. Datos ensayos a compresión sobre probetas libre de defectos de madera de chopo.	315
Tabla 173. Datos ensayos a compresión sobre probetas libre de defectos de madera de pino pinaster.	315
Tabla 174. Datos ensayos a tracción paralela de madera chopo (12%HR).....	316
Tabla 175. Datos ensayos a tracción paralela de madera pinaster (12%HR).	316
Tabla 176. Datos ensayos a cortante de madera chopo (12%HR).....	316
Tabla 177. Datos ensayos a cortante de madera pino pinaster (12%HR).	317
Tabla 178. Diámetro medio del filamento de los tejidos de refuerzo.....	317
Tabla 179. Datos ensayos a tracción de los distintos refuerzos naturales.	320
Tabla 180. Datos ensayos a tracción de los distintos tejidos de refuerzo.....	321
Tabla 181. Datos ensayos a tracción de los laminados de fibra de vidrio.	322
Tabla 182. Datos ensayos a cortante de madera chopo (12%HR).....	323
Tabla 183. Datos ensayos a cortante de madera pino pinaster (12%HR).....	325
Tabla 184. Datos ensayos a cortante de madera chopo tras los ciclos de envejecimiento.....	326
Tabla 185. Datos ensayos a tracción perpendicular (pull-off) de madera chopo (12%HR).	328
Tabla 186. Datos ensayos a tracción perpendicular (pull-off) de madera chopo tras los ciclos de envejecimiento.	329
Tabla 187. Datos ensayos a flexión de vigas dúo de chopo escala reducida 1/25.....	330
Tabla 188. Datos ensayos a flexión de vigas dúo de tablero de fibras de densidad media (DM) escala reducida 1/25.	338
Tabla 189. Datos ensayos a flexión de vigas dúo de chopo escala estructural.	339
Tabla 190. Datos ensayos a flexión de vigas dúo de pino pinaster escala estructural.	341
Tabla 191. Resumen de la evolución (semanal) de los ensayos de fluencia sobre vigas dúo testigo.	342
Tabla 192. Resumen de la evolución (semanal) de los ensayos de fluencia sobre vigas dúo reforzadas GFRP UNI2400.	343

Nomenclatura

Δ	Variación.
$A_{\text{ef.hilo}}$	Área eficaz por hilo de tejido (mm^2/hilo).
$A_{\text{ef.tej}}$	Área eficaz por centímetro de tejido (mm^2/cm).
A_{fibra}	Área eficaz de fibra contenida en la matriz de un laminado.
A_{neta}	Área neta.
b	Anchura.
b_m	Anchura madera.
b_t	Anchura a tracción.
b_{eq}	Anchura equivalente.
b_r	Anchura refuerzo.
Caract. (5%)	Valor característico.
CC	Ciclos de envejecimiento con cambio en las condiciones de temperatura y humedad (<i>Clim. Cycles</i>).
COV	Coefficiente de variación (%).
cN	Centinewton.
Dcha.	Derecha
Defor.	Deformación.
DMS1	Circuito a cuarto de puente de Wheatstone simple.
DMS1 +K	Circuito a cuarto de puente de Wheatstone con banda de compensación.
dm^3/s	Decímetro cúbico por segundo
dPa·s	Viscosidad en decipascal por segundo.
e	Espesor.
E	Módulo de elasticidad
E_L	Módulo de elasticidad longitudinal.
E_R	Módulo de elasticidad radial.
E_{Tan}	Módulo de elasticidad tangencial.
E_t	Módulo de elasticidad a tracción.
E_c	Módulo de elasticidad a compresión.
E_r	Módulo de elasticidad del refuerzo.
E_m	Módulo de elasticidad a flexión.
E_{rotura}	Módulo de elasticidad en rotura.
ELU	Estado límite último.
ELS	Estado límite de servicio.
EPX	Resina epoxi.
Fv	Fibra de vidrio.
FC	Fibra de carbono.
FI	Fibra de lino.
F_{inicial}	Fuerza inicial.
F_{Final}	Fuerza final.
$F_{\text{máx, est}}$	Fuerza máxima estimada.
f_n	Fibra neutra de una pieza sometida a flexión.
$f_{t,o,u}$	Fuerza a tracción longitudinal última.
$f_{c,o,u}$	Fuerza a compresión longitudinal última.
$F_{c,1}$	Bloque de compresiones madera uno.
$F_{c,2}$	Bloque de compresiones madera dos.
$F_{t,1}$	Bloque de tracciones madera uno.
F_{FRP}	Bloque de tracciones FRP.
g	Gramo.
g/m^2	Gramo por metro cuadrado.
g/m^3	Gramo por metro cúbico.
G_{LR}	Módulo de elasticidad transversal en dirección longitudinal-radial.
G_{LT}	Módulo de elasticidad transversal en dirección longitudinal-tangencial.
G_{RT}	Módulo de elasticidad transversal en dirección radial-tangencial.
G_1	Carga de peso propio.
G_2	Carga permanente.
GPa	Giga Pascal.
ha	Hectárea

HEH	Humedad de equilibrio higroscópico.
HR	Humedad relativa del aire.
h_{LN}	Altura de la línea neutra de la sección.
h_f	Altura de la fibra de refuerzo.
h_r	Altura del refuerzo.
h	Altura.
h_{cy}	Altura del punto de plastificación a compresión del bloque comprimido.
Izq.	Izquierda.
Inc.	Incremento.
Ind.Agot.	Índice de agotamiento.
Inf.:	Inferior.
I_d	Inercia de la viga dúo
I_r	Inercia del refuerzo.
K	Grado Kelvin
L_{fib}	Longitud fibra.
LVDT	Extensómetro inductivo (<i>Linear Variable Differential Transformer</i>).
Min.	Mínimo.
Máx.	Máximo.
MEF	Método de los elementos finitos (<i>Finite Elements Method -FEM-</i>).
M_u	Momento último de la sección.
$M_{u, testigo}$	Momento último de la sección en una pieza sin refuerzo.
$M_{u, FRP}$	Momento último de la sección en una pieza reforzada con FRP.
μm	Micra/s.
m	Metro/s.
m^2	Metro/s cuadrado/s.
MAT	Tejido secundario de trama compuesto por de hilos cortados, entrelazados aleatoriamente, aglomerados y prensados.
mm	Milímetro/s.
MPa	Mega Pascal.
min	Minuto/s.
MPa:s	Viscosidad en mega Pascal por segundo.
MOE	Módulo de elasticidad.
MOE_{medio}	Módulo de elasticidad medio.
MOEG	Módulo de Elasticidad Global a Flexión.
$MOEG_{min}$	Módulo de Elasticidad Global a Flexión mínimo.
MOR	Módulo de rotura.
MOR_{medio}	Módulo de rotura medio.
MOR_{min}	Módulo de rotura mínimo
MUF	Adhesivo melamina-urea-formol.
N	Newton.
N^o	Número.
Nm	Newton metro.
N/mm^2	Newton por milímetro cuadrado.
$N_{hilo, cm}$	Número de hilos por cada centímetro de tejido.
$N_{fib, hilo}$	Número de fibras en cada hilo.
N/E	No especificado.
Ohm	Ohmios.
P_s	Peso seco (g).
P_h	Peso húmedo (g).
PC	Ordenador (<i>Personal computer</i>).
ppm/K	Coefficiente de resistencia eléctrica de un circuito, partes por millón por grado Kelvin.
PUR	Adhesivo de poliuretano.
Q_1	Carga variable.
kg/m^3	Kilogramo por metro cúbico.
kJ/mol	Kilojulio por mol
Kn	Kilo Newton.
kS/s	1000 muestras cada segundo (<i>kilo samples per second</i>).
ρ	Densidad (kg/m^3).
\emptyset	Diámetro.
$\emptyset_{fib, mean}$	Diámetro medio de la fibra (mm^2).
\emptyset_{fib}	Diámetro de la fibra (mm^2).
FRP	Polímeros reforzados con fibras (<i>Fibers Reinforced Polymers</i>).
GFRP	Polímeros reforzados con fibras de vidrio (<i>Glass Fibers Reinforced Polymers</i>).
CFRP	Polímeros reforzados con fibras de carbono (<i>Carbon Fibers Reinforced Polymers</i>).
AFRP	Polímeros reforzados con fibras de aramida (<i>Aramid Fibers Reinforced Polymers</i>).
BFRP	Polímeros reforzados con fibras de basalto (<i>Basalt Fibers Reinforced Polymers</i>).

NOMENCLATURA

RFv	Laminado de fibra de vidrio embebida en resina.
RFc	Laminado de fibra de carbono embebida en resina.
rpm	Revoluciones por minuto.
s	Segundo.
SG	Banda extensométrica (Strain gauge).
SD	Desviación estándar.
Sup.	Superior.
T	Tonelada
UNI	Unidireccional.
Ud.	Unidad.
V	Voltios.
v _{LR}	Poisson en la dirección longitudinal-radial.
v _{RL}	Poisson en la dirección radial-longitudinal.
v _{LT}	Poisson en la dirección longitudinal-tangencial.
v _{TL}	Poisson en la dirección tangencial-longitudinal.
v _{RT}	Poisson en la dirección radial-tangencial.
v _{TR}	Poisson en la dirección tangencial-radial.
W	Vatios.
W/m·K	Conductividad térmica en vatio por kelvin metro.
W-FRP-W	Unión encolada tipo madera-FRP-madera.
W-W	Unión encolada tipo madera-madera.
#	Número.
L	Largo.
B	Espesor o grueso.
H	Ancho.
σ_t	Tensión a tracción.
σ_c	Tensión a compresión.
$\sigma_{t,0,u}$	Tensión longitudinal a tracción en rotura.
$\sigma_{c,0,y}$	Tensión longitudinal a compresión en tramo plástico.
$\sigma_{c,0,u}$	Tensión longitudinal a compresión en rotura.
$\sigma_{c,y}$	Tensión longitudinal a compresión en plastificación.
$\sigma_{c,u}$	Tensión a compresión última.
$\sigma_{c,max}$	Tensión a compresión máxima.
$\sigma_{t,max}$	Tensión a tracción máxima.
ϵ_c	Deformación a compresión.
ϵ_0	Deformación longitudinal.
$\epsilon_{c,0,e}$	Deformación longitudinal a compresión en tramo elástico.
$\epsilon_{c,0,y}$	Deformación longitudinal a compresión en tramo plástico.
$\epsilon_{c,0,u}$	Deformación longitudinal a compresión en rotura.
$\epsilon_{c,y}$	Deformación compresión en tramo plástico.
$\epsilon_{c,e}$	Deformación a compresión en tramo elástico.
$\epsilon_{c,u}$	Deformación a compresión en tramo plástico
ϵ_t	Deformación a tracción.
$\epsilon_{t,0,u}$	Deformación longitudinal a tracción en rotura.
$\epsilon_{t,u}$	Deformación a tracción en tramo plástico.
$F_{c,1}$	Fuerza a compresión bloque 1.
$F_{c,2}$	Fuerza a compresión bloque 2.
$F_{t,1}$	Fuerza a tracción bloque 1.
F_{FRP}	Fuerza a tracción del refuerzo FRP.
M_u	Momento último.
M_0-M_u	Momento desde carga 0 hasta momento último.
€	Euros.
°C	Grado Celsius.
$\delta_{y,ana}$	Flecha obtenida analíticamente.
$\delta_{y,exp}$	Flecha obtenida experimentalmente.

1 . INTRODUCCIÓN, JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Introducción

1.1.1. Antecedentes

La madera ha sido tradicionalmente utilizada en construcción por sus excelentes propiedades mecánicas, gran disponibilidad en nuestra latitud, ligereza y facilidad de trabajo. Además, es el único material de origen completamente biológico y natural utilizado aún en la construcción, siendo un material totalmente renovable y sostenible ambientalmente. Los árboles, durante su crecimiento y ciclo vegetativo, son capaces de captar el CO₂ atmosférico para transformarlo en madera –se estima una retención aproximada de 1,47 kg de CO₂ y la producción de 1,07 kg de O₂ por cada kg de madera¹-, y en sus procesos de transformación y fabricación de elementos de uso estructural se requieren unos gastos de energía significativamente inferiores a otros materiales de alternativos². También presenta unas buenas prestaciones térmicas, y un agradable confort higrotérmico y acústico. Todo ello explica su empleo permanente en la historia de la construcción y el atractivo que sigue presentando para los estándares de construcción sostenible y energéticamente eficiente que la sociedad está exigiendo hoy en día.³

La tendencia actual de la construcción con madera se encamina hacia una sustitución de la madera aserrada tradicional por diferentes productos industrializados -madera industrializada- de aplicación estructural. Productos transformados como la madera laminada encolada (MLE), el tablero contralaminado (CLT), o incluso madera reconstituida (PSL o LSP), compiten en precio y prestaciones con el resto de los materiales estructurales. Algunos de estos nuevos materiales permiten, al menos teóricamente, la fabricación de secciones con formas y dimensiones ilimitadas, y con controles de calidad intensivos que reducen la variabilidad de sus propiedades, consustancial al empleo de un material de origen natural.⁴

El empleo creciente de estos productos estructurales de madera industrializada viene marcado por numerosas circunstancias, entre las que destacan:

- El avance tecnológico en los sistemas de producción y la consiguiente reducción de costes de fabricación.
- La evolución y mejora de las prestaciones y durabilidad a largo plazo de los adhesivos de uso estructural.
- El aumento en la exigencia y control sobre la calidad de los materiales de uso estructural recogido en la normativa actual.
- La necesidad de obtener un adecuado aprovechamiento de los recursos madereros.
- La mayor concienciación social sobre la necesaria protección de los recursos forestales, su valor social y económico, y su necesaria gestión responsable y sostenible.

¹ Council, C. W. (1999). Life cycle analysis for residential buildings. *Wood the Renewable Resource Bulletin*, (5) pp.124-136.

² Lawson, B. (1996) Building materials energy and the environment. Towards ecologically sustainable development. The Royal Australian Institute of Architects. Makuna, Australia. pp.135.

³ AA.VV. (2012) Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo relativa a la eficiencia energética.

⁴ Thelandersson, S.; Larsen, H. J. (2003). *Timber engineering*. Ed. John Wiley & Sons. pp.429.

- La creciente escasez de trozas de madera de grandes dimensiones, y la necesidad de un mejor aprovechamiento y ahorro de materia prima.
- Su competitividad en precio de estructura construida, especialmente destacable en estructuras de grandes luces.

Las máquinas de control numérico (CNC), unidas a los actuales programas de diseño gráfico y cálculo, han contribuido al diseño de estructuras capaces de transmitir mayores cargas con una precisión y fiabilidad superior⁵. De este modo, la madera se ha convertido en un material altamente atractivo para arquitectos e ingenieros, aumentando exponencialmente su demanda, y obligando a las grandes empresas madereras a gestionar toda la cadena de producción, empleando técnicas de silvicultura adecuadas -siembra, gestión forestal, tratamientos culturales, aserrado, y laminación–, con el fin de garantizar una producción de calidad⁶ y cantidad suficiente para hacer frente a la demanda de madera actual y futura. Esto ha provocado también que desde el propio sector se estén realizando colaboraciones con centros de investigación para tratar de introducir en la fabricación de productos transformados maderas de rápido crecimiento⁷ -principalmente *Salicaceae*s y *Myrtaceae*s- optimizando el uso de las maderas de menor calidad, rechazadas bajo los estándares actuales⁸, de modo que puedan garantizarse los volúmenes de madera demandada en el futuro por la industria de un modo sostenible y ordenado. Ha de subrayarse, ya desde el principio, que la madera es, por su origen, un material potencialmente inagotable, porque se puede cultivar.

1.1.2. Contexto socioeconómico

La investigación desarrollada en esta tesis doctoral se realiza en una universidad -Universidad de Valladolid- y con unos fondos económicos –Proyecto Nacional BIA2012-31233 + Contrato FPI-UVA-, gestionados desde Castilla y León. Por ello, el enfoque de esta investigación, pese a ser eminentemente científica, se realiza también pensando en el contexto socioeconómico y técnico de esta Comunidad, en sus singularidades y problemas, y con el objetivo de revertir los resultados alcanzados en la sociedad.

Castilla y León (CyL) es una región eminentemente rural, la Comunidad de mayor extensión y la tercera con menor densidad de población de España, sólo superada por Extremadura y Castilla la Mancha, según los datos publicados por el Instituto Nacional de Estadística (INE) de 2017⁹. El cambio del modelo productivo y la industrialización del sector primario han generado, en las últimas décadas, una tendencia clara de emigración de población desde el entorno rural hacia las grandes urbes, provocando su paulatina despoblación¹⁰. La crisis económica iniciada en 2008, y su brutal impacto sobre la sociedad española, ha intensificado este éxodo generalizado de jóvenes en busca de empleo y formación en el exterior que, en el caso de CyL, ha acelerado la pérdida y envejecimiento de su población¹¹. Este grave problema socio-económico es palpable por la

⁵ Willmann, J.; Knauss, M.; Benesch, T.; Apolinarska, A.A.; Gramazio, F.; Kohler, M. (2016) Robotic timber construction – Expanding additive fabrication to new dimensions. *Automation in construction* 61, pp. 16-23. [DOI:10.1016/j.autcon.2015.09.011].

⁶ Brazier, J.D. (1977) The effect of forest practices on quality of harvested crop. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, Volume 50, Issue 1, pp. 49–66. [DOI: 10.1093/forestry/50.1.49].

⁷ Castro, G.; Paganini, F. (2003) Mixed glued laminated timber of poplar and Eucalyptus grandes clones. *Holz als Roh und Werkstoff*, 61 (4). pp.291-298. [DOI: 10.1007/s00107-003-0393-6].

⁸ Johansson, G.; Kliger, R.; Perstorper, M. (1994) Quality of structural timber-product specification system required by end-users. *Holz als Roh und Werkstoff*, 52 (1). pp.42-48. [DOI: 10.1007/BF02615017].

⁹ AA.VV. (2018) *España en cifras 2018*. Instituto Nacional de Estadística (INE). Madrid.

¹⁰ Zoido, F.; Arroyo, A. (2003). La población de España. *Tendencias demográficas durante el siglo XX en España*. pp. 17-75. Instituto Nacional de Estadística (INE). Madrid.

¹¹ Caballero, P.; Delgado, J.M.; Gómez, J.M.; González, Y.; González-Posada, E.; Niño, V.; Rueda, J.D.; Vega, C. (2009). *Perspectivas del envejecimiento activo en Castilla y León*. Consejo Económico y Social de Castilla y León. Valladolid. Pp. 463.

sociedad, lo que ha obligado a la propia Junta de CyL a desarrollar distintas iniciativas políticas para tratar de frenar esta tendencia, destacando entre la más ambiciosa el plan de generación de empleo y fijación de población rural recogida en “*Agenda para la Población de Castilla y León 2010-2020*”¹², y el aumento de competitividad del sector primario recogida en el “*Programa de desarrollo rural de Castilla y León 2014-2020*”.¹³

No obstante, en ambos casos, la recuperación económica en el entorno rural pasa inexorablemente por una mejor gestión de los recursos naturales, destacando especialmente el potencial crecimiento y mejora en la gestión de los montes de CyL. Según datos recogidos en el Tercer Inventario Forestal Nacional (IFN), publicado por el Ministerio de Agricultura en 2007¹⁴, CyL dispone de una superficie forestal arbolada de 2.982.318 Ha, lo que la posiciona como la Comunidad con mayor superficie forestal de España. Según datos de la Junta de CyL¹⁵, actualmente se están extrayendo unos 2,6 millones de m³/año de madera, de los cuales cerca de medio millón de m³ (438.000 m³) se corresponde con madera de populicultura y 760.000 m³ de madera de pino pinaster. Su impacto económico en la sociedad es notorio, con una producción total del sector forestal maderable de CyL (producción primaria + industrial) de aproximadamente 523 millones de euros anuales¹⁶; estimándose el empleo generado por el sector forestal¹⁷ en aproximadamente 6.500 puestos de trabajo directos en selvicultura, y unos 11.500 puestos de trabajo derivados en la industria maderera.

Destacan la explotación de las masas forestales tradicionales para usos estructurales de pino silvestre y laricio en la sierra de Segovia, gestionada desde 1825 por el Real Aserradero de Valsain¹⁸; o de la provincia de Soria y Burgos, gestionada desde 2003 por la fundación CESEFOR¹⁹ bajo el sello de calidad “*madera Pino Soria-Burgos*”. Sin embargo, actualmente aún se mantienen grandes extensiones de masas forestales sin explotación directa para uso estructural. Especialmente significativas las especies de reforestación como el *Pinus pinaster* Ait., ampliamente extendida en zonas áridas de la comunidad, y con trozas maduras susceptibles de explotación (>80 años) provenientes de las políticas de reforestación de postguerra iniciada en la década de 1940 con el Plan Nacional de Repoblación²⁰. La misma situación se plantea en especies de cultivo, como la madera de populicultura en zonas de ribera²¹ que, con unos cortos turnos de corta (<20 años), se destinan principalmente a usos secundarios de bajo rendimiento económico.

Desde la investigación que da cuerpo y forma a esta tesis, se busca estudiar ambas especies (*Populus* sp. y *Pinus pinaster* Ait.), analizar su situación actual, y revalorizar el impacto económico y social de estas especies tan extendidas en el entorno rural, y que actualmente representan el 45% del volumen total de madera explotada en CyL²². Para ello, la investigación plantea realizar una segunda transformación que permita su empleo en uso estructural de forma intensiva. No se trata

¹² AA.VV. (2010). *Agenda para la Población de Castilla y León 2010-2020*. Junta de Castilla y León. Valladolid.

¹³ AA.VV. (2014). *Programa de desarrollo rural de Castilla y León 2014-2020* [Spain - Rural Development Program]. (Regional) - *Castilla y León*. Junta de Castilla y León. Valladolid.

¹⁴ Ministerio de Medio Ambiente (2007). Op. cit.

¹⁵ Junta de Castilla y León (2014). *Crecimientos de madera y biomasa forestal en Castilla y León. Resultados*. Consejería de Fomento y Medio Ambiente, Valladolid. pp. 48.

¹⁶ Junta de Castilla y León (2014): *Programa de movilización de los recursos forestales en Castilla y León*. Consejería de Fomento y Medio Ambiente, Valladolid, pp. 68.

¹⁷ Junta de Castilla y León (2002). *Plan Forestal de Castilla y León. T08 Empleo, Seguridad y Salud*. Consejería de Fomento y Medio Ambiente, Valladolid. pp. 99.

¹⁸ Cruz, O.; Espinar, P.E.; Soler, J.M. (1987) *Real aserrió mecánico de los montes de Valsain*. ICONA – Ministerio de Agricultura, pesca y alimentación. Madrid.

¹⁹ <http://www.cesefor.com/> [Consultada 05/10/2018].

²⁰ Serrada R., (2000). *Apuntes de repoblaciones forestales*. Fundación Conde del Valle de Salazar, Universidad Politécnica de Madrid.

²¹ Rueda, J.; García-Caballero, J.L.; Cuevas, Y.; García-Jiménez, C.; Villar C. (2017) *Cultivo de chopos en Castilla y León*. Consejería de Fomento y Medio Ambiente, Junta de Castilla y León. Valladolid. pp. 111.

²² Ministerio de Medio Ambiente (2015). *Estadística Anual de Cortas de Madera*. https://www.mapa.gob.es/es/ desarrollo-rural/estadisticas/forestal_estad_anual_cortas_madera.aspx [Consultada 05/10/2018].

tanto de fabricar un producto nuevo para las grandes líneas de laminado, como de generar un producto industrializado que pueda fabricarse fácilmente en pequeñas industrias locales, con una inversión menor, utilizando los recursos forestales cercanos (chopo o pinaster), y que sea suficientemente competitivo en precio y prestaciones como para poder utilizarse en cualquier tipo de edificación. Todo ello permitiría, al menos teóricamente, realizar la segunda transformación de las materias primas en poblaciones próximas a las zonas de cultivo, generando recursos económicos ligados a los recursos forestales existentes y facilitando la creación de empleo "verde" y la fijación de población en zonas rurales.

1.1.3. Mejora estructural de la madera de baja calidad

Las principales causas del desuso de estas dos especies de madera -chopo y pinaster- se deben a singularidades propias de cada especie, que limitan sus cualidades mecánicas en comparación con otros tipos de especies de madera de uso común en estructuras.

El pino pinaster, especie amparada normativamente²³ como madera de uso estructural en España, presenta prestaciones de gran calidad en madera seleccionada libre de singularidades, con valores de resistencia, elasticidad y densidad semejantes al resto de coníferas de uso estructural explotadas en España. Sin embargo, sus características de crecimiento y la baja o nula gestión forestal a la que se han visto sometidas tradicionalmente sus masas forestales generan trozas con fustes irregulares, de longitud limitada, gran cantidad de nudos de tamaño excesivo y la presencia recurrente de otras singularidades como bolsas de resina, entrecasco, etc. Esto provoca que al realizarse la clasificación visual de las piezas de acuerdo con la normativa vigente²⁴, se genere un gran volumen de madera de rechazo no apta para uso estructural. Además, estas singularidades de la madera se traducen en una pérdida de rigidez en las piezas en comparación con madera limpia de la misma especie, y genera roturas imprevistas bajo cargas inferiores a las esperadas. Rigidez y resistencia se ven condicionadas, obligando a desechar volúmenes amplios de piezas y determinando una baja rentabilidad de esta especie para uso estructural, al menos bajo los escasos estándares de gestión forestal a los que se han sometido las masas maduras tradicionalmente.

El chopo -especie de uso estructural históricamente en España, y de uso actual en países europeos como Francia²⁵- se presenta como una especie de rápido crecimiento con fustes rectos, de gran longitud, baja densidad, y propiedades mecánicas comparables a las coníferas²⁶. Sin embargo, debido a su anatomía, presenta unos módulos de elasticidad muy bajos, inadecuados para cumplir con las altas exigencias de rigidez (Estados Límite de Servicio) de las normativas actuales²⁷ sin recurrir a secciones de madera excesivas.

Para compensar las limitaciones de estas especies, se propone fabricar piezas compuestas de madera y materiales de refuerzo en el interior de la sección que aumenten las propiedades elastomecánicas de las piezas resultantes y homogenicen la sección, reduciendo la repercusión de las singularidades de la madera.

El uso de este tipo de materiales en colaboración con madera se ha aplicado ya de forma satisfactoria en la rehabilitación de estructuras históricas²⁸. Sin embargo, pese a que este tipo de

²³ UNE-EN 1912:2012 Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de calidades visuales y especies.

²⁴ UNE 56544:2011 Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas.

²⁵ N FB 52-001:2007 Classement visuel pour l'emploi en structures des bois sciés français résineux et feuillus.

²⁶ Casado, M.; Acuña, L.; Basterra, L.A.; Vecilla, D (2012) Grading of structural timber of Populus × euramericana clone I-214. *Holzforchung*, Vol. 65, pp.633-638. [DOI: 10.1515/hf-2011-0153].

²⁷ AA.VV. (2009) *CTE-DB-SE-M. Código técnico de la edificación*. Ministerio de Fomento. Gobierno de España.

²⁸ Harte, A, Dietsch, P (ed) (2015) *Reinforcement of Timber Structures. A state-of-the-art report*, Shaker Verlag, Aachen. pp. 235.

soluciones se viene investigando desde los años 60²⁹ y empleando en usos de refuerzo estructural desde la década de los años 90³⁰, la primera investigación amplia entre distintas universidades europeas sobre el comportamiento estructural de distintos tipos de FRP, adhesivos y madera, será el proyecto GIROD³¹ (1999-2001). Más recientemente se ha desarrollado, también con fondos europeos, una completa investigación sobre su aplicación específica en el refuerzo y rehabilitación de estructuras de madera existentes a través de la COST Action FP1101³² (2011-2014), tanto en la reparación de estructuras históricas como en el refuerzo de piezas nuevas de madera laminada sometidas a cargas o configuraciones con alta concentración de tensiones. Actualmente, se están llevando a cabo iniciativas a nivel europeo para la generación de nuevas guías y normativas que permitan el uso generalizado de este tipo de materiales FRP en estructuras de nueva construcción. A día de hoy, la COST Action TU1207³³ (2014-2017) coordina a investigadores de diversos centros de investigación con este fin, presentándose las conclusiones parciales de esta tesis en su última publicación.³⁴

Con todo ello, parece sensato pensar, a priori, que la idea de utilizar este tipo de materiales FRP para fabricar un producto compuesto que mejore, a un precio razonable, las propiedades mecánicas de las maderas de chopo y pino pinaster para su aplicación estructural, puede convertirse en una realidad.

1.2. Justificación de la investigación

La demanda de productos industrializados de madera para uso estructural está creciendo a un ritmo suficientemente elevado como para poner en duda su sostenibilidad a largo plazo bajo los estándares actuales. Es necesario mejorar los procesos de gestión forestal con el fin de favorecer la calidad y velocidad de crecimiento de las masas forestales tradicionales; optimizar la tecnología de la industria de la madera, reduciendo el volumen de madera rechazada y mejorando la gestión de los recursos disponibles; y emplear especies de rápido crecimiento, bajas propiedades mecánicas y precio gestionadas a través de la silvicultura, para dar respuesta a los elevados volúmenes de madera futuros.

La realidad social y económica de las zonas rurales de España, especialmente destacables en CyL, muestran en las últimas décadas una tendencia hacia el desempleo, la despoblación, y el envejecimiento, agravada durante la última crisis económica. La revalorización de sus recursos naturales, en este caso concreto sus masas forestales, presentes actualmente en estas áreas (populicultura, especies de repoblación, etc.) cambiando sus usos actuales de bajo impacto económico por usos estructurales, puede generar una nueva oportunidad económica. Si además se plantea la posibilidad de realizar las segundas transformaciones del material en zonas próximas a las masas en explotación, el valor añadido respecto a empleo y fijación de población puede revertir la problemática social de las zonas rurales.

Este trabajo de investigación se justifica como alternativa a los sistemas constructivos actualmente disponibles en el mercado desde varias perspectivas:

²⁹ Bulleit, W.M. (1983) Reinforcement of wood materials: a review. *Wood and Fiber Science*, 16(3), pp. 391-397.

³⁰ Plevris, N.; Triantafillou, T.C. (1992) FRP-Reinforced wood as structural material. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 4(3), pp. 300-317. [DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(1992)4:3(300)].

³¹ AA.VV. (2001) *GIROD – Glued-in Rods for timber structures*. SMT4-CT97-2199 :1999-2001.

³² <https://www.cost.eu/actions/FP1101/> [Consultada 05/10/2018].

³³ <http://tu1207.eu/> [Consultada 05/10/2018].

³⁴ Basterra, L.A.; Acuña, L.; Casado, M.; López, G.; Morillas, L.; Balmori, J.A. (2016) FRP reinforcement and production of duo laminated timber beams. *Next Generation Design Guidelines for Composites in Construction [COST Action TU1207]* pp. 346-351.

- El empleo de maderas de rápido crecimiento (chopo) o maderas rechazadas en clasificación visual por su baja calidad (pino pinaster) para usos estructurales, mediante la incorporación de láminas de refuerzo (naturales o sintéticas) que mejoren suficientemente sus prestaciones mecánicas a un precio razonablemente competitivo.
- La propuesta de sistemas industrializados sencillos, que permitan incrementos de resistencia última y rigidez frente a la deformación significativos, pero que requieran métodos de fabricación poco complejos, compatibles con su ejecución por la pequeña industria susceptible de instalarse en el entorno rural.
- Obtención de un producto final orientado a su aplicación práctica y comercialización real bajo las normativas y estándares actuales. Sometiendo el sistema a un coherente control de la calidad del producto que garantice una precisión de dimensiones y estabilidad de forma, y una menor dispersión en los resultados esperables. Además de cumplir los requisitos mínimos de resistencia y protección del refuerzo frente al fuego exigibles para su uso estructural.

La hipótesis de partida de esta tesis se basa en la mejora que podría producirse en el rendimiento de las ya conocidas vigas dúo, añadiendo entre las piezas que las forman una lámina de refuerzo que podrían ser de diversos materiales: metálicos, sintéticos, fibras naturales, etc., ofreciendo como resultado una sección compacta que dispondría de incrementos notables en términos de resistencia última y rigidez frente a la deformación, además de mejorar la ductilidad y alejar la posibilidad de una rotura con cargas menores que las teóricamente previstas, causada por un nudo u otra anomalía local. La introducción de las láminas de refuerzo también podría mejorar el comportamiento de las vigas frente a los fenómenos de fluencia propios de la madera. Además, la disposición del refuerzo dentro de la sección lo protegería del fuego, y reduciría su impacto visual.

En esta investigación, inicialmente se analizó la posibilidad de utilizar diversas fibras de origen natural³⁵, aunque finalmente se observa la necesidad de recurrir a materiales sintéticos, los denominados Fiber Reinforced Polymer (FRP), de mayor módulo elástico y resistencia.

1.3. Objetivos

La investigación que se presenta en esta Tesis Doctoral se ha desarrollado con el fin de dar un nuevo uso a especies de maderas de rápido crecimiento o con bajos niveles de calidad, bajo valor económico, y actualmente sin aplicación directa en la construcción de estructuras en España. Su introducción en el mercado como producto estructural de madera reforzada y la revalorización económica de masas forestales, pretende generar una activación de la economía local sirviendo de catalizador para la mejora de aspectos sociales y económicos de las zonas rurales de CyL.

1.3.1. Objetivos generales

La motivación que permite el desarrollo de la investigación recogida en esta Tesis Doctoral se fundamenta en unos objetivos generales relacionados no sólo con aspectos técnicos, sino también sociales, económicos y de sostenibilidad ambiental.

³⁵ Basterra, L.A.; Acuña, L.; Casado, M.; López, G.; Bueno, A. (2012) Strength testing of Poplar duo beams, Populus x euramericana (Dode) Guinier cv. I-214, with fiber reinforcement. *Construction and Building Materials* 36, pp. 90–96.

A. Uso estructural de maderas de rápido crecimiento y bajas prestaciones estructurales, y optimización de los recursos maderables con el uso estructural de la madera de rechazo

El uso de madera estructural en edificación se ha incrementado exponencialmente, especialmente los productos de madera industrializada como madera laminada o paneles CLT, siendo la industria de la madera un sector puntero en varios países europeos. Sin embargo, de todas las especies arbóreas existentes únicamente unas pocas son utilizadas para uso estructural, y pese a emplearse en toda Europa una gestión sostenible y ordenada de las masas forestales, la creciente demanda de materia prima obligará en las próximas décadas a buscar especies alternativas con menores tiempos de rotación. El uso de maderas de rápido crecimiento, presentes de forma extensa en zonas de ribera de toda CyL, como el chopo, puede ser una alternativa viable de futuro si se logra compensar las bajas prestaciones elastomecánicas de su madera a través de procesos industriales y fabricación de secciones compuestas con otro tipo de materiales.

Otra de las opciones para incrementar el volumen de materia prima para la fabricación de madera estructural pasa por optimizar los recursos forestales. Actualmente, existen masas forestales cuya gestión no ha sido orientada hacia la obtención de madera para uso estructural, especialmente significativa en masas forestales de reforestación. Esta falta de tratamientos culturales adecuados con el uso final provoca unos volúmenes de madera de rechazo elevados en especies como el pino pinaster, presentes de forma extensa en zonas áridas de toda CyL. La industrialización y fabricación de secciones compuestas con otro tipo de materiales puede optimizar la utilización de los recursos madereros, permitiendo el empleo de maderas con bajas calidades para uso estructural.

B. Desarrollo de un producto industrializado reforzado competitivo en prestaciones y precio

Para poder dar un uso estructural real a este tipo de madera, maderas de rápido crecimiento y bajas prestaciones mecánicas o maderas de rechazo, es preciso desarrollar un producto industrializado compuesto de madera y materiales de refuerzo que permita competir en prestaciones mecánicas y precio, equiparándose con otros tipos de productos de madera industrializada actualmente comercializados.

1.3.2. Objetivos específicos

En el desarrollo de la línea de investigación marcada por los objetivos generales se han definido una serie de objetivos específicos relacionados con las tareas que van a realizarse ligadas a la investigación que abarca esta Tesis Doctoral.

A. Estudiar el comportamiento elastomecánico de las especies de madera utilizadas en la investigación

Estudiar las especies de madera utilizadas, definiendo tanto sus propiedades mecánicas como sus propiedades elásticas. Se definirán las constantes elásticas obteniendo los valores medios para los diferentes ángulos que permitan describir con precisión la anisotropía de cada especie para ser utilizados en posteriores análisis mediante modelos de elementos finitos (MEF).

B. Caracterizar las propiedades elastomecánicas de los materiales de refuerzo de origen natural susceptibles de ser utilizados

Caracterizar mediante ensayos experimentales las propiedades elastomecánicas de los materiales de origen natural seleccionados como potenciales materiales de refuerzo; estudiando, además, los costes aproximados que supone su uso.

C. Caracterizar las propiedades elastomecánicas de los materiales de refuerzo de origen sintético susceptibles de ser utilizados

Caracterizar mediante ensayos experimentales las propiedades elastomecánicas de los materiales de origen sintético seleccionados como potenciales materiales de refuerzo; estudiando, además, los costes aproximados que supone su utilización.

D. Estudiar del comportamiento de los adhesivos estructurales seleccionados en colaboración con las especies de madera y materiales de refuerzo utilizados en la investigación

El comportamiento de los adhesivos se ve condicionado fundamentalmente por las propiedades físicas y químicas de los materiales a adherir. Por ello es preciso realizar un estudio específico sobre distintos adhesivos comerciales de uso para madera estructural para definir su comportamiento real con las especies de madera y materiales de refuerzo utilizados.

E. Estudiar, analítica y experimentalmente, el comportamiento mecánico, resistente y de deformabilidad, de las vigas dúo reforzadas con distintos materiales de refuerzo

Definir el comportamiento de las vigas dúo reforzadas, sus prestaciones elastomecánicas y características fundamentales para los distintos tipos de refuerzo.

F. Estudiar el comportamiento a largo plazo (fluencia) de las vigas dúo reforzadas

Estudiar la influencia de los refuerzos utilizados sobre los fenómenos de fluencia presentes en las piezas de madera. Definir su comportamiento y posibles mejoras.

G. Estudio comparado de prestaciones mecánicas/precio frente las soluciones existentes en el mercado, en función de las secciones necesarias obtenidas con las prestaciones del nuevo material, para varios elementos estructurales representativos

Estudiar las prestaciones elastomecánicas de las vigas dúo reforzadas y sus costes de fabricación en relación con otros productos de madera industrializada, poniendo de manifiesto su potencial y limitaciones para la comercialización del producto.

1.3.3. Otros objetivos indirectos

El desarrollo de la investigación pretende orientarse de modo que pueda alcanzar, de un modo indirecto, varios objetivos paralelos.

A. Posibilidad de creación de industria local, empleo "verde" y fijación de población en el medio rural

El desarrollo del producto industrializado debe enfocarse hacia una industrialización lo más sencilla posible, que permita su fabricación con tecnología básica sin recurrir a grandes líneas de encolado industriales. El objetivo es orientar el producto industrial hacia una segunda transformación que pueda ser realizada en pequeñas industrias enclavadas en poblaciones próximas a las masas forestales en explotación. La creación de industria local, fuertemente ligada a los recursos naturales, pretende ser un incentivo a la creación de empleo y fijación de población en las zonas rurales, mejorando de este modo además los aspectos sociales y demográficos.

B. Repoblación y mantenimiento de masas forestales

La revaloración económica de las masas forestales actuales por el cambio de uso final, la creación de industria local y empleo ligada tanto a la gestión de las masas forestales, como a la fabricación de productos industrializados de madera estructural, pretende ser un incentivo a la repoblación y mantenimiento de masas forestales. Como ha quedado patente en otros

modelos de gestión forestal desarrollados en Europa, las masas forestales bajo explotación planificada y sostenible, ligadas a empleo local y rentabilidad económica, y por tanto valoradas por la población local, son el único modelo realmente eficaz para el mantenimiento y protección de las masas forestales.

C. Contribuir al uso de la madera como material sostenible

A través de la directiva europea 2018/844/EU relativa a la eficiencia energética de los edificios aprobado por el Parlamento Europeo, se profundiza en las directrices sobre construcción sostenible, el consumo energético casi nulo de los edificios y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. La madera como material sostenible y retenedor de CO₂, es sin duda uno de los elementos claves para alcanzar los objetivos marcados en reducción de consumo energético y emisiones, ayudando a reducir además el impacto medioambiental del sector de la construcción.

2. ANÁLISIS DOCUMENTAL Y ESTADO DEL ARTE

2.1. La madera

La madera presenta respecto al resto de los materiales de construcción ciertas singularidades derivadas de su origen natural que obligan a tener un conocimiento específico previo del material para alcanzar los requisitos básicos exigibles a los componentes de cualquier sistema estructural. Sin entrar en descripciones anatómicas³⁶ o características físicas³⁷, deben considerarse, al menos, las siguientes singularidades de la madera:

A. Material orgánico

A diferencia de otros materiales de uso estructural, la madera es un material orgánico, condicionado por las leyes naturales y, especialmente, las de la selección natural y la biología evolutiva. Bajo condiciones ambientales desfavorables, es sensible a los ataques de distintos organismos xilófagos y de agentes abióticos potencialmente agresivos, como la luz solar y el fuego; condicionando la durabilidad de algunas especies, a la homogeneidad del ambiente y la ausencia de patologías. No obstante, como material orgánico también es un material completamente renovable, lo que le convierte en un material muy atractivo desde el punto de vista de la sostenibilidad.

B. Anisotropía

La madera es un material esencialmente anisótropo, presentando distintos valores en sus propiedades mecánicas en función de la dirección en la que son tomadas. Estas direcciones se definen tomando como referencia la de la fibra, paralela al crecimiento del árbol, de la que se derivan tres direcciones: axial, radial y tangencial. La dirección axial o longitudinal es en la que se presentan mayores prestaciones mecánicas. Al fin y al cabo, esta es la dirección en la que el árbol debe resolver los esfuerzos de compresión por el peso del ramaje, y soportar los esfuerzos de flexión provocados por los vientos cambiantes. La dirección radial es perpendicular a la dirección longitudinal, y perpendicular a los anillos de crecimiento. La tangencial, también es perpendicular a la dirección axial, pero tangente a los anillos. Esta anisotropía provoca que algunas propiedades, como la tracción, la compresión o el cortante, presenten valores hasta 10 veces mayores en función de la dirección en la que se aplica.

C. Heterogeneidad

La heterogeneidad de la madera, al igual que su anisotropía, derivan directamente de su construcción anatómica microscópica. Si se observa la madera a nivel microscópico (Fig. 1), puede observarse como está compuesta, entre otro tipo de células, principalmente por traqueidas, unos sistemas celulares tubulares orientados en la dirección axial. Estos pequeños micro-tubos tienen una finísima pared, compuesta por varias capas sucesivas dispuestas en distintas direcciones y constituidas por celulosa (aprox. 40-50%), hemicelulosa (aprox. 20-30%) y lignina (aprox. 20-30%), formando un gran lumen interior por el que discurren diversos fluidos vegetativos con el árbol vivo (Fig. 2). En función de la especie, condiciones de crecimiento o

³⁶ García, L.; Gindeo, A.; Peraza, C.; De Palacios, P. (2003) *La madera y su anatomía: anomalías y defectos*. Fundación Conde del Valle de Salazar, Madrid. pp.327.

³⁷ Kollmann, F (1959) *Tecnología de la madera y sus aplicaciones*, Tomo primero. Ministerio de Agricultura. IFIE.

clima, el tamaño y composición de las traqueidas puede variar, modificando de este modo sus características mecánicas. Pero, además, variaciones de densidades de crecimiento, y la desviación de la fibra producida por las ramas, vientos dominantes, crecimiento en laderas, y otras condiciones particulares, pueden del mismo modo provocar una disminución de propiedades mecánicas, incluso entre madera del mismo árbol.

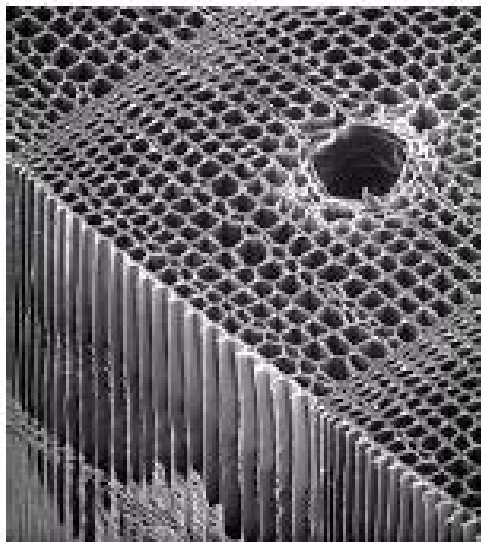


Fig. 1. Fotografía microscópica de un corte transversal en madera de conífera.³⁸

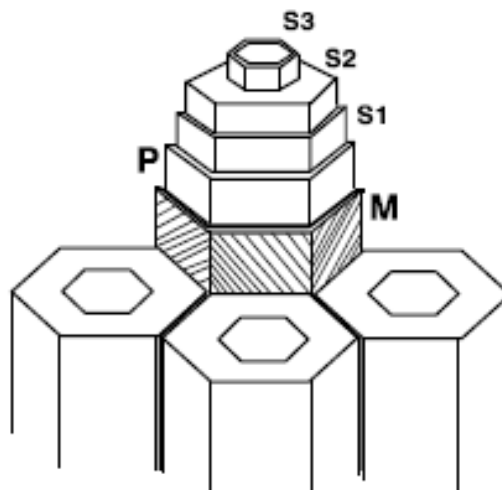


Fig. 2. Esquema de las diferentes capas constituyentes de la pared celular.³⁹

Esta heterogeneidad es un factor penalizador muy importante al definir los valores característicos de las propiedades mecánicas de la madera.

D. Higroscopía

La celulosa y hemicelulosa de la pared celular de las traqueidas está constituida por enlaces de hidrógeno intermoleculares formando microfibrillas, con una predisposición a absorber y ceder humedad del ambiente. Por esta razón, la madera sufre deformaciones en volumen, considerables en dirección radial y tangencial, y varía sus prestaciones resistentes y de rigidez en función del contenido de humedad. En general, un aumento de humedad provoca una disminución de las propiedades mecánicas de la madera.

2.2. La madera de *Populus*

Los chopos o álamos son la especie de árboles, excluyendo a los árboles frutales, más "domesticada" de la humanidad, siendo una especie fundamental para el desarrollo de la cultura y sociedad durante milenios⁴⁰. Su rápido crecimiento, su adaptabilidad a un amplio tipo de climas, y su facilidad de reproducción, tanto por semilla como vegetativamente, han sido las claves de esta íntima relación. Hasta tal punto que el término latín *Populus* que da nombre al género proviene de la expresión romana "*arbor populi*" o "árbol del pueblo" debido a su extendido cultivo junto a cualquier asentamiento humano⁴¹.

³⁸ Acuña, L. (2014) *Anatomía y fisiología de la madera*. Apuntes académicos del Máster en Ingeniería de la Madera Estructural Curso 2014/2015, Módulo 2: La madera estructural como material. Universidad de Santiago de Compostela. pp. 28.

³⁹ Ibidem.

⁴⁰ Gordon, J.C. (2001) Poplar: Trees of the people, trees of the future. *Forestry Chronicle* 77 (2), pp. 217-219. [DOI: 10.5558/tfc77217-2].

⁴¹ Clute, W.N. (1943) Meaning of plant names XCII: willows and poplars. *American Botanist* 49(3), pp. 78-84.

2.2.1. Descripción botánica de la especie

Los chopos pertenecen al género *Populus*, que junto a los sauces (género *Salix*), pertenecen a la familia de las salicáceas (*salicaceae*), nativa de regiones templadas del hemisferio norte con latitudes inferiores a los 30°N. Aunque la intervención humana ha permitido su proliferación en ambos hemisferios hasta zonas subtropicales.⁴²

El género *Populus* se divide en 6 secciones, que comprenden más de 30 especies botánicas distintas⁴³. Se trata de árboles de rápido crecimiento ligado a suelos con abundante presencia de agua -riberas fluviales o zonas inundables-, amplia necesidad de luz -no se desarrollan adecuadamente bajo cubierta o en competencia con otras especies durante su etapa juvenil-, y sin grandes exigencias de fertilidad, pudiéndose reproducir en terrenos arenosos, gravosos o arcillosos, siempre que permitan una adecuada oxigenación de las raíces -suelos no compactos-; con altitudes óptimas de crecimiento de 600 a 1000 m⁴⁴. Posee una gran aptitud para la reproducción, tanto sexual (semillas), como vegetativa (estacas, brotes, etc.). Al alcanzar la madurez, el árbol, produce flores unisexuales, desarrolladas por individuos masculinos o femeninos, carentes de sépalos o pétalos, agrupadas en racimos espiciformes apretados llamados amentos. Aunque se ha descrito la existencia de individuos bisexuales, se trata de casos excepcionales⁴⁵. Produce multitud de semillas de pequeño tamaño rodeadas de unos finos filamentos algodonosos que permiten su diseminación por acción del viento entre individuos⁴⁶. Es común que su reproducción en masas naturales se desarrolle también de forma vegetativa a partir de brotes, estacas, etc., permitiendo la reproducción de ejemplares con idéntico material genético (clon).

Esta facilidad de reproducción vegetativa ha posibilitado la hibridación natural y espontánea entre distintas especies de *Populus*. Posteriormente, la hibridación artificial selectiva por acción humana, fundamentada en los trabajos desarrollados por el botánico Augustine Henry⁴⁷ sobre el uso de técnicas de hibridación entre distintas especies de *Populus* -*Populus deltoides*, *Populus nigra*, *Populus trichocarpa*-, ha permitido desarrollar a partir de la década de 1920⁴⁸ las técnicas utilizadas en la populicultura intensiva actual, basada en la obtención y reproducción de clones seleccionados con características controladas y homogéneas, mejor resistencia a enfermedades y mayores rendimientos de producción.⁴⁹

En Europa, las masas de chopo representan el 4% de la superficie forestal, alcanzado un área total de 940.200 ha., siendo Francia con 236.000 ha el país europeo con mayor superficie de chopo, seguido de Italia, Alemania y España con superficies ligeramente superiores a las 100.000 ha. De esta superficie, únicamente unas 131.400 ha representan masas forestales naturales de especies de chopo tradicionales, siendo el resto cultivos de clones con fines de explotación.⁵⁰

⁴² Heilman, P.E. (1999) Planted forests: poplars. *New Forests* 17, pp. 89–93. [DOI: 10.1007/978-94-017-2689-4_7]

⁴³ Richarson, J.G.; Richarson, J. (2014) *Poplar and willows: Trees for society and environment*. The Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), pp. 699.

⁴⁴ Rueda et al. (2017) Op. cit.

⁴⁵ Brunner, A.M. (2010) Reproductive Development in *Populus*. *Genetics and Genomics of Populus*. Ed. Springer, New York. pp. 155-170.

⁴⁶ López, G. (2013) Guía de los árboles y arbustos de la península ibérica y baleares. Ediciones mundo-prensa. Madrid. pp.894.

⁴⁷ Henry, A. (1914). The artificial production of vigorous trees. *Journal of the Department of Agriculture and Technical Institute, Irish Free State* 15: 34-52.

⁴⁸ Stout, A.B.; Schreiner E. J (1933) Results of a project in hybridizing poplars. *Journal of Heredity*. Volume 24, Issue 6, 1, pp. 217–229.

⁴⁹ Fernández, A.; Hernanz, G. (2004) *El chopo (Populus sp.) Manual de gestión forestal sostenible*. Consejería de Fomento y Medio Ambiente, Junta de Castilla y León. Valladolid. pp.54.

⁵⁰ AA.VV. (2008) *Poplar, willows and people's wellbeing*. International Poplar Commission (FAO). 23^oSession, Beijing, China.

En España, la mayor parte de las masas actuales de chopo se reforestan a raíz de la creación, en 1952, de la Comisión Nacional del Chopo, dependiente del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, con el fin de gestionar y potenciar el cultivo de chopos o populicultura a partir de pies híbridos seleccionados -clones-⁵¹. De los distintos clones de origen español desarrollados por el antiguo Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias (IFIE) -actual INIA- destaca, por sus cualidades para usos madereros, el clon *Populus x euroamericana* 'Campeador', empleado extensamente en las primeras plantaciones realizadas en la década de los 50 en la cuenca del Duero⁵². Posteriormente se introducen y prueban clones de otros países, entre los que destaca por su rápido crecimiento, calidad de madera y adaptación a diversas condiciones ecológicas, el clon *Populus x euroamericana* 'I-214', desarrollado en 1929 en Italia por el antiguo *Instituto di Sperimentazione per la Pioppicoltura* -actual *Unità di ricerca per le Produzioni Legnose fuori Foresta*⁵³. Los buenos resultados de rendimiento, calidad y adaptación del clon I-214 desplazaron y sustituyeron con gran rapidez al clon 'Campeador', siendo hoy el clon más extendido; aunque según datos de la Comisión Internacional del Álamo, queda demostrado por comparación de marcadores moleculares, que los clones 'Campeador' e 'I-214' comercializados actualmente son genéticamente idénticos.⁵⁴

El cultivo del chopo en España se estima, según los datos recogidos por el Ministerio de Agricultura en 2017⁵⁵, en 122.652 ha, concentrándose la mayor superficie de chopo en la cuenca del Duero (60%) y en la cuenca del Ebro (20%). Según estos mismos datos, CyL representa la comunidad autónoma con mayor plantación de chopos, con una superficie cultivada de 79.343 ha, y una extracción de madera de 438.360 m³ en 2015 (Datos Anuario Forestal, 2015).⁵⁶



Fig. 3. Distribución del género *Populus* sp. en la península ibérica (Fuente: IFN3. 2007).⁵⁷

⁵¹ Enríquez, A.; Iglesias, S. (2012) El chopo híbrido (*Populus x canadensis* Moench.), una especie ignorada. *Foresta* 56, pp. 28-37.

⁵² Rueda et al. (2017) Op. cit.

⁵³ Fanlo, F.J. (1961) *El chopo*. Horas divulgadoras del Ministerio de Agricultura. N°11-61H.

⁵⁴ AA.VV. (2012) *Actividades relativas al cultivo y la utilización del Álamo y del Sauce*. Comisión Internacional del Álamo (FAO). 24ª Reunión, Dehradun, India.

⁵⁵ AA.VV. (2017) *Encuesta sobre superficies y rendimientos de cultivos (ESYRCE)*. Ministerio de Agricultura del Gobierno de España.

⁵⁶ AA.VV. (2015) *Anuario de estadística forestal*. Ministerio de Agricultura del Gobierno de España.

⁵⁷ AA.VV. (2007) *Tercer Inventario Forestal Nacional 1997-2007 (INF3)*. Ministerio de Agricultura del Gobierno de España.

Pueden distinguirse las masas naturales de chopo formadas por las tres especies autóctonas de la península: *Populus alba*, *Populus nigra*, y *Populus tremula*; dedicadas a la populicultura de conservación, y las plantaciones de chopo formada por los clones híbridos de *Populus sp.* dedicadas a la populicultura de producción -desenrollo, madera o biomasa-.⁵⁸

En España únicamente pueden comercializarse y cultivarse los clones de chopo -14 clones-incluidos en el primer Catálogo Nacional (BOE nº 179, de 27/07/1992) y su posterior ampliación - otros 14 clones- (BOE nº 63 de 14/03/2003). Añadiéndose, en una última actualización, 1 clon más (BOE nº 296, de 09/12/2011). En la Tabla 1 se muestran los 29 clones de chopo controlados y de uso permitido como material forestal de reproducción para plantaciones de repoblación con el género *Populus L.* en España.

Tabla 1. Clones admitidos dentro del Catálogo Nacional como materiales de base relativo al género *Populus L.*

Catálogo Nacional (BOE de 27/07/1992)	Ampliación del Catálogo Nacional (BOE de 14/03/2003)	Segunda ampliación del Catálogo Nacional (BOE de 09/12/2011)
<i>Populus nigra L.</i>	<i>Populus nigra L.</i>	<i>Populus x euroamericana</i> (Dode) Guinier E-298
Tr 56/75	Bordilis	
<i>Populus deltoides</i> Marsh Lux	Lombardo Leonés	
<i>Populus x euroamericana</i> (Dode) Guinier	<i>Populus deltoides</i> Marsh	
Agathe F	Viriato	
Campeador	<i>Populus x euroamericana</i> (Dode) Guinier	
Canadá Blanco	2000 Verde	
Flevo	B-1M	
I-214	BL Costanzo	
I-488	Branagesi	
Luiza Avanzo	Dorskamp	
MC	Guardi	
Triplo	I-454/40	
<i>Populus deltoides</i> Marsh x <i>Populus alba L.</i>	NNDV	
114/69	<i>Populus x Interamericana</i>	
<i>Populus trichocarpa</i> Torr x <i>Populus deltoides</i> Marsh.	Brokehuizen.	
Beaupre	Boelare	
Raspalje	Unal	
	USA 49-177	

De todos los clones recogidos en el Catálogo Nacional de materiales forestales, el más extendido actualmente en la populicultura es el *Populus x euroamericana I-214*. De acuerdo con los datos publicados por la Comisión Nacional de Chopo⁵⁹, en los viveros de CyL el 60,7% (2.498.371 ud) de la planta de chopo producida pertenece al clon I-214, seguida con un 13,7% (565.915 ud) por el clon Beaupré, y con un 11,6% (479.376 ud) por el clon Raspalje. En CyL, este clon se presenta como la especie de cultivo preminente en la cuenca del Duero, por su buena adaptación a las condiciones ambientales y suelo de la zona, así como a su resistencia a ciertas enfermedades endémicas de la especie⁶⁰. Lo que indica la importancia que tendrá sobre la producción maderera de chopo en las próximas décadas.

El clon I-214 es un híbrido hembra que presenta propiedades propias del cruce de *Populus deltoides* (padre) -buenas características y propiedades físicas- y *Populus nigra* (madre) -facilidad de reproducción vegetativa y adaptabilidad climática-. Presenta pies rectos de hasta 40 m de altura,

⁵⁸ Padró, A.; Alonso, N (2003) *Actividades Relativas al Cultivo y la Utilización del Álamo y del Sauce*. Comisión Nacional del Chopo en España. Secciones 2000-2003. Comisión Internacional del Álamo (FAO), 22ª Reunión, Santiago, Chile.

⁵⁹ AA.VV. (2016) *Actividades relativas al cultivo y la utilización del álamo y del sauce periodo 2012-2015*. Comisión Nacional del chopo España. 25ª Reunión de Berlín.

⁶⁰ Rueda, J.; García, J.L.; Villar, C. (2011). *Elección de clones idóneos para la populicultura en la cuenca del Duero*. Junta de Castilla y León.

diámetros de entre 300 y 450 mm, y alta producción de madera con crecimientos de hasta 35 m³/ha/año ⁶¹. En la Tabla 2 y Fig. 4 y Fig. 5 se describen las características principales del clon *Populus x euroamericana* (Dode) Guinier I-214.

Las razones principales que han hecho del clon *Populus x euroamericana* I-214 uno de los más utilizados en choperas productoras en la actualidad es: primero, su gran capacidad de adaptación a diferentes condiciones de suelo y clima, así como su resistencia a periodos de sequía ⁶²; segundo, su rápido crecimiento, permitiendo obtener madera de calidad en turnos cortos de 12-15 años, con cuidados culturales poco exigentes, e incluso con la posibilidad de compartir cultivos mixtos con otras especies en los primeros años de crecimiento. Por ello, la populicultura puede considerarse como actividad agrícola y forestal simultáneamente ⁶³. Por último, las características específicas de su madera, tales como ligereza, color claro, alta homogeneidad, y la facilidad para ser trabajada por la maquinaria de desenrollo y sierra, la hacen muy adecuada para satisfacer las necesidades de la industria maderera. ⁶⁴

Por ser el clon I-214 el de mayor extensión cultivada en España, y observando la adecuación de sus características y calidad para usos de sierra, se elige este clon concreto para realizar los ensayos desarrollados en esta investigación.

⁶¹ Rueda et al. (2017) Op. cit.

⁶² Ibidem.

⁶³ Fernández et al. (2004) Op. cit.

⁶⁴ Rueda et al. (2017) Op. cit.

Tabla 2. Características del clon *Populus x euroamericana* (Dode) Guinier I-214 (según Rueda et al. 2016).⁶⁵

I-214	
<p>País de origen: Italia Año de obtención: 1929</p> <p>Descripción Árbol de tronco ligeramente flexuoso, pero la falta de rectitud es modificable, en parte, con la poda; es más flexuoso en las peores estaciones. Corteza de color gris marrón, fina y lisa, salvo en mala estación, donde puede aparecer espesa desde los primeros años. Copa bastante amplia. Escasa dominancia apical con ahorquillamientos frecuentes. Ramificación verticilada, con ramas gruesas de desarrollo rápido; casi siempre presenta una rama gruesa en cada verticilo. Hojas jóvenes de color rojo anaranjado. Hojas adultas relativamente grandes, verdes, bastante oscuras, con el ápice bastante largo y agudo en las hojas tardías. Las de los braquiblastos son estrechas, claramente romboidales. La base es redondeada o recta. Los nervios laterales forman un ángulo cerrado con el nervio principal.</p> <p>Fenología Florece bastante precozmente. La foliación es muy precoz. La defoliación se produce bastante tardíamente.</p> <p>Manejo Posee un escaso vigor reproductivo, pero muy buena capacidad de enraizamiento. La poda del fuste es difícil y debe ser atenta y continuada; la poda de guía es imprescindible, para evitar bifurcaciones del tronco.</p> <p>Condiciones edáficas Se adapta a una gran amplitud de suelos, pero siempre aluviales con capa freática al alcance de las raíces; prefiere los suelos fértiles y ligeros (limoso-arenosos), de pH entre 6,5 y 8,0. En algunos suelos el clon presenta fendas de heladura, mientras que en otros sometidos a temperaturas similares las fendas no aparecen, sin conocerse la causa. Es resistente a la caliza activa. Presenta una resistencia media a la hidromorfía, pues rechaza el exceso de agua. Es tolerante a la aridez. Muy sensible a la salinidad.</p> <p>Condiciones climáticas Muy sensible al fototropismo. Relativamente sensible a las heladas precoces; prefiere climas cálidos y años cálidos. Es sensible al viento, ya que se inclina con los vientos dominantes; en años lluviosos, la combinación de fuertes vientos y agua en el suelo puede tumbar un gran número de pies; también puede producirse tableadura por el efecto del viento.</p>	<p>Género: <i>Populus x euroamericana</i> Sexo: femenino</p> <p>Plagas y enfermedades Muy resistente al virus del mosaico, a <i>Xanthomonas populi</i> y a <i>Venturia populina</i>. Resistente a <i>Melampsora allii-populina</i>. Tolerante a <i>Dothichiza populea</i> y a la enfermedad de las manchas pardas. Sensible a <i>Melampsora larici-populina</i> (razas E1, E2, E3 y E4). Muy sensible a <i>Melampsora medusae</i> y a <i>Phloeomyzus passerinii</i>. Se dice que es sensible a <i>Marssonina brunnea</i> en mala estación y clima oceánico.</p> <p>Tecnología Crecimiento elevado en suelos fértiles y ligeros. La madera es de color amarillo claro, de calidad buena a muy buena, muy apta para el desarrollo y bastante apta para sierra. Pérdida volumétrica baja o media cuando se ha corregido en parte su porte flexuoso; en caso contrario, la pérdida volumétrica es alta. Hay cierto riesgo de que se produzcan fendas longitudinales en el apeo y en el transporte de las trozas, debido a la formación de madera de tensión. Madera de baja densidad: 0,290 (0,250-0,320) g/cm³; es la más baja entre los clones de chopos más comúnmente utilizados.</p> <p>Utilización En general, en España, el clon 'I-214' ha constituido la base fundamental de la populicultura durante un largo período y esta circunstancia no debe ser despreciada en la actualidad. Se trata de un clon cuyos requerimientos son suficientemente conocidos, del que se sabe la mejor selvicultura que hay que aplicar y que proporciona una madera de muy alta calidad, muy apreciada por la industria del desarrollo. La sustitución de 'I-214' por otros clones menos experimentados debe estar muy fundamentada en el conocimiento de las ventajas que pueden proporcionar en cuanto a crecimiento, adaptación al medio, resistencia a posibles patógenos y calidad de la madera, así como en la necesidad de mantenimiento de una diversidad que haga más estables y resistentes las plantaciones de producción frente a posibles catástrofes. Sigue siendo el clon más utilizado en Castilla y León, Castilla-La Mancha, Andalucía y La Rioja. En Cataluña ocupa también superficies importantes, aunque ya por detrás de 'MC' y 'Tripló'.</p>

Fuente: Datos extraídos de la publicación "Rueda et al. (2016) *Clones de chopos del Catálogo Nacional de Materiales de Base*. Consejería de Fomento y Medio Ambiente. Junta de Castilla y León. pp. 36-37.

⁶⁵ Rueda, J.; Padró, A.; et al. (2016) *Clones de chopos del Catálogo Nacional de Materiales de Base*. Consejería de Fomento y Medio Ambiente. Junta de Castilla y León. pp. 36-37.

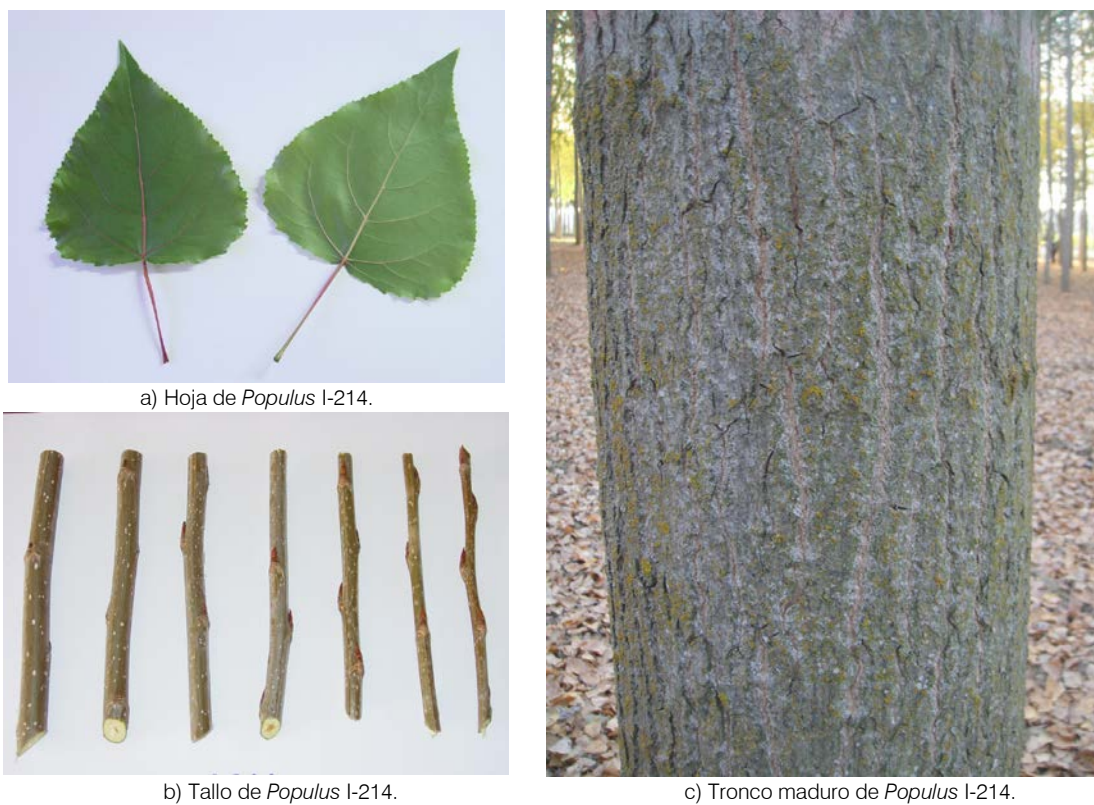


Fig. 4. Imágenes de las características del clon *Populus x euroamericana* (Dode) Guinier I-214 (fuente: Rueda et al. 2016).⁶⁶



Fig. 5. Imagen de una chopera bajo populicultura intensiva en retícula 6x6 m (fuente: Asociación del Chopo de Cyl).⁶⁷

⁶⁶ Ibidem.

⁶⁷ <http://www.populuscyl.es/contenido/subastas-madera-chopo-propietarios-privados> [Consultada el 17/12/18].

2.2.2. Características físicas y elastomecánicas de la madera del género *Populus*

Las características físicas y mecánicas de la madera, propias de cada especie o clon de chopo, van a influir significativamente en su aprovechamiento para la obtención de diferentes productos industriales, siendo más recomendables ciertas especies para cada tipo de uso final. Por esta razón, actualmente se continúa trabajando en la hibridación selectiva para obtener clones con propiedades más ajustadas a las necesidades de la industria, mayores rendimientos o más resistentes a plagas y enfermedades propias de la zona de cultivo.^{68, 69}

El rápido crecimiento del chopo permite turnos de corta rentables con árboles menores a 15 años, haciendo que las características propias de cada clon se vean fuertemente alteradas por las condiciones de crecimiento: suelo, clima, densidad de cultivo y tratamientos fitosanitarios. Esta sensibilidad a las condiciones de crecimiento genera una gran variabilidad interclonal en cuanto a las características físicas de la madera de *Populus*, incluso entre madera de los mismos tipos de clon y parcela de cultivo. Además, y como ocurre en cualquier otra especie, la edad de corta, la estación de apeo, la posición de la madera en altura del árbol, o las labores culturales realizadas, influyen significativamente en la calidad de la madera. Por ello, deben estudiarse y adaptarse las condiciones de cultivo y tratamientos culturales en relación con el uso final de la madera.⁷⁰

A. Densidad

De todas las características físicas de la madera, la densidad es sin duda una característica fundamental, íntimamente relacionada desde tiempo inmemorial con sus propiedades elastomecánicas, y asociada con otras propiedades físicas, siendo, por consiguiente, una de las propiedades más importantes para estimar su calidad para uso estructural.⁷¹

La densidad está relacionada con la estructura anatómica y la composición química de la madera, por ello no puede ser independiente del resto de propiedades. En piezas seleccionadas de madera limpia de pequeño tamaño, se conoce desde hace décadas, la íntima relación entre densidad y resto de propiedades mecánicas⁷². Sin embargo, al tratarse de una propiedad singular, de medida puntual, en piezas de gran escuadría su relación con el resto de las propiedades se ve condicionada por las singularidades propias de cada pieza. En todo caso, una variación significativa en densidad entre maderas de la misma especie implica necesariamente diferencias en sus propiedades elastomecánicas.⁷³

Debido al rápido crecimiento del género *Populus*, su madera se relaciona normalmente con madera de baja calidad, presentando en general una baja densidad y unas bajas propiedades mecánicas⁷⁴. Sin embargo, si comparamos sus propiedades mecánicas en relación con unidad de densidad con otras maderas frondosas, podremos ver como su resistencia relativa es extremadamente alta⁷⁵. Debido a su composición química, caracterizada por un alto contenido en polisacáridos, la madera de *Populus* presenta un alto contenido de holocelulosa, de hasta un 80% (celulosa 50%;

⁶⁸ Riemenschenider, D.E.; Stelzer, H.E.; Foster, G.S. (1996) *Quantitative genetics of poplars and poplar hybrids*. Biology of *Populus* and its implications for management and conservation, Chapter 7. National Research Council of Canada, Ontario. pp.539.

⁶⁹ Pliura, A.; Zhang, S.Y.; MacKay, J.; Bousquet, J. (2007) Genotypic variation in wood density and growth traits of poplar hybrids at four clonal trials. *Forest Ecology and Management* 238, pp. 92–106.

⁷⁰ Zhang, S.Y.; Yu, Q.; Chauret, G.; Koubaa, A. (2003). Selection for Both Growth and Wood Properties in Hybrid Poplar Clones. *Forest Science* 49(6), pp.901–908.

⁷¹ Zobel, B.J.; Buijtenen, J.P. (1989). *Wood variation. Its causes and control*. Springer Series in Wood Science. Berlin.

⁷² Newlin, J. A.; Wilson, T. R. C. (1919). The relation of the shrinkage and strength properties of wood to its specific gravity (Vol. 676). US Department of Agriculture.

⁷³ Matyas, C.; Peszlen, I. (1997). Effect of age on selected wood quality traits of poplar clones. *Silvae Genetica* 46. pp.2-8.

⁷⁴ Hernández, R.E.; Koubaa, A.; Beaudoin, M.; Fortin, Y. (1998) Selected mechanical properties of fast-growing poplar hybrid clones. *Wood and fiber science*, 30(2), pp. 138-147.

⁷⁵ Richarson et al. (2014) Op. cit.

hemicelulosa 30%), y un bajo contenido en lignina, presentando por esta razón una anatomía fibrosa y, en general, una baja densidad.⁷⁶

La densidad media para el género *Populus sp.* puede evaluarse en una horquilla de 300-400 kg/m³, destacando la gran variabilidad de valores entre distintas especies (clones), e incluso entre maderas de la misma especie y pie. En un estudio realizado en Italia con madera de 8 clones distintos⁷⁷ se obtienen valores de densidad interclonal comprendidos entre 269 kg/m³ (*Populus alba*) y 394 kg/m³ (*Populus x euroamericana 115*), observándose variaciones de densidad del 3 al 15% en maderas de los mismos clones. Igualmente se citan importantes diferencias en los valores hallados de contracción radial (C. min. 3,31%, C. máx. 4,77%) y tangencial (C. min. 5,66%, C. máx. 7,57%) entre clones.

En otro estudio realizado Estados Unidos sobre 4 especies de *Populus* ampliamente extendidos por su geografía en comparación con coníferas ligeras⁷⁸, obtienen valores de densidad interclonal comprendidos entre 310 kg/m³ (*Populus trichocarpa*) y 370 kg/m³ (*Populus deltoides*). Los valores presentados de contracción radial (C. min. 3,3%, C. máx. 3,9%) y tangencial (C. min. 6,7%, C. máx. 9,2%) entre clones se aproximan al rango expuesto anteriormente. Destaca la similitud encontrada entre valores de densidad y variación dimensional de *populus* y coníferas ligeras.

En España, un amplio estudio desarrollado sobre 25 clones⁷⁹, presenta la comparación de distintas propiedades físicas en función de la localización geográfica, la altura a la que se encuentra la madera en el árbol, y la edad. En relación con la densidad, este estudio destaca la gran variabilidad encontrada entre los distintos clones analizados, obteniéndose valores de densidad interclonal comprendidos entre 313 kg/m³ (*Populus x euroamericana (Dode) Guinier "Campeador"*) y 434 kg/m³ (*Populus deltoides Marsh "Lux"*). Sin embargo, los valores de contracción radial (C. min. 2,4%, C. máx. 4,0%) y tangencial (C. min. 7,6%, C. máx. 10,1%) obtenidos, son sensiblemente distintos a los expuestos en los estudios anteriores.

B. Módulo de elasticidad

El uso de la madera de chopo ha estado ligado tradicionalmente a la industria del desenrollado (tablero contrachapado), la de mejor calidad, y a la industria de la fibra (tablero de fibra, papel, etc.) el resto. Para este tipo de usos industriales, las propiedades más importantes son la densidad y la variación dimensional de la madera. Por esta razón, la mayor parte de las investigaciones desarrolladas sobre las propiedades de la madera de *Populus* centran sus ensayos en las variaciones de densidad y las variaciones dimensionales entre distintos tipos de clones, ubicaciones y edades de cultivo⁸⁰. En menor número, y en general más recientemente, se encuentran las investigaciones que se centran en las propiedades mecánicas de la madera de *Populus*, como módulo de elasticidad o resistencia, más orientada hacia un posible uso estructural de la madera. Tras realizarse una intensa búsqueda bibliográfica, los datos más relevantes en lo referente a la caracterización física y mecánica de la madera de *Populus* se resumen en la Tabla 5.

De todas las investigaciones consultadas, muy pocas exponen datos representativos sobre las propiedades mecánicas del clon *Populus x euroamericana (Dode) Guinier I-214*, utilizado en esta investigación. En un estudio realizado en Canadá sobre 10 clones distintos de *Populus x*

⁷⁶ Balatinecz, J.J.; Kretschmann, D.; Leclercq, A. (2001). Achievements in the utilization of poplar wood - guideposts for the future. *The forestry chronicle* 77(2), pp. 265-270.

⁷⁷ Castro, G.; Miegge, D. (1999) Caratteristiche fisiche e idoneità alla sfogliatura di alcuni cloni di pioppo. *SHERWOOD - Foreste ed Alberi Oggi* 5: 41-50.

⁷⁸ US Department of Agriculture (1999) *Wood Handbook – Wood as an Engineering Material*. General Technical Report FPL-GTR113. US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin.

⁷⁹ Gutiérrez, A.; Baonza, M.V (2001) Propiedades físicas de la madera de diferentes clones de chopo. *Actas del Iº Simposio del chopo* (Zamora). pp.461-468.

⁸⁰ Richarson et al. (2014) Op. cit.

*euroamericana*⁸¹, se obtiene la conclusión de que, aunque los valores medios de módulo de elasticidad (7.540 MPa) y densidad (335 kg/m³) de los clones de *Populus x euroamericana* ensayados son menores a otras especies tradicionales de chopo, su resistencia última a rotura (31,4 MPa) es semejante a estos; con valores MOR superiores a los valores medios de *Populus deltoides* (26,5 MPa), y moderadamente inferiores a los alcanzados por el *Populus tremuloides* (36,6 MPa). Otro estudio desarrollado en Hungría⁸², específicamente sobre 6 pies del clon I-214, obtiene valores de densidad (304 kg/m³) y resistencia última a rotura (26,6 MPa) similares; sin embargo, los valores de elasticidad (11.903 MPa) son atípicamente altos en comparación con otros autores (Tabla 5). En España se ha desarrollado, desde el centro de investigación CIFOR-INIA⁸³, un extenso estudio sobre distintas especies de rápido crecimiento de procedencia española, en el que se ha obtenido datos de propiedades mecánicas de clones *Populus x euroamericana* (sin especificar el clon) sobre una muestra de 309 piezas de tamaño estructural. Los valores de densidad media (380 kg/m³) y módulo de elasticidad (7.790 MPa) son similares al estudio anterior. Sin embargo, los valores de resistencia última obtenidos (37,9 MPa) son superiores.

Ante esta relativa escasez y diversidad de datos, en el año 2008 el Grupo de Investigación en Estructuras y Tecnología de la Madera de la Universidad de Valladolid, ha desarrollado un proyecto de investigación, financiado por la Junta de CyL (VA047A0)⁸⁴, y dirigido por la Dra. Casado Sanz, con el objetivo principal de conseguir una clasificación de la madera aserrada para uso estructural del clon *Populus x euroamericana* I-214 de distintos tamaños estructurales y procedencias. Para ello, se realizó un intenso trabajo de caracterización con distintas técnicas, incluyendo clasificación visual, ensayos no destructivos y ensayo en máquina⁸⁵. En la Tabla 3 se expone un resumen de las propiedades mecánicas obtenidas en el conjunto de los siete lotes y 762 piezas ensayadas a lo largo del proyecto de investigación. Asimismo, a medida que avanza el proyecto de investigación se van publicando todos los datos obtenidos del clon I-214^{86,87}. Todos los lotes ensayados arrojan propiedades mecánicas muy similares, con valores de densidad media y resistencia a flexión parecidos a los obtenidos anteriormente por otros autores^{88,89,90,91}, y unos valores del Módulo de Elasticidad relativamente bajos, que limitan considerablemente su aplicación para uso estructural.

Tabla 3. Propiedades mecánicas de *Populus x euroamericana* I-214 (Fuente: Casado et al. 2010⁹²).

Lotes	Humedad (%)	Densidad (kg/m ³)	MOE (Mpa)	MOR (MPa)
Lote 1	9,95	376,71	6.723,02	44,76
Lote 2	9,73	355,2	7.052,85	39,98
Lote 3	12,8	334,35	7.413,85	37,02
Lote 4	14,31	369,79	8.069,50	34,59
Lote 5	9,69	348,84	6.943,19	37,18
Lote 6	9,28	378,48	7.320,06	38,24
Lote 7	8,24	394,05	9.332,98	45,42
Media	10,57	365,35	7.550,78	39,60

⁸¹ Hernández et al. (1998) Op. cit.

⁸² Matyas et al. (1997). Op. cit.

⁸³ Fernández-Golfín, J.I.; Díez-Barra, M.R. (1996) Growth rate as a predictor of density and mechanical quality of sawn timber from fast growing species. *Holz als Roh und Werkstoff* 54(3), pp.171-174.

⁸⁴ Casado, M (IP) Informe final (2008-10) del proyecto de "Clasificación por métodos no destructivos y pseudo no destructivos de madera estructural de *Populus*" (Ref. VA047A08).

⁸⁵ Casado, M.; Acuña, L.; Relea, E.; Basterra, L.A.; Ramón, G.; López, G. (2009). Structural timber classification of *Populus x Euroamericano* I-214. *V Congreso Nacional y II Congreso Ibérico Agroingeniería. Lugo. España.* pp. 78-84.

⁸⁶ Casado et al. (2012) Op. cit.

⁸⁷ Casado et al. (2010) Op. cit.

⁸⁸ Gutiérrez et al. (2001) Op. cit.

⁸⁹ Hernández et al. (1998). Op. cit.

⁹⁰ Cuevas, D. H. (2012) Propiedades mecánicas de *Populus x euroamericana* (Dode) Guinier creciendo en Valdivia, Chile. *Bosque (Valdivia)* 23(2): 93-98.

⁹¹ Casado et al. (2009). Op. cit.

⁹² Casado et al. (2008-10) Op. cit.

Es muy interesante comparar el alto número de piezas rechazadas según las normas de clasificación actuales, en comparación con los valores reales obtenidos en máquina hasta rotura. Efectivamente, los ensayos a flexión en máquina en los lotes estudiados muestran unos porcentajes de rechazo entre el 18,5% y el 63%, lo que da una idea de la gran variabilidad de los lotes. Los resultados, según los criterios de las normas de clasificación visual española (UNE 56.544:1997) y francesa (NF B 52-001:2007), presentan porcentajes de rechazo más homogéneos, situándose estos en torno al 75 % para la mayoría de los lotes. Sin embargo, ambas normas visuales infravaloran la calidad de los lotes de madera previendo más rechazos de los mostrados en los ensayos de flexión en máquina. El mayor porcentaje de rechazos, según los criterios de las normas de clasificación visual, se debe esencialmente a la presencia de nudos en la cara y/o el canto, suponiendo cerca del 60% de los rechazos. La presencia únicamente de gemas supone alrededor de un 33%, y el entrecasco causa el 7% aproximadamente⁹³. Estos porcentajes de rechazo (60-65%) son similares a los obtenidos en otras publicaciones.⁹⁴

En la Fig. 6 se refleja un resumen comparativo de los resultados de la clasificación visual según norma UNE 56.544:1997 y norma NF B 52-001:2007 para un total de 762 piezas de los siete lotes ensayados, y los resultados de máquina según norma EN 408:2004.

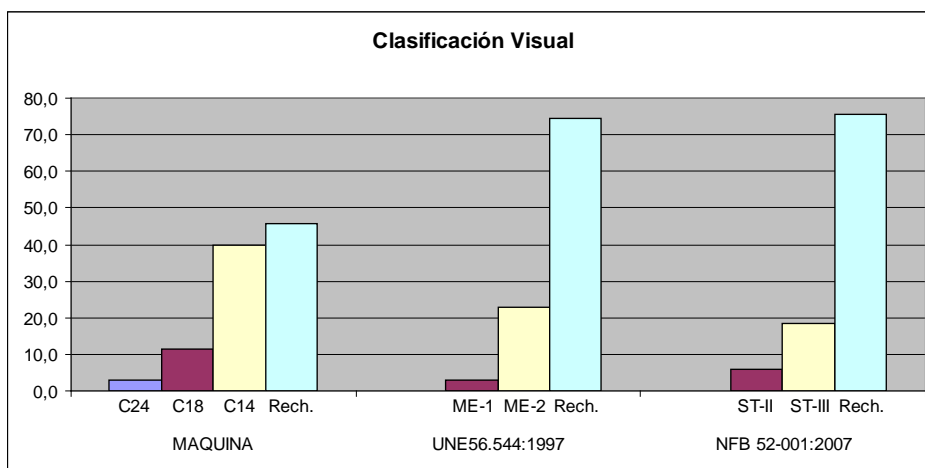


Fig. 6. Rendimientos clasificatorios correspondientes a las normas de clasificación visual UNE 56544 (1997), NF B 52-001 2007 y en máquina de flexión (Fuente: Casado et al. 2011).⁹⁵

Si se observa la Tabla 3, los valores expresados no encuentran buen acomodo en una sola clase resistente de las definidas en la norma UNE-EN 338:2016. Los valores de resistencia última (MOR) son significativamente altos, estando en el orden de una conífera de clase resistente C24. Sin embargo, el módulo de elasticidad es muy inferior, correspondiente con una clase resistente entre C14 y C16. Desde el GIR de la Universidad de Valladolid^{96,97,98} se propuso una nueva clase resistente dentro de la UNE-EN 338:2016, independiente y específica para el género *Populus* (CHP1 y CHP2), con valores intermedios (Tabla 4), como, por cierto, ya han propuesto varios autores para

⁹³ Ibidem.

⁹⁴ Kretschmann, D.E.; Isebrands, J.G.; Stanosz, G.; Dramm, J.; Olstad, A.; Cole, D.; Samsel, J. (1999) *Structural lumber properties of hybrid poplar*. Res. Pap. FPL-RP-573. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. pp.8.

⁹⁵ Casado (2008-10) Op. cit.

⁹⁶ Casado et al. (2012) Op. cit.

⁹⁷ Casado, M.; Basterra, L.A.; Acuña, L.; Vecilla, D.; Relea, E.; López, G. (2011) Ultrasonidos y parámetros de clasificación visual para la caracterización de madera estructural de *Populus x euroamericana* I-214. *Actas del 1º Congreso Ibero-Latino Americano da Madeira na Construção CIMAD*, vol.11. Coimbra (Portugal).

⁹⁸ Casado et al. (2010) Op. cit.

la madera estructural de gran escuadría de madera de conífera⁹⁹, habiendo sido adoptado por AENOR, a partir de la versión del año 2007 de la norma UNE correspondiente.¹⁰⁰

Tabla 4. Clases resistentes, según EN 338, y propuesta de clases para el *Populus x euroamericana*¹⁰¹.

Valores característicos	C14	C16	C18	C24	CHP1	CHP2
MOR N/mm ²	14	16	18	24	18	22
MOE N/mm ²	7	8	9	11	6,5	8
Densidad kg/m ³	290	310	320	350	290	310

Aceptando las clases resistentes de esta forma definidas para la madera de *Populus x euroamericana* I-214, los lotes de madera de partida quedarían compuestos por un 70 % de madera estructural, de la que existiría un 28 % y un 42 % de CHP1 y CHP2 respectivamente, y únicamente un 30% de madera rechazada, optimizando el uso de la madera de *Populus* para uso estructural de un modo seguro.

Tabla 5. Propiedades físicas y elastomecánicas del género *Populus*, según diversos autores.

Clon <i>Populus</i> sp.	Referencia datos	Densidad (kg/m ³)	C. rad (%)	C. tang (%)	MOE (Mpa)	MOR (MPa)
<i>Populus tremuloide</i> FN10	Avradimis et al. 2005 ¹⁰²	460-465	-	-	-	-
<i>Populus tremuloide</i> FN16	"	419-457	-	-	-	-
<i>Populus tremuloide</i> FN18	"	458-494	-	-	-	-
<i>Populus tremuloide</i> FN19	"	420-450	-	-	-	-
<i>Populus tremuloide</i> FN21	"	407-411	-	-	-	-
<i>Populus tremuloide</i> FN26	"	463-474	-	-	-	-
<i>Populus tremuloide</i>	Balatinecz et al. 2001 ¹⁰³	350	-	-	5.900	35
<i>Populus grandidentata</i>	"	360	-	-	9.000	38
	"	370	-	-	7.000	37
<i>Populus deltoides</i>	"	310	-	-	7.400	34
<i>Populus trichocarpa</i>	"	310	-	-	5.200	27
<i>Populus balsamifera</i>	"	360	-	-	7.100	32,2
<i>Populus tremuloides</i> Wisconsin-5	"	360	-	-	7.100	32,2
<i>Populus x euroamericana</i>	Beaudoin et al. 1992 ¹⁰⁴	284-407	-	-	-	-
<i>Populus deltoides</i> Bartr.	Bendtsen et al. 1986 ¹⁰⁵	344-396	-	-	4800-5900	35-38
<i>Populus tremula</i>	Bjurhager et al. 2008 ¹⁰⁶	274-298	-	-	5.900-6.600	45-49
<i>Populus tremula x Populus tremuloides</i>	"	204-246	-	-	4.800-6.000	32-45
<i>Populus maximowiczii x Populus trichocarpa</i>	Blankenhorn et al. 1988 ¹⁰⁷	315-460	-	-	-	-
<i>Populus x euroamericana</i> I-214	Casado et al. 2009 ¹⁰⁸	420	-	-	7.046	43,7
<i>Populus x euroamericana</i> I-214	Casado et al. 2010 ¹⁰⁹	355-373	-	-	7.052-7.658	34-40
<i>Populus x euroamericana</i> I-214	Casado et al. 2012 ¹¹⁰	361	-	-	7.044	36,88

⁹⁹ Arriaga, F., Íñiguez, G., Esteban, M., Bobadilla, I. (2007). Madera aserrada de gran escuadría para uso estructural y sus particularidades. *Informes de la Construcción*, 59 (506): 29-41.

¹⁰⁰ UNE 56544:2007 Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas.

¹⁰¹ Casado et al. (2011) Op. Cit.

¹⁰² Avradamis, S.; Mansfield, S. (2005). On some physical properties of six aspen clones. *Holzforchung* vol.59, pp. 54-58. [DOI:10.1515/HF.2005.009]

¹⁰³ Balatinecz et al. (2001). *Op. cit.*

¹⁰⁴ Beaudoin, M.; Hernández R.E.; Kuobaa, A.; Poliquin, J. (1992). Interclonal, intraconal and within-tree variation in wood density of poplar hybrid clones. *Wood and fiber science* 24(2), pp. 147-153

¹⁰⁵ Bendtsen, B.; Senft, J. (1986). Mechanical and anatomical properties in individual growth rings of plantation-grown Eastern cottonwood and loblolly pine. *Wood and fiber science* 18(1), pp. 23-38.

¹⁰⁶ Bjurhager, I.; Berglund, L.; Bardage, S.; Sundberg, B. (2008). Mechanical characterization of juvenile European aspen (*Populus tremula*) and hybrid aspen (*Populus tremula x populus tremuloides*) using full-field strain measurements. *Journal of Wood science* 54. pp. 349-355. [DOI:10.1007/s10086-008-0960-x]

¹⁰⁷ Blankenhorn, P.; Bowersox, T.; Strauss, C.; Stimely, G.; DiCola, M. (1988). *Effects of management strategy and site on selected properties of first rotation Populus hybrid NE-3 8 8*. *Wood and fiber science* 20(1), pp. 74-81.

¹⁰⁸ Casado et al. (2009) Op. cit.

¹⁰⁹ Casado et al. (2012) Op. cit.

¹¹⁰ Casado et al. (2010) Op. cit.

<i>Populus alba</i>	Castro et al. 1999 ¹¹¹	269	3,53	5,66	-	-
<i>Populus deltoides</i>	"	333	4,17	6,13	-	-
<i>Populus deltoides x P. ciliata</i>	"	335	3,31	6,56	-	-
<i>Populus deltoides x P. maximowiczii</i>	"	326	4,77	6,94	-	-
<i>Populus x euroamericana 107</i>	"	321	3,9	6,02	-	-
<i>Populus x euroamericana 112</i>	"	334	4,27	7,05	-	-
<i>Populus x euroamericana 115</i>	"	394	3,98	7,57	-	-
<i>Populus x euroamericana 121</i>	"	344	3,63	6,13	-	-
<i>Populus deltoides x Guayracá INTA</i>	Cortizo 2017 ¹¹²	446	4,16	8,36	5,176	52,89
<i>Populus deltoides x Hovyú INTA</i>	"	355	3,74	7,25	5,402	52,88
<i>Populus deltoides x Ñacurutú INTA</i>	"	430	3,89	7,10	6,808	79,22
<i>Populus deltoides x Paycarabí INTA</i>	"	430	3,33	6,33	5,969	63,64
<i>Populus deltoides x Pytá INTA</i>	"	353	3,78	6,12	5,135	51,62
<i>Populus x euroamericana I-161</i>	Cuevas 2002 ¹¹³	310	-	-	6,025	37
<i>Populus x euroamericana I-488</i>	"	360	-	-	6,450	59,9
<i>Populus x euroamericana I-72</i>	"	370	-	-	6,500	51
<i>Populus trichocarpa Capitol Lake (CL)</i>	DeBell 2002 ¹¹⁴	310-400	-	-	-	-
<i>Populus trichocarpa Torr x Populus deltoides Marsh. 11-11</i>	"	290-450	-	-	-	-
<i>Populus trichocarpa Torr x Populus deltoides Marsh. 47-174</i>	"	290-470	-	-	-	-
<i>Populus deltoides Bartl'</i>	Farmer et al. 1966 ¹¹⁵	320-460	-	-	-	-
<i>Populus sp.</i>	Fdez-Golfín 1995 ¹¹⁶	378	2,7	6,8	9,000	17,6
<i>Populus deltoides</i>	Gabriel 1956 ¹¹⁷	402	-	-	-	-
<i>Populus trichocarpa</i>	"	466	-	-	-	-
<i>Populus deltoides</i>	Geyer et al. 2000 ¹¹⁸	340-400	-	-	-	-
<i>Populus deltoides x Populus nigra</i>	"	350-370	-	-	-	-
<i>Populus deltoides Australiano 129/60</i>	Guillaumet et al. 2016 ¹¹⁹	426-443	-	-	-	37-54
<i>Populus deltoides Marsh LUX</i>	Gutiérrez et al. 2001 ¹²⁰	414	3,1	8,7	-	-
<i>Populus nigra L. Lombardo Leonés</i>	"	380	3	9,1	-	-
<i>Populus nigra L. TR 56/75</i>	"	379	2,4	7,8	-	-
<i>Populus trichocarpa Torr x Populus deltoides Marsh. BEAUPRE</i>	"	349	3,1	9,3	-	-
<i>Populus trichocarpa Torr x Populus deltoides Marsh. RASPALJE</i>	"	329	3	9,1	-	-
<i>Populus x euroamericana 454-40</i>	"	368	2,8	9,4	-	-
<i>Populus x euroamericana B-1M</i>	"	332	3	8,5	-	-
<i>Populus x euroamericana Dorskamp</i>	"	364	3,3	9,2	-	-
<i>Populus x euroamericana Agathe F</i>	"	360	3,1	9,3	-	-
<i>Populus x euroamericana Campeador</i>	"	313	2,7	8	-	-
<i>Populus x euroamericana Canadá Blanco</i>	"	387	2,6	8,6	-	-
<i>Populus x euroamericana Flevo</i>	"	359	3,5	9,4	-	-
<i>Populus x euroamericana I-214</i>	"	328	2,8	7,8	-	-
<i>Populus x euroamericana I-488</i>	"	405	3,5	8,2	-	-
<i>Populus x euroamericana MC</i>	"	357	3,4	9,1	-	-
<i>Populus x euroamericana TRIPLO</i>	"	349	2,8	8,6	-	-
<i>Populus x Interamericana Brokehuizen BOELARE</i>	"	330	3,4	9,6	-	-
<i>Populus x Interamericana Brokehuizen UNAL</i>	"	352	3,1	8,9	-	-

¹¹¹ Castro et al. (1999) Op. cit.

¹¹² Cortizo, S.; Monteverde, M.S.; Abbiati, N. (2017) Caracterización de la madera de cinco clones de *Populus Deltoides* seleccionados dentro del programa de mejora de INTA. *II congreso CLEM+ CIMAD*, Buenos Aires, Argentina.

¹¹³ Cuevas (2002) Op. cit.

¹¹⁴ DeBell, D.S.; Singleton, R.; Harrington, C.A.; Gartner, B.L. (2002) Wood density and fiber length in young *Populus* stems: Relation to clone, age, growth rate, and pruning. *Wood Fiber Science*, 34, pp.529-539.

¹¹⁵ Farmer, R.E.; Wilcox J.R. (1966). Specific gravity variation in a lower Mississippi valley cottonwood population. *Tappi* 49(5), pp.210-211.

¹¹⁶ Fernández-Golfín, J.I.; Gutiérrez, A.; Baonza, M.V.; Diez-Barra, M.R. (1995) Características físico-mecánicas de las maderas de especies de crecimiento rápido de procedencia española. *Investigación agraria. Sistemas y recursos forestales*, vol.4(2). Pp.251-261.

¹¹⁷ Gabriel, W.J., (1956). Preliminary report on clonal differences in the wood and phloem of *Populus deltoides* and *P. trichocarpa*. *Proc of 3rd Northeastern Forest Tree Improvement Conference*, Ithaca, New York, pp. 33-34.

¹¹⁸ Geyer, W.A.; DeWyke, J.; Walawender, W.P. (2000) Biomass and gasification properties of young *populus* clones. *Wood and fiber science*, 32(3), pp. 375-384.

¹¹⁹ Guillaumet, A.; Manavella, R.; Acuña, L.; Piter, J. (2016) Influencia de las dimensiones de la sección transversal sobre la resistencia a flexión en madera aserrada de *Populus deltoides* cultivado en Argentina. *Maderas, ciencia y tecnología* 18(4), 587-598. [DOI: 10.4067/S0718-221X2016005000051]

¹²⁰ Gutiérrez et al. (2001) Op. cit.

<i>Populus sp.</i>	Headlee et al. 2013 ¹²¹	267-495	-	-	-	-
<i>Populus x euramericana</i>	Hernández et al. 1998 ¹²²	335	-	-	7.540	31,4
<i>Populus deltoides</i>	"	352	-	-	8.140	26,5
<i>Populus deltoides Mirchx.</i>	"	374	-	-	12.700	36,3
<i>Populus x euroamericana DxN-131</i>	Huda 2014 ¹²³	341	2,75	4,85	7.010	41,9
<i>Populus x euroamericana DxN-3565</i>	"	369	2,87	5,22	7.480	46,8
<i>Populus x euroamericana DxN-3570</i>	"	343	2,33	4,54	6.970	43,0
<i>Populus x euroamericana DxN-3586</i>	"	327	2,62	4,56	6.600	40,8
<i>Populus x euroamericana DxN-4813</i>	"	380	2,85	5,80	7.520	49,9
<i>Populus x euroamericana x Populus maximowiczii DNxM-915508</i>	"	334	2,27	4,45	7.290	44,6
<i>Populus x generosa 'Boalare' TxD 3230</i>	"	339	2,41	5,53	7.020	42,5
<i>Populus x euroamericana</i>	INIA 1996 ¹²⁴	383	-	-	7.798	37,9
<i>Populus x euroamericana I-214</i>	Istok et al. 2016 ¹²⁵	336	5,1	9,7	-	-
<i>Populus x euroamericana S1-8</i>	"	323	4,6	9,6	-	-
<i>Populus balsamifera L.</i>	Ivkovich 1995 ¹²⁶	290-410	-	-	-	-
<i>Populus alba</i>	Johnson 1942 ¹²⁷	459-502	-	-	-	-
<i>Populus grandidentata</i>	"	361-413	-	-	-	-
<i>Populus tremuloides</i>	"	363-437	-	-	-	-
<i>Populus alba x Populus grandidentata</i>	"	338-469	-	-	-	-
<i>Populus alba x Populus tremuloides</i>	"	347-440	-	-	-	-
<i>Populus trichocarpa Torr. And Gray</i>	Kellogg et al. 1986 ¹²⁸	310-362	-	-	11.194	66,31
<i>Populus balsamifera L.</i>	"	326-346	-	-	9.651	60,69
<i>Populus tremuloides</i>	Kennedy 1995 ¹²⁹	374	3,6	6,6	11.238	67
<i>Populus grandidentata</i>	"	390	3,2	6,8	8.690	65
<i>Populus balsamifera</i>	"	372	3,9	6,4	11.510	68
<i>Populus deltoides</i>	"	352	3,1	7,8	7.790	51
<i>Populus trichocarpa</i>	"	295	3,6	8,8	8.820	49
<i>Populus deltoides Bartr.</i>	Klasnja et al. 2001 ¹³⁰	292-429	-	-	-	-
<i>Populus x euroamericana 77/51</i>	Kord et al. 2010 ¹³¹	329-360	2,96	3,79	-	-
<i>Populus tremuloide</i>	Koubaa 2006 ¹³²	340	-	-	4.800	42
<i>Populus tremuloide</i>	Kretschmann 1999 ¹³³	390-430	-	-	7.600-10.300	19-35,8
<i>Populus balsamifera L.</i>	Kroll et al. 1992 ¹³⁴	340-390	-	-	-	-
<i>Populus deltoides</i>	Markwardt et al. 1935 ¹³⁵	370-400	3,9	9,2	4.100	24,9
<i>Populus trichocarpa hastata</i>	"	320-350	3,6	8,6	3.690	24,3
<i>Populus balsamifera</i>	"	300-330	3,0	7,1	3.219	19,9
<i>Populus x euroamericana I-214</i>	Matyas et al. 1997 ¹³⁶	304	-	-	11.903	26,06
<i>Populus x euroamericana KOLTAY</i>	"	351	-	-	12.337	29,59
<i>Populus x euroamericana KOPECKY</i>	"	336	-	-	11.709	30,38
<i>Populus trichocarpa</i>	Niemiec 1995 ¹³⁷	320	-	-	6.900	46

¹²¹ Headlee, W.; Zalesny, R.; et al. (2013) Specific Gravity of Hybrid Poplars in the North-Central Region, USA: Within-Tree Variability and Site × Genotype Effects. *Forests*, vol. 4, pp.251-29. [DOI:10.3390/f4020251]

¹²² Hernández et al. (1998) Op. cit.

¹²³ Huda, A.; Koubaa, A.; Cloutier, A.; Hernández, R.; Fortin, Y. (2014) Variation of the physical and mechanical properties of hybrid poplar clones. *BioResources* 9(1), pp. 1456-1471.

¹²⁴ Fernández-Golfín et al. (1996) Op. cit.

¹²⁵ Ištók, I.; Sedlar, T.; Bogoslav, S.; Sinković, T.; Perković, T. (2016). Physical Properties of Wood in Poplar Clones 'I-214' and 'S1-8'. *Drvena industrija*. 67. 163-170. [DOI: 10.5552/drind.2016.1604]

¹²⁶ Ivkovich, M (1995). *Genetic variation of wood properties in balsam poplar (Populus balsamifera L.)*. MsC Thesis, Faculty of Forestry, Lakehead University, pp.120.

¹²⁷ Johnson, L.P. (1942) Studies on the relation of growth rate to wood quality in populus hybrids. *Canadian Journal of Research* 20, Section C, pp.28-40.

¹²⁸ Kellogg, R.M.; Swan, E.P. (1986) Physical properties of black cottonwood and balsam poplar. *Canadian Journal of Forestry Resources* 16, pp.491-496.

¹²⁹ Kennedy, E. (1995). *Strength and related properties of woods grown in Canada*. Department of Forestry of Canada, N°1104.

¹³⁰ Klasnja, B.; Kopitovic, S.; Orlovic, S. (2001). Variability of some wood properties of eastern cottonwood (*Populus deltoides* Bartr.) clones. *Wood Science Technology* 37, pp.331-337. [DOI: 10.1007/s00226-003-0179-3]

¹³¹ Kord, B.; Kialashaki, A. (2010) The within-tree variation in wood density and shrinkage, and their relationship in *Populus euramericana*. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 34, pp. 121-126. [DOI: 10.3906/tar-0903-14]

¹³² Koubaa, A (2006) L'innovation et le développement de nouveaux produits de bois: Défis à relever et opportunités à saisir. *74^{ème} Congrès de l'Association francophone pour le savoir (ACFAS)*.

¹³³ Kretschmann et al. (1999) Op. cit.

¹³⁴ Kroll, R.; Ritter, D.; Gertjensen, R.; Au, K. (1992) Anatomical and physical properties of balsam poplar (*Populus balsamifera* L.) in Minnesota. *Wood and Fiber Science*, 24 (19), pp.13-24.

¹³⁵ Markwardt, L.J.; Wilson, T.R.C. (1935). *Strength and related properties of woods grown in the United States*. U.S. Dep. Agr. Tech. Bull. 479.

¹³⁶ Matyas et al. (1997). Op. cit.

¹³⁷ Niemiec, S.S.; Ahrens, Glenn R.; Willits, Susan y Hibbs, David E. (1995) Hardwoods of the pacific northwest. Research Contribution 8. *Forest Research Laboratory Oregon State University*.

<i>Populus trichocarpa</i>	"	380	-	-	9.000	62,7
<i>Populus deltoides</i> Bartr.	Olso et al. 1985 ¹³⁸	270-390	-	-	-	-
<i>Populus deltoides</i>	Pliura et al. 2007 ¹³⁹	370-390	-	-	-	-
<i>Populus deltoides</i> x <i>Populus nigra</i>	"	320-340	-	-	-	-
<i>Populus balsamifera</i> x <i>Populus nigra</i>	"	310-340	-	-	-	-
<i>Populus trichocarpa</i> x <i>Populus deltoides</i>	"	340-360	-	-	-	-
<i>Populus maximowiczii</i> x <i>Populus balsamifera</i>	"	290-310	-	-	-	-
<i>Populus alba</i>	Shahverdi et al. 2012 ¹⁴⁰	-	-	-	5.500-7.000	55-60
<i>Populus alba</i> X <i>Populus tremula</i> (1XAE91)	Semen et al. 2001 ¹⁴¹	366	-	-	-	-
<i>Populus alba</i> X <i>Populus alba</i> Bolleana (2 1XAA9 I)	"	354	-	-	-	-
<i>Populus alba</i> X <i>Populus grandidentata</i> (9XAG91)	"	327	-	-	-	-
<i>Populus deltoides</i> x <i>Populus nigra</i>	Tharakan et al. 2003 ¹⁴²	330-370	-	-	-	-
<i>Populus nigra</i> x <i>Populus maximowiczii</i>	"	340-360	-	-	-	-
<i>Populus tremuloide</i>	U. Laval	370	-	-	11.200	57,6
<i>Populus deltoides</i>	USDA 1999 ¹⁴³	370	3,9	9,2	-	-
<i>Populus grandidentata</i>	"	360	3,3	7,9	-	-
<i>Populus tremuloide</i>	"	350	3,5	6,7	-	-
<i>Populus trichocarpa</i>	"	360	3,6	8,6	-	-
<i>Populus</i> x <i>euroamericana</i> Grimminge	Civitarese et al. 2018 ¹⁴⁴	285-304	-	-	-	-
<i>Populus</i> x <i>euroamericana</i> Hoogvorst	"	265-302	-	-	-	-
<i>Populus</i> x <i>euroamericana</i> Muur	"	269-287	-	-	-	-
<i>Populus</i> x <i>euroamericana</i> Vesten	"	270-276	-	-	-	-
<i>Populus nigra</i> Limatola	"	272-295	-	-	-	-
<i>Populus tremuloide</i> Mic hx	Yanchuk 1983 ¹⁴⁵	348-402	-	-	-	-
<i>Populus</i> sp.	Zhang et al. 2003 ¹⁴⁶	174-434	-	-	-	-

2.2.3. Usos, rendimientos y sostenibilidad

La madera de chopo puede ser utilizada en diversas aplicaciones, en continua evolución, siendo los empleos principales: desarrollo (tableros contrachapados), tableros de partículas y embalajes industriales de tipo variado; y utilizándose en menor medida para pasta de papel¹⁴⁷. Actualmente se están desarrollando investigaciones sobre el uso de plantaciones de ciclo corto para la producción de energía como biomasa¹⁴⁸, uso hacia el que puede enfocarse de forma intensa la populicultura en el futuro inmediato. Además, tradicionalmente se ha utilizado el chopo para usos secundarios como protección de suelos o cultivos; como plantaciones en parques y jardines por su valor estético, e incluso como forraje para el ganado.¹⁴⁹

¹³⁸ Olson, J.; Jourdain, C.; Rousseau, R. (1985). Selection for cellulose content, specific gravity, and volume in Young *Populus deltoides* clones. *Canadian Journal of Forestry Recourses* 15, pp. 393-396. [DOI: 10.1139/x85-063].

¹³⁹ Pliura et al. (2007) Op. cit.

¹⁴⁰ Shahverdi, M.; Tarmian, A.; Dashti, H.; Ebrahimi, G.; Tajvidi, M (2012) Mechanical properties of poplar wood (*Populus alba*) dried by three drying schedules. *BioResources* 7(1), pp. 1092-1099.

¹⁴¹ Semen, E.; Kuo, M.; Su, YC.; Hall, R.; Stokke, D. (2001) *Physical properties of kraft pulp from four-year-old aspen hybrids and crosses*. Wood and fiber science, 33 (1), pp. 140-147.

¹⁴² Tharakan, P.J.; Volk, T.A.; Abrahamson L.P.; White, E.H. (2003) Energy feedstock characteristics of willow and hybrid poplar clones at harvest age. *Biomass and Bioenergy* 25, pp. 571 – 580. [Doi: 10.1016/S0961-9534(03)00054-0].

¹⁴³ US Department of Agriculture (1999) Op. cit.

¹⁴⁴ Civitarese, V.; Faugno, S.; et al. (2018) Production of selected short-rotation wood crop species and quality of obtained biomass. *European Journal of Forest Research* 137, pp. 541–552. [Doi: 10.1007/s10342-018-1122-3]

¹⁴⁵ Yanchuk, A.D., Dancik, B.P., Micko, M.M. (1983). Intraconal variation in wood density of trembling aspen in Alberta. *Wood Fibre Science* 15, pp. 387–394.

¹⁴⁶ Zhang et al. (2003). Op. cit.

¹⁴⁷ Balatínez et al. (2001) Op. cit.

¹⁴⁸ Sixto, H.; Cañellas, I.; Arendonk, J.; Ciria, P.; Camps, F.; Sánchez, M.; Sánchez-González, M. (2015). Growth potential of different species and genotypes for biomass production in short rotation in Mediterranean environments. *Forest Ecology and management* 354, pp.291-299. [DOI. 10.1016/j.foreco.2015.05.038].

¹⁴⁹ Richarson et al. (2014) Op. cit.

El uso estructural de la madera de chopo fue muy común en el pasado, sobre todo en el entorno rural cercano a riberas, donde esta madera se empleaba en todo tipo de edificaciones por su gran abundancia, fustes rectos de gran longitud, facilidad de trabajo y estabilidad dimensional. Pero, además, su uso también fue común en edificaciones monumentales, y aún hoy podemos encontrar importantes muestras de su utilización en edificios históricos de España como La Alhambra - Granada S. XI-¹⁵⁰; e Italia como la 'Sala delle feste' en el Castello del Valentino - Turín, S.XVIII, o el Teatro Verdi - Pisa, S.XIX-¹⁵¹. Recientemente, el Grupo de Investigación en estructuras de madera de la UVa ha localizado madera estructural de chopo en la cubierta de la iglesia del convento de San Francisco, en Medina de Rioseco¹⁵², y en la cubierta de la iglesia de las Úrsulas de Salamanca, en ambos casos empleándose a modo de tirantes en configuraciones estructurales tradicionales. También han encontrado piezas estructurales de chopo en la cubierta de la iglesia de San Juan, en Villalón de Campos, si bien en este caso actuando en forma de cabios, y con síntomas claros de proceder de una intervención muy posterior a la configuración constructiva original.

Por el contrario, actualmente su empleo en usos estructurales es residual, limitándose a intervenciones de rehabilitación de estructuras históricas, pero sin aplicación en edificación nueva al no encontrarse el género *Populus* dentro de las maderas de uso estructural amparadas normativamente en España (UNE-EN 1912:2012)¹⁵³. Sin embargo, en otros países como Francia, Canadá o Estados Unidos, su uso estructural es más común. Si bien, su aplicación directa como madera aserrada se limita a secciones ligeras (*balloon frame*), está muy extendido el uso de productos industriales procesados¹⁵⁴, siendo muy común su utilización como tableros estructurales de OSB¹⁵⁵ y vigas de madera laminada y microlaminada LVL de chopo¹⁵⁶. Incluso, más recientemente, se han realizado investigaciones sobre la fabricación de piezas laminadas mixtas, con maderas de *Populus* y otras maderas de alto módulo elástico y rápido crecimiento como el eucalipto¹⁵⁷. En España, resultan de gran valor los productos innovadores fabricados a partir de madera de chopo por la empresa GARNICA plywood¹⁵⁸. Su catálogo de productos incluye tableros para una variedad de clases de uso, modificando las características del adhesivo, así como tableros ignifugados e híbridos, combinados con madera de eucalipto, para la obtención de prestaciones mecánicas superiores a la del propio chopo.

En cuanto a la repercusión económica que genera el uso y cultivo del chopo en CyL, según datos de 2014¹⁵⁹ se sitúa en torno a 523 millones de euros anuales, contabilizando economía directa y secundaria asociada; estimándose el empleo generado por el sector forestal¹⁶⁰ en aproximadamente 6.500 puestos de trabajo directos en selvicultura, y unos 11.500 puestos de trabajo derivados en la industria maderera. El mercado principal de esta madera es el procesado (desenrollo, trituración, biomasa), con un uso estructural anecdótico¹⁶¹. Pese al bajo precio de su madera, entorno a los 45 a 53 €/m³, y su gran variabilidad en función de los diámetros de las trozas

¹⁵⁰ Bermúdez, J.; Maldonado, M. (1970) Informe sobre técnicas, restauraciones y daños sufridos por los techos pintados de la sala de los reyes en el Palacio de los Leones de la Alhambra.

¹⁵¹ Carmassi, M.; Montagna, G.; Mucci, L.; Aliverti, M.; Lupi, I.; Ciampi, M. (1994) *Il restauro del Teatro Verdi di Pisa*. Pacini, Pisa. pp. 211.

¹⁵² Basterra, L.A.; Balmori, J.A.; Casado, M. (2017) La armadura de cubierta de la nave central de la Iglesia del Convento de San Francisco en Medina de Rioseco (Valladolid). *Actas del X Congreso Nacional y IIº Congreso Internacional Hispanoamericano de Historia de la Construcción*. Donostia-San Sebastián. Vol. 1. pp. 143-150.

¹⁵³ UNE-EN 1912:2012 Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de calidades visuales y especies.

¹⁵⁴ Castro, C.; Fragnelli, G. (2006) New technologies and alternatives uses for poplar wood. *Boletín del CIDEU* (2), pp.27-36.

¹⁵⁵ Zhou, D (1990) A study of oriented structural board made from hybrid poplar. *Holz als Roh- und Werkstoff* 48, pp. 293-296. [DOI: 10.1007/BF02626522]

¹⁵⁶ Castro, G.; Zanuttini, R. (2004) Multilaminar wood: Manufacturing process and main physical-mechanical properties. *Forest products journal* 54 (2), pp.61-68.

¹⁵⁷ Castro et al. (2003) Op. cit.

¹⁵⁸ <http://www.garnica.one/> [Consultada 19/02/19].

¹⁵⁹ Junta de Castilla y León (2014) Op. cit.

¹⁶⁰ Junta de Castilla y León (2002).Op. cit.

¹⁶¹ García, I. (2018) Consumo de chopo por la industria en España: evolución y necesidades futuras. *II Simposio del chopo*, Valladolid, pp.231-233.

y calidad¹⁶², su rápido crecimiento, con rendimientos medios de 15 m³/ha año¹⁶³, permite una explotación económicamente rentable en turnos cortos, de tan sólo 12-15 años, convirtiendo la populicultura en una gestión agrícola-forestal viable.

A su valor económico asociado al cultivo y fabricación de productos derivados de la madera de chopo, deben unirse los aspectos ecológicos positivos. La madera de chopo está siendo ampliamente utilizada en nuevas plantaciones por sus ventajas sobre otras especies, como los eucaliptos, que generan ciertos rechazos por la acidificación de los suelos. Es destacable su uso en rehabilitaciones de suelos contaminados por metales pesados provenientes de explotaciones mineras, contaminantes industriales, o vertidos animales; permitiendo fijar los metales pesados y nitratos del suelo durante su crecimiento.¹⁶⁴

En definitiva, la ya amplia superficie cultivada y el valor económico directo generado sobre la sociedad podrían ser sensiblemente incrementados si se lograra introducir en el mercado nuevas presentaciones que permitan obtener productos atractivos para el consumidor y rentable para el productor. A mi juicio, una de las vías para aumentar esta producción es el empleo de la madera de chopo para usos estructurales, generando un nuevo nicho de mercado adicional al actual uso industrial de la madera de chopo. Este uso estructural se ve limitado en España, como se ha venido diciendo anteriormente, en tanto en cuanto las características elastomecánicas esenciales de este género (o sus clones más representativos en España) no sean normalizados. De acuerdo con Basterra¹⁶⁵, parece claro que la incorporación de la madera a un sector económicamente tan importante como el de la edificación, que en España ha llegado a representar nada menos que el 14% del PIB, hará que su demanda crezca y, en un contexto de libre mercado, lo deberá hacer también la oferta de empresas y productos basados en el material lúneo. Pero a diferencia de cualquier otro sector o industria, una adecuada ordenación de este aumento de volumen traerá consigo evidentes beneficios indirectos como pueden ser la fijación de población en medios rurales, la mejora de suelos degradados y empobrecidos, el aumento de la biodiversidad, la mitigación de la erosión, el favorecimiento de la regulación del ciclo del agua y la mejora del paisaje.

2.3. La madera de *Pinaster*

El pino pinaster es una especie mediterránea autóctona de la península ibérica, pudiéndose datar fehacientemente su presencia a lo largo de toda la península desde el Holoceno, dentro del periodo Cuaternario, hace más de 10.000 años, coincidiendo con el fin de la última glaciación^{166, 167}. Su adaptación a suelos pobres y arenosos, climas con escasas precipitaciones, y características enfocadas a persistir y regenerarse tras los incendios, han sido las claves para su natural expansión sobre clima mediterráneo y posterior reforestación humana sobre suelos áridos. El término en latín *Pinaster*, con el que se denomina a su especie, es un término despectivo proveniente de los romanos para diferenciarlo del pino piñonero (*Pinus pinea*), al que ellos denominaban como "*pinus*", con el que convivía en masas naturales. Debido al similar aspecto y tamaño de sus piñas, y ante la

¹⁶² Coaloa, D.; Nervo, G. (2011) Poplar wood production in Europe on account of market criticalities and agricultural, forestry and energy policy. *Tercer Congreso Internacional de Salicáceas en Argentina*, pp.1-8.

¹⁶³ Huda et al. (2014) Op. cit.

¹⁶⁴ García, I. (2018) Op. cit.

¹⁶⁵ Basterra, L.A. (2009) *Construcción de estructuras de madera*. Universidad de Valladolid y COACyLE. Valladolid.

¹⁶⁶ Morales-Molino, C.; Postigo-Mijarra, J.M.; Morla, C.; García-Antón, M. (2012) Long-term persistence of Mediterranean pine forests in the Duero Basin (central Spain) during the Holocene: The case of *Pinus pinaster* Ait. *The Holocene*, 22(5), pp.561-570. [DOI: 10.1177/0959683611427339]

¹⁶⁷ Alcalde, C.; García-Amorena, I.; et al. (2004) Nuevos datos de carbones y maderas fósiles de *Pinus pinaster* Aiton en el holoceno de la Península Ibérica. *Investigaciones Agrarias: Sistemas de recursos Forestales*, Fuera de serie, pp. 152-163.

falta de los apreciados piñones, los romanos añaden a la raíz “*pinus*” el sufijo despectivo “-aster” con el que indican falsedad o ilegitimidad para referirse al pino pinaster.¹⁶⁸

2.3.1. Descripción botánica de la especie

El pino pinaster (*Pinus pinaster* Aiton), es una conífera natural de la familia de las pináceas, oriundo de la península Ibérica, que en la actualidad se extiende por la cuenca sur-oeste del Mediterráneo (España, norte de Italia y norte de Marruecos), y cuenca atlántica de la península Ibérica (España, Portugal y sur de Francia), aunque ha sido introducido como especie de reforestación en regiones templadas de Latinoamérica (Chile, Uruguay), Oceanía (Australia, Nueva Zelanda) y África (Sudáfrica).

Conocido vulgarmente como pino negral, pino marítimo, pino rodeno o pino gallego, se trata de un árbol de porte medio (20-30 m), extendido por toda la península en masas monoespecíficas aisladas, y frecuentemente formando masas mixtas junto con *Pinus pinea* L., *Pinus sylvestris* L. o *Quercus ilex* L., principalmente. Se trata de árboles con un crecimiento rápido inicial, gran adaptabilidad a climas variados, ligados a suelos pobres con escasa fertilidad, como arenales costeros o de la meseta, o con sustrato limitado, como suelos de dolomías o areniscas, y con altitudes óptimas de crecimiento por debajo de los 1.500 m. Presenta una buena tolerancia al frío y las heladas, así como una gran tolerancia al estrés hídrico, soportando periodos de sequía y temperaturas altas prolongados, características muy adecuadas para su uso en repoblaciones¹⁶⁹. Su reproducción se realiza por reproducción sexual, produciendo las primeras floraciones a partir de los 4-5 años, y desarrollando a partir de ellas unas piñas de gran tamaño (8-20 cm) con formaciones en grupo (normalmente 2-3 piñas), diferenciándose de otras especies de pinos por su inserción sentada en rama¹⁷⁰. Las piñas una vez maduras permanecen en el árbol sin abrirse en su totalidad durante años, permitiendo al árbol disponer de un gran número de semillas (piñones), viables para germinar en todo momento. En periodos de altas temperaturas o incendios las piñas se abren y dispersan sus semillas, permanecen protegidas y fértiles dentro de las piñas incluso ante temperaturas extremadamente altas (400°C), lo que permite al pinaster persistir y regenerarse ante incendios periódicos¹⁷¹. Las repoblaciones de pinaster son comunes, bien mediante siembra directa de semillas o gradeo; o previa obtención de plantones en invernadero, a partir de semillas de ejemplares seleccionados. Sin embargo, en los últimos años se están desarrollando trabajos para la obtención de híbridos interprocedencia de pinaster con el fin de mejorar los crecimientos y resistencia a plagas. Estos híbridos se obtienen mediante polinización controlada de ejemplares seleccionados¹⁷². También se está trabajando en la creación de clones de pies seleccionados mediante la técnica de estaquillado de plántulas jóvenes, alcanzándose unos prometedores porcentajes de enraizado.¹⁷³

La superficie mundial ocupada por el *Pinus pinaster* Ait. se estima en torno a los 4,4 millones de hectáreas¹⁷⁴. En España, según los datos obtenidos en el INF3 (2007)¹⁷⁵ la superficie total ocupada

¹⁶⁸ Alía, R.; Martín, S.; De Miguel, J.; et al. (1996) *Las regiones de procedencia de Pinus pinaster* Ait. Dirección General de Conservación de la Naturaleza, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.

¹⁶⁹ Ibidem.

¹⁷⁰ Ceballos, L.; Ruíz de la Torre, J. (1979) *Árboles y arbustos de la España Peninsular*. ETS. Ingenieros Montes, Madrid. pp. 512.

¹⁷¹ Gil, L.; López, R.; García-Mateos A.; González-Doncel, I (2009) Seed provenance and fire-related reproductive traits of *Pinus pinaster* in central Spain. *International Journal of Wildland Fire*, 18, pp. 1003-1009. [DOI: 10.1071/WF08101].

¹⁷² De la Mata, R.; Merlo, E.; Zas, R. (2006). Seed and cone traits in a polycrossing hybrids populations of maritime pine. Indicators of hybridization viability. *International meeting on population genetics and genomics of forest trees: from gene function to evolutionary dynamics and conservation*. Madrid

¹⁷³ Varela, S. (2007). Control genético de capacidad de rebrote y emisión de raíces adventicias en familias híbridadas de procedencias de *Pinus pinaster*. Proyecto Fin de Carrera, EPS Lugo, Universidad de Santiago de Compostela. pp. 78.

¹⁷⁴ Sanz et al. (2006) Op. cit.

¹⁷⁵ AA.VV. (INF3) (2007) Op. cit.

por el pino pinaster se sitúa en torno a los 1,3 millones de ha, de las que, aproximadamente, 1 millón de ha se corresponden a masas forestales naturales (parcialmente reforestadas a lo largo del S.XX), y el resto, unas 300.000 ha, se corresponden con masas de repoblación artificial reciente sobre antiguo suelo agrícola. Las restantes masas artificiales comprenden ampliación o extensión de otras antiguas, o bien introducciones en nuevas comarcas, donde este pino no era usual, tal como en Extremadura, Montes de Toledo, Sierra Morena y Cataluña, siendo también con el que más se ha repoblado.

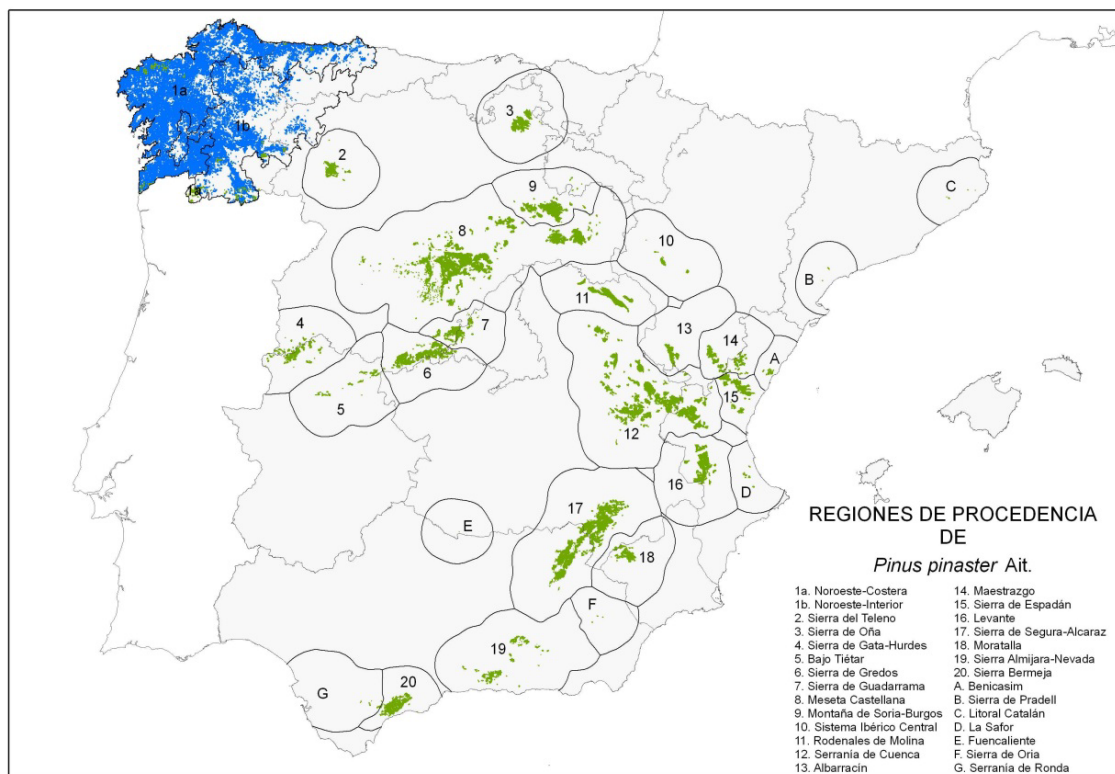


Fig. 7. Distribución del *Pinus pinaster* Ait (Fuente: IFN3. 2007) ¹⁷⁶ Azul ssp atlántica; verde ssp mesogeensis.

Dentro de la Península Ibérica coexisten dos subespecies reconocibles por morfología y áreas de desarrollo¹⁷⁷: la *ssp atlántica*, que ocuparía el norte de Portugal, noroeste de España (principalmente Galicia); y la *ssp mesogeensis*, que ocuparía principalmente zonas de interior de la península y oeste de la región mediterránea, doblando en superficie forestal la segunda a la primera ¹⁷⁸ (Fig. 7). Fruto de la explotación y acción del hombre, esta especie, que originalmente tupía toda la península Ibérica, actualmente se encuentra dispersa formando masas forestales fragmentadas y aisladas entre sí. Este aislamiento prolongado, unido a las diferentes características geográficas, climáticas y edáficas de sus masas forestales, ha favorecido la diferenciación de variedades de pinaster en función de sus regiones de procedencia (Fig. 7), estableciéndose inicialmente 21 regiones de procedencia ¹⁷⁹, y ampliándose posteriormente en otras 7 precedencias de área restringida (A-G) ¹⁸⁰. En la Tabla 6 y Fig. 8, Fig. 9, se describen las características principales del *Pinus pinaster* Ait. presente en la Península Ibérica.

¹⁷⁶ Ibidem.

¹⁷⁷ Rol, R (1933) Les races françaises de Pin maritime. *Revue des Eaux et Forêts*, 71. pp. 19-23.

¹⁷⁸ Rodríguez, R.J.; Serrada, R.; Lucas, J.A.; Alejano, R.; Del Río, M.; Torres, E.; Cantero, A. (2008) Selvicultura de *Pinus pinaster* Ait. subsp. *mesogeensis* Fieschi & Gaussen. *Compendio de Selvicultura Ampliada en España*. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, Madrid (España). pp. 399-430.

¹⁷⁹ Catalá, G.; Gil, P.; Galera, R.; Martín, S.; Agúndez, D.; Alía, R. (1991) *Regiones de procedencia de Pinus sylvestris* L. y *Pinus nigra* ssp. *Salzmannii* (Dunal) Franco. ICONA, Madrid, pp.31.

¹⁸⁰ Díaz-Fernández, P.; Jiménez, P.; Martín, S.; De Tuero, M.; Gil, L. (1995) *Regiones de procedencia de Quercus robur* L., *Quercus petraea* (Mall) Liebl y *Quercus humilis* Miller. ICONA, Madrid, pp.86.

Su distribución actual se debe a la presión humana sobre los recursos forestales, continuada a lo largo de los siglos, unida a una intensa política de reforestación artificial iniciada en el S.XIX. En un inicio, toda la Península Ibérica disponía de masas forestales mixtas de pinaster, junto con otras especies de pinos (*P. pinea*, *P. sylvestris*, *P. nigra*, *P. halepensis*). Sin embargo, la acción humana iniciada hace unos 4.500 años sobre los bosques de la península Ibérica, en relación a la necesidad de suelo para la agricultura y la ganadería¹⁸¹, y la especial sobreexplotación de los recursos forestales realizada durante los S.XVII y XVIII por la necesidad de nutrir de madera de calidad a los astilleros reales, ha reducido las masas forestales actuales a focos aislados próximos a regiones montañosas de difícil explotación¹⁸². Será a partir de la creación del cuerpo de Ingenieros Forestales, en 1853, cuando se inicien serios trabajos de catalogación, legislación, protección y reforestación; iniciándose, en 1877, el primer Plan de Reforestación sobre cuencas inundables¹⁸³. No obstante, casi la totalidad de las masas de reforestación de pinaster que disponemos actualmente se realizan en el S.XX, a partir del Plan Nacional de Repoblación de 1940¹⁸⁴, iniciado tras la Guerra Civil, y donde se promueve por iniciativa pública planes estatales para la repoblación masiva de los montes con, entre otras, esta especie. Durante la duración de este plan estatal de reforestación (1940-1983), el pinaster es la principal especie utilizada, con una superficie repoblada estimada superior a las 800.000 ha¹⁸⁵. A partir de 1983 las políticas de reforestación son transferidas a las comunidades autónomas, continuándose desde los gobiernos autonómicos la reforestación de unas 60.000 ha en el periodo 1983-1993 (MMA 2006)¹⁸⁶. Posteriormente, el desarrollo del programa de Reforestación de Tierras Agrarias, iniciado en 1993 desde la Unión Europea (PAC), designa fondos para la reforestación activa de terrenos agrícolas, aunque la superficie reforestada anualmente durante el periodo 1994-2006 decrece en un 46%.¹⁸⁷

Los factores que favorecieron la elección de esta especie para su uso común en repoblaciones a lo largo de toda la Península Ibérica son su rápido crecimiento (crecimientos medios de 10 m³/ha año), facilidad de germinación, y adaptación a diversas condiciones ecológicas. Presenta una gran resistencia a suelos arenosos y de escasa fertilidad, sobre los que ninguna otra especie con valor económico puede desarrollarse. Además, muestra un buen comportamiento frente a las sequías estacionales y relativa resistencia al frío y el viento, lo que lo convierte en una buena alternativa para reforestaciones masivas tanto en localizaciones costeras atlánticas, como en localizaciones peninsulares de interior¹⁸⁸.

¹⁸¹ Barbero, M.; Bonin, G.; Loisel, R.; Quézel, P. (1990). Changes and disturbances of forest ecosystems caused by human activities in the western part of the Mediterranean basin. *Vegetatio* 87, pp.151-173.

¹⁸² Valbuena-Carabaña, M.; López de Heredia, U.; Fuentes-Utrilla, P.; González-Doncel, I.; Gil, L. (2010) Historical and recent changes in the Spanish forests: A socio-economical process. *Review of Paleobotany and Palynology*, 162, pp.492-506. [DOI: 10.1016/j.revpalbo.2009.11.003]

¹⁸³ Gómez-Mendoza, J (1992) Ciencia y política de los montes españoles (1948-1936). ICONA, Madrid.

¹⁸⁴ Ximénez de Embún, J.; Ceballos, L. (1938) *Plan general para la repoblación forestal de España*. Madrid.

¹⁸⁵ Solís, A (2003) Planteamientos sobre la regeneración en pinares de repoblación que alcanzan la edad de turno. *Cuaderno de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 15, pp.49-57.

¹⁸⁶ AA.VV. (2006) *Anuario de estadística forestal. Technical Report*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.

¹⁸⁷ Gil, L. (2008) El bosque que nos ha llegado: La extinción local de los bosques de *Pinus* y *Quercus* en España. *Proforest*, 1, pp. 48-62.

¹⁸⁸ Alia et al. (1996) Op. cit.

Tabla 6. Características del *Pinus pinaster* Ait (Fuentes: Ceballos y Ruíz de la Torre 1979¹⁸⁹; López, G. 2013¹⁹⁰).

<i>Pinus pinaster</i> Ait.	
<p>Región de origen: Península Ibérica</p> <p>Descripción Árbol de porte piramidal en los pinos jóvenes, con copa redondeada e irregular en los pinos viejos, a veces desproporcionada con reducido tamaño en relación con la altura del árbol. De porte medio alcanza una altura de 20 a 30 metros, aunque en condiciones excepcionales puede alcanzar hasta los 40 metros. El follaje deja pasar bastante luz al suelo, lo que redundará en la abundancia de sotobosque, constituido muchas veces por matorral heliófilo. Presenta un tronco recto, con tendencia a flexuoso en ocasiones, de corteza áspera, gruesa y muy resquebrajada, de color pardo-rojizo. En general el porcentaje de corteza es muy elevado, lo que es un inconveniente para el aprovechamiento de la madera. Las ramas son fuertes, casi horizontales, presentando hojas aciculares que van en grupos de dos. Estas son de color verde oscuro muy largas (100-270mm) y gruesas (2-2.5mm), planas y acanaladas, con punta fuerte y punzante. Como el resto de pináceas, es monoico: cada pie produce conos masculinos y femeninos separados. Los masculinos aparecen en grupos hacia el extremo de las ramas, son amarillos y producen una gran cantidad de polen. Los conos femeninos son pequeños, de color rojo a violeta y aparecen en grupos de 2 o 3 en el extremo del crecimiento, y solo en la parte superior de la copa. Produce piñas de forma alargada-cónica de gran tamaño (80-220 mm), asentadas sobre las ramas, en parejas o tríos normalmente. Los piñones son pardos-cenizos, con ala ancha y oscura, y pequeño tamaño.</p> <p>Fenología Florece en primavera, de abril a mayo. La piña está madura al final del verano del siguiente año, pero la caída de los piñones no tiene lugar hasta la primavera o verano del año tercero.</p> <p>Manejo Posee una buena reproducción por semilla, sin necesidad de preparación previa del terreno.</p> <p>Condiciones edáficas Se adapta a una gran amplitud de suelos, incluso terrenos poco fértiles, prefiriendo suelos sueltos y arenosos. Se desarrolla en suelos silíceos, y soporta los suelos calizos (dolomías).</p> <p>Condiciones climáticas Necesita unas buenas condiciones de luz para su adecuado desarrollo. Es resistente a las heladas y sequía, prefiriendo climas templados en la región mediterráneo y atlántica, desde nivel de mar hasta altitudes máximas de unos 1500m. El sistema radical es bastante desarrollado y profundo, sobre todo en los suelos con fondo, lo que le confiere una buena resistencia al viento.</p>	<p>Familia: <i>Pinaceae</i> Género: <i>Pinus pinaster</i> Aiton</p> <p>Plagas y enfermedades Muy sensible a la infestación del hemíptero <i>Matsococcus feytaudí</i> Duc., con elevada mortandad en poblaciones afectadas; y muy sensible también al ataque de varios hongos (<i>Armillaria mellea</i>) (<i>Lophodermium ssp</i>). Sensible a la Procesionaria del pino (<i>Thaumetopoea pityocampa</i>), un lepidóptero que causa fuertes defoliaciones. También es sensible al ataque de varios coleópteros (<i>Ips sexdentatus</i>) (<i>Hylobius abietis</i>)</p> <p>Tecnología Crecimiento elevado inicial, con turnos de corta mínimos de 40años en suelos fértiles y 80años en el resto. Madera clara en la albura y rojiza en duramen, resinosa, con anillos de crecimiento marcados y de gran diferencia estacional en espesor y color. En masas sin un correcto tratamiento cultural muestra gran presencia de nudos, con preponderancia a nudos saltadizos.</p> <p>Utilización En general, en España, el pinaster se ha utilizado de forma intensiva en replantaciones, tanto de masas de protección como en reforestación de tierra baldía, siendo la primera especie en superficie reforestada de la península. Su aprovechamiento tradicional maderero para la construcción de navíos, y edificaciones en general, se complementa con el uso resinero de las masas, principalmente en la meseta castellana (Segovia, Ávila, Valladolid, Soria o León) y parcialmente en la Mancha (Cuenca, Guadalajara o Albacete), iniciado a mediados del S.XIX hasta su máxima explotación en la década de 1960 con producciones de unas 40.000tn/año. De la resina del pinaster se obtiene la trementina, de la cual se destila el aguarrás y otros productos de gran valor en la industria química. Actualmente se mantienen de forma testimonial masas forestales dedicadas a resina.</p> <p>El principal uso de la madera de pinaster, especialmente la ssp atlántica, es la obtención de madera de sierra para el deshilado en tabla de distintas calidades (mueble, suelos, embalajes o encofrados), destinando las peores trozas para la industria de trituración y la fabricación de tableros de partículas. Su uso estructural, si bien está normalizado, es escaso y limitado a regiones con gran presencia masas forestales.</p>

¹⁸⁹ Ceballos et al. (1979) Op. cit.¹⁹⁰ López (2013) Op. cit.



a) Acículas de pino pinaster.¹⁹¹



b) Piña de pino pinaster.¹⁹²



c) Masa monoespecífica de pino pinaster.¹⁹³

Fig. 8. Ejemplos de las características del pino pinaster.



Fig. 9. Masa de pino pinaster.¹⁹⁴

¹⁹¹ <http://www.arbolapp.es/especies/ficha/pinus-pinaster/> (Consultada el 10/01/19).

¹⁹² <https://floradeiberia.com/407/pinus-pinaster-pino-resinero-pino-maritimo/> (Consultada el 10/01/19).

¹⁹³ <http://www.arbolapp.es/especies/ficha/pinus-pinaster/> (Consultada el 10/01/19).

¹⁹⁴ <https://tabuyodelmonte.wordpress.com/2011/12/16/el-pino-resinero-i-nomenclatura-y-distribucion/> (Consultada el 10/01/19).

2.3.2. Características físicas y elastomecánicas de la madera de pino pinaster

La madera aserrada de pino pinaster se encuentra recogida en España, junto con los *P. sylvestris*, *P. nigra*, y *P. radiata*, dentro de la norma de clasificación visual UNE 56544:2011, como una de las 4 especies de coníferas cuya caracterización mecánica puede obtenerse a partir de criterios de clasificación visual; pudiéndose separar clase de calidad ME-1, ME-2 o no estructural. A partir de esta clase de calidad visual, la norma europea UNE-EN 1912:2012 asigna, en combinación con la especie, una Clase Resistente para cada calidad visual, y la UNE-EN 338:2016 concreta las propiedades mecánicas asociadas a cada una estas clases resistentes (Tabla 7).

Tabla 7. Caracterización mecánica de la madera de *P. pinaster* a partir de la clasificación visual.

Especie	Calidad Visual UNE-56544	Clase resistente UNE-EN 1912	Propiedades mecánicas UNE-EN 338		
			Resistencia Flexión (MPa)	Módulo de Elasticidad (MPa)	Densidad (kg/m ³)
<i>Pinus pinaster</i> Ait	ME-2	C18	18	9.000	380
	ME-1	C24	24	11.000	420

Sin embargo, las particulares características de crecimiento del pino pinaster, unido a la gestión silvícola y tratamientos culturales de las masas forestales orientados a resinación y protección del uso empleada en nuestro país, dan como resultado escuadrías de madera aserrada con gran abundancia en singularidades (nudos, bolsas de resina, etc.). Estas singularidades provocan que al realizar la clasificación visual de acuerdo con los criterios recogidos en la mencionada UNE 56544:2011, un relativamente elevado porcentaje de madera sea rechazada para su uso estructural. Algunos autores sitúan los porcentajes de rechazo por clasificación visual para madera pinaster entorno al 30-36%^{195, 196}, alcanzando otros investigadores porcentajes de hasta el 67%.¹⁹⁷

Otras normas de clasificación visual europeas (Tabla 8) disponen de similares números de calidades visuales para el pino silvestre. En el caso de la madera de pino pinaster, la norma francesa NFB 52.001-4¹⁹⁸ dispone de las mismas clases resistentes que la norma española; mientras que la norma portuguesa NP 4305¹⁹⁹ reduce la clasificación a una única calidad, equivalente a C18.

Tabla 8. Correspondencia entre clases resistentes y calidades (EN 1912) para madera serrada de pino pinaster.

	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27
NFB 52.001-4 (Francia)			ST-III			ST-II	
NP 4305 (Portugal)			E				
UNE 56544 (España)			ME-2			ME-1	

En general, la madera de pino pinaster presenta unas buenas propiedades mecánicas para su uso estructural, sin embargo, su gran porcentaje de madera de rechazo por clasificación visual supone una limitación para su empleo rentable en edificación. Se producen grandes variaciones en los porcentajes rechazados en función de las regiones de procedencia, siendo necesario profundizar en la calidad de las masas forestales para su explotación dirigida a uso estructural. En la Tabla 9 se resumen las propiedades físicas y elastomecánicas del pino pinaster recogidas en diversas publicaciones, siendo evidente la gran variabilidad de propiedades presente en esta especie. En

¹⁹⁵ Fernández-Golfín, J.I.; Diez-Barra, M.R.; Gutiérrez, O. (1998) Caracterización mecánica de la madera aserrada de uso estructural, clasificada visualmente de acuerdo con la norma UNE 56544. *Materiales de Construcción*, Vol. 48(252), pp. 45-59

¹⁹⁶ Carballo, J.; Hermoso, E.; Fernández-Golfín, J.I. (2009) Mechanical properties of structural maritime pine sawn timber from Galicia (*Pinus pinaster* Ait. ssp. atlántica). *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 18(2), pp.152-158. [DOI: 10.5424/fs/2009182-01058].

¹⁹⁷ Acuña, L.; Casado, M.; et al. (2009) Caracterización estructural de *P. pinaster* Ait. De 3 regiones de procedencia de Castilla y León. *5º Congreso Forestal Español*.

¹⁹⁸ FFB 52-001-4:2011 Règles d'utilisation du bois dans les constructions. Partie 4: Classement visuel pour l'emploi en structures pour les principales essences résineuses et feuillues.

¹⁹⁹ NP 4305:1995 Madeira serrada de pinheiro bravo para estruturas. Classificação visual.

este sentido, el GIR de Estructuras y Tecnología de la madera de la Universidad de Valladolid ha realizado varias investigaciones encaminadas a la caracterización de la madera de pino pinaster. En uno de esos estudios realizado por Acuña et al.²⁰⁰, se caracteriza y clasifica madera de pino pinaster procedente de los montes de Castilla y León, con el fin de certificar su calidad y asegurar su correcto empleo en todo tipo de aplicaciones, principalmente estructural.

En dicho estudio se realizaron ensayos sobre piezas de tamaño estructural de dos regiones de procedencia: Gredos y Sierra de Bureba-Oña. La muestra de madera de *Pinus pinaster* Ait. que se utilizó tenía un volumen total estimado en unos 20 m³, de las cuales, tras su acopio, secado hasta el 12% de humedad y desechado de las piezas con fuertes irregularidades (alabeos, abarquillados, etc.) que impedían un correcto ensayo, se obtuvieron un total de 819 vigas válidas a ensayar. Los resultados obtenidos (Fig. 10) muestran el alto porcentaje de rechazos, entre el 66% y el 80%, que se producen al clasificar visualmente la madera de pino pinaster.

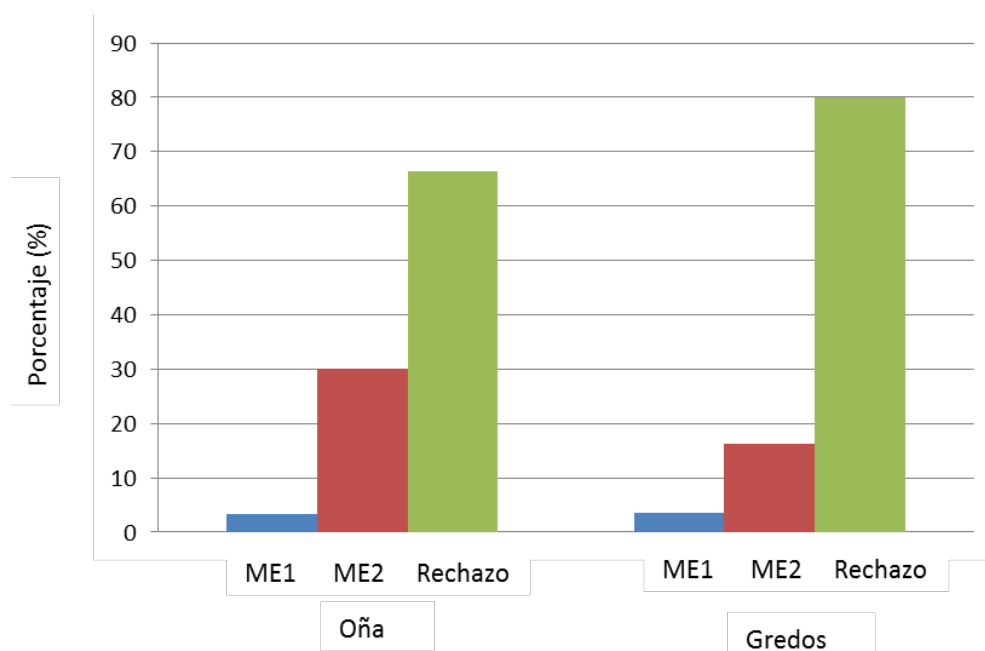


Fig. 10. Gráfico de la calidades de la madera de pino pinaster de procedencia Oña y Gredos.²⁰¹

De los datos anteriores se puede concluir que el porcentaje de madera clasificada como estructural para el total de la especie (ME1+ME2) supone un 33,5%, para la procedencia Oña, y 19,9% para la procedencia Gredos. Este hecho evidencia como la gran mayoría de la madera aserrada de pino pinaster producida por los montes de Castilla y León no cumple adecuadamente los requisitos exigidos por la normativa de clasificación actual (UNE 56544:2011) para su utilización estructural, considerándose madera no estructural o de rechazo. Esto merma en gran medida el valor añadido de las masas forestales de la comunidad, limitando su uso principalmente a usos industriales (pallet, envases, etc.) o a la trituración para la fabricación de tableros o biomasa.

El empleo de las masas forestales maduras de pino pinaster con producciones de madera de baja calidad para usos estructurales, mediante la industrialización de nuevos productos estructurales, permitiría un nuevo valor añadido para la madera inicialmente rechazada y un incremento del valor económico y social de los recursos naturales de las amplias masas de repoblación de esta especie.

²⁰⁰ Acuña, L.; Basterra, L.A.; Casado, M. (2005) Caracterización estructural de madera aserrada mediante ensayos no destructivos. Particularización del uso de ultrasonidos para pino pinaster Ait. Proyecto AGL 2002-03386 del Plan nacional de I+D+I 2002-2003.

²⁰¹ Ibidem.

Tabla 9. Propiedades físicas y elastomecánicas del *Pinus pinaster* Ait., según diversos autores.

Pinaster	Referencia datos	Densidad (kg/m ³)	C. rad (%)	C. tang (%)	MOE (Mpa)	MOR (MPa)
<i>Pinus pinaster</i> Ait. ssp mediterránea	INIA 1996 ²⁰²	530	-	-	9.228	45,6
<i>Pinus pinaster</i> Ait. ssp atlántica	"	518	-	-	10.184	45,2
<i>Pinus pinaster</i> Ait. ssp atlántica	Fdez-Golfín 1995 ²⁰³	516	4,1	7,6	9.800	18,6
<i>Pinus pinaster</i> Ait.	Esteves et al. 2011 ²⁰⁴	620	3,5	6,2	10.924	-
<i>Pinaster</i> Ait. ssp atlántica	Carballo et al. 2009 ²⁰⁵	573	-	-	12.161	55
<i>Pinus pinaster</i> Ait.	Prades et al. 2001 ²⁰⁶	516	3,76	6,97	-	69,3
<i>Pinus pinaster</i> Ait.	Ortiz et al. 1991 ²⁰⁷	500-570	-	-	7.200-11.500	25,1 - 56,3
<i>Pinus pinaster</i> Ait.	Hermoso 2001 ²⁰⁸	503-557	-	-	9.657-11.462	39,4-57
<i>Pinus pinaster</i> Ait.	García-Iruela et al. 2016 ²⁰⁹	339-686	-	-	3.426-9.144	21,44-82,59
<i>Pinus pinaster</i> Ait.	Vignote 2014 ²¹⁰	476	4,09	7,59	7.378	-
<i>Pinus pinaster</i> Ait.	Riesco et al. 2007 ²¹¹	499	5,00	7,20	-	-
<i>Pinus pinaster</i> Ait.	Casado et al. 2001 ²¹²	478	3,93	6,81	10.137	-
<i>Pinus pinaster</i> Ait (Bureba-Oña)	Acuña et al. 2005 ²¹³	-	-	-	10504-12.791	-
<i>Pinus pinaster</i> Ait (Gredos)	"	-	-	-	10283-14.275	-
<i>Pinus pinaster</i> Ait (Bureba-Oña)	Acuña et al. 2009 ²¹⁴	547	-	-	8.028-11.163	29,66-61,60
<i>Pinus pinaster</i> Ait (Gredos)	"	534	-	-	8.825-9.771	29,93-59,23
<i>Pinus pinaster</i> Ait (M. Castellana)	"	524	-	-	7.860-9.265	22,07-32,82
<i>Pinus pinaster</i> Ait (Bureba-Oña)	Acuña et al. 2004 ²¹⁵	-	-	-	8.616	34,4
<i>Pinus pinaster</i> Ait (Gredos)	"	-	-	-	7.495	33,1
<i>Pinus pinaster</i> Ait.	Fdez-Golfín 1998 ²¹⁶	503-557	-	-	9.657-11.462	39,4-57

2.3.3. Usos, rendimientos y sostenibilidad

La extensión natural del pino pinaster a lo largo de la Península Ibérica, unido a sus adecuadas características (rapidez de crecimiento, porte,...) y propiedades mecánicas de su madera (buena resistencia, adecuada durabilidad,...) ha extendido su utilización tradicional en multitud de aplicaciones, desde la construcción naval histórica, hasta su empleo actual en usos estructurales,

²⁰² Fernández-Golfín et al. (1996) Op. cit.

²⁰³ Fernández-Golfín et al. (1995) Op. cit.

²⁰⁴ Esteves, B.; Nunes, L.; Pereira, H. (2011) Properties of furfurylated wood (*Pinus pinaster*). *European Journal of Wood Products*, 69(4), pp. 521–525. [DOI: 10.1007/s00107-010-0480-4]

²⁰⁵ Carballo et al. (2009) Op. cit.

²⁰⁶ Prades, C.; Montero, A.; Rubio, J. (2001) Características físico-mecánicas de la madera de *Pinus pinaster* Ait, procedente de los montes del marquesado (provincia de Granada) 3^{er} Congreso forestal español. Granada. España

²⁰⁷ Ortiz J.; Martínez, J.J (1991) Características mecánicas de la madera de pino gallego, obtenidas a partir de ensayos con piezas de tamaño estructural. *Revista AITIM*, 150, pp. 95-101.

²⁰⁸ Hermoso, E. (2001) Caracterización mecánica de la madera estructural de *Pinus sylvestris* L. PhD tesis. Universidad Politécnica de Madrid.

²⁰⁹ García-Iruela, A.; Esteban, L.; De Palacios, P.; García-Fernández, F.; De Miguel, A.; Vázquez, E.; Simón, C. (2016) Resinous Wood of *Pinus pinaster* Ait.; Physio-mechanical properties. *BioResources* 11(2), pp. 5230-5241.

²¹⁰ Vignote, S. (2014). *Principales maderas de coníferas en España características, tecnología y aplicaciones*. Monografía (Informe Técnico). E.T.S.I. Montes Universidad Politécnica de Madrid. pp.170.

²¹¹ Riesco, C.; Díaz, J (2007) Características físicas de la madera de pino procedente de raleos en el noroeste de España. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 9(3), pp. 233-244. [DOI: 10.4067/S0718-221X2007000300004]

²¹² Casado, M.; García, M.; Acuña, L. (2001). Caracterización físico-mecánica del *Pinus pinaster* Ait. procedencia Sierra de Oña (Burgos), influencia del factor rectitud. *Congresos Forestales*.

²¹³ Acuña et al. (2005) Op. cit.

²¹⁴ Acuña et al. (2009) Op. cit.

²¹⁵ Acuña, L.; Casado, M.; et al. (2004) Evaluación resistente no destructiva de madera de *Pinus pinaster* Ait. De las regiones de procedencia "Gredos" y "Bureba-sierra de Oña". *I Jornadas de Investigación en Construcción Universidad de Valladolid*.

²¹⁶ Fernández-Golfín et al. (1998) Op. cit.

tablas, suelos y mobiliario, así como la explotación de amplias extensiones para la extracción de resina durante la primera mitad del s. XX.²¹⁷

Las masas en explotación maderera actuales, con edades de medias de 80 años, provienen mayoritariamente del repoblamiento masivo iniciado a mediados del siglo XX. Sin embargo, la inadecuada gestión silvícola, sin tratamientos adecuados, ha condicionado negativamente la calidad de la madera, limitando la productividad y la posibilidad de obtener madera de calidad²¹⁸. El pino pinaster es una especie con grandes necesidades de luz, por lo que, ante altas densidades de repoblamiento e inadecuadas labores de aclareo y podas, produce fustes con formas curvadas, con diámetros delgados y grandes nudosidades. Cualidades todas ellas paupérrimas para la obtención de maderas de calidad²¹⁹. Por esta razón, el 98% de la madera de pino pinaster se destina a la industria de la trituración para la fabricación de tablero de partículas²²⁰. Por el contrario, la madera de pino pinaster únicamente representa el 6% del consumo total de la industria de la chapa y tableros contrachapados, y entorno al 5% de la madera maciza aserrada para uso en mueble o estructuras²²¹. En la actualidad, las condiciones del mercado hacen aconsejable mejorar las labores silvícolas y orientar la mejora de la especie bajo criterios de mejora de la calidad hacia la producción de fustes de diámetro elevado y nudosidad reducida²²². Esta madera de mejor calidad puede ser empleada por aserraderos para usos estructurales o de mobiliario, segundas transformaciones que permiten a los recursos madereros alcanzar un efecto multiplicador por el efecto de valor añadido que genera en la economía.²²³

En Castilla y León la superficie total de pino pinaster en masas mono especímenes supera las 82.000 ha, de las cuales sólo el 25% de la superficie se mantiene en producción, extrayéndose de sus bosques unos 750.000 m³/anuales de madera (datos de la Junta CyL 2006)²²⁴, y unas 5.000 t de resina, con una repercusión económica total (resinado y maderable) de entre 40-60 millones de euros (datos de la Junta CyL 2014)²²⁵. Otro de los usos de la madera de pinaster es su aprovechamiento energético como biomasa, pues las maderas provenientes de clareos o podas obtenidas de los tratamientos culturales pueden ser utilizados por esta floreciente industria.²²⁶

También es destacable su uso ecológico como especie de regeneración post incendios. Esta especie presenta unos caracteres favorables para la resistencia al fuego de los ejemplares adultos y la regeneración natural tras incendios, siendo además favorable a la siembra artificial por braseo de semillas sobre suelos desprotegidos.²²⁷

²¹⁷ Rodríguez et al. (2008) Op. cit.

²¹⁸ Madrigal, A (1998) Problemática de la ordenación de masas artificiales en España. *Cuadernos de la S.E.C.F.* 6 (febrero), pp. 13-20.

²¹⁹ Sanz et al. (2006) Op. cit.

²²⁰ Zas, R.; Merlo, E. (2008) El programa de mejora genética de *Pinus pinaster* en Galicia. *Boletín del CIDEU* 6-7, pp.5-24.

²²¹ Sanz et al. (2006) Op. cit.

²²² Pot, D.; Chantre, G.; Rozenberg, P.; Rodrigues, J.C.; Jones, G.L.; Pereira, H.; Hannrup, B.; Cahalan, C.M.; Plomion, C (2002) Genetic control of pulp and timber properties in maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). *Annals of Forest Science* 59 (5-6), pp. 563-575. [DOI: 10.1051/forest:2002042]

²²³ Sanz et al. (2006) Op. cit.

²²⁴ AA.VV. (2006) Manual de gestión para masas procedentes de repoblación de *Pinus pinaster* Ait., *Pinus sylvestris* L. y *Pinus nigra* en Castilla y León. Junta de Castilla y León, pp.104.

²²⁵ AA.VV. (2014) Programa de Movilización de Recursos Forestales de Castilla y León 2014-2022. Junta de Castilla y León, pp.72.

²²⁶ Ibidem.

²²⁷ Vega, J. A.; Pérez-Gorostiaga, P.; Fonturbel, T.; Cuiñas, P.; Hernando, C.; Guijarro, M.; Durán, M.V. (2003). *Regeneración de P. pinaster Ait. tras incendios forestales y medidas silvícolas para favorecerla*. Informe final del Proyecto INIA SC-99-018-C2, Madrid.

2.4. Sistemas compuestos

La gran multitud de especies botánicas existentes y sus diferentes características, unida a la heterogeneidad propia de la madera, complica increíblemente la determinación de las propiedades mecánicas con seguridad. Por esta razón, es preciso conocer las propiedades mecánicas de cada especie de madera que se pretende utilizar con usos estructurales, siendo necesario la realización de extensas tandas de ensayos, con maderas de distintas procedencias y con amplios márgenes de confianza antes de poder definir sus propiedades con seguridad suficiente²²⁸. Este estudio, análisis y comprensión de la naturaleza anisótropa y heterogénea de la madera ha llegado a desarrollar estrategias para conseguir cierta homogeneidad y estandarización, en consonancia con las exigencias del actual sector de la construcción, permitiendo reducir la incertidumbre propia del material y aumentar su seguridad. El establecimiento de unos sistemas de calidad, asociados a especies de procedencias concretas, y la obtención, simplificada, de un sistema de clases resistentes es una de estas estrategias. Aunque sin lugar a duda, ha sido el desarrollo de la tecnología de los adhesivos la que ha permitido la fabricación de la madera industrializada²²⁹, reduciendo la variabilidad de las piezas finales, y aumentando la calidad y seguridad del material. La madera laminada, basada en la selección de tablas de mejor calidad, eliminación de singularidades y posterior empalme mediante *finger-joints*, permite reducir la heterogeneidad de la madera y aumentar sus propiedades mecánicas; pudiendo producir bajo condiciones de calidad controladas, además, piezas de mucha mayor sección y longitud que los árboles de procedencia.

Un tipo de madera industrializada de sencilla mecanización y óptimas prestaciones son las llamadas vigas 'dúo', cuyas secciones han sido pensadas para sacarle el máximo partido a las características anisótropas de la madera. Surge como producto del análisis de las características del material y una aplicación técnica consecuente de los conocimientos de éste, así como de la experiencia adquirida respecto de las colas de unión en la más veterana industria de la madera laminada, generando así un nuevo producto industrial de alto valor añadido. En la Fig. 11 se observa como las resistencias características de las maderas de coníferas utilizadas para este tipo de productos aumentan conforme nos alejamos del corazón. Las trozas se optimizan al máximo para producir los tablones, cuyas dimensiones varían entre los 50 y 80 mm de anchura y los 140 y 240 mm de altura. El sistema *finger joint*, o empalme dentado, permite aprovechar al máximo la madera y tiene una mayor resistencia que las alternativas tradicionales.

²²⁸ Thelandersson et al. (2003). Op. cit.

²²⁹ Basterra, L.A.; Balmori, J.A (2018) *Maderas (I). Madera Laminada Encolada (MLE)*. Manuales y Textos Universitarios, Arquitectura, 207. Ediciones Universidad de Valladolid.

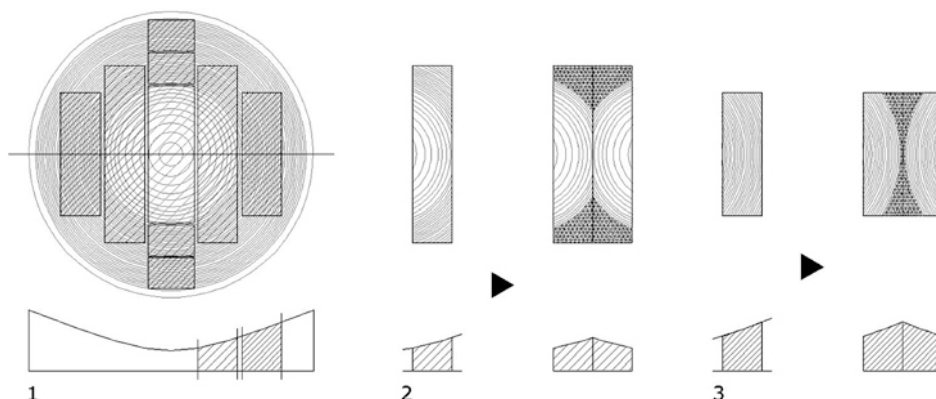


Fig. 11. Distribución de los cortes del tronco para la producción de piezas pa DÚO (MGB) y esquemas para la comprensión del aprovechamiento que el sistema DÚO hace de las características anisotrópicas de la madera (Fuente: Ahvenainen et al. 2007).²³⁰

El concepto 'dúo' se desarrolla en la actualidad en el ámbito europeo especialmente con especies como el abeto rojo (*Picea abies Karst*), que tiene una densidad del orden de 440 kg/m³.²³¹ En concreto, consiste en la unión, por medio de encolado, de piezas de madera de formatos algo superiores a las láminas habituales de las vigas laminadas: 80 mm de grosor, frente a los 45 mm que son habituales en la madera laminada. La unión se realiza de forma que las piezas queden con la superficie de encolado en posición vertical, de modo que las caras con los anillos de crecimiento más exteriores permanezcan en el interior de la viga y aquellas que se situaban más interiormente en el tronco original, queden vistas hacia fuera. Uniendo los tablones por la parte exterior del tronco, y dejando, por consiguiente, el duramen al exterior se consigue mayor durabilidad ante los agentes causantes del biodeterioro. Además, al estar encolados los tablones se logran compensar las tensiones de secado, que son las culpables de generar fendas y revirados.

Pese a ser el producto industrializado con menor mecanizado posible, las ventajas conseguidas son múltiples: desde el punto de vista visual, mejora el aspecto y limpieza de las vigas puesto que los cortes más interiores presentan menos nudos y son éstos los que aparecen en la cara exterior en el sistema 'dúo'. Se consigue una optimización en el uso de la madera de costeros del tronco originario, de una mayor resistencia, uniéndose para formar piezas de mayor escuadría, logrando una mayor estabilidad de las piezas frente a alabeos o fendas.

2.5. Fibras de refuerzo estructural

Las fibras de refuerzo estructural son frecuentemente utilizadas embebidas en matrices poliméricas (*Fibers Reinforced Polymers -FRP-*), también denominados polímeros reforzados con fibras. Se basan en la utilización de fibras sintéticas ligeras, de alto módulo elástico y alta resistencia mecánica, no metálicas y normalmente orientadas, embebidas en una matriz de resina polimérica. Las fibras, debido a sus altas propiedades mecánicas, tienen la función resistente en la dirección principal del composite, mientras que la resina, sin grandes prestaciones, realiza la función de transmitir las cargas entre las fibras, confinarlas y protegerlas frente a daños físicos o químicos externos para garantizar su durabilidad. Además, debido a la anisotropía de los compuestos FRP, la resina es la responsable de las propiedades transversales y a compresión del sistema compuesto. Como resultado de esta composición, pueden darse multitud de combinaciones de

²³⁰ Ahvenainen, J.; García Barbero, M. (2007) Uso estructural de vigas DÚO y TRÍO. Vigas de madera compuestas por dos o tres piezas: una alternativa ideal para estructuras ligeras de alta exigencia estética. *Informes de la Construcción*. Vol. 59 (506), pp. 117-121.

²³¹ Ibidem.

fibras y resinas, sin embargo, cada combinación debe tratarse como un sistema único. La resistencia, deformabilidad y durabilidad de un 'composite' supone una interacción compleja que depende de la matriz (resina), las fibras y la interfase o enlace entre ambas. Las propiedades mecánicas básicas del composite (FRP) pueden obtenerse en relación con el volumen de fibras presente, pudiéndose estimar sus propiedades con relación a la regla de mezclas.

$$f_{FRP} = f_{fib} \cdot V_{fib} + f_{matriz} \cdot V_{matriz}$$

Donde: f_{FRP} = propiedad polímero reforzado con fibras; f_{fib} = propiedad fibra; V_{fib} = volumen de fibra; f_{matriz} = propiedad resina; V_{matriz} = volumen de resina.

Los formatos básicos de estos materiales compuestos (FRP) se presentan como rígidos o flexibles. Los FRPs flexibles se comercializan en tejidos –"sheets"–, formados por tejido principal (longitudinal) y un tejido secundario (tejido 90° o MAT), aplicándose la resina in situ para embeber el tejido al mismo tiempo que se adhiere al sustrato. Su volumen de fibra en la dirección principal, aplicada la resina, es bajo por tratarse de una fabricación manual e in situ, representando entre el 25-35% del refuerzo. Los FRPs rígidos se comercializan en forma de barras –"bars"–, laminados o bandas –"Laminates" o "Strips"–, compuestos de fibras unidireccionales embebidas en una matriz polímera. Su fabricación industrial permite volúmenes altos de fibra en la dirección principal, oscilando entre el 50-70% del refuerzo.²³²

Los tipos de fibras más comunes utilizadas en la fabricación de compuestos FRP son las fibras de carbono, vidrio y aramida. Además, recientemente se están utilizando las fibras de basalto. Dependiendo del tipo de fibra, diámetro, forma o composición química del filamento, las propiedades y usos pueden variar enormemente, incluso dentro de la misma familia de fibras.

2.5.1. Fibra de vidrio

La fibra de vidrio es la más común, por ser la más barata y una de las primeras en utilizarse para la fabricación de compuestos GFRP. Tal y como la conocemos actualmente, fue inventada en 1938 por Russell Games Slayter, de la compañía Owens-Corning. Su compuesto fundamental es la sílice (SiO₂), que junto con otros aditivos se funden a alta temperatura (>1.600°C) para formar vidrio líquido. Posteriormente, un proceso industrial de extrusión permite obtener filamentos de diámetro micrométricos (3-20 μm)²³³. Variando los porcentajes y tipos de aditivos pueden obtenerse fibras con propiedades diversas, entre todas las variantes posibles destacan:

- **Resistencia química:** A-glass or AR-glass (Alkali-Resistant); C-glass (Chemical resistant).
- **Resistencia mecánica:** S-glass (Tensile Strength); HS-glass (High Tensile Strength); R-glass (Resistant).
- **Aislante eléctrico:** D-glass (Dielectric).
- **Conductor eléctrico:** E-glass (Electric); HE-glass (High Electric).

La fibra de vidrio E es, sin duda, la más utilizada para la fabricación de refuerzos, representando entorno al 90% de la fibra utilizada para GFRP. Puede considerarse la fibra de vidrio más polivalente de los distintos tipos al ofrecer unas buenas prestaciones mecánicas, ser durable y presentar un

²³² Fédération internationale du béton-FIB (2007) *FRP reinforcement in RC structures*. Technical report. Bulletin 40. Switzerland. pp.151.

²³³ Cardarelli, F. (2008) *Materials Handbook*. Springer, London. pp.1339.

bajo grado de absorción de humedad, a un coste relativamente bajo²³⁴. Su precio suele situarse en torno a los 1,5-3 €/kg.²³⁵

2.5.2. Fibra de carbono

La fibra de carbono, también denominada fibra de grafito, presenta unas propiedades mecánicas extremadamente altas, son ligeras ($\rho < 2.000 \text{ kg/m}^3$) y resistentes químicamente. Se obtiene mediante procesos de pirólisis a altas temperaturas ($> 3.000^\circ\text{C}$) de fibras polímeras previas, principalmente de 3 tipos: PAN (poliacrilonitrilo), Rayon ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$), o Pitch (polímero viscoelástico derivado del petróleo). En función del polímero utilizado se obtienen fibras de carbono con distintas propiedades. Creadas en 1958 por Roger Bacon a partir de grafitización de filamentos de Rayon, el proceso de fabricación es complejo, disponiendo de varios procesos químicos y mecánicos sucesivos a altas temperaturas (oxidación $200\text{-}300^\circ\text{C}$; carbonización $1.000\text{-}2.000^\circ\text{C}$ y grafitización $2.500\text{-}3.000^\circ\text{C}$) y unos tratamientos superficiales finales para obtener filamentos de diámetros inferiores a las $10 \mu\text{m}$, con unas propiedades de rigidez y resistencia muy elevadas.²³⁶

De uso en aplicaciones aeronáuticas desde los años 60, y en automovilismo de altas prestaciones más recientemente, sus fibras presentan un alto módulo de elasticidad, mínimo coeficiente de expansión térmica, excelente respuesta a fatiga, excelente resistencia al ataque químico, no son corrosibles y resisten a las sales del deshielo. Su uso en construcción es muy limitado y suele restringirse a refuerzos de estructuras existentes debido a su alto precio, situado en torno a los 20-60 €/kg en función del tipo de fibra.²³⁷

2.5.3. Fibra de aramida

La fibra de aramida es un término genérico dentro del cual se engloban fibras orgánicas y sintéticas obtenidas a partir de poliamidas aromáticas, presentando bajas densidades ($\rho < 1.500 \text{ kg/m}^3$), alta resistencia a tracción, altos módulos de elasticidad y una buena resistencia al impacto. Son fibras sensibles al calor ($< 250^\circ\text{C}$), perdiendo cerca del 80% de sus propiedades mecánicas a partir de 180°C , y resistentes, en general, a productos químicos. En función del tipo de fibra absorben gran cantidad de humedad, siendo sensibles a la presencia continuada de alta humedad y luz UV. Este tipo de fibras son fabricadas bajo distintas marcas comerciales como “Kevlar” o “Nomex” por DuPont, “Twaron” por Akzo Nobel, o “Technora” por Teijin; y con distintos tipos de compuestos y propiedades²³⁸. Su precio varía en función de cada tipo de compuesto y fabricantes, aunque las fibras de aramida suelen situarse en torno a los 20-35 €/kg.²³⁹

En la Tabla 10 se resumen las principales propiedades de algunas de las fibras comerciales anteriormente descritas.

²³⁴ Olivares, M.; Galán, C.; Roz, J. (2003) Los composites: características y aplicaciones en la edificación. *Informes de la construcción*, Vol.54(484), pp. 45-62.

²³⁵ Alann, A (2006) Fibers for strengthening of timber structures. Technical report, Lulea University of Technology. 121pp.

²³⁶ Cardarelli (2008) Op. cit.

²³⁷ Alann (2006) Op. cit.

²³⁸ Fédération internationale du béton-FIB (2007) Op. cit.

²³⁹ Alann (2006) Op. cit.

Tabla 10. Propiedades de diferentes tipos de fibras utilizadas en refuerzos FRP (Fuentes: Alann 2006²⁴⁰, Jacob et al. 2007²⁴¹, FIB 2007²⁴²).

Tipo de fibra	Diámetro (μm)	Densidad (kg/m^3)	Resistencia a tracción (GPa)	Módulo Elasticidad (GPa)	Deformación máxima (%)	Coef. Expansión térmica ($10^6/^\circ\text{C}$)	Temp. límite ($^\circ\text{C}$)	Coef. Poisson -
<i>E-Glass</i>	8-14	2540	3,45	72,4	2,4	5,0	880	0,22
<i>S-Glass</i>	10	2490	4,58	85,5	3,3	5,6	880	0,22
<i>AR-Glass</i>	-	2270	1,8-3,5	70-76	2,0-3,0	-	880	0,22
<i>C-Glass</i>	-	2490	3,16	68,9	1,8	7,2	880	0,22
<i>D-Glass</i>	-	2140	2,5	55	4,7	3,1	880	0,22
<i>Carbon (High Modulus)</i>	-	1950	2,5	350-650	0,5	-1,2 a -0,1	1600	0,20
<i>Carbon (High Strength)</i>	-	1750	3,5	240	1,1	-0,6 a -0,2	1600	0,20
<i>PAN Carbon</i>	7-10	1670- 1900	1,72-2,93	228-570	0,3-1,0	-0,1 a -1,0	1600	0,20
<i>Pitch Carbon</i>	10-11	2020	1,72	345	0,4-0,9	-0,9 a -1,6	1600	0,20
<i>Rayon Carbon</i>	6,5	1530- 1660	0,62-2,20	41-393	1,5-2,5	-	1600	0,20
<i>Aramida (Kevlar 29)</i>	12	1440	2,76	62	4,4	-2,0	250	0,35
<i>Aramida (Kevlar 49)</i>	12	1480	2,8-3,79	124-131	2,2-2,8	-2,0	250	0,35
<i>Aramida (Kevlar 149)</i>	-	1470	3,62	179	1,9	-	250	0,35
<i>Aramida (Technora H)</i>	-	1390	3,0	70	4,4	-	250	-
<i>Aramida (SVM)</i>	-	1430	3,8-4,2	130	3,5	-	250	-
<i>Aramida (Spectra 900)</i>	38	970	2,58	117	4,0-5,0	-	250	-
<i>Basalt (Albarrie)</i>	9-23	2800	4,84	89	3,1	8	1450	-

En la Fig. 12, se muestra la gráfica tensión-deformación para las fibras descritas anteriormente, pudiéndose resumir en función de la pendiente de la recta la rigidez de cada tipo fibra, y su tensión máxima a tracción.

²⁴⁰ Ibidem.

²⁴¹ Jacob, J.; Garzon, L. (2007) Flexural strengthening of glued laminated timber beams with Steel and carbon fiber reinforced polymers. Master's Thesis, Chalmers University of Technology, pp. 151.

²⁴² Fédération internationale du béton-FIB (2007) Op. cit.

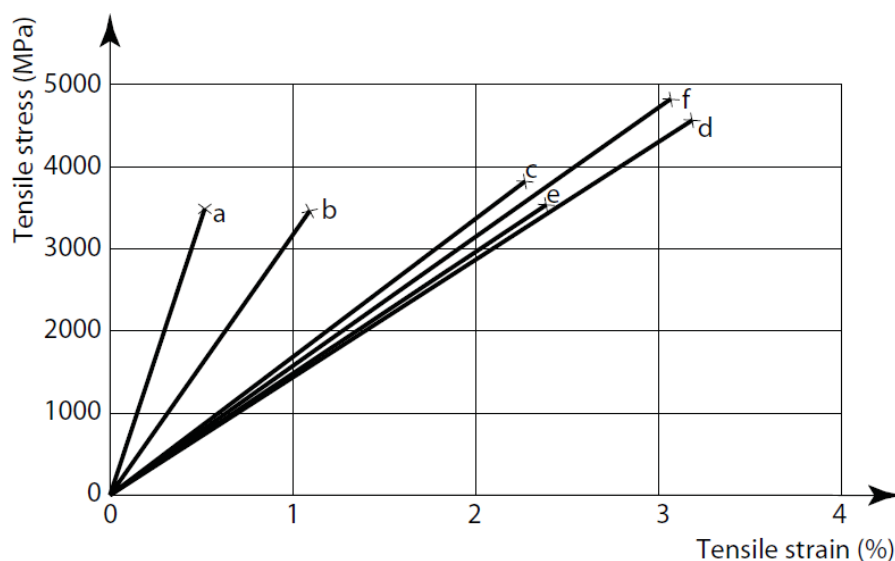


Fig. 12. Comparación de las gráficas tensión-deformación de diferentes tipos de fibras utilizadas en refuerzos FRP a) *Carbon (High Modulus)*; b) *Carbon (High Strength)*; c) *Aramida*; d) *S-glass*; e) *E-glass*; f) *Basalto* (Fuente: FIB 2007).²⁴³

Para la utilización de estas fibras como material de refuerzo es necesario embeber las fibras anteriormente descritas en una matriz de resina, para fabricar un polímero reforzado con fibras (FRP) en forma de láminas, barras o bandas, y con distintos tipos de fibras (GFRP, CFRP, AFRP, ...). Las resinas representan desde un 30-40% del volumen total, en compuestos FRP de altas prestaciones, hasta un 75% en las inferiores; siendo su cometido el mantener todas las fibras unidas y orientadas en la posición establecida, transmitir tensión entre fibras, y protegerlas de agresiones químicas o físicas del exterior.²⁴⁴

En la fabricación de compuestos FRP pueden emplearse dos familias de polímeros: las resinas termoestables y las termoplásticas. Las resinas termoestables una vez curadas y endurecidas no pierden prestaciones ni modifican su estructura molecular hasta que, aplicada una temperatura superior a su transición vítrea, se descomponen. Por el contrario, las resinas termoplásticas pueden modificar su estructura molecular al aplicarles calor, recuperando su dureza al enfriarse; de este modo es posible cambiar su forma simplemente calentándolas. Para la fabricación de compuestos FRP destinados a uso estructural se utilizan, mayoritariamente, resinas termoestables, destacando entre ellas las recogidas en la Tabla 11:

Tabla 11. Propiedades de diferentes tipos de resinas termoestables utilizadas como matriz en compuestos FRP de uso estructural (Fuentes: Jacob et al. 2007²⁴⁵, FIB 2007²⁴⁶)

Tipo de resina	Densidad (kg/m ³)	Módulo Elasticidad (GPa)	Resistencia tracción (GPa)	Resistencia compresión (GPa)	Deformación máxima (%)	Coef. Expansión térmica (10 ⁶ /°C)	Temp. Transición vítrea (°C)	Coef. Poisson -
<i>Polyester</i>	1100-1500	1,2-4,5	34,5-104	90-250	2,0-5,0	55-100	50-110	0,35-0,39
<i>Vinylester</i>	1150-1350	3,0-4,0	65-90	127	1,0-5,0	50-75	50-170	0,36-0,39
<i>Epoxi</i>	1100-1400	2,0-6,0	55-130	100-200	1,0-1,85	45-70	50-175	0,38-0,40

²⁴³ Ibidem.

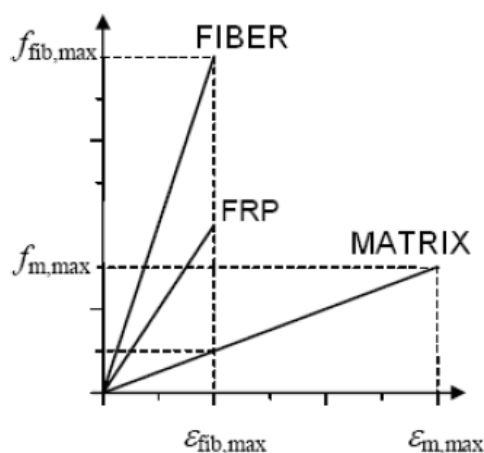
²⁴⁴ US Department of Defense (1999) *The composite materials handbook- Mil-17*, vol.2, Materials properties, US Dept. of Defense, pp. 694.

²⁴⁵ Jacob et al. (2007) Op. cit.

²⁴⁶ Fédération internationale du béton-FIB (2007) Op. cit.

2.5.4. Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de los compuestos FRP responden, de acuerdo con lo expuesto en el punto anterior, a un compromiso entre las propiedades de la fibra seleccionada, las propiedades de la resina que conforma la matriz (Fig. 13), y el volumen que representan respecto al total del refuerzo, el cual depende fundamentalmente del proceso de fabricación.²⁴⁷



a)

Fig. 13. Relación tensión-deformación de fibras, matriz y FRP resultante (fuente:CNR-DT 200/2004).²⁴⁸

En general, puede afirmarse que al aumentar el volumen ocupado por la matriz se obtienen menores prestaciones mecánicas. No obstante, la anisotropía de los compuestos de FRP (Fig. 14) permite, en función del uso final, orientar todas las fibras en una dirección principal (refuerzos unidireccionales para flexión/tracción), dos direcciones (bidireccionales para cortante) o de forma isótropa (MAT refuerzos superficiales), concentrando o distribuyendo la capacidad resistente del compuesto y modificando por tanto sus prestaciones.

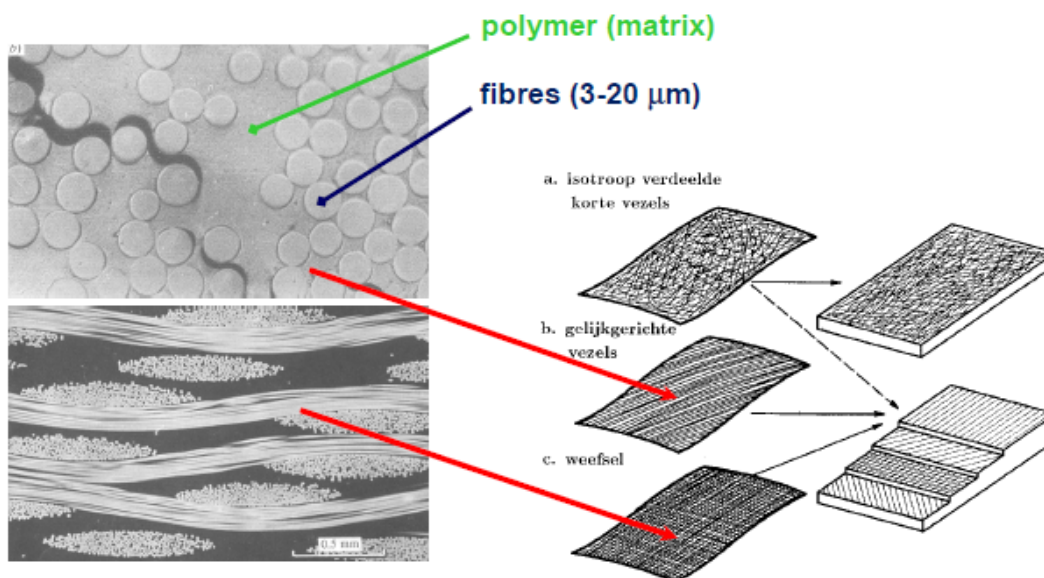


Fig. 14. Esquema de la composición de una lamina de GFRP (Fuente:Stijn Matthys 2016²⁴⁹).

²⁴⁷ AA.VV. (2004) Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati. CNR-DT 200/2004. Consiglio Nazionale delle Ricerche.

²⁴⁸ Ibidem.

²⁴⁹ Matthys, S. (2016) M11 Introduction, materials and industrial perspective. Presentation from FRP training course "Reinforcing and strengthening of structures with FRP reinforcement". University of Gent, 25-29 January.

Para el tipo de refuerzos a flexión, en torno a los cuales se desarrolla esta tesis doctoral, los compuestos FRP utilizados son siempre unidireccionales, orientando el mayor porcentaje de sus fibras en la dirección longitudinal del refuerzo. Las propiedades mecánicas de este tipo de refuerzos para laminados comerciales fabricados por pultrusionado con distintos tipos de fibras se comparan en la Tabla 12 y Fig. 15.

Tabla 12. Propiedades mecánicas típicas de refuerzos unidireccionales de GFRP, CFRP y AFRP (Fuente: FIB 2007).²⁵⁰

Propiedades	GFRP	CFRP	AFRP
	E-glass+ epoxi	Carbon HS+ epoxi	Kevlar 49 + matriz epoxi
Porcentaje de fibra [V_{fib}] (%)	55	65	60
Densidad [ρ_{mean}] (kg/m ³)	2100	1600	1380
Módulo de elasticidad longitudinal [E_o] (GPa)	39	177	87
Resistencia tracción longitudinal [$f_{t,o}$] (GPa)	1,08	2,86	1,28
Resistencia compresión longitudinal [$f_{c,o}$] (GPa)	0,620	1,875	0,335
Deformación máxima longitudinal [$\epsilon_{max,o}$] (%)	2,8	1,6	1,5
Módulo de elasticidad transversal [E_{90}] (GPa)	8,6	10,8	5,5
Resistencia tracción transversal [$f_{t,90}$] (GPa)	0,039	0,049	0,030
Resistencia compresión transversal [$f_{c,90}$] (GPa)	0,128	0,246	0,158
Deformación máxima transversal [$\epsilon_{max,90}$] (%)	0,5	0,5	0,5
Módulo elasticidad cortante [G_{medio}] (GPa)	3,8	7,6	2,2
Resistencia a cortante [f_v] (GPa)	0,089	0,083	0,049
Coefficiente Poisson [ν] (-)	0,28	0,27	0,34
Coef. de conductividad térmica [λ] (W/(m·K))	0,8-1,3	24-105	0,4
Temperatura límite de trabajo [t_{lim}] (°C)	100 (20-40%) <200 (100%)	100 (20-40%) <200 (100%)	-

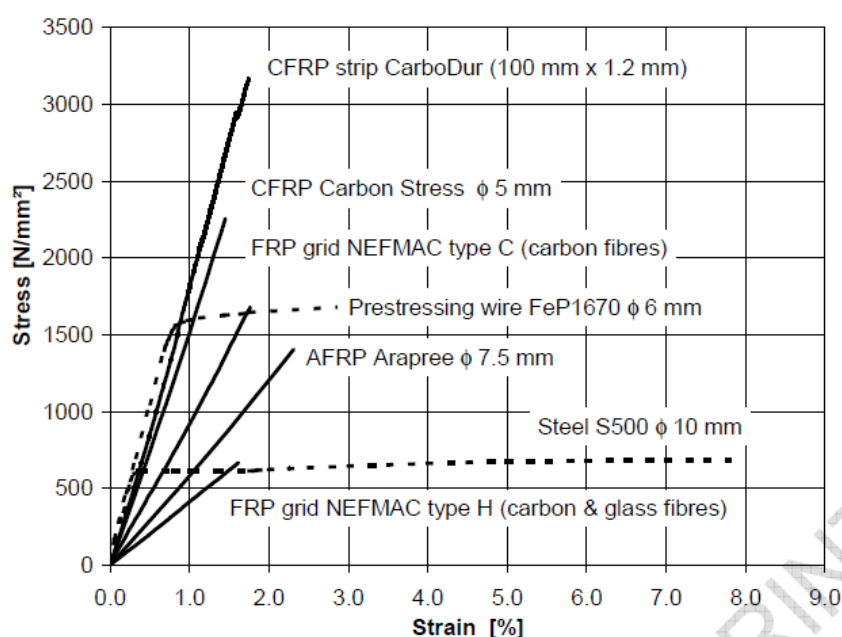


Fig. 15. Comportamiento tensión-deformación de diferentes compuestos FRP comerciales en comparación con acero estructural (Fuente: Matthys 2013)²⁵¹

2.6. Adhesivos

Los adhesivos forman una parte fundamental en el refuerzo de piezas de madera con materiales FRP, siendo necesario recurrir a adhesivos de tipo estructural que permitan garantizar una unión resistente y duradera entre madera y polímeros FRP. Este tipo de adhesivos deben garantizar una

²⁵⁰ AA.VV. (FIB) (2007) Op. cit.

²⁵¹ Matthys, S. (2013) FRP material characteristics. The international Handbook of FRP composites in civil engineering. ED. Manoochehr Zoghi, CRC Press, pp.706.

solvente transmisión de los esfuerzos previstos a largo plazo, en ocasiones incluso ante condiciones ambientales cambiantes. Esta durabilidad se ve limitada, principalmente, por tres condicionantes: ambiente (temperatura y humedad), materiales a adherir, y tensiones a la que se ve sometida ²⁵². Los fundamentos básicos que permiten la unión resistente y duradera pueden dividirse entre procesos de adhesión química y mecánica. La unión química se debe a fuerzas intermoleculares, de naturaleza principalmente electrostática, existiendo tres fenómenos químicos que permiten la adhesión. ²⁵³

- **Las fuerzas de Van der Waals**, son fuerzas intermoleculares de atracción (o repulsión) que se producen en la superficie de contacto, y que dependen del tamaño y forma de las moléculas. Su fuerza de unión es muy pequeña (aprox. 20 kJ/mol).
- **Los puentes de hidrógeno** son fuerzas electrostáticas producidas por la atracción entre un átomo electronegativo y un átomo de hidrógeno unido covalentemente a otro cargado positivamente. Su fuerza de unión es alta (aprox. 60 kJ/mol).
- **Los enlaces covalentes**, son fuerzas atómicas originadas por la polaridad de las moléculas (iones), que se producen entre las superficies a unir y los adhesivos. Estas fuerzas son responsables de la resistencia al deslizamiento entre moléculas, lo que explica la rigidez de la unión. Su fuerza de unión es intensa (aprox. 100-1200 kJ/mol).

Las uniones químicas pueden activarse sobre cualquier tipo de superficie, contribuyendo eficazmente a la resistencia de la unión. No obstante, en materiales porosos como la madera, la unión mecánica aporta una resistencia superior (Fig. 16). Al aplicar el adhesivo sobre la superficie, éste penetra entre las irregularidades, colmatando las minúsculas cavidades y fraguando en su interior, produciendo una especie de anclaje mecánico que funciona solidariamente con la madera a la que ha quedado adherida. ²⁵⁴

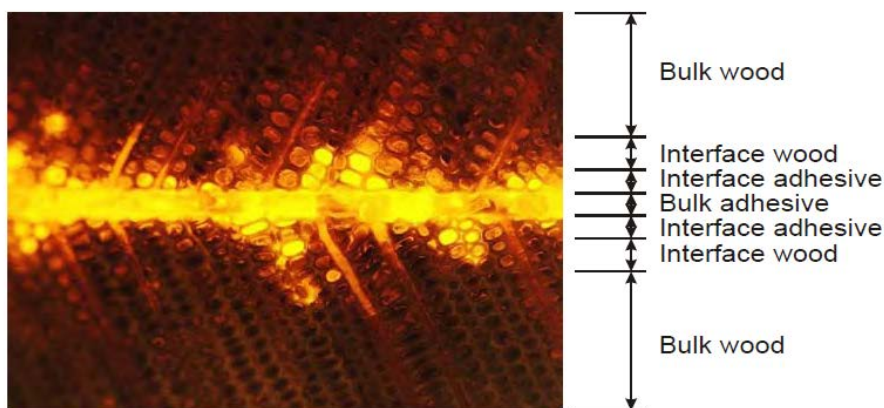


Fig. 16. Imagen obtenida mediante microscopía fluorescente de una unión de madera-PUR (Fuente: Richter 2007). ²⁵⁵

De este modo, una unión correctamente realizada puede resistir esfuerzos de tensión y cizallamiento de forma segura durante un tiempo prolongado, mostrando resistencias superiores a las que se conseguirían con una hipotética unión monolítica a base de la misma madera.

²⁵² Custodio, J.; Broughton, J.; Cruz, H (2009) A review of factors influencing the durability of structural bonded timber joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 29, pp.173-185. [DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2008.03.002].

²⁵³ Pizzi, A.; Mittal, K.L. (2003) Handbook of adhesive technology. 2nd ed. CRC Press LLC. 999pp.

²⁵⁴ Ritcher, K. (2007) Gluing technologies and properties of GLT. Grazer Timber Engineering Seminar 1. GRAHSE'07 Influencing factors on the mechanical properties of glued laminated timber. Graz University of Technology. 26 March. pp.113.

²⁵⁵ Ibidem.

2.6.1. Tipos de adhesivos

Es fundamental elegir el tipo de adhesivo que más se adecue a los materiales que ha de unir, a las tensiones a las que va a estar sometido, y a las condiciones ambientales que tendrá que soportar²⁵⁶. Aunque existen varios criterios de clasificación, el más habitual y práctico es el que distingue adhesivos en función de las condiciones ambientales que debe soportar. Las normas UNE-EN 301:2014²⁵⁷ y UNE-EN 15425:2017²⁵⁸ especifican dos tipos de adhesivos, según las condiciones ambientales: Adhesivos “tipo I”, para encolados expuestos a clases de servicio 2 y 3, y adhesivos “tipo II”, para encolados expuestos a clase de servicio 1.

Los adhesivos estructurales empleados en madera presentan distintos comportamientos en función de la clase de servicio en la que se empleen. Algunos adhesivos pueden ser mecánicamente solventes y duraderos bajo entornos de temperatura y humedad controlados, pero no ser útiles a la intemperie²⁵⁹. El exceso de humedad, las altas temperaturas o el efecto de la degradación por exposición al ambiente hace necesario delimitar la clase de servicio recomendada para los distintos adhesivos estructurales (Tabla 13).

Tabla 13. Clasificación de adhesivos estructurales para madera según el nivel de exposición ambiental (Fuente: FPL 2010).²⁶⁰

Adhesivo para uso estructural		
EN 301:2014	Clase de servicio	Tipo de adhesivo
Tipo I	Exterior Clase de uso 3.2	Phenol-formaldehído (PF)
		Resorcinol-formaldehído (RF)
		Phenol-resorcinol-formaldehído (PRF)
		Emulsión-polímero-isocianato (EPI)
		Melamina-formaldehído (MF)
		Isocianato (I)
Exterior protegido Clase de uso 3.1		Melamina-urea-formaldehído (MUF)
		Resinas epoxi (EPX)
		Poliuretanos (PUR)
Tipo II	Interior Clase de uso 1 y 2	Urea-formaldehído (UF)
		Colas de caseína
		Colas de acetato de polivinilo (PVAC)
		Etileno acetato de vinilo (EVAC)
		Poliamida

Debe considerarse la necesidad de elegir un adhesivo que permita efectuar uniones duraderas entre madera y distintos tipos de refuerzos polímeros (FRP), sin producirse incompatibilidades químicas que puedan reducir la capacidad resistente de la unión o su durabilidad, y garantizando un comportamiento mecánico solvente. De todos los adhesivos utilizados en madera, sólo una pequeña parte pueden ser utilizados para el refuerzo con FRP; siendo las resinas epoxi (EPX) las más amplia y extensamente utilizadas y, en menor grado, los Poliuretanos (PUR), y Phenol-resorcinol-formaldehído (PRF).^{261; 262}

²⁵⁶ Davis, G. (1997) The performance of adhesive systems for structural timbers. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 17, pp.247-255. [DOI: 10.1016/S0143-7496(97)00010-9].

²⁵⁷ UNE-EN 301:2014. Adhesivos. Adhesivos fenólicos y aminoplásticos para estructuras de madera bajo carga. Clasificación y requisitos de comportamiento.

²⁵⁸ UNE-EN 15425:2017. Adhesivos. Adhesivos de poliuretano de un componente para estructuras de madera bajo cargas. Clasificación y requisitos de comportamiento.

²⁵⁹ Forest Products Laboratory (2010). *Wood handbook; Wood as an engineering material*. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. pp. 508.

²⁶⁰ Ibidem.

²⁶¹ Kemmsies, M. (1999) Comparison of pull-out strengths of 12 adhesives for glued-in rods for timber structures. SP Swedish National Testing and Research Institute. Building Technology. SP Report 1999:20, pp. 30.

²⁶² Gustafsson PJ, Serrano E. (2001) *Glued-in rods for timber structures—development of a calculation model*. Report TVSM-3056. Lund University, Division of Structural Mechanics, Lund.

2.6.2. Comportamiento de las uniones adhesivas con FRP

Existen numerosos factores que influyen en la eficacia y durabilidad de la unión adhesiva estructural en madera²⁶³. Interfieren tanto factores humanos (durante el proceso de encolado), como las propias características de los materiales empleados (madera, adhesivo, refuerzo) y, especialmente, las condiciones ambientales a las que la unión va a estar expuesta (clase de servicio). Como expone Steiger (2012)²⁶⁴ en sus investigaciones sobre barras encoladas (Fig. 17); el uso de materiales polímeros FRP convierte a la unión en una cadena compuesta de madera, adhesivo y FRP, donde la madera debe ser siempre el eslabón más débil; mientras que el adhesivo y FRP deben mostrar mayores resistencias y permitir cierta ductilidad a la unión.

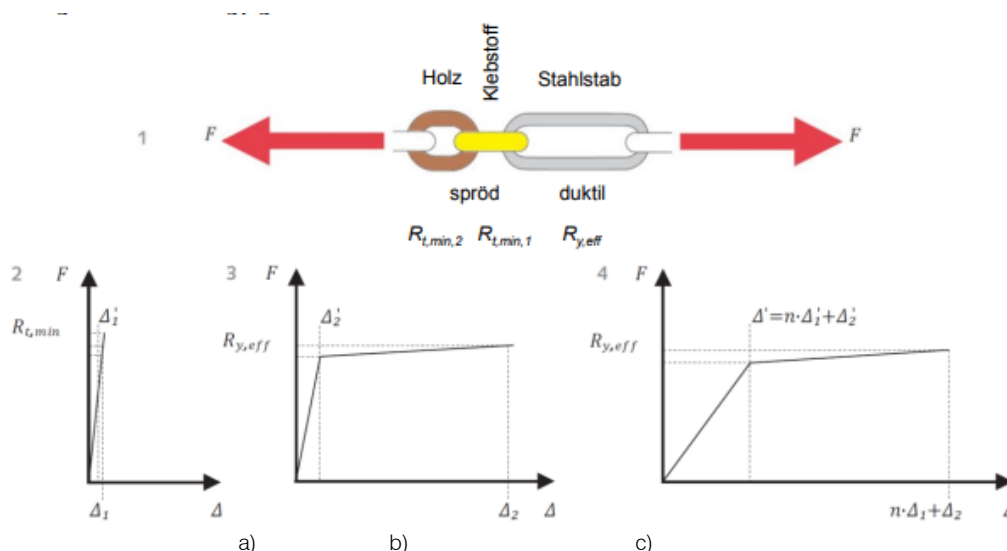


Fig. 17. Comportamiento de una unión reforzada. Gráficos de tensión deformación; a) madera; b) adhesivo estructural; c) barra FRP (Fuente: Steine 2012).²⁶⁵

A. Ambiente

El ambiente al cual se somete la unión es uno de los factores determinantes en el comportamiento de la unión y su durabilidad; pudiéndose afirmar, en general, que las propiedades de la unión decaen al aumentar la temperatura y la humedad, y a largo plazo ante tensiones excesivamente elevadas. Sin duda, la humedad es uno de los factores más importantes en el comportamiento y durabilidad de las uniones. Barbero (1994)²⁶⁶ investigó las tensiones internas que se producen entre la madera y el adhesivo por la diferente reacción de ambos materiales frente a los cambios de temperatura y humedad. Mientras que la madera es un material higroscópico (absorbe o pierde humedad), el refuerzo de FRP y el adhesivo apenas varían su contenido de humedad. Si la unión se encuentra sometida a condiciones ambientales fluctuantes, con variaciones dimensionales cíclicas, el adhesivo puede ir debilitándose progresivamente desembocando en el fallo de la unión. Estos cambios de humedad también pueden provocar alteraciones en las propiedades de los adhesivos. Así, Rolands et al. (1986)²⁶⁷ concluyen en sus investigaciones que mediante el empleo de colas epoxídicas se conseguían excelentes adhesiones con refuerzos de fibra de vidrio, carbono y aramida en condiciones secas, pero que tras ser expuestos a cambios cíclicos de humedad apenas eran capaces de soportar el 50% de la resistencia en seco. En la misma línea, Xu Jiang et

²⁶³ Custodio et al. (2009) Op. cit.

²⁶⁴ Steiger, R (2012). In Brettschichtholz eingeklebte Gewindestangen: Stand des Wissens zu einer leistungsfähigen Verbindungstechnik. *Proceedings of the 18. Internationales Holzbauforum*, Garmisch, Deutschland.

²⁶⁵ Ibidem.

²⁶⁶ Barbero, E.; Davalos, J.; Mupalle, U. (1994). Bond strength of FRP-wood interface. *Journal of reinforced plastics and composites*, 13(9), pp.835-854. [DOI: 10.1177/073168449401300905].

²⁶⁷ Rowlands, R. E.; Van Deweghe, R. P.; Laufenberg, T. L.; Krueger, G. P. (1986). Fiber-reinforced wood composites. *Wood and fiber science*, 18(1), pp. 39-57.

al. (2014)²⁶⁸ también han estudiado recientemente la degradación por efecto de las variaciones higrotérmicas en los refuerzos de GFRP y los adhesivos, determinando cuantitativamente la influencia de la temperatura y humedad en la degradación de los FRP y sus adhesivos.

La temperatura, sobre todo en valores elevados, es otro factor importante que afecta a las uniones. La norma europea EN 301:2014²⁶⁹ contempla como el límite de una temperatura “normal”, alcanzable en un adhesivo tipo I, los 50°C. Cruz et al. (2006)²⁷⁰ investigan el comportamiento de resinas epoxi en rangos de temperatura de 20 a 60°C. Los resultados muestran una caída de resistencia evidente al alcanzar la resina los 45°C. Este comportamiento depende en gran medida del tipo de adhesivo, pero ante situaciones de incendio los resultados son muy similares. Stumes (1975)²⁷¹ realiza un estudio muy completo sobre el comportamiento de uniones madera-FRP con resinas epoxi en distintas configuraciones ante situaciones de fuego. Los resultados son claros; todas las resinas analizadas pierden su capacidad resistente a temperaturas superiores a los 120°C y, lo que es más interesante, la pérdida de resistencia no es inmediata, lo que puede provocar una falsa sensación de seguridad. Continuando este tipo de ensayos con resinas epoxi, Lartigau et al. (2015)²⁷² detectan pérdidas de resistencia para las resinas ensayadas a partir de los 60°C, con una caída de rigidez del 50%, tomando los 80°C como la temperatura límite que soporta la resina.

No obstante, como muestra la investigación desarrollada por Di Maria et al. (2017)²⁷³, esta limitada temperatura para una situación de incendio puede ser suficiente si el adhesivo se encuentra protegido dentro de la madera. El estudio introduce barras de acero adheridas con resina epoxi dentro de tacos de madera de 120x160 mm (protección mínima 50 mm de madera), y se introducen en un horno hasta los 400°C, mientras se somete a la barra a una tracción constante desde el exterior. El colapso se alcanza a los 75 minutos, con una temperatura en la resina de 50°C (Fig. 18).

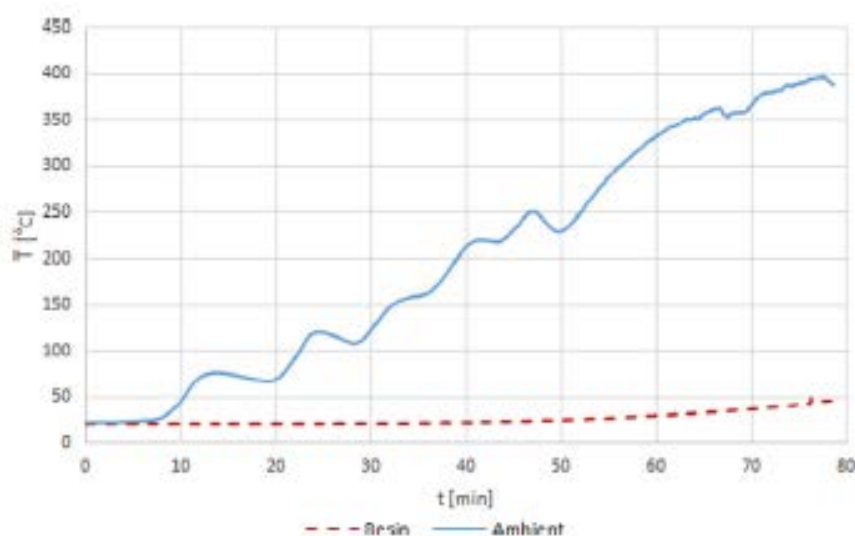


Fig. 18. Temperatura del ambiente y de la resina protegida por 50 mm de madera de abeto (Fuente: Di Maria et al. 2017).²⁷⁴

²⁶⁸ Jiang, X.; Kolstein, H.; Bijlaard, F.; & Qiang, X. (2014). Effects of hygrothermal aging on glass-fiber reinforced polymer laminates and adhesive of FRP composite bridge: Moisture diffusion characteristics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 57, pp. 49-58. [DOI: 10.1016/j.compositesa.2013.11.002].

²⁶⁹ UNE-EN 301:2014 Op. cit.

²⁷⁰ Cruz, H.; Custodio, J. (2006) Thermal performance of epoxy adhesives in timber structural repair. *9th world conference on timber engineering*, Portland, USA.

²⁷¹ Stumes, P. (1975) Testing the efficiency of Wood epoxy reinforcement systems. *Bulletin of the Association for Preservation Technology*, Vol. 7(3), pp. 2-35.

²⁷² Lartigau, J.; Coureau, J.; Morel, S.; Galimard, P.; Maurin, E (2015) Effect of temperature on the mechanical performance of glued-in rods in timber structures. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 57 pp. 79-84. [DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2014.10.006].

²⁷³ Di Maria, V.; D'Andria, L.; Muciaccia, G.; Ianakiev, A. (2017) Influence of elevated temperature on glued-in steel rods for timber elements. *Construction and Building Materials*, 147, pp. 457-465. [DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.038].

²⁷⁴ Ibidem.

B. Influencia de la especie de madera y tipo de FRP

Como ya se ha enunciado anteriormente, cada especie de madera presenta unas características singulares y propias. En general, una de las propiedades que suele tomarse como referencia en las uniones es la densidad. Se considera que la resistencia de la unión se incrementa a la par que la densidad, hasta llegar a valores de entre 700 u 800 kg/m³. Hasta estos umbrales aproximados la capacidad última de la unión viene limitada por la resistencia de la propia madera, no siendo previsible el fallo por la línea de encolado al considerarse la adhesión óptima (el adhesivo penetra fácilmente en la madera y se encaja sólidamente en su estructura)²⁷⁵. Para valores superiores de densidad, la unión sí puede fallar por la deficiente calidad de la línea de encolado. La influencia de la densidad en las uniones ha sido estudiada por Widmann et al.(2007)²⁷⁶, comparando el comportamiento ante la misma configuración de ensayo de maderas de alta y baja densidad. Los resultados muestran una diferencia de resistencia última entorno al 11% entre madera de alta y baja densidad, estableciendo la influencia de la densidad en la unión entorno a un 5%.

Para conocer el comportamiento real de las especies de madera empleadas con más frecuencia, los distintos tipos de refuerzos FRP, y los principales adhesivos estructurales, es necesario someter previamente cada tipo de unión a numerosos ensayos de laboratorio. Steiger et al. (2015)²⁷⁷ resumen los resultados obtenidos en el proyecto de investigación GIROD sobre uniones con barras FRP y madera. Distintas configuraciones de unión, tipos de madera, adhesivos o refuerzos FRP, que permiten comparar la influencia de los distintos materiales en la resistencia y durabilidad. A lo largo de la literatura científica se encuentran investigaciones sobre distintas especies de madera, siendo muy común el estudio con coníferas. Otras especies son estudiadas por Corradi et al.(2015)²⁷⁸, que realizan ensayos de *pull-off* sobre uniones con barras de CFRP y resina epoxi en dos especies de madera: abeto (*Abies alba* Mill.), y castaño (*Castanea sativa* Mill.), pudiéndose observar una diferencia en los resultados entre especies. O Cheng et al.(2015)²⁷⁹, estudian el comportamiento a cortante de uniones GFRP con madera de chopo (*Populus ussuriensis* Kom.).

C. Tensiones y geometría de la unión

Otro aspecto que condiciona la resistencia de las uniones FRP-madera es la tensión a la que se somete la unión y las características de los adhesivos. Los adhesivos más resistentes, como el epoxi, soportan una mayor energía de fractura; sin embargo, su excesiva rigidez no permite repartir homogéneamente la tensión a lo largo de toda la superficie generando concentración de tensiones en los extremos de la unión (Fig. 19) que pueden llevar al colapso de la unión por la madera ²⁸⁰. Este hecho obliga a estudiar con detenimiento las dimensiones y geometría de la unión, así como las propiedades de los adhesivos. Es muy interesante en este sentido el estudio realizado por Serrano (2001) ²⁸¹ con distintos tipos de adhesivos y su comparación a partir de la energía de fractura calculada de los gráficos de tensión-deformación obtenidos (Fig. 20).

²⁷⁵ Forest Products Laboratory (2010). Op. cit.

²⁷⁶ Widmann, R.; Steiger, R.; Gehri, E. (2007) Pull-out strength of axially loaded steel rods bonded in glulam perpendicular to the grain. *Materials and Structures* 40, pp.827-838. [DOI: 10.1617/s11527-006-9111-2].

²⁷⁷ Steiger, R.; Serrano, E.; et al. (2015) "Strengthening of timber structures with glued-in rods" *Construction and Building Materials* 97, pp.90-105.

²⁷⁸ Corradi, M.; Righetti, L.; Borri, A (2015) Bond Strength of Composite CFRP Reinforcing Bars in Timber. *Materials* 8(7), pp.4034-4049. [DOI: 10.3390/ma8074034].

²⁷⁹ Cheng, F.; Hu, Y.; Li, L. (2015) Interfacial Properties of Glass Fiber/Unsaturated Polyester Resin/Poplar Wood Composites Prepared with the Prepreg/Press Process. *Fibers and Polymers*, Vol.16 (4), pp.911-917. [DOI: 10.1007/s12221-015-0911-2].

²⁸⁰ Serrano, E (2017) Adhesive Joints –Theory (and use of innovative joints). *Timber Engineering, PhD-course 2017*. Training material. Lund University, Division of Structural Mechanics, Lund.

²⁸¹ Serrano, E. (2001) Glued-in rods for timber structures - An experimental study of softening behavior. *Materials and Structures* 34, pp. 228-234. [DOI: 10.1007/BF02480593].

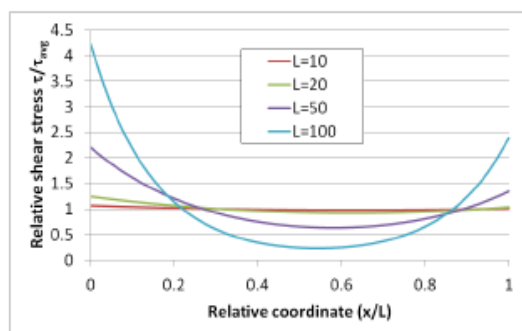


Fig. 19. Tensión de la línea de encolado en función de la longitud de la unión (Fuente: Serrano 2017).²⁸²

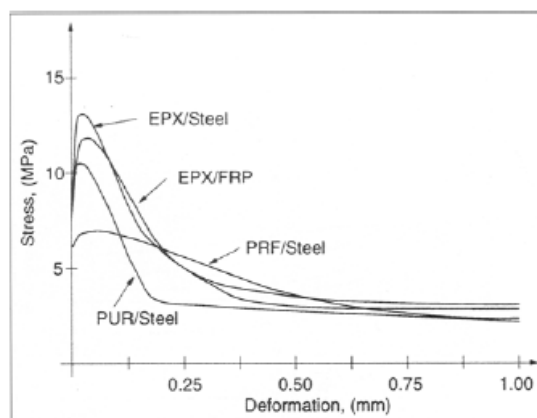


Fig. 20. Influencia del tipo de adhesivo en la respuesta de tensión-deformación (Fuente: Serrano 2001).²⁸³

Este comportamiento ha sido analizado por Lorenzis et al. (2005)²⁸⁴ en un estudio realizado con barras de CFRP encoladas con resina epoxi a tacos de madera con distintas longitudes, diámetros de barra y direcciones respecto a la fibra. Los resultados muestran un mejor comportamiento en las uniones perpendiculares a la fibra, y un comportamiento no lineal de las uniones; siendo más eficientes las uniones de menor longitud en comparación con las más largas (Fig. 21).

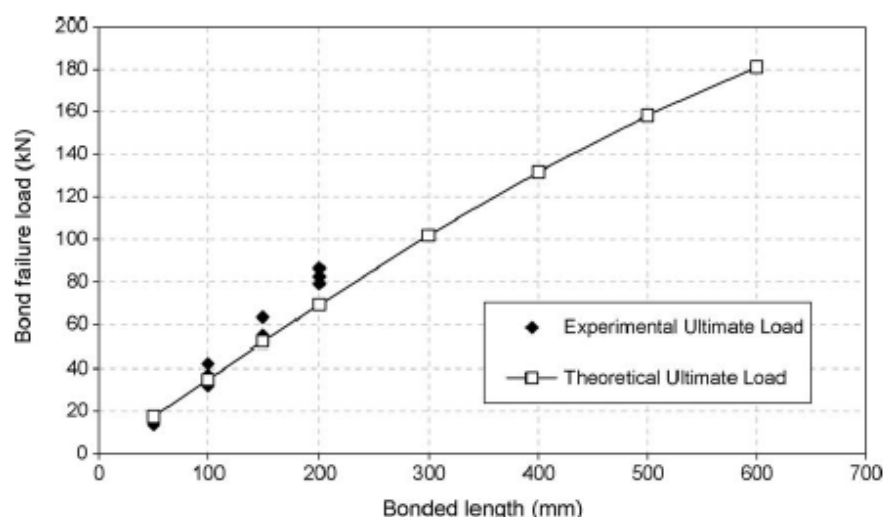


Fig. 21. Resistencia de la unión en comparación con la longitud encolada (Fuente: Lorenzis 2005).²⁸⁵

El espesor de la unión es otro de los elementos que puede influir en la resistencia. Raftery et al. (2009)²⁸⁶ han desarrollado un interesante estudio en el que se analiza la influencia del espesor del adhesivo epoxídico en la unión entre maderas de baja densidad y refuerzos de FRP. Parte de que los espesores de unión más frecuentes son de 2 mm con los que se asegura una buena adhesión entre FRP y adhesivo, y se minimizan los efectos de las tensiones de cizalladura ocasionados por las variaciones higrotérmicas. Sin embargo, la investigación de Raftery demuestra que pueden obtenerse resultados de resistencia y durabilidad aceptables con espesores de 0,5 mm, permitiendo abaratar significativamente los costes de producción de vigas de madera reforzadas.

²⁸² Serrano (2017) Op. cit.

²⁸³ Serrano (2001) Op. cit.

²⁸⁴ Lorenzis, L.; Scialpi, V.; Tegola, A. (2005) Analytical and experimental study on bonded-in CFRP bars in glulam timber. *Composites Part B: Engineering* 36, pp. 279-289. [DOI: 10.1016/j.compositesb.2004.11.005].

²⁸⁵ Ibidem.

²⁸⁶ Raftery, G. M.; Harte, A. M.; Rodd, P. D. (2009). Bonding of FRP materials to wood using thin epoxy glue lines. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29(5), pp. 580-588. [DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2009.01.004].

Otro factor que influye en la resistencia de las uniones es la geometría, configuración de la unión, y separaciones entre conexiones, cuando se utilizan varias barras o láminas sobre la misma pieza de madera. Tlustochowicz et al.(2011)²⁸⁷ estudiaron esta influencia realizando un exhaustivo repaso sobre varias investigaciones previas.

2.7. Refuerzo de la madera con fibras

La madera es un material ampliamente utilizado en la construcción de estructuras debido a sus propiedades mecánicas, ligereza y, en general, disponibilidad y fácil trabajo. Actualmente, a estas características valoradas tradicionalmente, se le añaden su carácter sostenible y reciclable, totalmente respetuoso con el medio ambiente y con un gasto energético derivado de su procesado muy inferior a otros materiales usados en estructuras. Sin embargo, su carácter natural introduce una gran heterogeneidad al material, condicionando las propiedades mecánicas no sólo al tipo de especie, sino a las condiciones de crecimiento y gestión silvícola propias de cada árbol. Estas singularidades reducen las propiedades mecánicas del material y limitan los recursos forestales aprovechables para usos estructurales.

Las limitaciones de la madera aserrada (dimensiones, presencia de singularidades, o heterogeneidad de calidad y propiedades mecánicas) se solventan, al menos parcialmente, con el desarrollo industrializado de las colas y la aparición de madera laminada en 1890²⁸⁸. A partir de este momento pueden fabricarse piezas de dimensiones, teóricamente, ilimitadas, con tablas de calidad controlada que permite una optimización racional en el uso de la madera; aunque las propiedades mecánicas de las piezas continúan limitadas a la especie de madera empleada.

En cuanto a las reparaciones y refuerzo de estructuras de madera, durante todo el s. XX ha sido común el empleo de refuerzos de acero para resolver este tipo de reparaciones, pese a que la experiencia ha demostrado que la gran diferencia de comportamientos entre ambos materiales (coef. dilatación, comportamiento frente a la humedad, comportamiento frente al fuego, ...) puede generar, bajo ciertas condiciones ambientales, daños graves no previstos.

Para dar respuesta a estas dos situaciones: reparación y refuerzos de estructuras de madera existentes, y mejora de propiedades mecánicas de la madera en piezas nuevas; en la década de 1960 se inician varios estudios sobre el desarrollo de materiales híbridos con fibras polímeras²⁸⁹. Las ventajas de estos sistemas híbridos: aumentar las propiedades mecánicas de las piezas y reducir la heterogeneidad de la madera; pueden observarse en la Fig. 22.

²⁸⁷ Tlustochowicz, G.; Serrano, E.; Steiger, R. (2011). "State-of-the-art review on timber connections with glued-in steel rods". *Materials and Structures*, 44(5), pp. 997-1020. [DOI: 10.1617/s11527-010-9682-9].

²⁸⁸ Müller, C. (2000) Holzleimbau. Laminated Timber Construction. Birkhäuser, Bremen.

²⁸⁹ Bulleit (1983) Op. cit.

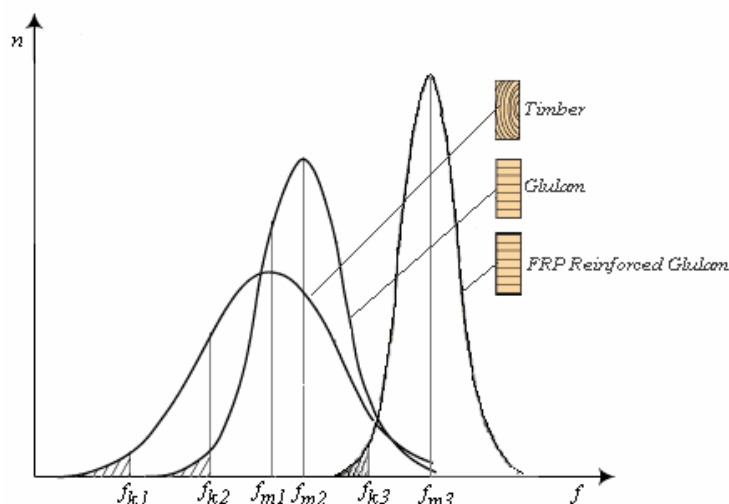


Fig. 22. Características comparadas de madera aserrada, madera laminada, y madera laminada reforzada con FRP (f_k = Valores característicos; f_m = Valores medios / n =número; f =valor) (Fuente: Alann 2006).²⁹⁰

Los materiales compuestos reforzados con fibras son de uso habitual en campos tales como aeronáutica, náutica o automoción. Por el contrario, su aplicación en la construcción se encuentra mucho más limitada, siendo difícil sustituir los materiales tradicionalmente empleados, principalmente por el desconocimiento y la desconfianza que provocan.

En los últimos años, y debido a los avances que se han producido en su fabricación, el aumento de la disponibilidad y el costo reducido de materiales compuestos a base de fibras, se ha estimulado desde las instituciones la investigación sobre el refuerzo y reparación de estructuras de madera mediante proyectos internacionales, como la COST Action FP1101 (2011-2014)²⁹¹ o la COST Action TU1207 (2014-2017)²⁹², confirmándose los materiales compuestos FRP como una alternativa eficiente y económica a los sistemas tradicionales basados en la incorporación de perfiles o platabandas metálicas a las escuadrías existentes.

Los materiales compuestos disponen de ventajas en comparación con otros materiales estructurales, aportando numerosas cualidades funcionales: ligereza, resistencia mecánica y química, mantenimiento reducido, y libertad de formas. Actualmente, en el campo de la consolidación y el refuerzo de estructuras de madera se conocen aplicaciones con éxito del refuerzo basado en la utilización de materiales compuestos de matriz polimérica reforzada con fibras FRP²⁹³, principalmente de vidrio o carbono, embebidos en formulaciones epoxídicas, pero con ciertas limitaciones en su uso, originadas por las incertidumbres todavía existentes relativas a su resistencia, deformabilidad, durabilidad y comportamiento en caso de incendio, y la falta de una normativa que ampare su uso en estructuras de madera.

2.7.1. Aplicación de FRP

El uso de refuerzos FRP en la rehabilitación y reparación de estructuras civiles está ampliamente extendido. Sin embargo, su aplicación a la fabricación de nuevos materiales de madera ha sido escasamente desarrollada²⁹⁴. La ingeniería de la madera ha basado su desarrollo desde los años

²⁹⁰ Alann (2006) Op. cit.

²⁹¹ <https://www.cost.eu/actions/FP1101/> [Consultada 05/10/2018].

²⁹² <http://tu1207.eu/> [Consultada 05/10/2018].

²⁹³ Harte et al. (2015) Op. cit.

²⁹⁴ Bakis, C.E.; Bank, L.C.; et al. (2002) Fiber-Reinforced polymer composites for construction - State of the art review, J. Compos. Constr. 6(2), pp.73–87. [DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:2(73)].

40 en productos "wood-based composites", como vigas laminadas encoladas, vigas microlaminadas (LVL), madera reconstruida (LSL y PSL), madera contralaminada (CLT), etc.²⁹⁵, sin recurrir a la utilización de nuevos materiales compuestos FRP, salvo casos aislados (FIRP® Reinforced Glulam Technology).

La introducción de refuerzos basados en polímeros con fibras (FRP) en la fabricación de vigas laminadas permite emplear maderas de bajas prestaciones mecánicas, y de especies de rápido crecimiento, para usos estructurales al aumentar la resistencia y rigidez a flexión de la sección y reducir la variabilidad de las propiedades mecánicas²⁹⁶. Además, la introducción de refuerzos FRP confiere una mayor ductilidad a los elementos estructurales, permitiendo una redistribución interna de tensiones que minimiza los efectos negativos de los nudos y otras singularidades de la madera²⁹⁷, siendo posible fabricar vigas laminadas con maderas de baja calidad o rechazo. De esta forma, estas maderas de menor coste presentan una alternativa comercial económicamente viable con secciones de menor tamaño, peso y altas propiedades mecánicas, optimizando el uso de los recursos forestales actualmente sin aplicación para usos estructurales.

Como se expone a continuación, existen múltiples precedentes de investigaciones que han estudiado la posibilidad de incrementar la resistencia de las vigas de madera mediante la incorporación de compuestos FRP^{298, 299}. De forma generalizada, estos estudios presentan como punto de partida la incorporación de materiales compuestos FRP embebidos en adhesivos, normalmente formulaciones epoxi, en el interior y/o exterior de las piezas de madera para, a continuación, efectuar el análisis de su capacidad portante y rigidez frente a ensayos a flexión. Cabe destacar, en cualquiera de los casos, que la eficacia del refuerzo inevitablemente está condicionada por la perfecta unión de los materiales que conforman el sistema: refuerzo, adhesivo y madera. Aunque existen antecedentes de refuerzos de piezas de madera con fibras de aramida y basalto, los dos tipos de materiales de refuerzo más utilizados son la fibra de vidrio y de carbono. Su tipología puede separarse entre laminados (o incluso tejidos), más utilizados en refuerzos de vigas nuevas, y las barras o varillas ampliamente utilizadas en el refuerzo de estructuras de madera en servicio.

Además del material y del tipo de refuerzo, otro aspecto decisivo examinado en estos trabajos es la situación dentro de la sección de madera en la que se dispondrá dicho refuerzo. La madera es frágil a tracción mientras que puede exhibir un comportamiento plástico en la zona de compresión. La resistencia a la tracción es con frecuencia menor que el límite de plastificación en compresión, lo que determina que una viga en flexión fracase antes en la zona traccionada. Ello sin tener en cuenta, además, la pérdida de resistencia por la presencia de nudos en la zona traccionada. Por esta razón, la disposición del mismo refuerzo FRP en una u otra situación de la pieza a reforzar puede variar significativamente la respuesta del mismo.

En la Fig. 23 se resumen las principales disposiciones de refuerzo tratadas en la bibliografía, diferenciándose 4 familias; por un lado refuerzos piezas existentes con láminas exteriores (REL), láminas interiores (RIL), o barras interiores (RIB); y por otro lado los refuerzo de piezas de nueva fabricación (NIL):

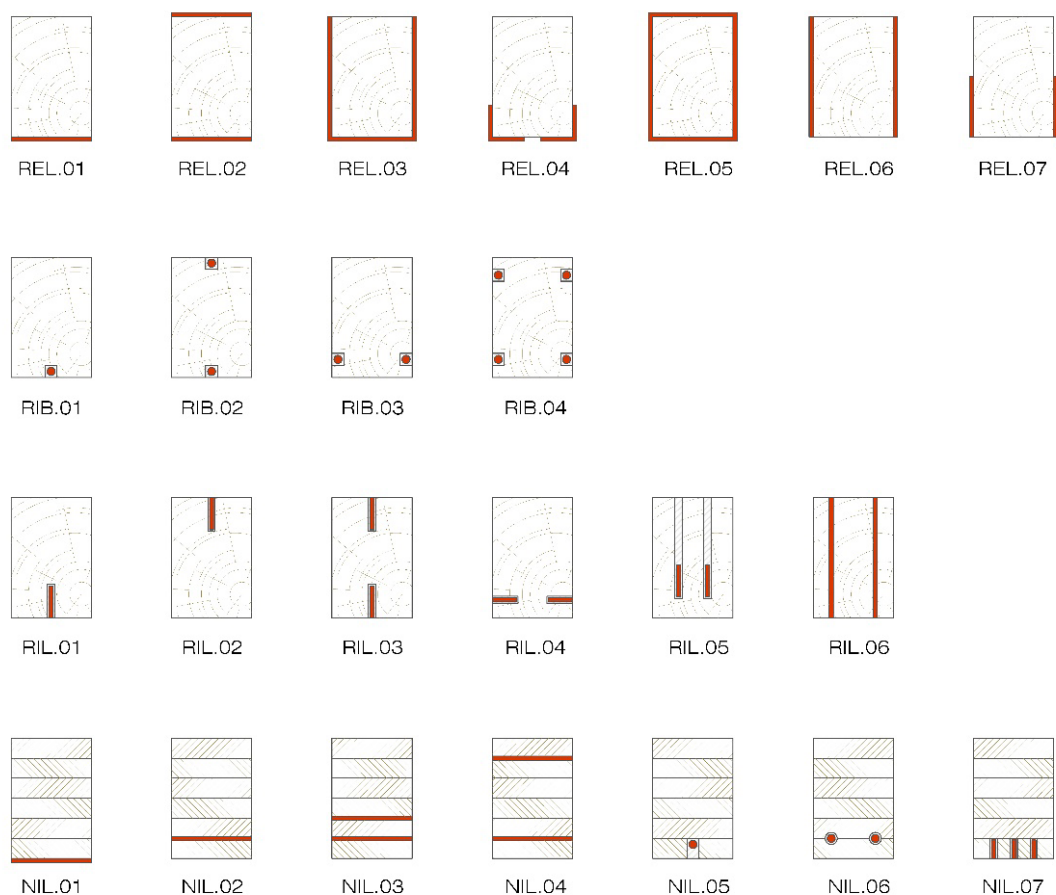
²⁹⁵ Thelandersson, S.; Larsen, H. J (2003) *Timber engineering*. Ed. John Wiley & Sons. pp. 429.

²⁹⁶ Parvez, A (2004) *The reinforcement of timber for structural applications and repair*. PhD thesis, Dept Mech Eng. University of Bath.

²⁹⁷ Jacob, J.; Garzon, L. (2007) Flexural strengthening of glued laminated timber beams with Steel and carbon fiber reinforced polymers. Master's Thesis, Chalmers University of Technology, pp. 151.

²⁹⁸ Bulleit (1983) Op. cit.

²⁹⁹ Harte et al. (2015) Op. cit.



REL: Refuerzo piezas existentes laminado externo. RIB: Refuerzo piezas existentes barra interna. RIL: Refuerzo piezas existentes laminado interno. NIL: Nueva fabricación con refuerzo interno.

Fig. 23. Resumen de las distintas disposiciones de refuerzo estudiados y recogidos en el estado del arte de esta tesis.

Teniendo en cuenta estos tres parámetros citados: material, geometría del refuerzo y disposición en la sección, se recogen en los siguientes apartados las distintas tipologías de sistemas para el refuerzo de vigas de madera con materiales compuestos FRP.

2.7.2. Fibra de vidrio GFRP

A. Tejidos y laminados

Los primeros ensayos de refuerzo de piezas de madera a flexión se inician en la década de los años '60, siendo Theakston (1965)³⁰⁰ uno de los primeros investigadores en trabajar sobre esta temática. En un trabajo realizado en 1965, Theakston realiza una serie de ensayos a flexión con un total de 38 vigas de madera laminada encolada de abeto Douglas (*Pseudotsuga menziesii* Mirb.) y pino blanco (*Pinus strobus* L.) de pequeñas dimensiones (aprox. 40x60x1200 mm) reforzadas con fibra de vidrio³⁰¹. Los refuerzos los realizan con distintos tipos de tejido de fibra de vidrio E-Glass aplicados sobre las piezas en distintas disposiciones y cuantías del 5-10%, empleando resina epoxi para embeber y pegar los tejidos de fibra a las vigas. El refuerzo de las piezas permite aumentar la resistencia última de las piezas de forma apreciable, llegando a alcanzarse mejoras de hasta el

³⁰⁰ Theakston, F.H. (1965) A Feasibility Study for Strengthening Timber Beams with Fiberglass. *Canadian Agricultural Engineering* January. Pp. 17-19.

³⁰¹ Ibidem.

39%. Este y otros trabajos realizados en las décadas de 1960 a 1980 ³⁰² serán el inicio de la investigación en el uso de fibras de refuerzo FRP aplicadas al refuerzo de estructuras de madera. Si bien, las experiencias desarrolladas en esta época se centran, por lo general, en experiencias de laboratorio sobre piezas de pequeñas dimensiones; no siendo hasta la década de los '90 cuando el número de estudios de vigas de madera reforzada con FRP y su aplicación en estructuras se incrementa de modo sustancial.

Un estudio muy completo sobre la tecnología de compuestos FRP y su aplicación en refuerzos de madera fue realizado por Rowlands et al. (1986) ³⁰³. Analiza 7 tipos distintos de fibras comerciales (Fibra de vidrio, carbono y aramida), 10 adhesivos comerciales (EPX, RF, PRF), y el comportamiento entre ambos. Posteriormente, ensaya vigas laminadas de pequeñas dimensiones (aprox. 20x25x635 mm) de madera de abeto Douglas (*Pseudotsuga menziesii* Mirb.) reforzadas con GFRP. Los resultados muestran que, con una ratio de refuerzo GFRP del 18% en la zona traccionada, se obtienen mejoras superiores al 20% en rigidez, y 45% en resistencia última.

Poco después, Moulin et al. (1990) ³⁰⁴ realizan ensayos con vigas laminadas de chopo (*Populus x euramericana* "Robusta"; *Populus x euramericana* I-214) de pequeñas dimensiones (40x50x820 mm) reforzadas con una y dos capas de GFRP, dispuestas en la zona traccionada (Fig. 23 Tipo NIL01). Estas vigas se comparan con un lote de vigas laminadas sin refuerzo. El refuerzo GFRP utilizado es un tejido de fibra de vidrio unidireccional (SOTIVER UC 420-791 de espesor 0,55 mm) con un módulo de elasticidad medio de 40.200 MPa y una tensión de rotura de 910 MPa. Los resultados obtenidos confirman el aumento de rigidez y capacidad de carga de las piezas reforzadas en comparación con las piezas testigo, con aumentos en el módulo de elasticidad de la sección de entre el 10-20%. Además, se demuestra la idoneidad de este tipo de refuerzos para su uso en refuerzo de vigas laminadas de especies de rápido crecimiento y bajas prestaciones mecánicas.

Continuando esta línea de investigación, Dagher et al. (1996) ³⁰⁵ realizan una investigación sobre los beneficios de reforzar con FRP vigas laminadas fabricadas con especies de madera infrautilizadas para fines estructurales. Realizan ensayos a flexión vigas de madera de abeto oriental (*Tsuga canadensis* L.) reforzadas con GFRP en la zona de tracción (Fig. 23 Tipo NIL02) y vigas sin refuerzo de dimensiones estructurales (aprox. 76x305x4.880 mm). Así mismo, se utilizan tres calidades de madera diferente para la fabricación de las vigas (*Low; Medium; High*), con ratios de refuerzo GFRP de 0,3 % al 3,1%. Los resultados obtenidos muestran un buen comportamiento de las piezas reforzadas, con valores resistentes superiores a las piezas sin reforzar entre un 24-51%, y mejoras de rigidez de entre el 25-37%. Los mayores incrementos en resistencia se obtienen con las vigas reforzadas de maderas de menor calidad, las cuales alcanzaron valores semejantes a piezas comerciales.

Similares resultados fueron obtenidos por Hernández et al. (1997) ³⁰⁶, los cuales estudiaron el comportamiento de 12 vigas de madera laminada de Yellow poplar (*Liriodendron tulipifera* L.), de dimensiones estructurales (aprox. 100x330x6.100 mm), reforzadas con láminas rígidas de fibra de vidrio (E=40GPa) de 4,7 mm de espesor situadas en la cara inferior (tracción) de la sección y en

³⁰² Bulleit (1983) Op. cit.

³⁰³ Rowlands et al. (1986) Op. cit.

³⁰⁴ Moulin, J.M.; Pluvinage, G.; Jodin, P. (1990) FGRG: Fiberglass reinforced glulam-A new composite. *Wood Sci. Technol.* 24. pp.289-294. [DOI: 10.1007/BF01153561]

³⁰⁵ Dagher, H.J.; Kimball, T.E.; Shaler, S.M.; Abdel-Magid, B (1996) Effect of FRP Reinforcement on Low Grade Eastern Hemlock Glulam. *National. Conference Wood Transp. Struct.*, General Technical Report No. FPL-GTR-96, Madison, WI:USA. pp. 207-214.

³⁰⁶ Hernandez, R., Davalos, J.F. Sontii, S., Kim, Y., Moody, R.C. (1997) *Strength and Stiffness of Reinforced Yellow-Poplar Glued-Laminated Beams*. Research Paper FPL-RP-554. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI: U.S. pp.30.

ambas (tracción + compresión), a lo largo de toda la viga, tal y como se representa en la Fig. 24. Las bandas de fibra de vidrio se unieron a la madera mediante un adhesivo de resorcinol formaldehído, y con resina epoxi entre sí en refuerzos con doble laminado.

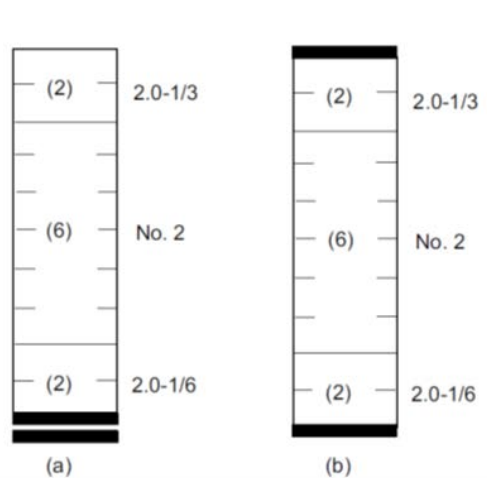


Fig. 24. Situación de laminados de refuerzo en la sección de madera (Fuente: Hernández et al. 1997).³⁰⁷

Con un refuerzo GFRP del 3%, se obtuvieron incrementos del 18% en la rigidez a flexión de las vigas y del 26% en la resistencia última respecto de las vigas no reforzadas. A tenor de los resultados obtenidos, los autores sugirieron que el refuerzo colocado en la zona inferior traccionada de la sección incrementa de forma eficiente la resistencia a flexión, mientras que la incorporación de la misma cuantía de laminado en la parte superior e inferior aumenta la rigidez a flexión de la viga, pero la mejora no resulta lo suficientemente significativa como para compensar los costes de material y mano de obra asociados.

Este tipo de refuerzos también ha sido analizado sobre madera aserrada. Johns y Lacroix (2000)³⁰⁸ realizan una comparación entre refuerzos de CFRP y GFRP sobre vigas de madera aserrada SPF (*S-abeto*, *P-pino* y *F-picea*) de uso comercial y varias calidades. En los ensayos se emplean un total de 100 vigas de madera aserrada de conífera de pequeñas dimensiones (aprox. 39x89x1.500 mm). Estas vigas se refuerzan bajo tres disposiciones distintas, concretamente con 25 vigas sin refuerzo, 25 vigas con un refuerzo a tracción de 2 capas de fibra de carbono ($E=230\text{GPa}$, ratio $<1\%$; longitud 1.000 mm), 25 vigas con un refuerzo a tracción de 2 capas de fibra de carbono ($E=230\text{GPa}$, ratio $<1\%$; longitud 1.400 mm), 25 vigas con un refuerzo en forma de U de 2 capas de fibra de vidrio ($E=25,7\text{GPa}$, ratio $<10\%$; longitud 1.400 mm) (Fig. 25). Los tejidos de refuerzo se adhieren a las piezas por el exterior con resina epoxi. Los resultados obtenidos muestran los incrementos en resistencia alcanzados, que varían del 40 al 100% en función del tipo de refuerzo empleado. Puede explicarse este aumento tan elevado en la rigidez de las secciones por el efecto de unión y confinamiento generado por la fibra, la cual además de incrementar la resistencia, minimiza el efecto negativo que producen las singularidades de la madera.

³⁰⁷ Ibidem.

³⁰⁸ Johns, K.C.; Lacroix, S. (2000) Composite reinforcement of timber in bending. *Canadian Journal of Civil Engineering*; 27 (5) pp.899–906. [DOI: 10.1139/100-017].

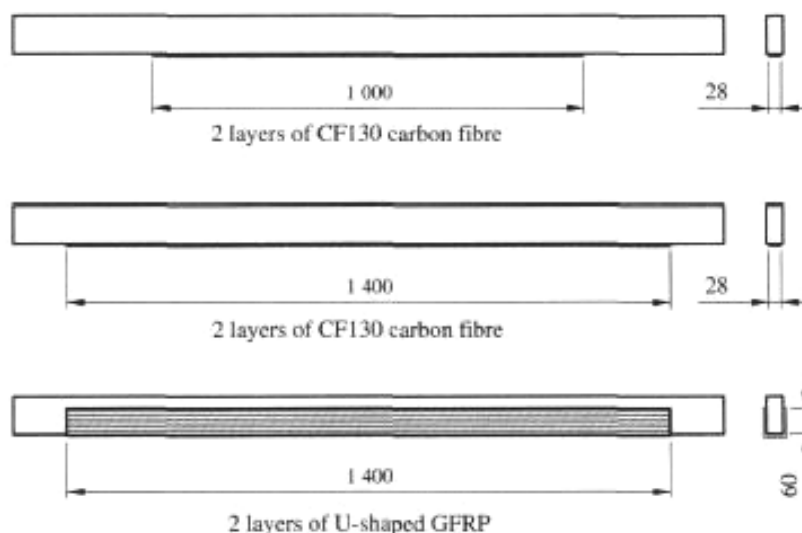


Fig. 25. Disposición de los refuerzos ensayados (Fuente: Johns y Lacroix 2000).³⁰⁹

Partiendo de los resultados de otros trabajos de investigación precedentes, Fiorelli y Alves (2003)³¹⁰ realizaron un estudio experimental sobre el refuerzo de vigas de madera de la especie "*Pinus Caribea var. Hondurensis* Morelet", de dimensiones estructurales (aprox. 60x120-160-x3.000 mm) reforzadas con tejido de fibra de vidrio (ratio 1% al 3% de la sección, $E=70$ GPa) y fibra de carbono (ratio 0,4%; $E=180$ GPa) pegadas con resina epoxi por el exterior en la cara traccionada de la viga (Fig. 23 Tipo NIL01). El proceso de laminado para unir la fibra a la madera fue manual, aplicando el adhesivo sobre la superficie de las fibras, para posteriormente adherirlo a la sección de madera. Los resultados obtenidos en las pruebas experimentales revelaron un aumento porcentual en la rigidez de las vigas que se situaba entre el 15 y 30% respecto de sus equivalentes sin refuerzo. En una de las muestras donde el porcentaje de refuerzo de fibra de vidrio respecto de la sección se aumentó hasta el 3%, el incremento de la rigidez a flexión de la viga alcanzó valores del 58%. Los resultados experimentales fueron concordantes con los planteados en el modelo teórico, realizado a partir de hipótesis formuladas en estudios previos³¹¹, corroborando de esta forma su validez. Entre las conclusiones, ha de subrayarse la repetición de un fenómeno común en el modo de fallo de la viga reforzada: inicialmente el fracaso se produjo en la zona comprimida de la sección, por encima del eje neutro. Inmediatamente después, la viga rompió a tracción y/o cortadura, observando en este caso, que las vigas de madera reforzadas con fibras presentaron una mayor ductilidad en comparación con las no reforzadas, lo que mejoraba de forma considerable su comportamiento estructural.

En su tesis doctoral, Alam Parvez (2004)³¹² dedicó parte de su investigación a comparar el comportamiento refuerzos internos de GFRP colocados en distintas disposiciones (Fig. 26). Para ello emplea piezas de pequeña escuadría (51x110x1.900 mm) de madera microlaminada (LVL), sobre las cuales realiza diversos cajeados para introducir los refuerzos GFRP, adheridos con resina epoxi. Obtiene mejoras en la rigidez del 14-34%, siendo el más eficaz el refuerzo de la Phase I, con incrementos en la resistencia del 25-27%.

³⁰⁹ Ibidem.

³¹⁰ Fiorelli, J., Alves Dias, A. (2003). Analysis of the Strength and Stiffness of Timber Beams Reinforced with Carbon Fiber and Glass Fiber. *Material Researches* 6 (2), pp.193-202. [DOI: 10.1590/S1516-14392003000200014].

³¹¹ Lindyberg, R.F (2000) *ReLAM: A nonlinear stochastic model for the analysis of reinforced glulam beams in bending*. Ph.D. Dissertation, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Maine, Orono, ME.

³¹² Parvez (2004). Op. cit.

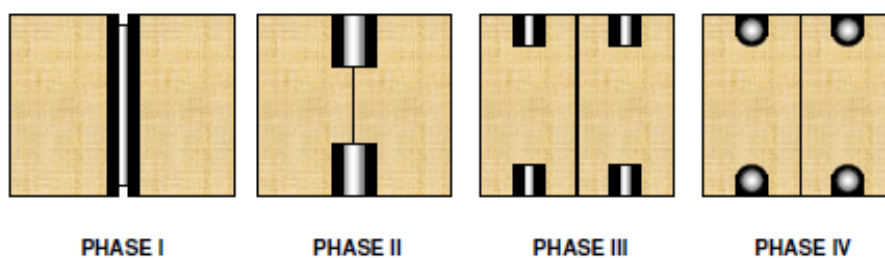


Fig. 26. Diferentes disposiciones de refuerzo utilizadas por Alam Parvez (2004).³¹³

Continuando esta línea, Motlagh et al. (2008)³¹⁴ realizan una investigación sobre vigas recuperadas de edificios antiguos cuyo objetivo se centra en comparar las mejoras que se producen al introducir láminas de fibra de vidrio (GFRP) en diversas posiciones (Fig. 23 Tipo REL01-REL02). Los ensayos se realizan con un total de 50 piezas limpias de "*Celtis occidentalis* L." de pequeñas dimensiones (aprox. 25x25x410 mm) deshiladas de vigas de derribo con una antigüedad en servicio de unos 150 años. Sobre estas piezas se adhieren, en distintas disposiciones (superior-inferior) y número de capas, refuerzos de fibra de vidrio con resina epoxi. Los resultados obtenidos muestran, en general, una mejora de la resistencia de las piezas reforzadas con GFRP en comparación con las piezas testigo sin reforzar (13-31%). La rigidez por el contrario no presenta una mejoría significativa, alcanzando porcentajes de mejora inferiores al 10%.

En el año 2009, Parvez et al. (2009)³¹⁵ realizaron una investigación cuyo objetivo principal se centraba en la búsqueda de estrategias de reparación para vigas de madera en estructuras preexistentes. Para ello, estudiaron el refuerzo a flexión de 36 vigas de madera de abeto (*Picea abies* L.) de clase resistente C16 y dimensiones estructurales (aprox. 93x96x1.900 mm), a las que inicialmente provocaron la ruptura mediante mecanismos de flexión, simulando daños estructurales, para a continuación reforzarlas con bandas de fibra de vidrio, carbono y acero ubicadas en ranuras perfiladas en la cara superior, inferior, o ambas de las vigas fracturadas (Fig. 23 Tipo RIL01 a RIL03). Las vigas reforzadas se fabricaron mediante la unión encolada de dos secciones con junta vertical a partir de listones cortados horizontalmente de la madera original para ensayarlas a flexión hasta su destrucción. De este modo pueden comparar directamente sus propiedades mecánicas respecto de las de la viga original, analizando la influencia de la situación del refuerzo con respecto a los parámetros de rigidez y resistencia resultante de las vigas reparadas. Las dimensiones de las ranuras donde se dispuso el laminado de refuerzo fueron de 20 mm de profundidad y 12,7 mm de ancho (el ancho efectivo de la fibra de vidrio era de 4 mm). Las bandas de refuerzo se insertaron verticalmente en los surcos, que se rellenaron con una resina epoxi. Los mayores incrementos se obtienen con el refuerzo doble (sup. + inf.) con un aumento de la rigidez del 12-14%, y en resistencia del 50-61%.

Con el objetivo de fabricar vigas laminadas nuevas de prestaciones mejoradas, Ribeiro et al. (2009)³¹⁶ realizaron un estudio sobre refuerzo de vigas laminada de pino pinaster (*Pinus pinaster* Ait.) de pequeñas dimensiones (50x50x760 mm) con láminas de fibra de vidrio GFRP, colocadas en la zona de tracción de las piezas con ratios de refuerzo de 1,2-4,2% (Fig. 27). Los resultados obtenidos muestran un aumento en rigidez del 20,7-43,7%, y un aumento en resistencia del 25,2-32,4%.

³¹³ Ibidem.

³¹⁴ Motlagh, Y.B.; Gholipour, Y.; Ebrahimi, G.; Hosseinalibeygi, M. (2008) Experimental and Analytical Investigations on Flexural Strengthening of Old Wood Members in Historical Building with GFRP. *Journal of Applied Sciences* Vol 8(2), pp.3887-3894. [DOI: 10.3923/jas.2008.3887.3894]

³¹⁵ Parvez, A.; Ansell, M.; Smedley, D. (2009). Mechanical repair of timber beams fractured in flexure using bonded-in reinforcements. *Composites Part B: Engineering*, 40, pp. 95-106. [DOI: 10.1016/j.compositesb.2008.11.010].

³¹⁶ Ribeiro, A.; De Jesús, A.; Lima, A.; Lousada, J. (2009) Study of strengthening solutions for glued-laminated wood beams of pine wood maritime. *Construction and Building Materials* 23, pp. 2738-2745. [DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.02.042].

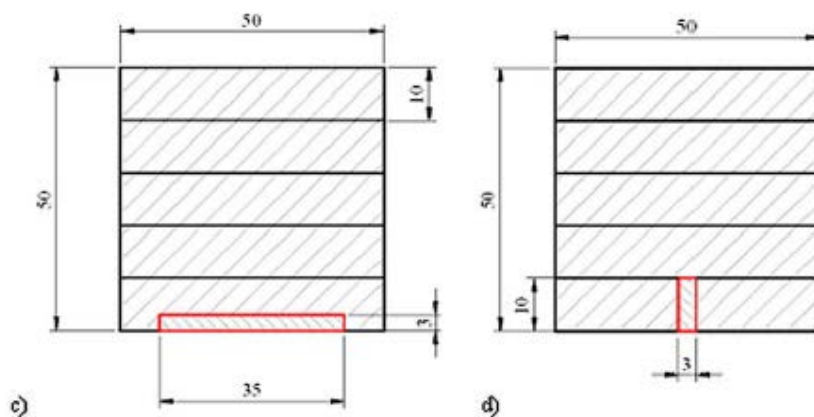


Fig. 27. Disposición del refuerzo sobre la viga laminada (Fuente: Ribeiro et al. 2009).³¹⁷

Continuando con esta idea, Raftery y Harte (2011)³¹⁸ realizaron un programa experimental basado en la fabricación y refuerzo de vigas laminadas de madera de abeto (*Picea sitchensis* Carr.) mediante la incorporación de laminados de fibra de vidrio tipo Fulcrum ($E=45\text{GPa}$). Los ensayos se basan en un total de 26 vigas laminadas de madera de dimensiones estructurales (aprox. $96\times 190\times 4.200\text{ mm}$), a las que se añade en la zona de tracción un refuerzo de fibra de vidrio (ratio 1,7-2%) con resina epoxi. Adicionalmente, en otras configuraciones de ensayo se añade una tabla de sacrificio suplementaria, con el fin de proteger el refuerzo del fuego (Fig. 28).

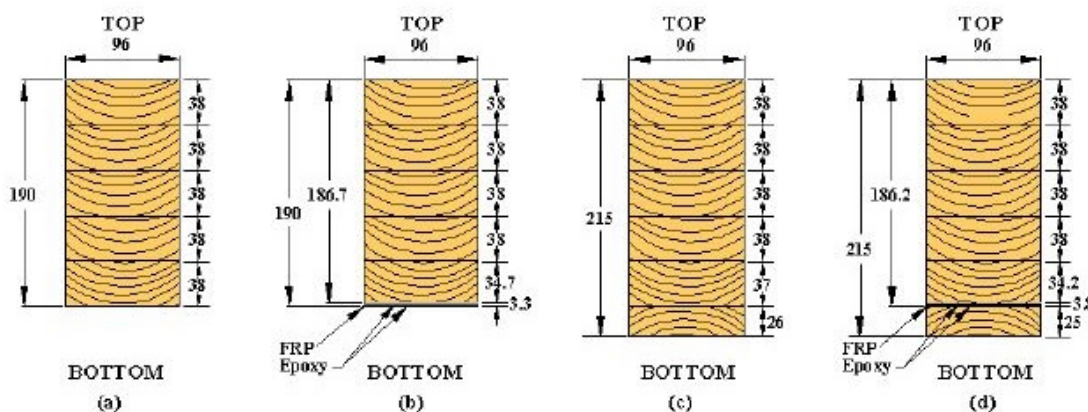


Fig. 28. Configuraciones de ensayo (Fuente: Raftery y Harte 2011).³¹⁹

(a) Sin refuerzo 190mm canto, (b) reforzadas 190mm canto, (c) sin refuerzo 215 mm canto, (d) reforzada 215 mm canto.

Los resultados obtenidos muestran una mejora en la rigidez de las piezas reforzadas en comparación con las piezas testigo sin reforzar. La rigidez de las piezas de canto 190 mm reforzadas presentan un incremento medio de un 12%. La rigidez en las piezas de 215 mm, en comparación con las piezas sin refuerzo se incrementa en un 10%.

Con idéntica configuración, Fiorelli y Alves (2011)³²⁰ presentan un artículo basado en un programa experimental realizado con vigas laminadas de "*Pinus caribea var. hondurensis* Morelet" reforzadas internamente con tejido de fibra de vidrio. En total se ensayan 6 vigas laminadas de dimensiones estructurales (aprox. $70\times 300\times 4.000\text{ mm}$), de las cuales 2 son vigas testigo sin refuerzo, el resto de las vigas se refuerzan con GFRP en ratios de 1 y 3%, pegadas con resina epoxi y protegidas del fuego por la última lámina de madera (Fig. 23 Tipo NIL02). Los resultados obtenidos muestran una

³¹⁷ Ibidem.

³¹⁸ Raftery, G.M.; Harte, A.M. (2011) Low-grade glued laminated timber reinforced with FRP plate. *Composites Part B: Engineering*, 42, pp. 724–735. [DOI: 10.1016/j.compositesb.2011.01.029].

³¹⁹ Ibidem.

³²⁰ Fiorelli, J.; Alves Dias, A. (2011) Glulam beams reinforced with FRP externally bonded: theoretical and experimental evaluation. *Materials and Structures* 44(8), pp.1431–1440. [DOI: 10.1617/s11527-011-9708-y].

mejora en el comportamiento de las vigas reforzadas, con una menor variabilidad en los valores y forma de rotura, alcanzando mejoras del 13-42% en rigidez, y del 53-104% en momentos de rotura.

Similares investigaciones son realizadas sobre vigas laminadas por Yang et al. (2016)³²¹. Se utilizan piezas de tamaño estructural (aprox. 75x300x6.000 mm) de madera de abeto Douglas (*Pseudotsuga menziesii* Mirb.), con ratios de refuerzos de 0,5-1,8%. Los mejores resultados se obtienen con la configuración C (Fig. 29), con una mejora en resistencia del 56,3%, y de rigidez del 27,5%.

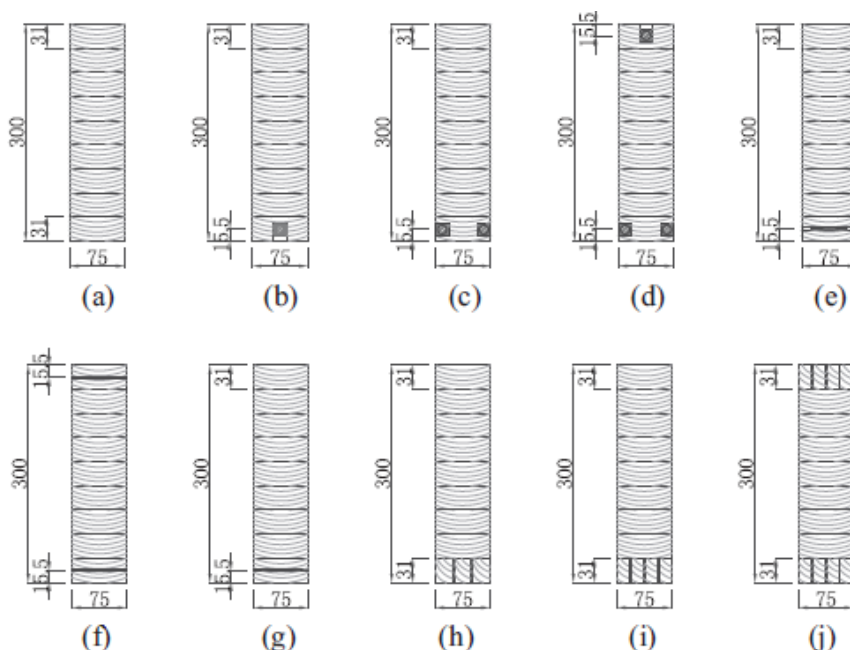


Fig. 29. Configuraciones de refuerzo de vigas laminadas (Fuente: Yang et al. 2016).³²²

Este mismo tipo de refuerzo, utilizado para mejorar las prestaciones mecánicas de madera de rápido crecimiento es utilizado por Nadir et al. (2016)³²³. Emplean madera del árbol del látex (*Hevea brasiliensis* Müll. Arg.) de pequeñas dimensiones (aprox. 40x60x900 mm) reforzada con tejido GFRP en ratios de 1,6-3% (Fig. 23 Tipo REL01). Las mejoras en resistencia superan el 40%, mientras que las mejoras obtenidas en rigidez alcanzan el 26%.

Un método alternativo a los refuerzos pasivos de FRP, es el pretensado de los refuerzos (Fig. 23 Tipo REL01-RIB01) durante el curado del adhesivo. Kliger et al. (2016)³²⁴ realizan un interesante estudio en esta línea, donde puede compararse sistemas y métodos de pretensado. Se alcanzaron mejoras de resistencia del entorno del 95% para GFRP pretensados, en comparación con el 38% en esos mismos refuerzos pasivos. No obstante, esta técnica implica unos costes adicionales importantes, y un aumento en la complejidad de la colocación del refuerzo que no es aplicable a todos los casos.

³²¹ Yang, H.; Liu, W.; Lu, W.; Zhu, S.; Geng, Q. (2016) Flexural behavior of FRP and steel reinforced glulam beams: Experimental and theoretical evaluation. *Construction and Building Materials*, 106, pp.550-563. [DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.135].

³²² Ibidem.

³²³ Nadir, Y.; Nagarajan, P.; Ameen, M.; Arif, M. (2016) Flexural Stiffness and Strength Enhancement of Horizontally Glued Laminated Wood Beams with GFRP and CFRP Composite Sheets. *Construction and Building Materials* 112, pp. 547–55. [DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.133].

³²⁴ Kliger, R.; Haghani, R.; Brunner, M.; Harte, A.; Schober, K.U. (2016) Wood-based beams strengthened with FRP laminates: improved performance with pre-stressed systems. *European Journal of Wood and Wood Products*, 74(3), pp.319-330. [DOI: 10.1007/s00107-015-0970-5].

Otra línea de investigación alternativa al uso tradicional de refuerzos FRP adheridos es la iniciada por Corradi et al. (2016)³²⁵, que investiga la incorporación de refuerzos reversibles con láminas GFRP atornilladas. Utilizan vigas de tamaño estructural (aprox. 200x200x4.000 mm) de abeto (*Picea abies* L.), con refuerzos externos de láminas rígidas GFRP en ratios de 1,9-3,8%. La conexión mecánica se realiza repartida a lo largo de toda la lámina, alcanzando incrementos de resistencia superiores al 58,9%, y de rigidez superiores al 98,9%. Posteriormente, los mismos autores (2018)³²⁶ continúan con este estudio sobre el refuerzo de vigas mediante la incorporación de refuerzos GFRP atornillados sólo en el extremo del refuerzo a la cara inferior (Fig. 30). Para ello, utilizan vigas de tamaño estructural (aprox. 95x95x2.000 mm) de madera de roble (*Quercus robur* L.) y abeto (*Picea abies* L.), colocando láminas rígidas gruesas de GFRP con ratios de refuerzo del 3,8 al 6,4%. Este sistema permite aumentos significativos de la resistencia, con mejoras del 33-79%. Sin embargo, la falta de conexión entre refuerzo y viga no permite limitar adecuadamente la flecha, obteniéndose menores porcentajes de mejora en el módulo de elasticidad, del 18-49%. En general, este tipo de refuerzo reversible minimiza los resultados potenciales de aportación de rigidez del refuerzo adherido, condicionando también la ductilidad y cosido de singularidades de la madera.

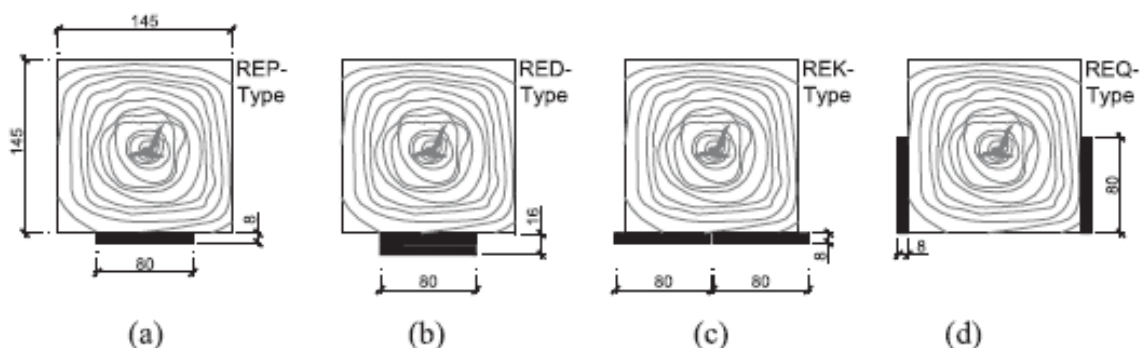


Fig. 30. Tipos de refuerzo GFRP a flexión utilizados por Corradi et al. (2018).³²⁷

B. Barras o varillas

Como alternativa a los tejidos o láminas, los métodos de refuerzo de vigas de madera mediante barras GFRP, consisten en la mayor parte de los casos en la disposición de varillas dentro de perforaciones o ranuras previamente realizadas en la sección de madera a las que se envuelve con un adhesivo que sirva de enlace y sea capaz de transferir los esfuerzos entre los dos materiales. Generalmente, este formato de GFRP suele utilizarse preferentemente en el refuerzo de piezas en servicio^{328, 329}, aunque también puede utilizarse en la fabricación de piezas nuevas. En este sentido, en el año 2002 se inicia un proyecto de investigación europeo titulado "GIROD", dedicado a la investigación sobre el empleo de barras FRP en estructuras de madera, su comportamiento y posibles mejoras.³³⁰

³²⁵ Corradi, M.; Borri, A.; Castori, G.; Speranzini, E. (2016) Fully Reversible Reinforcement of Softwood Beams with Unbonded Composite Plates. *Composite Structures* 149, pp. 54–68. [DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.04.014].

³²⁶ Corradi, M.; Thuc, P.; Poologanathan, K.; Osofero, A. (2018) Flexural behavior of hardwood and softwood beams with mechanically connected GFRP plates. *Composite Structures* 206, pp.610–620. [DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.08.056].

³²⁷ Ibidem.

³²⁸ Gemert, D.V.; Bosch, M.V. (1987) Structural restoration of wooden beams by means of epoxy resin. *Materials and Structures* 20(3), pp.165-170. [DOI: 10.1007/BF02472732].

³²⁹ Schober, K.U.; Harte, A.M.; Kloger, R.; Jockwer, R.; Xu, Q.; Chen, J.F. (2015) FRP reinforcement of timber structures. *Construction and Building Materials*, 97, pp.106-118. [DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.020].

³³⁰ Bengtsson, C.; Johansson, C.J. (2002) *Final Report: GIROD—Glued in Rods for timber structures*. SMT4-CT97-2199. Swedish National Testing and Research Institute, Borås, Sweden. pp.104.

Entre los precursores de esta técnica, Gentile et al. (2002)³³¹ realizaron un programa experimental que comprendía la evaluación de vigas de madera aserrada de abeto Douglas (*Pseudotsuga menziesii* Mirb.) tratadas con creosota, de dimensiones estructurales (aprox. 100x300x4.300 mm / 20x600x10.000 mm), reforzadas todas ellas con barras GFRP en una ratio de refuerzo del 2,7% al 8,2%. Para los ensayos se utilizaron vigas originarias de un puente que fue desmantelado tras mantenerse en servicio durante más de treinta años, analizando su rigidez inicial previa a la incorporación del refuerzo. Las varillas de refuerzo utilizadas en las vigas de menor tamaño tenían un diámetro de 5,1 mm, estaban compuestas en un 80% en peso de fibra de vidrio 'E' y en un 20% de resina epoxi. En las vigas de mayor tamaño se utilizaron barras GFRP con diámetros de 10 mm y 13 mm. En este caso, las barras estaban compuestas por un 70% en peso de fibra de vidrio 'E' unidireccional y un 30% de resina de poliéster 'PET' reciclable (Polietileno Tereftalato). La disposición de las barras GFRP en las piezas se representa en la Fig. 31.

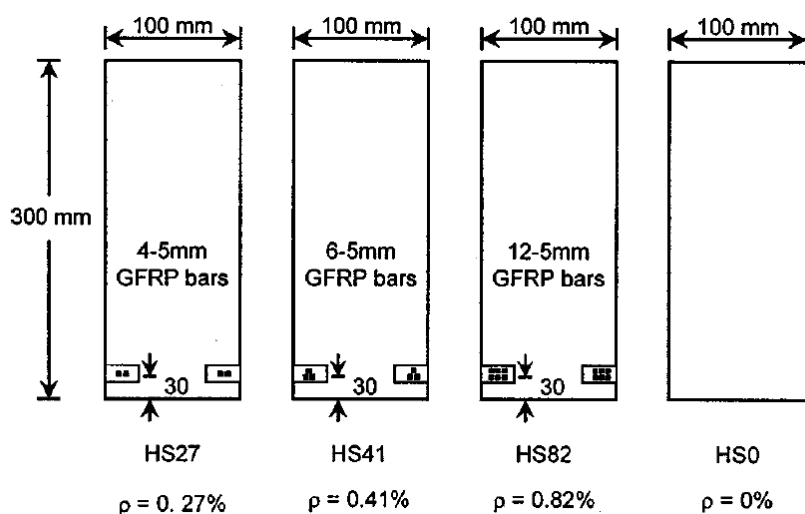


Fig. 31. Disposición de los refuerzos en las piezas (Fuente: Gentile et al. 2002).³³²

Debido, al limitado número de muestras, según opinión de los investigadores, los resultados experimentales no revelaron evidencias suficientes del incremento de la rigidez de las vigas, aunque sí demostraron en todos los casos el aumento de su resistencia a flexión, concretamente entre un 18 y un 46% con respecto a las vigas no reforzadas, así como que la disposición de las barras cerca de la superficie mejoraba la disminución puntual de resistencia producida por los defectos locales en la pieza. En todos los casos, la rotura se produjo por compresión, no apareciendo desgarros ni delaminación de la madera por las barras, lo que puede interpretarse como que la adhesión entre madera, armadura y resina epoxi resultó adecuada.

Una investigación con barras GFRP muy interesante es la realizada por Raftery et al. (2014)³³³ sobre vigas laminadas de nueva fabricación de madera de abeto (*Picea sitchensis* Carr.). Utilizando vigas laminadas de dimensiones estructurales (aprox. 96x190x4.200mm) introducen refuerzos de barras GFRP en ratios del 1,05 hasta el 2,8% en 4 fases. Todos los refuerzos se sitúan en la cara traccionada, menos uno que se coloca en ambas (Fig. 32). Este tipo de refuerzos muestran incrementos de resistencia del 43-98%, y mejoras en la rigidez del 22-29%.

³³¹ Gentile, C., Svecova, D., Rizkalla, S.H. (2002) Timber beams strengthened with GFRP bars: development and applications. *Journal of Composites for Construction* 6 (1), pp.11-20. [DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:1(11)].

³³² Ibidem.

³³³ Raftery, G.; Whelan, C. (2014) Low-grade glued laminated timber beams reinforced using improved arrangements of bonded-in GFRP rods. *Construction and Building Materials*, 52, pp.209-220. [DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.044].

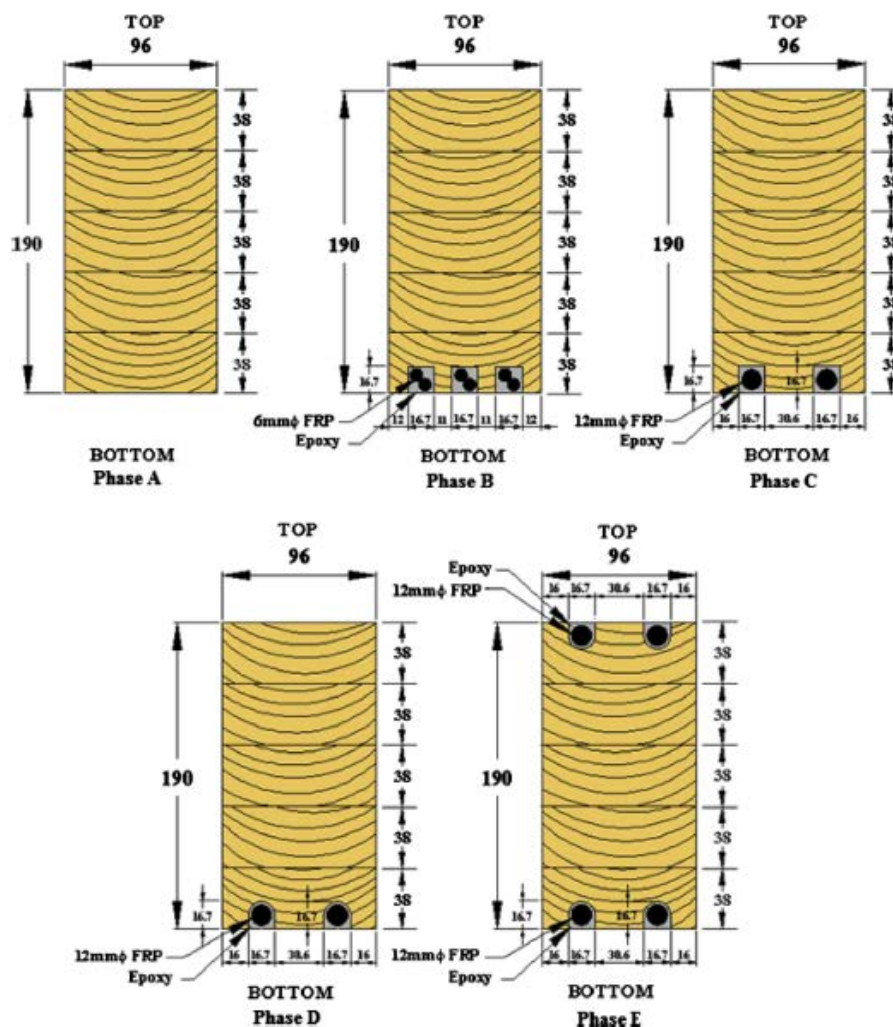


Fig. 1. Beam configurations: (a) Phase A. (b) Phase B. (c) Phase C. (d) Phase D. (e) Phase E.

Fig. 32. Configuración de las vigas reforzadas con GFRP (Fuente: Raftery et al. 2014)³³⁴

Frente a la mayor parte de las tipologías de refuerzos realizadas con barras de resinas epoxi reforzadas con fibras cuyo objetivo era mejorar el comportamiento a flexión de una viga, generalmente aumentando la capacidad mecánica a tracción de la sección correspondiente, el enfoque del trabajo realizado por Radford et al. (2002)³³⁵ se centraba en la recuperación y/o mejora de la resistencia frente al corte de vigas empleadas en puentes de ferrocarril. Para ello realizan la inserción a intervalos regulares, a lo largo de la longitud de la viga, de barras pultruidas de fibra de vidrio desde su cara inferior hasta la cara superior. El estudio planteaba, a su vez, un método de reparación que no obligara a desmontar la estructura, que fuera fácilmente accesible, y garantizara el refuerzo de las piezas y su conservación. Para la comprobación experimental de este refuerzo se realizaron ensayos sobre dos vigas de pequeñas dimensiones (aprox. 28x76x1.220 mm) de madera apiladas directamente una sobre la otra (Fig. 33), cuyo tamaño, cargas y distancia entre apoyos guardaban proporción directa con las vigas reales de un puente de ferrocarril multi-tramo, que también fue objeto de refuerzo, a las que se insertaron conectores de fibra de vidrio tipo espiga, denominados 'Shear Spikes' (puntas, o clavos de corte) a intervalos regulares a lo largo de la longitud de las dos vigas de madera, atravesando ambas.

³³⁴ Ibidem.

³³⁵ Radford, D.W., Van Goethem, D., Gutkowski, R.M., Peterson, M.L. (2002) Composite repair of timber structures. *Construction and Building Materials*, 16, pp. 417- 425. [DOI: 10.1016/S0950-0618(02)00044-2].

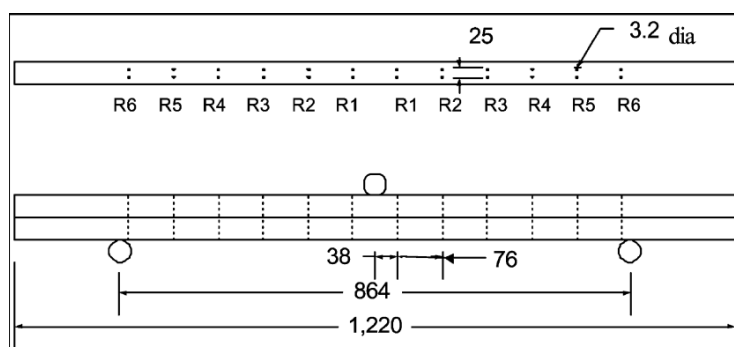


Fig. 33. Geometría del modelo de ensayos de 'picos de corte' (medidas en mm).³³⁶

Los resultados de las pruebas realizadas ofrecieron un incremento en los valores del módulo a flexión de las vigas reforzadas que oscilaba desde los 2,7 GPa, para los ejemplares no reforzados, hasta los 7,1 GPa para los refuerzos completos realizados con seis pares de 'espigas', demostrando que la propuesta de refuerzo con 'shear spikes' recuperaba tanto la rigidez como la resistencia del elemento previas a su deterioro.

Profundizando en este tipo de refuerzos a cortante con barras GFRP, Titirla et al. (2019)³³⁷ estudian la respuesta mecánica de barras encoladas con resina epoxi frente a ensayos de *pull-out* en distintos ángulos de fibra, así como la determinación de los modelos teóricos que permitan predecir su comportamiento

2.7.3. Fibra de carbono CFRP

A. Tejidos y laminados

A semejanza de los laminados con fibra de vidrio, en este apartado se describen los métodos de refuerzo de vigas de madera mediante la adhesión superficial o inserción dentro de la sección de bandas de fibra de carbono, encontrados en la literatura.

Dentro de una prolífica actividad investigadora relacionada con materiales y sistemas compuestos, Plevris et al. (1992)³³⁸ realizaron el estudio exhaustivo del comportamiento a flexión de vigas de madera reforzada con láminas FRP situados en la zona traccionada de la sección (Fig. 23 Tipo REL01). Su trabajo, realizado sobre piezas de pequeñas dimensiones (aprox. 30x51x760 mm) mostraba que utilizando laminados con espesores muy pequeños de CFRP, en ratios aproximados 1-4%, se conseguía un considerable incremento de la capacidad resistente y de rigidez (>60%), aportando además una mayor ductilidad de los elementos reforzados respecto de su situación inicial.

En cuanto al refuerzo de vigas de madera existentes, Borri et al. (2005)³³⁹ realizaron un estudio sobre el uso de laminados CFRP. En el programa experimental desarrollado en el laboratorio se ensayaron veinte vigas de madera de conífera (especie sin especificar) de dimensiones estructurales (aprox. 200x200x4.000 mm) con tres configuraciones de refuerzo en la zona traccionada y caras laterales de la viga, consistentes en la incorporación de dos o tres bandas de

³³⁶ Ibidem.

³³⁷ Titirla, M.; Michel, L.; Ferrier, E. (2019) Mechanical behavior of glued-in rods (carbon and glass fiber-reinforced polymers) for timber structures—An analytical and experimental study. *Composite Structures* 208, pp. 70-77 [DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.09.101].

³³⁸ Plevris et al. (1992) Op. cit.

³³⁹ Borri, A.; Corradi, M.; Grazini, A. (2005) A method for flexural reinforcement of old wood beams with cfrp materials. *Composites Part B: Engineering*, 36(2), pp.143-153. [DOI: 10.1016/j.compositesb.2004.04.013].

fibra de carbono cuyo porcentaje de refuerzo variaba entre el 0,82% y el 1,23% respecto de la sección original (Fig. 34). Los resultados de las pruebas experimentales demostraron que el refuerzo incrementaba la carga última de rotura respecto de una viga no reforzada un promedio superior al 60,3% (Fig. 34 'a') y el 55,0% (Fig. 34 'b' y 'c'), respectivamente. En sus conclusiones subrayaron como la incorporación de los laminados de fibra de carbono parecían detener la apertura de grietas, reducían la posibilidad de roturas locales, y servían de 'costura' entre los defectos puntuales de la madera. En consecuencia, la viga disponía de mayor resistencia a flexión revelando un comportamiento más dúctil con respecto al de las vigas no reforzadas. Otro de los principales objetivos de este trabajo fue determinar las características de la deformación bajo carga de las vigas reforzadas, obteniendo un considerable incremento en los parámetros de rigidez, fluctuando desde el 22,5% hasta el 30,3%, para la configuración de la Fig. 34 'b', que fue la que mejores resultados ofreció cuando se compararon con los obtenidos para esas mismas vigas de madera antes de la colocación del refuerzo.

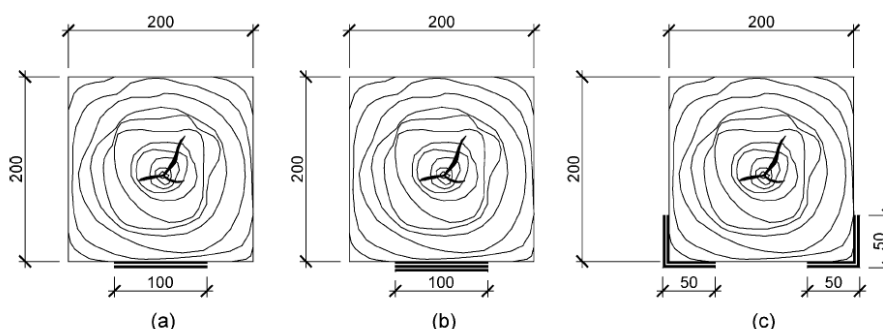


Fig. 34. Esquemas de refuerzo con bandas de CFRP (Fuente: Borri et al. 2005).³⁴⁰

También en el año 2005, Schober et al.³⁴¹ presentaron un estudio sobre técnicas de refuerzo para la restauración y refuerzo a flexión de vigas de madera de abeto (*Picea abies* L.), preexistentes mediante el uso de CFRP, como extensión de procedimientos similares que llevaban varias décadas empleándose para la reparación y mejora de otro tipo de materiales estructurales. Los ensayos experimentales se centraron en el uso de materiales de refuerzo embebidos en resina epoxi en el interior y exterior de la sección de vigas de madera de abeto preexistentes, de dimensiones estructurales (aprox.150x200x3.500 mm), aplicados 'in situ', que dieran lugar a un sistema compuesto. Para ello, se reforzaron varias vigas de madera maciza con laminados de fibra de carbono CFRP, en ratios <1%, incorporadas en tres posiciones diferentes (Fig. 35).

Series	Height [cm]	Width [cm]	Type	Description
Vh	19.33	14.59		1 x 1.4 x 50 mm bonded centrally to the tension zone, horizontal on bottom
	17.67	15.14		
	18.07	16.00		
	15.42	20.30		
Vs	18.76	15.30		2 x 1.4 x 25 mm bonded laterally to the tension zone 3 cm from bottom in slot
	21.28	15.76		
	20.11	16.11		
	14.64	18.28		
Vv	16.62	15.39		1 x 1.4 x 50 mm bonded centrally to the tension zone, vertical on bottom
	21.09	15.00		
	15.74	17.74		
	15.56	19.33		

Fig. 35. Esquema y dimensiones de las vigas de madera reforzadas (Fuente: Schober et al. 2005)³⁴².

³⁴⁰ Ibidem.

³⁴¹ Schober, K.U.; Rautenstrauch, K. (2005) Experimental investigations on flexural strengthening of timber structures with CFRP. *Proceedings of the International Symposium on Bond Behavior of FRP in Structures (BBFS 2005)*.

³⁴² Ibidem.

Los resultados de los ensayos confirmaron un aumento de la rigidez a flexión de aproximadamente el 6% y de la resistencia a flexión hasta un 25%, para los dos primeros tipos de refuerzo (Vh y Vs) respecto de los especímenes no reforzados. La rotura en la segunda configuración (Vs) se producía por su incapacidad para asumir el esfuerzo rasante debido al desgarro entre las ranuras de la sección en la dirección longitudinal de la pieza. En los testigos reforzados con bandas de fibra colocadas en posición vertical (Vv) el incremento de rigidez fue inferior, situándose entre el 4-5%, aumentando la resistencia a la flexión en una media de un 9%.

Otro de los trabajos que se ocupa del refuerzo de estructuras preexistentes de madera es el presentado por Jasięńko y Nowak (2007)³⁴³, cuyo objetivo principal se centraba en la reparación y refuerzo de vigas de madera con presencia en edificios catalogados o con algún tipo de valor histórico, que requiriesen una intervención que respetara los valores estéticos y no alterase el aspecto original de los elementos. Frente a los métodos de refuerzo propuestos en la mayoría de los antecedentes revisados, consistentes en adherir una banda de fibra en la zona inferior de la sección, mecánicamente más eficaces pero inapropiados para su aplicación sobre elementos con valores históricos y/o artísticos, los autores proponían la reparación con laminados CFRP situados de forma oculta dentro de la sección. Los ensayos experimentales se realizaron sobre varias series de vigas de madera de pino (especie sin especificar) que presentaban defectos, grietas, o estaban afectadas por algún tipo de proceso de degradación biológico. Las vigas tenían dimensiones estructurales (aprox.120x220x4.000 mm), y se dividieron en 6 tipologías con diferentes configuraciones de refuerzo (Fig. 36), a las que se añade una serie de madera nueva, sin refuerzo, como patrón de contraste. Los resultados experimentales fueron confrontados con simulaciones de cálculo realizadas mediante análisis numéricos.

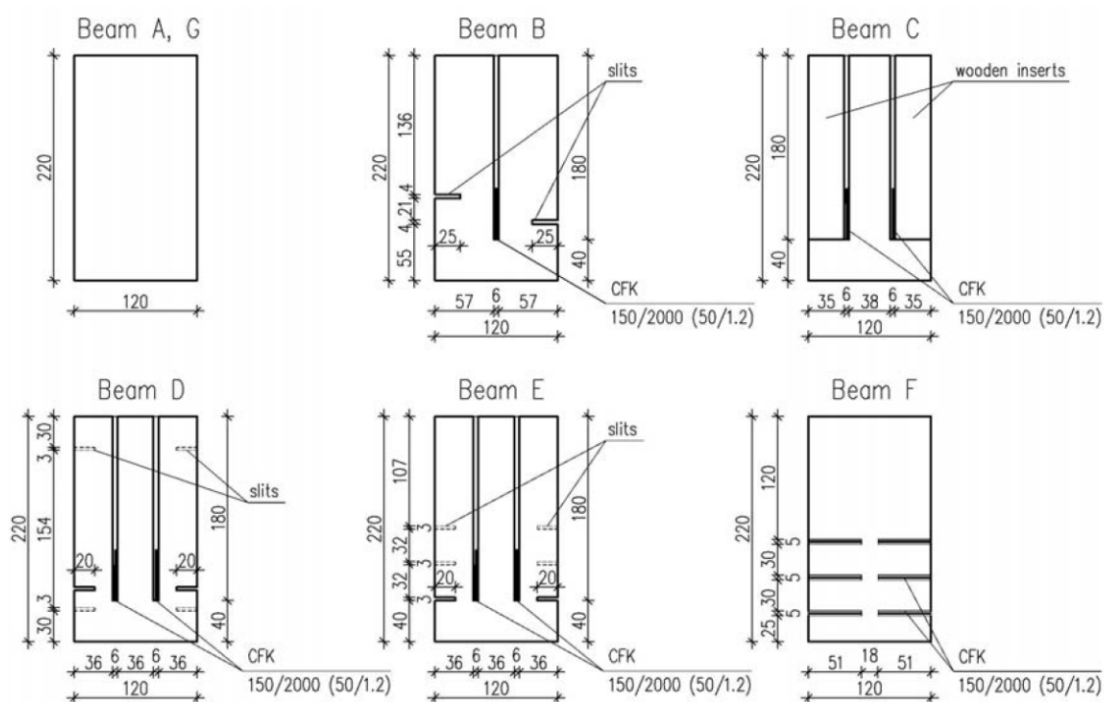


Fig. 36. Esquema de configuraciones de refuerzo de las vigas ensayadas (Fuente: Jasięńko y Nowak 2007).³⁴⁴

³⁴³ Jasięńko, J., Nowak, T (2007) Strengthening of Bent Timber Beams in Historical Objects. From Material to Structure - Mechanical Behavior and Failures of the Timber Structures. *ICOMOS IWC – XVI. International Symposium*. Florence, Venice and Vicenza.

³⁴⁴ Ibidem.

Las bandas de fibra de carbono utilizadas tenían un espesor de 1,2 mm y 50 mm de ancho y se adhirieron a la madera mediante una resina epoxi cuya consistencia permitió pegar estos elementos de refuerzo dentro de la sección. A continuación, se rellenaron las ranuras con la misma resina y polvo de cuarzo en una proporción de 100:80 en peso. Los resultados de las pruebas experimentales ofrecieron considerables incrementos en la capacidad de carga de las vigas ensayadas, que se situaron en el orden del 21% para las vigas de la serie 'F', superando el 79% en el caso las vigas de la serie 'D', mientras que los valores deducidos mediante análisis numérico se quedaron por debajo de los alcanzados en los ensayos.

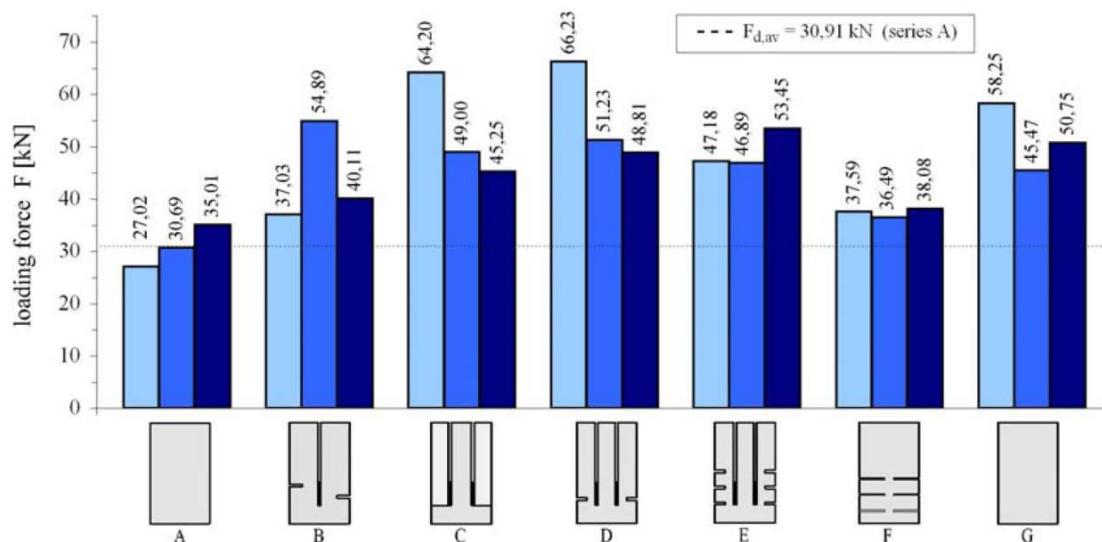


Fig. 37. Valores de carga de rotura de las vigas ensayadas (Fuente: Jasieńko y Nowak 2007).³⁴⁵

Entre las conclusiones de las pruebas realizadas, los autores señalaron el bajo nivel de aprovechamiento mecánico que se obtiene con la disposición vertical dentro de la sección del sistema de refuerzo, concretamente en las soluciones 'B' y 'E'. Frente a esta contingencia plantearon la posibilidad de introducir fuerzas de pretensado en las bandas de fibra, de modo que mejorara la eficacia del refuerzo. Esta solución, sin embargo, no parecía compatible con el objetivo de que la intervención de reparación quedase oculta y no alterara la apariencia de los elementos originales.

Entre las variantes investigadas por Parvez et al. (2009)³⁴⁶ en los estudios para la reparación y refuerzo de vigas de madera de abeto (*Picea abies* L.) preexistentes, se incluyó la opción de incorporar bandas de fibra de carbono CFRP en ranuras perfiladas en la cara superior, inferior, o en ambas (Fig. 23 Tipo RIL01 a RIL03). Al igual que con otros materiales ensayados, los autores muestran en la discusión de resultados del trabajo una comparación de los valores de resistencia a flexión y módulo de elasticidad obtenidos en las vigas antes y después del refuerzo, describiendo un aumento de resistencia del 31-251%, y de la rigidez del 10 al 88%. Con independencia del material de refuerzo y de su situación en la sección, los resultados experimentales indican que la incorporación del laminado en las vigas tiene un efecto más significativo en la mejora de la resistencia a la flexión que en la rigidez frente a la deformación, lo que se atribuye a los bajos ratios relativos de material de refuerzo respecto de la totalidad de la sección, que limita, en opinión de los investigadores, su capacidad para elevar el módulo elástico de la viga original. Además, en las conclusiones del trabajo señalaron como la posición del laminado, su colocación en una o ambas caras de la sección, y su módulo de elasticidad, son parámetros esenciales que influyen directamente en el incremento de la rigidez a la flexión de las muestras.

³⁴⁵ Ibidem.

³⁴⁶ Parvez et al. (2009) Op. Cit.

Del mismo modo, D'Ambrisi et al. (2014)³⁴⁷ compara los resultados obtenidos sobre 6 piezas nuevas, y 6 piezas de derribo, reforzadas ambas con laminados internos de CFRP. Las vigas utilizadas en la investigación son de madera de conífera (especie sin especificar) y dimensiones estructurales (aprox. 120x120x2.500 mm), a las cuales se les realiza un pequeño cajeadado en la zona de tracción, donde se introducen los refuerzos CFRP con resina epoxi en ratios de refuerzo <0.5% (Fig. 38). Los resultados obtenidos muestran una mejora significativa en la resistencia de las piezas reforzadas, aunque con una fuerte variabilidad, con incrementos del 16-149%.

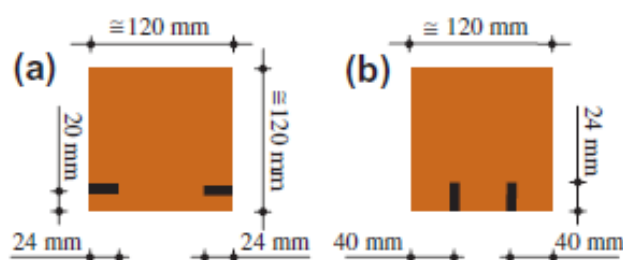


Fig. 38. Disposición de los refuerzos internos CFRP (Fuente: D'Ambrisi 2014).³⁴⁸

Completando las investigaciones efectuadas junto con laminados de fibra de vidrio, Fiorelli y Alves (2011)³⁴⁹ finalizaron los ensayos realizados con el estudio sobre el refuerzo de vigas de madera de la especie "*Pinus Caribea var. Hondurensis* Morelet", de dimensiones estructurales (aprox. 60x120-160x3.000 mm), reforzadas en este caso con bandas de fibra de carbono CFRP en una ratio del 0,4% de la sección, pegadas con resina epoxi en el exterior de la cara traccionada de la viga (Fig. 23 Tipo NIL01). Los valores de rigidez a flexión mostraban un incremento del 16 al 30 % respecto de las vigas no reforzadas. Los correspondientes al momento último de rotura determinados experimentalmente fueron moderadamente superiores a los estimados de manera teórica, reforzando de este modo la seguridad estructural y la fiabilidad del proceso.

Continuando esta misma línea, De Jesús et al. (2012)³⁵⁰ investigaron sobre el refuerzo de vigas de madera de pino pinaster (*Pinus pinaster* Ait.) de pequeñas dimensiones (50x50x760 mm) con refuerzos a flexión de laminados CFRP. Utilizan dos refuerzos CFRP de distinta longitud (350 mm/600 mm), adheridos con resina epoxi a la cara traccionada (Fig. 23 Tipo REL01), con una ratio de refuerzo del 2,5%. Los resultados muestran un aumento de rigidez del 29% para el refuerzo de 350 mm, y del 34% para el de 600 mm. Los incrementos en resistencia varían del 9 al 28%. Una de las conclusiones del estudio es que un aumento de la longitud del refuerzo permite un mejor reparto de las tensiones a lo largo de la viga, reduciendo la tensión máxima aplicada en las cabezas de los refuerzos.

Actualmente, se está investigando activamente sobre el uso de tejidos CFRP y pequeñas ratios de refuerzo (<1%) con el fin de abaratar los costes y permitir el uso de CFRP de forma rentable. Andor et al. (2015)³⁵¹ realizan una investigación sobre la mejora de rigidez y resistencia de vigas de pequeñas dimensiones (aprox. 95x95x2.000mm) de madera de abeto (*Picea abies* L.) reforzadas con tejido de CFRP, colocadas en la cara traccionada de las vigas (Fig. 23 Tipo REL01). Con unos

³⁴⁷ D'Ambrosi, A.; Focacci, F.; Luciano, R. (2014) Experimental investigation on flexural behavior of timber beams repaired with CFRP plates. *Composite Structures* 108, pp. 720-728. [DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.10.005].

³⁴⁸ Ibidem.

³⁴⁹ Fiorelli et al. (2011). Op. Cit.

³⁵⁰ De Jesús, A.; Pinto, J.; Morais, J (2012) Analysis of solid wood beams strengthened with CFRP laminates of distinct lengths. *Construction and Building Materials* 35, pp. 817-828. [DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.124].

³⁵¹ Andor, K.; Lengyel, A.; Polgár, R.; Fodor, T.; Karácsonyi, Z. (2015) Experimental and statistical analysis of spruce timber beams reinforced with CFRP fabric. *Construction and Building Materials*, 99, pp.200-207. [DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.09.026].

refuerzos mínimos del 1%, se alcanzan incrementos en la resistencia del 18-31%, y en rigidez del 9-16%.

En esta línea, De la Rosa et al. (2016)³⁵² estudiaron el uso de tejidos de refuerzo CFRP, además de tejidos de basalto BFRP, como refuerzo de vigas aserradas de madera de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) de pequeñas dimensiones (aprox. 78x155x1.090 mm), continuando con otra investigación anterior (De la Rosa et al. 2013³⁵³) con los mismos materiales, disposición y tipos de refuerzos. En este caso, utilizando un refuerzo en U colocado en la zona traccionada (Fig. 39), con ratios de refuerzo <1%, y embebido en resina epoxi, se obtienen incrementos de resistencia del 30-44%, observándose una mayor ductilidad en las roturas.

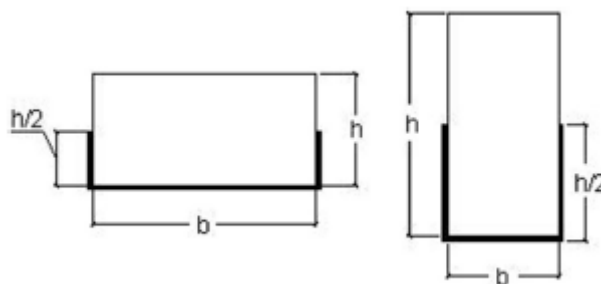


Fig. 39. Refuerzo CFRP utilizado sobre piezas de madera aserradas (Fuente: De la Rosa et al. 2016).³⁵⁴

Más recientemente Brunetti et al. (2019)³⁵⁵ realizaron un estudio en el que comparan el comportamiento de tejidos de refuerzo CFRP adheridos con resinas de poliuretano y epoxi. Para ello utilizan vigas laminadas de madera de abeto (*Picea abies* L.) de dimensiones estructurales (aprox. 100x140x2.800 mm), reforzadas con tejido de fibra de carbono CFRP adherida en la cara traccionada de la viga (Fig. 23 Tipo REL01), con ratios de refuerzo <0,5% adheridos con resina PUR y EPX. Las mejoras alcanzadas son significativas, con incremento de resistencia del 45-57%, y de rigidez del 12-22%. Una conclusión de esta investigación es que la resina de PUR presenta mejor comportamiento y con menores variaciones que la resina EPX, tradicionalmente utilizada en este tipo de refuerzos; lo que presenta una nueva línea de investigación.

Otro tipo de sistema estudiado es el del pretensado. Con el fin de optimizar los refuerzos. Triantafillou et al. (1992)³⁵⁶ investigan el refuerzo de elementos de madera mediante laminados CFRP pretensados. Partiendo de investigaciones previas³⁵⁷, la investigación se centra en establecer la tensión máxima de pretensado que puede aplicarse a los refuerzos CFRP adheridos en madera para que no se produzcan fallos por delaminación como consecuencia de un cortante excesivo sobre la madera en las cabezas del refuerzo. Para ello, se ensayan vigas de madera (sin especificar especie) de pequeña escuadría (aprox. 45x60-80x800 mm) reforzadas en la cara de tracción (Fig. 23 Tipo REL01) con láminas CFRP de pequeño espesor (0,5-0,75 mm) y ratios de refuerzo inferiores al 6%, adheridas con resina epoxi. El pretensado se introducía mediante el uso de placas de acero ancladas a las cabezas de las vigas y al refuerzo FRP. En sus conclusiones, los autores destacaron las ventajas del modelo propuesto ya que combinaba las prestaciones que ofrecen los materiales

³⁵² De la Rosa, P.; Cobo, A.; González, M. (2016) Analysis of the flexural stiffness of timber beams reinforced with carbon and basalt composite materials. *Composites Part B: Engineering*, 86, pp.152-159. [DOI: 10.1016/j.compositesb.2015.10.003].

³⁵³ De la Rosa, P.; Cobo, A.; González, M. (2013) Bending reinforcement of timber beams with composite carbon fiber and basalt fiber materials. *Composites Part B: Engineering*, 55, pp.528-536. [DOI: 10.1016/j.compositesb.2013.07.016].

³⁵⁴ De la Rosa, P. et al. (2016). Op. Cit.

³⁵⁵ Brunetti, M.; Christovasilis, I.; Micheloni, M.; Nocetti, M. (2019) Production feasibility and performance of carbon fiber reinforced glulam beams manufactured with polyurethane adhesive. *Composites Part B: Engineering*, 156, pp.212-219. [DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.08.075].

³⁵⁶ Triantafillou, T.C.; Deskovic, N. (1992) Prestressed FRP sheets as external reinforcement of wood members. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 118(5), pp. 1270-1284. [DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1992)118:5(1270)].

³⁵⁷ Triantafillou, T.C.; Deskovic, N. (1991) Innovative prestressing with FRP sheets: mechanics of short-term behavior. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 117(7), pp. 1652-1672. [DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1991)117:7(1652)].

compuestos con la eficiencia mecánica del pretensado exterior, ofreciendo mejores resultados en los incrementos de rigidez, resistencia y durabilidad respecto de los sistemas no pretensados.

Continuando este trabajo, Brunner y Schnueriger (2005)³⁵⁸ investigaron con laminados CFRP pretensados de alta resistencia, superando los problemas generados por las técnicas aplicadas hasta el momento que no resolvían de manera eficiente el fracaso prematuro de la viga pretensada por causa de la delaminación. En los antecedentes de modelos similares revisados^{359,360}, los autores advirtieron que la fuerza de pretensado se anclaba a una distancia muy pequeña respecto de los extremos de la viga. Como resultado de esta operación, la transmisión de la fuerza inducida se concentraba en el final del laminado, generándose altas tensiones en la dirección perpendicular a la fibra, precisamente donde resistencia a tracción perpendicular la sección de madera es más baja.

Tras el examen de una amplia variedad de sistemas presentados en trabajos de investigación previos, destinados al refuerzo y reparación de estructuras de hormigón, se dieron cuenta de un dispositivo de pretensado desarrollado en Suiza por Stöecklin y Meier (2003)³⁶¹, en el año 2001, para el Instituto Federal Suizo de Investigación de Materiales y Tecnologías (EMPA) que conseguía aplicar la fuerza de pretensado en etapas, mediante un sistema de anclaje graduado, al que se le añadió un mecanismo de control electrónico para resolver el problema de la delaminación en los extremos de la viga. El proceso comenzaba con la introducción de una alta fuerza de pretensado en la banda de fibra de carbono que se adhería a la superficie de la viga de madera en la zona central del vano mediante la aplicación de resina epoxi y calor. Paulatinamente, y a medida que se acercaban a los extremos, la unión se realizaba con fuerzas inferiores de pretensado, de manera que las tensiones del proceso no se concentraban en los extremos de la viga, sino que se repartían a lo largo de la longitud de esta. En las pruebas experimentales, se ensayaron tres series de vigas laminadas de clase resistente GL32 de dimensiones estructurales (aprox. 140x200x4.000 mm). Las vigas mostraron un comportamiento claramente lineal respecto de la relación carga-deformación, produciéndose, en todas las vigas, el colapso por la rotura frágil de la cara a tracción de la madera. En el caso de las vigas reforzadas, el laminado se rompió inmediatamente después. La zona comprimida en el centro de la viga mostró señales de 'plastificación', pero se mantuvo intacta. Los resultados experimentales obtenidos demostraron que el refuerzo laminado pretensado es más eficaz. La resistencia a flexión de las vigas de madera laminada se incrementó en un 34% cuando se reforzó con un pretensado laminado CFRP, frente al 22% cuando se hizo con laminado pasivo CFRP. Además, los parámetros deducidos de los ensayos se ajustaban de modo coherente con los escrutados en el modelo teórico previo basado en el comportamiento elasto-plástico de la sección en la cara comprimida de la madera, por un lado, y de la consideración puramente lineal y elástica de las tensiones en la cara de tracción.

B. Barras o varillas

³⁵⁸ Brunner, M.; Schnueriger, M (2005) Timber beams strengthened by attaching prestressed carbon FRP laminates with a gradient anchoring device. *Proceedings of the International Symposium on Bond Behavior of FRP in Structures*.

³⁵⁹ Holzenkämpfer, P. (1997). *Ingenieurmodelle des verbunds geklebter bewehrung für betonbauteile* (No. 473). Ed. Wilhelm Ernst & Sohn. Germany.

³⁶⁰ Luggin W. F. (2000) Die Applikation vorgespannter CFK-Lamellen auf Brettschichtholzträger, Dissertation, Universität für Bodenkultur, Vienna, Austria.

³⁶¹ Stöecklin, I.; Meier, U. (2003) Strengthening of concrete structures with prestressed and gradually anchored CFRP strips. *Fibre-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures*, Vol.2, pp. 1321-1330. [DOI: 10.1142/9789812704863_0127].

El uso de barras de CFRP es muy común en el refuerzo y reparación de vigas de madera, sin embargo, su uso para la mejora de las propiedades mecánicas de vigas nuevas no está tan desarrollado.³⁶²

En piezas de madera aserrada maciza, Borri et al. (2005)³⁶³ realizaron el refuerzo de vigas mediante la incorporación de barras de CFRP. Para los ensayos experimentales se seleccionaron vigas de madera de conífera (sin especificar especie) sobre las que practicaban una o dos ranuras de pequeñas dimensiones en la cara traccionada (Fig. 40). Las barras de CFRP, de diámetro 7,5 mm, se introdujeron en las ranuras realizadas y se unieron a la madera mediante resina epoxi. Las barras de refuerzo de CFRP permitieron incrementos de la carga máxima de hasta el 52% para la variante de refuerzo con dos barras, sin embargo, respecto del incremento de rigidez, los resultados fueron mucho menos relevantes. Sorprendentemente todas las vigas ensayadas revelaron un comportamiento menos dúctil que las vigas no reforzadas. El efecto positivo inducido por la presencia de las barras no fue suficiente para limitar las rupturas locales que se generaban básicamente a partir de los defectos locales de las muestras, no consiguiendo ejercer el efecto de 'costura' que lograban realizar las bandas de CFRP, al tiempo que se observaba que las ranuras realizadas en las vigas para insertar las barras de CFRP también generaban algún daño limitado.

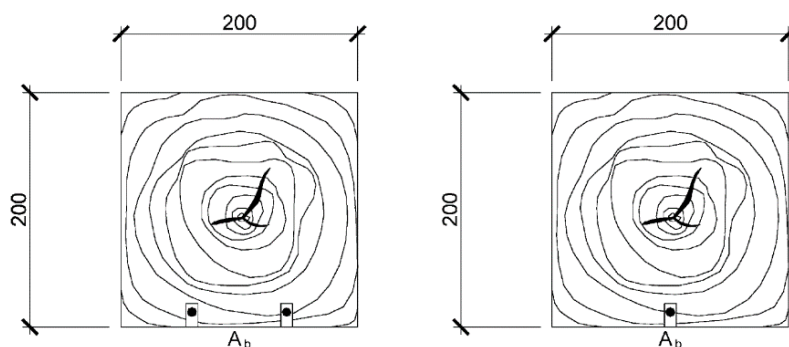


Fig. 40. Esquemas de refuerzo con barras de CFRP (Fuente: Borri et al. 2005).³⁶⁴

La aplicación de refuerzo CFRP también se aplica en uniones de vigas laminadas encoladas. Micelli et al. (2005)³⁶⁵, estudiaron el empalme de 6 vigas laminadas de abeto (*picea abies* L.) de dimensiones estructurales (aprox. 120x200x5.000 mm) reforzadas con barras de CFRP en ratios de 3-6%. Estos refuerzos no se prolongan en toda la longitud de la viga, sino únicamente en el tramo central, cubriendo una longitud de 1.600-1.800-2.000 mm, colocando adicionalmente refuerzo en la zona comprimida con una longitud de 600-800-1.000 mm, tal y como se representa en la Fig. 41. Con este tipo de refuerzo se alcanzan roturas de gran ductilidad, con incrementos en la resistencia de 93%.

³⁶² Schober, K.U.; Harte, A.M.; Kloger, R.; Jockwer, R.; Xu, Q.; Chen, J.F. (2015) FRP reinforcement of timber structures. *Construction and Building Materials*, 97, pp.106-118. [DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.020].

³⁶³ Borri et al. (2005). Op. Cit.

³⁶⁴ Ibidem.

³⁶⁵ Micelli, F.; Scialpi, V.; Tegola, A. (2005) Flexural Reinforcement of Glulam Timber Beams and Joints with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Rods. *Journal of composites for construction*, 9(4), pp.337-347. [DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2005)9:4(337)].

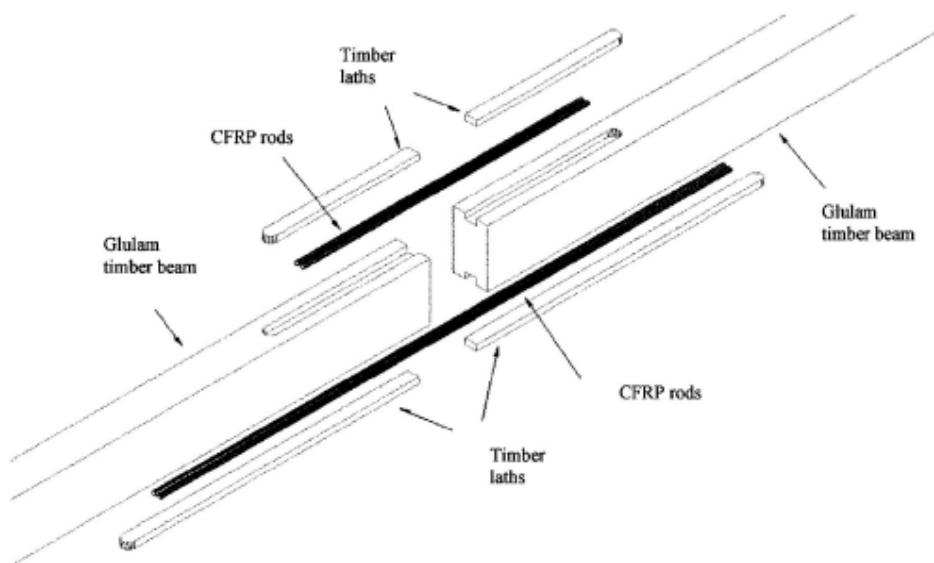


Fig. 41. Empalme de dos vigas laminadas con barras de CFRP.³⁶⁶

Johnsson et al. (2006)³⁶⁷ realizan una investigación sobre el refuerzo de vigas laminadas de madera de abeto (*Picea abies* L.) de dimensiones estructurales (aprox. 90x225x3500 mm), y clase resistente GL32, con barras de CFRP de 10 mm de diámetro. Los refuerzos se realizan internamente mediante cajeadado en la zona de tracción de la viga, tal y como se recoge en la Fig. 42 con una ratio de refuerzo <0,5%.

Series	Appellation	Strengthening	Cross section
Series 1	Reference 1 Reference 2 Reference 3	None	
Series 2	Beam 1:1 Beam 2:1 Beam 3:1	1 NSMR	
Series 3	Beam 1:2 Beam 2:2 Beam 3:2	2 NSMR	
Series 4	Shortened NSMR	1 Shortened NSMR	

Fig. 42. Tipos de refuerzo con barras de CFRP investigado (Fuente: Johnsson et al. 2006).³⁶⁸

Los resultados obtenidos muestran un incremento en la resistencia de las vigas de 44-63%, mientras que la rigidez de la pieza solo se incrementa en un 10%, siendo el refuerzo tipo 2NSMR (Fig. 42) el que presenta un mejor comportamiento.

³⁶⁶ Ibidem.

³⁶⁷ Johnsson, H.; Blanksvard, T.; Carolin, A. (2006) Glulam members strengthened by carbon fiber reinforcement. *Materials and Structures* 40(1), pp. 47-56. [DOI: 10.1617/s11527-006-9119-7].

³⁶⁸ Ibidem.

2.7.4. Otros tipos de fibras

En menor medida, también se han realizado refuerzos de vigas de madera con otros tipos de fibras, como la aramida o el basalto. No obstante, debido a que sus prestaciones son semejantes a las de la fibra de vidrio y su coste mucho más elevado, su uso es limitado.

En su tesis doctoral, Tingley (1996)³⁶⁹ ensayó vigas laminadas encoladas de escala estructural (aprox. 130x610x4.570 mm) de madera de abeto Douglas (*Pseudotsuga menziesii* Mirb.) reforzadas con fibra de aramida (AFRP) en la zona de tracción (Fig. 23 Tipo NIL02) con diferentes ratios de refuerzo (1-4%). Las mejoras recogidas son significativas con incrementos de rigidez superiores al 28% y de resistencia al 50%.

Siguiendo esta línea, De la Rosa et al. (2013)³⁷⁰ estudiaron el uso de tejidos de refuerzo de basalto (BFRP) como refuerzo de vigas aserradas de madera de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) de pequeñas dimensiones (aprox. 78x155x1.090 mm). En este caso, utilizando un refuerzo en U colocado en la zona traccionada (Fig. 43), con ratios de refuerzo < 1%, y embebido en resina epoxi, se obtienen incrementos de resistencia del 17-22%, observándose una mayor ductilidad en las roturas.

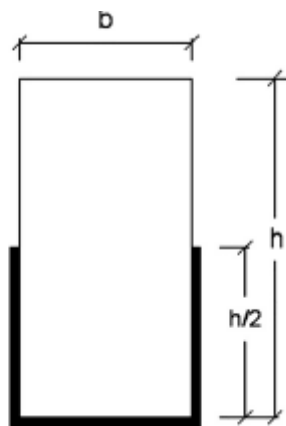


Fig. 43. Refuerzo con tejido BFRP sobre madera aserrada (Fuente: De la Rosa 2013).³⁷¹

También con tejido de fibra de basalto (BFRP), pero como refuerzo interno, Fernando et al. (2016)³⁷² realizaron una investigación sobre la mejora que produce la introducción de este tipo de tejidos en el refuerzo de vigas. Para ello utilizan vigas de madera aserrada de conífera (sin especificar especie) de pequeñas dimensiones (20x92x2.500 mm) con tejido de BFRP en ratios de refuerzo del 2,5-10% (Fig. 23 Tipo RIL06). Con este tipo de refuerzos muestran incrementos de resistencia del 65%, y mejoras en la rigidez del 26%.

En cuanto al uso de barras, Raftery et al. (2015)³⁷³ realizaron una investigación sobre vigas laminadas de nueva fabricación de madera de abeto (*Picea sitchensis* Carr.) reforzadas con barras de BFRP. Utilizando vigas laminadas de dimensiones estructurales (aprox. 96x190x4.200mm) se introducen refuerzos de barras BFRP en ratios del 1,4% en unos cajeados situados en la zona

³⁶⁹ Tingley, D.A (1996) The Stress-Strain Relationships in Wood and Fiber-Reinforced Plastic Laminae of Reinforced Glued-Laminated Wood Beams. PhD Thesis, Oregon State University, pp. 233.

³⁷⁰ De la Rosa et al. (2013) Op. cit.

³⁷¹ Ibidem.

³⁷² Fernando, D.; Frangi, A.; Kobel, P. (2016) Behavior of basalt fiber reinforced polymer strengthened timber laminates under tensile loading. *Engineering structures*, 117, pp.437-456. [DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.03.009].

³⁷³ Raftery, G.M.; Kelly, F. (2015) Basalt FRP rods for reinforcement and repair of timber. *Composites Part B: Engineering*, 70, pp.9-19. [DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.10.036].

traccionada (Fig. 44). Este tipo de refuerzos muestran incrementos de resistencia del 23%, y mejoras en la rigidez del 8,4-10,3%.

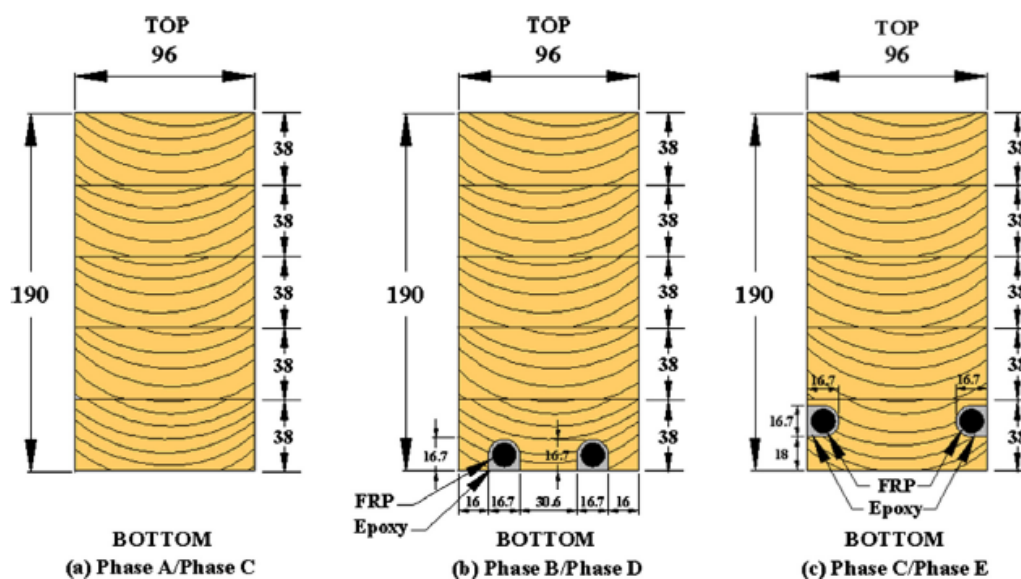


Fig. 44. Secciones con las disposiciones y dimensiones de las piezas reforzadas (Fuente: Raftery et al. 2015).³⁷⁴

2.7.5. Comportamiento frente al fuego de la madera reforzada con FRP

Como es sabido, el comportamiento frente al fuego de la madera depende en gran medida de la composición química y física de cada especie, tomándose la temperatura de ignición entorno a los 310-390°C. Antes de la combustión se desencadena la descomposición por degradación térmica de los componentes fundamentales de la madera: a partir de los 200°C se produce la descomposición de la hemicelulosa, a partir de los 250°C se degrada la lignina, y a partir de los 300°C se degrada la celulosa^{375,376}. Sin embargo, las propiedades mecánicas del material disminuyen al alcanzar unos rangos de temperatura inferiores, como consecuencia del inicio del proceso de degradación mencionado, tomándose la temperatura de unos 160°C como el punto crítico o inicio de la pirólisis.³⁷⁷

No obstante, la madera presenta una baja conductividad térmica, con valores de 0,10-0,20 w/m·K³⁷⁸, por lo que la velocidad de propagación del calor es lenta, pudiendo someterse las piezas de madera a un tiempo de exposición prolongados sin una pérdida significativa de sus propiedades mecánicas. Fruto de esta baja conductividad térmica, y de los procesos de pirólisis y carbonización que sufre la madera, puede estimarse los tiempos de resistencia de una pieza a partir del método simplificado recogido en la normativa (EU5/CTE), o mediante métodos complejos más precisos como los modelos numéricos (MEF)³⁷⁹, como los representados en la Fig. 45.

³⁷⁴ Ibidem.

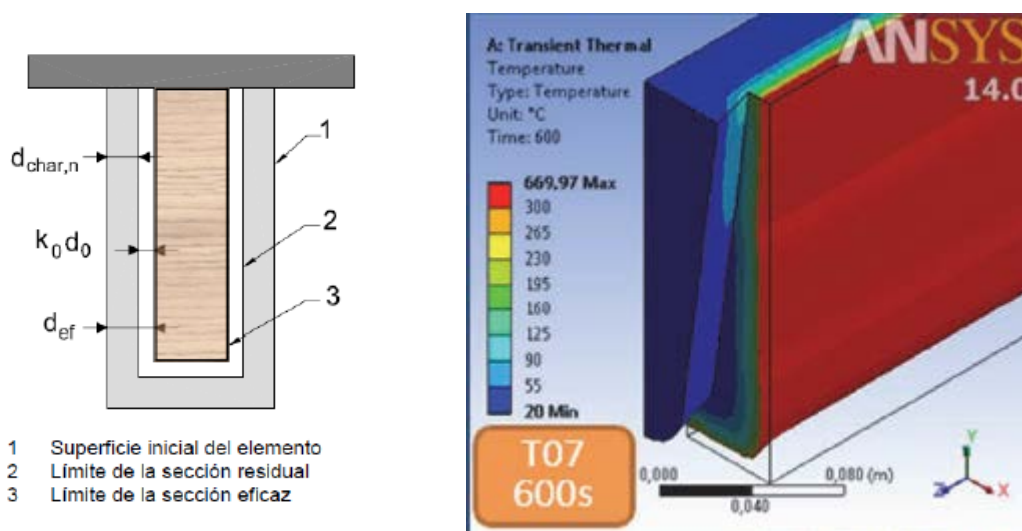
³⁷⁵ Roberts, A. F. (1971) Problems Associated with the Theoretical Analysis of the Burning of Wood. *16th International Symposium on Combustion*, vol13(1), pp. 893-903. [DOI: 10.1016/S0082-0784(71)80090-5].

³⁷⁶ Shafizadeh, F. (1982). Introduction to pyrolysis of biomass. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 3(4), pp. 283-305. [DOI: 10.1016/0165-2370(82)80017-X].

³⁷⁷ Kollmann (1959) Op. cit.

³⁷⁸ Cengel, Y. A. (2004). *Transferencia de calor*. Ed. McGraw-Hill-Interamericana.

³⁷⁹ Regueira, R. (2013) Aplicación de métodos numéricos al análisis de estructuras de madera en situación de incendio. Tesis doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.



a) Método simplificado: Sección reducida (Fuente: CTE-DB-SE-F 2009).

b) Método MEF (Fuente: Regueira 2013).³⁸⁰

Fig. 45. Métodos de cálculo de la resistencia al fuego de la madera (tiempo).

Respecto al comportamiento de los refuerzos FRP, las fibras sintéticas utilizadas comercialmente presentan en todo caso temperaturas límite muy superiores a las temperaturas de degradación térmica de la madera; con 250°C para las fibras de aramida, 880°C para las fibras de vidrio, 1.450°C para las fibras de basalto, y 1.600°C para la fibra de carbono^{381,382,383}. Sin embargo, el comportamiento frente al fuego de los refuerzos FRP se ven limitados por la temperatura de transición vítrea de las resinas empleadas para la formación de las matrices rígidas de los laminados, con temperaturas de 50-175°C en función del tipo de resina utilizada^{384,385}. Además, es determinante el comportamiento de los adhesivos utilizados para el anclaje, presentando temperaturas de trabajo máximas de 50-120°C^{386,387,388}, con una pérdida de capacidad resistente sensible a partir de los 45-60°C.³⁸⁹

Son varios los investigadores que han realizado estudios específicos sobre el comportamiento frente a fuego de las piezas de madera reforzadas con FRP. Avent et al. (1984)³⁹⁰ analizaron el comportamiento de madera reforzada con FRP, y el uso de resinas epoxi, comparando las propiedades a compresión y cortante de uniones madera-FRP a temperatura ambiente (21°C) con su evolución bajo exposiciones a altas temperaturas. Los resultados muestran el colapso de la unión por fallo de la resina epoxi en rangos de temperatura bajos, al alcanzar el adhesivo temperaturas de 66-93°C. En la misma línea Lau et al. (2016)³⁹¹ investigaron sobre el comportamiento térmico de los refuerzos de FRP adheridos sobre diversos materiales. En el caso de refuerzos CFRP adheridos superficialmente a piezas de madera con resinas epoxi se detectan fallos por delaminación al alcanzar temperaturas superiores a los 50°C, lo cual representa una temperatura muy baja en el contexto que estamos analizando. También Zigler et al. (2015)³⁹²

³⁸⁰ Ibidem.

³⁸¹ Alann (2006) Op. cit.

³⁸² Jacob et al. (2007) Op. cit.

³⁸³ Fédération internationale du béton-FIB (2007) Op. cit.

³⁸⁴ Jacob et al. (2007) Op. cit.

³⁸⁵ Fédération internationale du béton-FIB (2007) Op. cit.

³⁸⁶ Cruz et al. (2006) Op. cit.

³⁸⁷ Lartigau et al. (2015) Op. cit.

³⁸⁸ Di María et al. (2017) Op. cit.

³⁸⁹ Stumes (1975) Op. cit.

³⁹⁰ Avent, R.; Issa, C.A. (1984) Effect of fire on epoxy-repaired timber. *Journal of structural engineering*, 110(12), pp. 2858-2875. [DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1984)110:12(2858)].

³⁹¹ Lau, D.; Qiu, Q.; Zhou, A.; Chow, C. L. (2016). Long term performance and fire safety aspect of FRP composites used in building structures. *Construction and building materials*, 126, pp. 573-585. [DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.031].

³⁹² Zigler, R.; Pokorný, M. (2015). Fire protection of timber structures strengthened with FRP materials. *Civil Engineering Journal*, 4, pp.1-8. [DOI: 10.14311/CEJ.2015.04.0022].

investigaron sobre el comportamiento de FRP bajo condiciones de fuego, limitando las temperaturas de transición vítrea de los adhesivos estructurales de 60-130°C. Debido a esta baja temperatura de colapso de los adhesivos, analizaron el comportamiento de refuerzos FRP protegidos de la temperatura en el interior de la madera. Como se muestra en la Fig. 46, la protección de los refuerzos FRP en el interior de la madera aumenta los tiempos en alcanzar la temperatura vítrea del adhesivo hasta 30 min, con recubrimientos de 40 mm de madera.

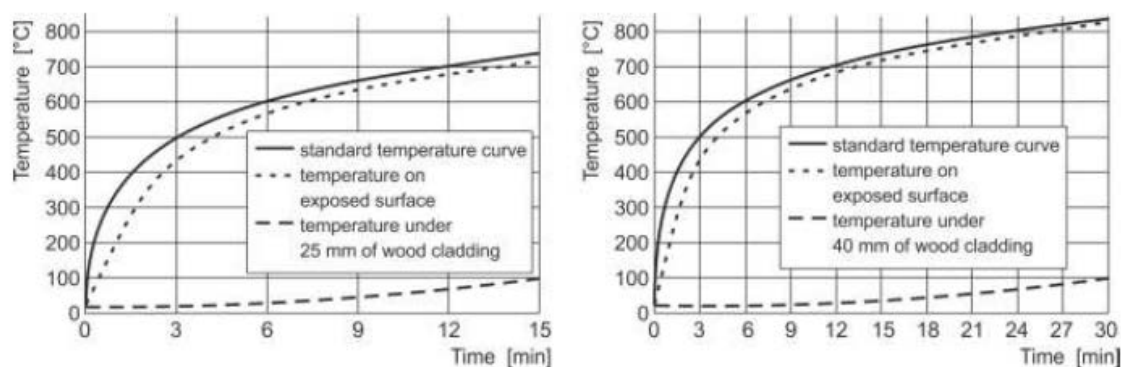


Fig. 46. Evolución de temperatura en refuerzos FRP protegidos del fuego (Fuente: Zigler et al. 2015).³⁹³

En todo caso, la resistencia al fuego recogida en la normativa (CTE-DB-SE-F) para los elementos estructurales en función del tipo de edificación (R30, etc.) sólo es aplicable para ELU (resistencia), y no para ELS (rigidez). Por ello, debe estudiarse adecuadamente si, pese a la pérdida temprana del refuerzo FRP en situación de incendio, la sección de madera puede resistir por sí sola las acciones previstas.

2.7.6. Comportamiento frente a la fluencia de la madera reforzada con FRP

El comportamiento a fluencia de la madera ha sido suficientemente investigado³⁹⁴, siendo las conclusiones de las investigaciones realizadas una parte fundamental del sistema de coeficientes correctores en función de la duración de la carga y la clase de servicio utilizado en las normativas vigentes (EC 5; CTE). No obstante, actualmente se continúan realizando ensayos de fluencia sobre los nuevos materiales industrializados de madera (tableros, vigas laminadas, microlaminadas...) con el fin de conocer con precisión su comportamiento real a largo plazo³⁹⁵. Por el contrario, no ha sido hasta fechas recientes cuando se han promovido de forma amplia los ensayos de fluencia (*creep*) sobre piezas estructurales de madera reforzadas por FRP.

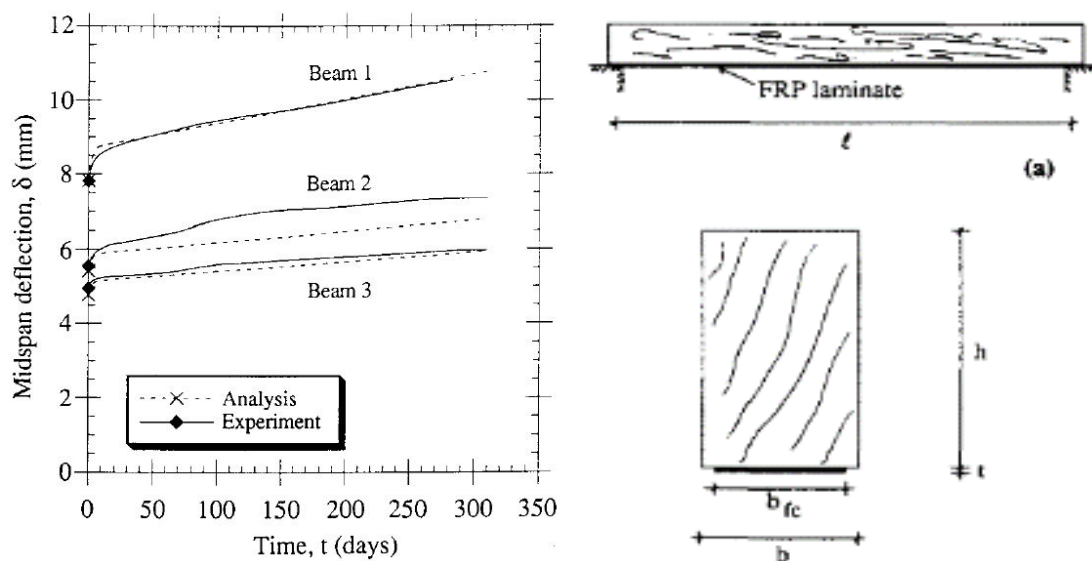
Plevris et al. (1995)³⁹⁶ realizaron ensayos sobre piezas de madera reforzadas inferiormente con láminas de FRP de varios tipos (GFRP, CFRP, AFRP) con el fin de comprender el comportamiento de estas piezas reforzadas (Fig. 47).

³⁹³ Ibidem.

³⁹⁴ Morlier, P. Creep in timber Structures. RILEM, London. 1994.

³⁹⁵ Ranta-Maunus, A. (1991). Collection of creep data of timber. Proceedings of the International Council for Building Research Studies and Documentation. Working Commission W 18A-Timber Structures CIB-W18A/24-9-2. Oxford, United Kingdom.

³⁹⁶ Plevris, N.; Triantafyllou, T. C. (1995). Creep behavior of FRP-reinforced wood members. *Journal of Structural Engineering*, 121(2) pp. 174-186. [DOI:10.1061/(ASCE)0733-9445(1995)121:2(174)].



Su conclusión fue que el comportamiento de las piezas estructurales de madera reforzadas con FRP era, básicamente, semejante al comportamiento de la madera sin reforzar. La mejora aportada por el refuerzo FRP se presentaba únicamente bajo condiciones ambientales de humedad y temperatura variables donde el refuerzo reducía la fluencia de las piezas reforzadas en comparación con piezas sin reforzar.

Siguiendo esta línea Tingley et al. (1996)³⁹⁸ realizaron una monitorización mediante bandas extensométricas de un puente de madera reforzada con FRP de reciente construcción para comprobar el comportamiento estructural de este tipo de estructuras a largo plazo bajo unas condiciones de servicio y cargas reales. El puente estaba formado por 5 vigas laminadas de abeto Douglas (*Pseudotsuga menziesii* Mirb.) de 25 m de luz, reforzadas inferiormente con laminado de AFRP, las dos vigas laterales, y con laminado CFRP, las tres vigas centrales. Las conclusiones de este ensayo fueron la no apreciación de fenómenos de fluencia significativos sobre las piezas reforzadas, y una mayor correlación entre las flechas calculadas en el proyecto y las sufridas durante su monitorización.

Del mismo modo, Davids et al. (2000)³⁹⁹ realizaron un ensayo a largo plazo similar al anterior, bajo condiciones de laboratorio, donde ensayaron 12 vigas madera laminada abeto Douglas (*Pseudotsuga menziesii* Mirb.) de dimensiones 130x305x7.000mm, con dos tipos de refuerzos de fibra de vidrio (GFRP) y fibra de carbono (CFRP), en ratios de refuerzo de 1,1 y 3,3%. Los laminados de refuerzo se colocan en la zona traccionada de las piezas (Fig. 23 Tipo NIL02). Entre otros resultados, obtienen una relación entre la fluencia relativa y la duración de la carga para los tres tipos de refuerzo empleado en los ensayos (sin refuerzo, con una capa y con tres capas). Donde puede observarse como el aumento del refuerzo de fibra de vidrio (GFRP) si bien no impide la fluencia de la viga de madera reforzada, sí que reduce su efecto (Fig. 48). Más significativamente aún en el caso de emplear refuerzos de fibra de carbono (CFRP).

³⁹⁷ Ibidem.

³⁹⁸ Tingley, D. A.; Gilham, P. C.; Kent, S. M. (1996). Long term load performance of FRP reinforced glulam bridge girders. *Proc National Conference on Wood Transportation Structures*. pp. 201-206.

³⁹⁹ Davids, W. G., Dagher, H. J., & Breton, J. M. (2000). Modeling creep deformations of FRP-reinforced glulam beams. *Wood and fiber science*, 32(4), 426-441.

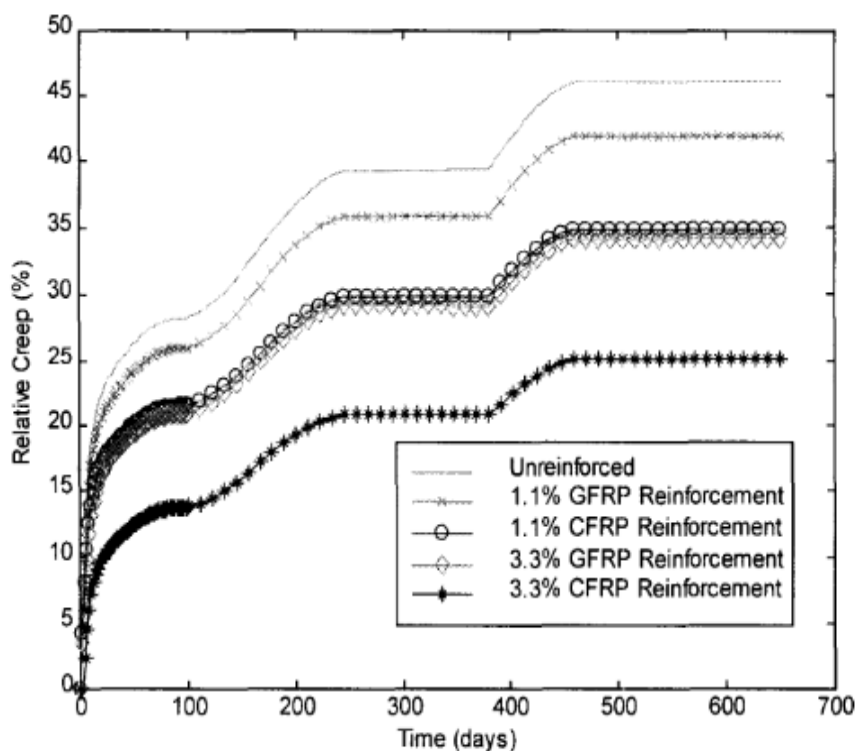


FIG. 11. Effect of FRP type and reinforcement ratio on relative creep.

Fig. 48. Efecto del refuerzo FRP en los efectos de fluencia en comparación con especímenes sin refuerzo (Fuente: Davids et al.).⁴⁰⁰

Por su parte, Yahyaei-Moayyed et al. (2011)⁴⁰¹ realizaron una investigación en profundidad sobre el comportamiento de fluencia de las piezas de madera estructural reforzadas por FRP. En sus investigaciones utilizaron laminados de aramida (AFRP), adheridos en la cara inferior (Fig. 23 Tipo REL01) de piezas aserradas de madera abeto Douglas (*Pseudotsuga menziesii* Mirb.). Sin embargo, lo interesante de este artículo, además de sus conclusiones, es la metodología empleada en los experimentos; ensayando a fluencia las piezas de madera sin reforzar, láminas de refuerzo, y piezas de madera reforzadas durante idéntico periodo de tiempo y bajo semejantes condiciones ambientales. Los resultados obtenidos fueron que, si bien los refuerzos de FRP utilizados no eliminan los procesos de fluencia sufridos por la madera, sí que son capaces de reducir significativamente su intensidad (Fig. 49).

⁴⁰⁰ Ibidem.

⁴⁰¹ Yahyaei-Moayyed, M.; Taheri, F. (2011). Experimental and computational investigations into creep response of AFRP reinforced timber beams. *Composite structures*, 93(2), pp.616-628. [DOI: 10.1016/j.compstruct.2010.08.017].

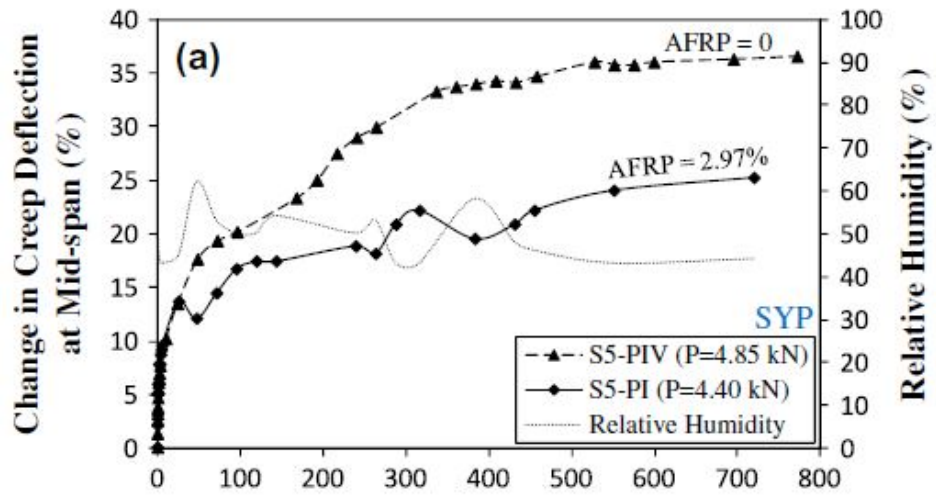


Fig. 49. Grafica tiempo / deformacion compativa entre piezas con y sin refuerzo(Fuente: Yahyaei-Moayyed et al. 2011).⁴⁰²

⁴⁰² Ibidem.

3. MATERIAL Y EQUIPOS

3.1. Instrumental y equipamiento

Esta investigación se ha desarrollado en diferentes fases y en varios laboratorios de universidades y centros de investigación públicos; principalmente en el Laboratorio de Maderas del Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal de la ETS Ingenierías Agrarias (ETSIIAA) (UVa- Campus de la Yutera), y el Laboratorio de Estructuras del Departamento de Construcciones Arquitectónicas, Ingeniería del Terreno y Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la ETS de Arquitectura (ESTAVA) (UVa- Avda. Salamanca); ambos pertenecientes a la Universidad de Valladolid. También se han realizado ensayos en el Laboratorio de Estructuras de Madera del Centro de Investigación Forestal del Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (CIFOR-INIA) en Madrid, y en el Laboratorio de Estructuras (LEST) del Departamento de Ingeniería Civil (DECivil) de la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Minho en Guimarães (Portugal). Además, se han realizado ensayos en el Laboratorio de Control y Calidad Industrial de la empresa ATISAE (Madrid). Por último, el Grupo de Investigación de Estructuras y Tecnología de la Madera ha puesto a disposición de la investigación los medios y equipos con los que cuenta.

Todos los equipos utilizados en el desarrollo de esta investigación se encuentran calibrados conforme a las especificaciones y periodicidad marcadas por cada laboratorio para garantizar la precisión y conformidad de las medidas.

3.1.1. Equipos de ensayo

Se han utilizado varias máquinas de ensayo durante el desarrollo de la investigación, en función del tipo de ensayo realizado (tracción, compresión o flexión) y del rango de carga necesaria para su ejecución. Además, en los ensayos a tracción de algunas fibras de altas prestaciones ha sido necesario recurrir a equipos con características específicas en la tipología y sistema de cierre de las mordazas para garantizar su correcta ejecución.

A. Máquina de tracción 5 kN (ESTAVA-UVa)

Máquina de tracción electromecánica, marca SHIMADZU modelo AGS-500, con una célula de carga instalada de 5kN. Monta cuñas rígidas con apriete mediante usillo manual. Se utiliza para la realización de ensayos a tracción de fibras de acuerdo con la norma ISO 527-5:2010⁴⁰³.

B. Máquina de tracción 100 kN (CIFOR-INIA)

Máquina de tracción electromecánica, marca INSTRON Modelo 1195, con una célula de carga instalada de 100kN (Fig. 50). Monta cuñas rígidas con apriete mediante usillo manual. Se utiliza para la realización de ensayos a tracción de fibras de acuerdo con la norma ISO 527-5:2010⁴⁰⁴.

⁴⁰³ Norma UNE-EN ISO 527-5:2010. Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 5: Condiciones de ensayo para plásticos compuestos unidireccionales reforzados con fibras.

⁴⁰⁴ Ibidem.

C. Máquina de tracción 400 kN (ATISAE)

Máquina a tracción hidráulica, marca INSTRON Modelo UM 18-400/SW, con una célula de carga instalada de 400 kN (Fig. 51). Monta mordazas con cuñas móviles que generan un aumento de la presión sobre la probeta al aumentar la carga. Las garras empleadas permiten un cierre total ($\pm 0,0$ mm), con lo que es posible el ensayo de probetas < 1 mm de espesor. El cierre se realiza manualmente, confiando el ajuste a un golpe seco de martillo sobre la palanca de cierre. Se utiliza para la realización de ensayos a tracción de laminados de fibras de altas prestaciones de acuerdo con la norma ISO 527-5:2010⁴⁰⁵.

D. Máquina de tracción cierre neumático 1000 kN (ATISAE)

Máquina de tracción hidráulica, marca INSTRON Modelo MEN-102/100, con una célula de carga instalada de 1.000 kN (Fig. 52). Monta mordazas con cuñas móviles que generan un aumento de la presión sobre la probeta al incrementar la carga. Las garras empleadas permiten un cierre total ($\pm 0,0$ mm) con lo que es posible el ensayo de probetas < 1 mm de espesor. El cierre se realiza mediante un sistema neumático que garantiza el correcto apriete de las mordazas, limitando el deslizamiento de la probeta. Se utiliza para la realización de ensayos a tracción de laminados de fibras de altas prestaciones de acuerdo con la norma ISO 527-5:2010⁴⁰⁶.



Fig. 50. Máquina de ensayos INSTRON Mod.1195.

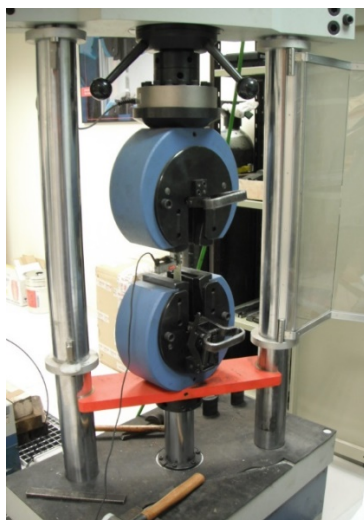


Fig. 51. Máquina INSTRON Mod. UM 18-400/SW.

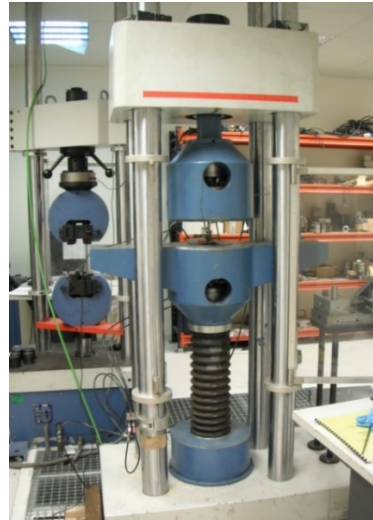


Fig. 52. Máquina INSTRON Mod. MEN-102/100.

E. Máquina Universal de ensayos (ETSIIAA-UVa)

Máquina universal de ensayos electromecánica, marca IBERTEST modelo ELIB-100 MODERN, equipada con células de carga intercambiables de 5kN, 20kN, y 100kN (Fig. 53). Se utiliza para la realización de ensayos a flexión de acuerdo con la norma UNE-EN 408:2012⁴⁰⁷.

⁴⁰⁵ Ibidem.

⁴⁰⁶ Ibidem.

⁴⁰⁷ Norma UNE-EN 408:2012. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas.



Fig. 53. Máquina universal de ensayos IBERTEST mod. ELIB-100 MODERN.

F. Actuador hidráulico tracción 25kN (LEST-U. Minho)

Actuador hidráulico instalado en pórtico de acero en configuración de tracción y control de desplazamiento en velocidad constante, con célula de carga instalada de 25kN (Fig. 54). Se utiliza para la realización de ensayos de uniones encoladas tipo “pull-off” de acuerdo con la norma UNE-EN-ISO 4624:2016.⁴⁰⁸

G. Actuador hidráulico compresión 100kN (LEST-U. Minho)

Actuador hidráulico instalado en pórtico de acero en configuración de compresión con control de desplazamiento en velocidad constante, con célula de carga instalada de 100kN (Fig. 55). Se utiliza para la realización de ensayos de uniones encoladas tipo “cortante” de acuerdo con la norma ISO 6238:2018.⁴⁰⁹



Fig. 54. Actuador hidráulico tracción 25 kN.



Fig. 55. Actuador hidráulico compresión 100 kN.

⁴⁰⁸ Norma UNE-EN-ISO 4624:2016. Pinturas y barnices. Ensayo de adherencia por tracción.

⁴⁰⁹ Norma ISO 6238:2018. Adhesives. Wood to wood adhesive bonds. Determination of shear strength by compressive loading.

3.1.2. Equipos de acondicionamiento

Se han utilizado distintos equipos de acondicionamiento, principalmente estufas de secado y cámaras climáticas, para generar entornos con las condiciones de temperatura y/o humedad necesaria para la realización de varios tipos de ensayos, o para acondicionar y estabilizar la madera.

A. Estufa de secado IBERTEST (ETSIAA-UVa)

Estufa de secado marca IBERTEST modelo ES-6, con unas dimensiones útiles de 550x600x450 mm. Regulación de temperatura con resolución 1°C, desde temperatura ambiente hasta +250°C. Recirculación interna de aire con una homogeneidad de temperatura de $\pm 2\%$, y estabilidad de $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Utilizada para obtener la humedad de las muestras de madera por el método del ensayo en estufa, de acuerdo con la norma UNE-EN 13183-1:2002 / AC (2004) ⁴¹⁰.

B. Cámara de acondicionamiento (LEST-U. Minho)

Cámara de acondicionamiento para madera realizada in situ, con condiciones semi-estancas y correctamente aislada, de unas dimensiones útiles de 2.500x7.500x2.900 mm. Las condiciones ambientales en el interior de la cámara son constantes y continuas durante todo el año, con una temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ y una humedad relativa del aire de $65 \pm 5\%$. Bajo estas condiciones las piezas de madera alcanzan una humedad de equilibrio higroscópico próxima al 12%, normalizada para la realización de ensayos de laboratorio con madera según norma UNE-EN 408:2012 ⁴¹¹.

C. Cámara climática ARALAB Fitoclima 1000 (LEST-U. Minho)

Cámara climática marca ARALAB, Mod. Fitoclima 1000, con un rango de temperatura -45 a $+180^\circ\text{C}$ ($\pm 0,5^\circ\text{C}$) y un rango de humedad de 10 a 98% ($\pm 2\%$); con dimensiones útiles de 1.000x1.060x980 mm (Fig. 56). Utilizada para realizar los ciclos ambientales en los ensayos de adhesivos.



Fig. 56. Cámara climática ARALAB Fitoclima 1000.

⁴¹⁰ Norma UNE-EN 13183-1:2002 / AC (2004). Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 1: Determinación por el método de secado en estufa.

⁴¹¹ Norma UNE-EN 408:2012. Op.cit.

3.1.3. Control ambiental y de los materiales

Con el fin de controlar o monitorizar las condiciones ambientales de laboratorio durante la ejecución de los ensayos se han utilizado dos tipos de sondas termo-higrométricas.

A. **Termohigrómetro TESTO 608-H (ETSIIAA-UVa)**

Instrumento de medición de temperatura y humedad ambiente (termohigrómetro), marca TESTO modelo 608-H. Registra medida continua en pantalla, con intervalos de medición de 18 s. Temperatura de funcionamiento de -10 hasta +70°C, resolución de medida de 0,1°C / 0,1%HR. Con una precisión de medida en temperatura de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ ($a+25^\circ\text{C}$), y en humedad de $\pm 2\%$ (en rango de 2 hasta 98%HR). Utilizado para controlar las condiciones del laboratorio durante la realización de ensayos.

B. **Sondas termo-higrométricas inalámbricas TESTO 635-2 (ESTAVA-UVa)**

Instrumento de medición de temperatura y humedad ambiente (termohigrómetro), marca TESTO modelo 635-2, con seguimiento por radiofrecuencia de hasta 3 sondas inalámbricas de temperatura y humedad. Dispone de memoria interna para el almacenamiento de datos en intervalos preestablecidos, pantalla para visualización de medidas a tiempo real, y conexión vía USB a PC para visualización y gestión de datos. Temperatura de funcionamiento de -20 hasta +50°C, resolución de medida de 0,1°C / 0,1%HR. Con una precisión de medida en temperatura de $\pm 0,3^\circ\text{C}$, y en humedad de $\pm 2\%$ (en rango de 2 hasta 98%HR). Utilizado para controlar y monitorizar las condiciones del laboratorio durante la realización de ensayos.

3.1.4. Xilohigrómetros

Se han utilizado dos xilohigrómetros de resistencia eléctrica para el control de la humedad de la madera durante las labores de fabricación de las vigas dúo y antes de la realización de ensayos.

A. **Xilohigrómetro de laboratorio SECAMAD HD-3 (ETSIIAA-UVa)**

Xilohigrómetro de resistencia de laboratorio Marca SECAMAD modelo HD-3, con selector de ajuste para uso en distintas especies. Resolución de medida 0,1% para medidas con humedad de 4-30%, según norma UNE-EN 14081-1:2016.⁴¹²

B. **Xilohigrómetro portátil Protimeter SurveyMaster (ESTAVA-UVa)**

Xilohigrómetro de resistencia portátil Marca PROTIMETER modelo SurveyMaster, con resolución de medida 1% para medidas de humedad de la madera de 6-30%, según norma UNE-EN 14081-1:2016.⁴¹³

3.1.5. Balanzas de precisión

Se han utilizado tres balanzas de precisión de prestaciones similares, en función del laboratorio en el que se estuviesen realizando los ensayos.

A. **Balanza de precisión GIBERTINI EU3000HR (ESTAVA-UVa)**

Balanza de precisión marca GIBERTINI modelo EUROPE-3000 HR, con una capacidad de 3.300 g, y una resolución de medida de 0,01 g. Masa mínima de medida 0,1 g y temperatura

⁴¹² Norma UNE-EN 14081-1:2016. Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por su resistencia. Parte 1: Requisitos generales.

⁴¹³ Ibidem.

de funcionamiento de 5-35°C. Utilizada durante la caracterización de los refuerzos para obtener el peso de las muestras de fibras; así como el pesado de las mezclas de adhesivos.

B. Balanza de precisión KERN 474 (ETSIIAA-UVa)

Balanza de precisión marca KERN modelo EMB 474, con una capacidad de 6.200 g, y una resolución de medida de 0,1 g. Masa mínima de medida 5 g y temperatura de funcionamiento de 5-35°C. Utilizada durante la obtención de la humedad de las muestras de madera por el método del ensayo en estufa, de acuerdo con la norma UNE-EN 13183-1:2002 / AC (2004)⁴¹⁴, tras cada ensayo.

C. Balanza de precisión KERN EMB 500-1 (LEST-U. Minho)

Balanza de precisión marca KERN modelo EMB 500-1, con una capacidad de 500 g, y una resolución de medida de 0,1 g. Masa mínima de medida 0,75 g y temperatura de funcionamiento de 5-35°C. Utilizada para el pesado de las mezclas de adhesivos.

3.1.6. Microscopio

Se han utilizado técnicas de microscopía durante la caracterización de adhesivos y tejidos, empleando el siguiente equipo:

A. Estereomicroscopio MOTIC (ESTAVA-UVa)

Estereomicroscopio Marca MOTIC modelo SMZ-168, con zoom óptico de 7,5x-50x aumentos, con iluminador fluorescente anular 12W y temperatura de color 6.400°K. Adaptada con cámara digital MOTICAM 2300 de 3.0 M pixeles y conexión USB para visualización y captura de imagen o video en PC. Dispone de software Motic-Images Plus 3.0, con láminas de calibración para la medida micrométrica sobre imágenes. Utilizado para el estudio de las fibras de refuerzo, medida del diámetro de sus filamentos, y estimación de la densidad por superficie de los tejidos.

3.1.7. Instrumentación de medida de precisión

A lo largo de las distintas fases de la investigación se han utilizado instrumentos de precisión para la medida.

A. Calibre Mitutoyo (ESTAVA-UVa)

Calibre marca MITUTOYO modelo 505-745, con rango de medida de 0 a 300 mm. Lectura en reloj analógico de 2 mm/revolución con resolución de medida 0,02 mm y precisión de medida declarada de $\pm 0,04$ mm. Utilizado para el dimensionado de probetas de pequeñas dimensiones empleadas durante las distintas fases de la investigación.

B. Calibre digital MANNESMANN (LEST-U. Minho)

Calibre digital marca MANNESMANN modelo M823-160, con rango de medida de 0 a 150 mm. Lectura en pantalla digital LCD con resolución de medida 0,01 mm. Utilizado para el dimensionado de probetas de pequeñas dimensiones empleadas durante los ensayos realizados en la Universidad de Minho (Portugal).

⁴¹⁴ Norma UNE-EN 13183-1:2002 / AC (2004). Op. cit.

C. Extensómetro (LVDT) HBM WA/100 (ESTAVA-UVa)

Extensómetro axial inductivo (LVDT) Marca HBM modelo WA100, con un rango de medida de 0 a 100 mm. Resolución de medida de 0,001 mm, y error de linealidad del 0,1%. Lectura digital a través de equipo de adquisición de datos y PC. Utilizados en el desarrollo de los ensayos de flexión según norma UNE-EN-408:2012⁴¹⁵.

D. Extensómetro (LVDT) HBM WA/50 (ETSIAA-UVa)

Extensómetro axial inductivo (LVDT) Marca HBM modelo WA50, con un rango de medida de 0 a 50 mm. Resolución de medida de 0,001 mm, y error de linealidad del 0,1%. Lectura digital a través de equipo de adquisición de datos y PC. Utilizados en el desarrollo de los ensayos de flexión según norma UNE-EN-408:2012⁴¹⁶.

E. Extensómetros (LVDT) INELTA ISDB/20 (LEST-U. Minho)

Extensómetro axial inductivo (LVDT) Marca INELTA modelo ISDB, con un rango de medida de 0 a 20 mm. Resolución de medida de 0,001 mm, y error de linealidad del 0,25%. Lectura digital a través de equipo de adquisición de datos y PC. Utilizados durante el desarrollo de ensayos sobre adhesivos (pull-off / shear) realizados en la Universidad do Minho (Portugal).

F. Extensómetro de pinza (ATISAE)

Extensómetro axial pinzable potenciométrico Marca IBERTEST Mod. IB-MFA 2 (Fig. 57) con una distancia de medida inicial (L_0) 50 mm y un alargamiento máximo medible (ΔL_{\max}) de 2 mm. Clase 0.2 según ISO 9513:2013⁴¹⁷. Fuerza de activación: 10 – 60 cN; Peso: 190 g. Utilizados para medir las deformaciones de las probetas GFRP durante los ensayos a tracción según norma ISO 527-5:2010⁴¹⁸.



Fig. 57. Extensómetro IBERTEST Mod. IB-MFA 2.

G. Bandas extensométricas (ESTAVA-UVa)

En el desarrollo de los ensayos se emplean bandas extensométricas marca HBM de distintos tipos (Fig. 58). Estas bandas permiten realizar medidas de deformación con una resolución de 0,01 $\mu\text{m}/\text{m}$.

⁴¹⁵ Norma UNE-EN 408:2012 Op. cit.

⁴¹⁶ Ibidem.

⁴¹⁷ Norma UNE-EN ISO 9513:2013. Materiales metálicos. Calibración de las cadenas extensométricas utilizadas en ensayos uniaxiales.

⁴¹⁸ UNE-EN ISO 527-5:2010. Op. cit.

HBM LY41- 10/120

Banda extensométrica lineal, con rejilla de Constantan sobre lámina portadora de poliamida, y temperatura de respuesta de acero ferrítico (10,8 ppm/K). Longitud de rejilla de 10 mm y resistencia nominal de 120 Ohm. Instaladas con cable de compensación para eliminar la influencia de la longitud de este (con 3 cables de 2 m). Utilizada para mediciones sobre madera.

HBM LY41- 6/120

Banda extensométrica lineal, con rejilla de Constantan sobre lámina portadora de poliamida, y temperatura de respuesta de acero ferrítico (10,8 ppm/K). Longitud de rejilla de 6 mm y resistencia nominal de 120 Ohm. Utilizada para mediciones sobre material FRP, y probetas de pequeñas dimensiones de madera limpia.

HBM XY31- 6/120

Banda extensométrica en roseta en T, con dos rejillas desplazadas 90° entre sí. Rejilla de Constantan sobre lámina portadora de poliamida, con temperatura de respuesta de acero ferrítico (10,8 ppm/K). Longitud de rejillas de 6 mm y resistencia nominal de 120 Ohm. Utilizada para mediciones de poissones sobre probetas de madera limpia (sin defectos) de pequeñas dimensiones.

Series Y

with 1 measuring grid / linear SG

LY41

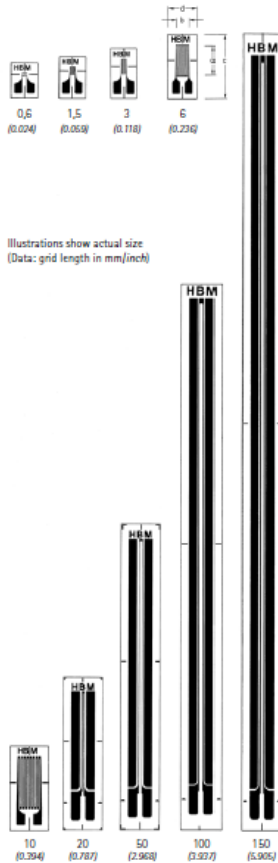
Linear SG
Temperature response matched to steel
with $\alpha = 10,8 \cdot 10^{-4}/K (6,0 \cdot 10^{-4}/F)$

LY43

Temperature response matched to aluminum
with $\alpha = 23 \cdot 10^{-4}/K (12,8 \cdot 10^{-4}/F)$

LY4x

Temperature response matched to customer's choice
see page 16



Types available ex stock		Variants	Nominal resistance	Dimensions (mm/inch)				Max. perm. effective bridge ex. voltage	Solder terminals (1)
Steel	Aluminum			Measuring grid		Measuring grid carrier			
		Other	Ω	a	b	c	d	V	
1-LY41-0.6/120		1-LY4x-0.6/120*	120	0.6 (0.024)	1.1 (0.043)	6 (0.236)	4 (0.157)	1.5	LS 5
1-LY41-1.5/120		1-LY4x-1.5/120	120	1.5 (0.059)	1.2 (0.047)	7 (0.276)	5 (0.197)	2.5	LS 5
1-LY41-3/120		1-LY43-3/120	120	3 (0.118)	1.2 (0.047)	8 (0.315)	5 (0.197)	3.5	LS 5
		1-LY4x-3/120A	120	3 (0.118)	1.2 (0.047)	8 (0.315)	5 (0.197)	3.5	LS 5
1-LY41-6/120		1-LY43-6/120	120	6 (0.236)	1.2 (0.047)	11.5 (0.453)	8 (0.315)	8	LS 5
		1-LY4x-6/120A	120	6 (0.236)	1.2 (0.047)	11.5 (0.453)	8 (0.315)	8	LS 5
1-LY41-10/120		1-LY4x-10/120	120	10 (0.394)	1.2 (0.047)	14 (0.551)	9 (0.354)	14	LS 5
		1-LY4x-10/120A	120	10 (0.394)	1.2 (0.047)	14 (0.551)	9 (0.354)	14	LS 5
1-LY41-20/120		1-LY4x-20/120	120	20 (0.787)	1.2 (0.047)	17.5 (0.689)	10 (0.394)	14	LS 5
		1-LY4x-20/120A	120	20 (0.787)	1.2 (0.047)	17.5 (0.689)	10 (0.394)	14	LS 5
1-LY41-50/120		1-LY4x-50/120	120	50 (1.968)	1.2 (0.047)	21.5 (0.847)	11 (0.433)	12	LS 5
		1-LY4x-50/120A	120	50 (1.968)	1.2 (0.047)	21.5 (0.847)	11 (0.433)	12	LS 5
1-LY41-100/120		1-LY4x-100/120	120	100 (3.937)	1.2 (0.047)	25 (0.984)	12 (0.472)	19	LS 5
		1-LY4x-100/120A	120	100 (3.937)	1.2 (0.047)	25 (0.984)	12 (0.472)	19	LS 5
1-LY41-150/120		1-LY4x-150/120	120	150 (5.906)	1.2 (0.047)	28.5 (1.122)	13 (0.512)	25	LS 5
		1-LY4x-150/120A	120	150 (5.906)	1.2 (0.047)	28.5 (1.122)	13 (0.512)	25	LS 5
1-LY41-1.5/350		1-LY4x-1.5/350*	350	1.5 (0.059)	2.2 (0.087)	8.7 (0.343)	5.5 (0.217)	6.5	LS 5
1-LY41-3/350		1-LY43-3/350	350	3 (0.118)	2.2 (0.087)	10.9 (0.429)	5.5 (0.217)	9	LS 5
		1-LY4x-3/350A	350	3 (0.118)	2.2 (0.087)	10.9 (0.429)	5.5 (0.217)	9	LS 5
1-LY41-3/350A		1-LY4x-3/350A	350	3 (0.118)	2.2 (0.087)	10.9 (0.429)	5.5 (0.217)	9	LS 5
1-LY41-6/350		1-LY43-6/350	350	6 (0.236)	2.2 (0.087)	13.9 (0.547)	6.5 (0.256)	15	LS 5
		1-LY4x-6/350A	350	6 (0.236)	2.2 (0.087)	13.9 (0.547)	6.5 (0.256)	15	LS 5
1-LY41-10/350		1-LY4x-10/350	350	10 (0.394)	2.2 (0.087)	16.9 (0.665)	7.5 (0.295)	24	LS 5
		1-LY4x-10/350A	350	10 (0.394)	2.2 (0.087)	16.9 (0.665)	7.5 (0.295)	24	LS 5
1-LY41-3/700		1-LY43-3/700	700	3 (0.118)	10.9 (0.429)	10.9 (0.429)	5.5 (0.217)	13	LS 5
		1-LY4x-3/700	700	3 (0.118)	10.9 (0.429)	10.9 (0.429)	5.5 (0.217)	23	LS 5
1-LY41-6/700		1-LY4x-6/700	700	6 (0.236)	11.9 (0.469)	13.9 (0.547)	6.5 (0.256)	23	LS 5
		1-LY4x-6/700A	700	6 (0.236)	11.9 (0.469)	13.9 (0.547)	6.5 (0.256)	23	LS 5
1-LY41-10/1000		1-LY4x-10/1000	1,000	10 (0.394)	11.9 (0.469)	16.9 (0.665)	7.5 (0.295)	40	LS 5
		1-LY4x-10/1000A	1,000	10 (0.394)	11.9 (0.469)	16.9 (0.665)	7.5 (0.295)	40	LS 5

(1) Solder terminals are not compulsory
(2) With the temperature adaptation for quartz glass / composite (x=6) available ex stock (preferential gage)
(*) Types are only available with matching to aluminum, ferritic or austenitic steel

XY31

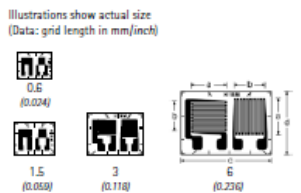
0°/90° T rosette
Temperature response matched to steel
with $\alpha = 10,8 \cdot 10^{-4}/K (6,0 \cdot 10^{-4}/F)$

XY33

Temperature response matched to aluminum
with $\alpha = 23 \cdot 10^{-4}/K (12,8 \cdot 10^{-4}/F)$

XY3x

Temperature response matched to customer's choice
see page 16



Types available ex stock		Variants	Nominal resistance	Dimensions (mm/inch)				Max. perm. effective bridge ex. voltage	Solder terminals (1)
Steel	Aluminum			Measuring grid		Measuring grid carrier			
		Other	Ω	a	b	c	d	V	
1-XY31-0.6/120		1-XY3x-0.6/120*	120	0.6 (0.024)	1 (0.039)	7 (0.276)	6 (0.236)	1.5	LS7
1-XY31-1.5/120		1-XY3x-1.5/120	120	1.5 (0.059)	1.6 (0.063)	8 (0.315)	6.3 (0.248)	3	LS7
1-XY31-3/120		1-XY3x-3/120	120	3 (0.118)	1.7 (0.067)	10.5 (0.413)	8 (0.315)	5.5	LS7
1-XY31-6/120		1-XY3x-6/120	120	6 (0.236)	1.7 (0.067)	13.5 (0.529)	10 (0.394)	11	LS4
1-XY31-1.5/350		1-XY33-1.5/350	350	1.5 (0.059)	1.7 (0.067)	7.7 (0.303)	6.3 (0.248)	5	LS7
		1-XY3x-1.5/350*	350	1.5 (0.059)	1.7 (0.067)	7.7 (0.303)	6.3 (0.248)	5	LS7
1-XY31-3/350		1-XY33-3/350	350	3 (0.118)	1.7 (0.067)	10.9 (0.429)	7.5 (0.295)	10	LS5
		1-XY3x-3/350*	350	3 (0.118)	1.7 (0.067)	10.9 (0.429)	7.5 (0.295)	10	LS5
1-XY31-6/350		1-XY33-6/350	350	6 (0.236)	1.7 (0.067)	13.9 (0.547)	10 (0.394)	20	LS4
		1-XY3x-6/350*	350	6 (0.236)	1.7 (0.067)	13.9 (0.547)	10 (0.394)	20	LS4

Fig. 58. Dimensiones bandas extensométricas utilizadas tipo lineales (LY41- 10/120 y LY41- 6/120), y tipo roseta (XY31- 6/120) de la marca HBM (Fuente: Catalogo HBM 2015 419).

419 AA.VV. (2015) "Strain gauges. Absolute precision from HBM" Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM).

En función del tipo de ensayo (larga/corta duración) y del material se utilizan dos tipos de adhesivos. Para ensayos de corta duración sobre material plástico, o madera limpia, se utiliza adhesivo monocomponente de cianocrilato, tipo HBM Z70. Para ensayos de larga duración, o sobre madera estructural, se utiliza un adhesivo de polimerización en frío, bicomponente, de metil-metacrilato tipo HBM X-60. En ensayos a largo plazo, además se protege la superficie de las bandas extensométricas con una laca de poliuretano (tipo HBM PU 140), frente al polvo, la humedad o roces (Fig. 59).

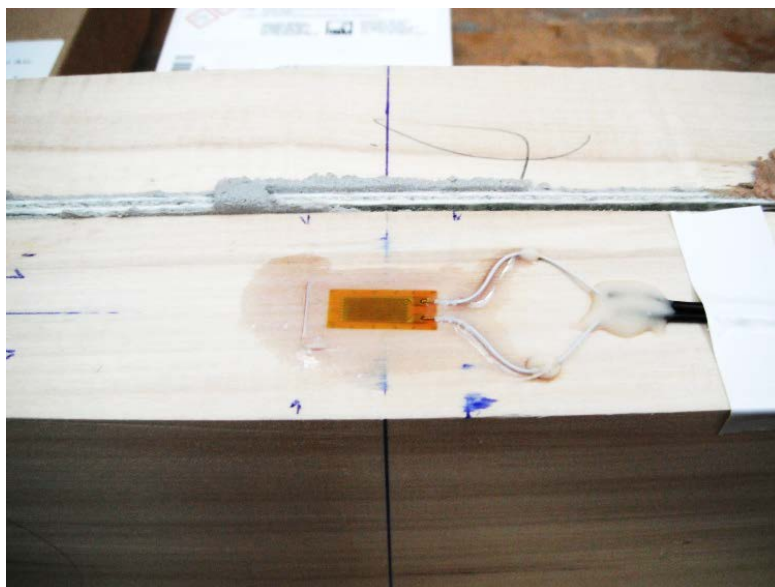


Fig. 59. Banda extensométrica LY41-10/120 colocada en una de las vigas.

3.1.8. Equipo de medida volumétrica

A. **Contador volumétrico de pistón rotativo con salida digital Zenner RNK (ESTAVA-UVa)**

Contador volumétrico de pistón rotativo Marca ZENNER modelo RNK-L-RP-N, con una resolución de medida de 0,02 litros, y una precisión de 0,1 litros. Dispone de salida digital para la lectura a través de PC. Este equipo se ha utilizado para conocer con precisión el volumen de agua introducido en el depósito y, de este modo, controlar la carga total aplicada durante los ensayos de fluencia.

3.1.9. Equipos de adquisición de datos

A. **Equipo de adquisición de datos HBM QuantumX MX840B – 8 canales universales (ESTAVA-UVa)**

Equipo de adquisición de datos marca HBM Modelo QuantumX MX840B, con 8 canales universales con conectores DSubH 15 pines. Permite la alimentación (5-24 V) y lectura (40 kS/s) de todo tipo de sensores (Bandas extensométricas, potenciómetros, LVDT, ...), con una temperatura de trabajo de -20 a +65°C y humedad de 5-95%. Se utiliza para la lectura de LVDT, contador volumétrico, células de carga, y bandas extensométricas (únicamente en configuración cuarto de puente de Wheatstone) empleados en el desarrollo de ensayos.

B. **Equipo de adquisición de datos HBM CanHead CB1010 (ESTAVA-UVa)**

Adicionalmente al equipo anterior se emplea otro sistema de adquisición de datos de la marca HBM modelo CanHead CB1010, específicamente diseñado para la medición con bandas extensométricas. Este equipo dispone de 10 canales con conector RJ45, equipados todos ellos

con resistencias 120/350/700/1.000 Ohm, pudiendo medir con cualquier tipo de configuración de puente de Wheatstone y con bandas extensométricas de distintas resistencias, con una temperatura de trabajo de -30 a +70°C y humedad de 10-90%. Se utiliza para la medición de bandas extensométricas en ensayos de fluencia (largo plazo), montadas cada una de ellas con banda de compensación paralela (medio puente) para eliminar la influencia de la humedad y temperatura en las mediciones.



Fig. 60. Sistema de adquisición de datos QuantumX-MX840B.



Fig. 61. Sistema de adquisición de datos CanHead CB1010.

3.1.10. Cámara fotográfica

A. Cámara fotográfica

Utilizada para registrar gráficamente los distintos procesos realizados durante el desarrollo de la investigación.

3.1.11. Otro equipamiento

A. Equipamiento auxiliar de laboratorio

Bancada de acero (ETSAVA-UVA)

Bancada de acero diseñada y construida *exprofeso* para la realización de los ensayos de fluencia, de dimensiones exteriores aproximadas 800x1.000x2.500 mm (Fig. 62).

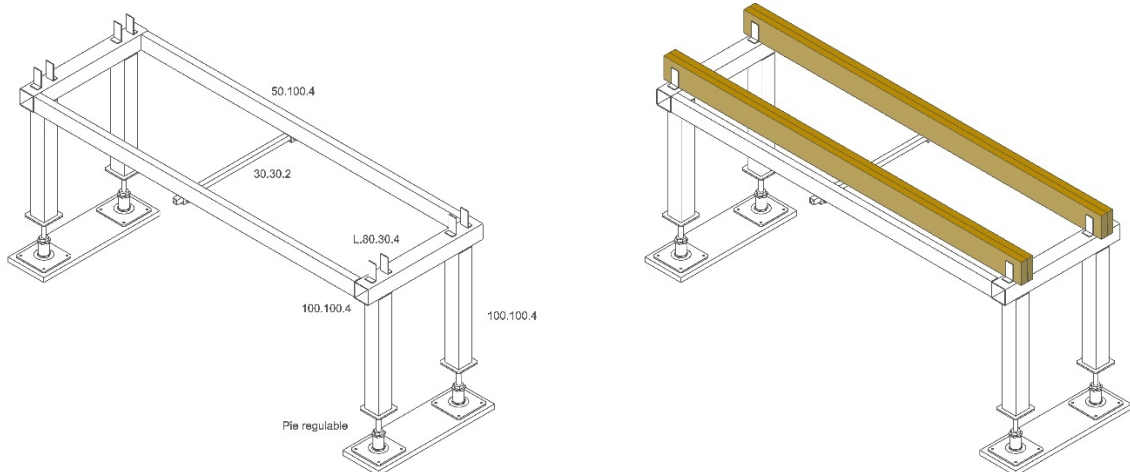


Fig. 62. Croquis de las bancadas de acero.

Bolsas herméticas + cajas herméticas para la estabilización de probetas

Bolsas herméticas de cierre tipo zip de dimensiones 150x200 mm, y cajas de plástico herméticas de dimensiones 200x350x120 mm. Se utilizan para mantener las probetas de pequeñas dimensiones estabilizadas en unas condiciones protegidas durante periodos limitados de tiempo hasta su ensayo.

Cilindros metálicos mecanizados (LEST-U. Minho)

Cilindros metálicos de latón, de diámetro 50 mm y espesor 25 mm, con cara inferior pulida y mecanizado de rosca Ø10 mm en la cara superior. Utilizados como sufridera para el anclaje del actuador a tracción y anillo de LVDTs en los ensayos de pull-off.

Depósitos de 1000L (ETSAVA-UVA)

Depósitos de pared simple de polietileno (PE) con una capacidad útil de 1.000 litros y dimensiones aproximadas 1.650x720x1.260 mm, con bocas de llenado superiores y racor de vaciado con llave inferior de ½". Utilizados para introducir carga en los ensayos de fluencia de acuerdo con la norma UNE 380:1998.⁴²⁰

Desecador (ETSIIAA-UVA)

Recipiente de vidrio con tapa hermética y cavidad inferior para la colocación de desecante. Permite mantener las probetas en un ambiente anhidro mientras enfrían durante la obtención de la humedad de la madera por el método de secado en estufa UNE-EN 13183-1:2002 / AC (2004).⁴²¹

Sierra de corona (LEST-U. Minho)

Sierra de corona de corte para madera de dimensiones Ø_{ext} 53mm, Ø_{int} 48mm, longitud 55mm. Utilizada para la realización de las perforaciones en los ensayos de pull-off.

Útil de cortante (LEST-U. Minho)

Útil de carga y apoyo para el ensayo de probetas para la determinación del esfuerzo cortante, de acuerdo con las características expuestas en la norma ISO 6238:2018.⁴²²

B. Utillaje y herramientas**Amoladora + útil para discos de lija**

Amoladora marca BOSCH modelo GWS 7-115 Professional, de potencia nominal 720 W (Potencia útil 300 W), velocidad de giro 11.000 rpm. A este equipo monta un plato Ø115mm para colocar papel de lija. Utilizado para mejorar el acabado superficial de las bandas de refuerzo.

Espátula de carrocerero

Espátula de carrocerero de acero inoxidable, de diversas anchuras. Utilizadas para la manipulación y aplicación de las resinas durante las labores de encolado.

Mesa combinada + fresa

Mesa combinada de carpintería marca WOODMAN modelo 310N/1500, con cepillo, fresa y torno. Se utiliza una fresa plana marca INCASTRI, de Ø200 x 6/4 x 50 mm, para la realización de la caja en una de las tablas de la viga dúo donde colocar el refuerzo FRP.

⁴²⁰ UNE 380:1998 Estructuras de madera. Métodos de ensayo. Principios generales para los ensayos de carga estática.

⁴²¹ Norma UNE-EN 13183-1:2002 / AC (2004). Op.cit.

⁴²² Norma ISO 6238:2018. Op.cit.

Pistola termo encoladora

Pistola para la aplicación de cola termofusible de potencia nominal 80 W. Utilizada para fijar temporalmente equipos de medidas y topes, durante la realización de ensayos.

Rodillo de goma de 40 mm

Utilizado para asentar la lámina de refuerzo sobre la cama de resina durante las labores de encolado.

Sargento de carpintero

Tornillo de apriete de émbolo con freno antideslizante de dos tipos; de longitud 1.000 mm, y longitud 150 mm. Utilizados para aplicar una presión homogénea durante la fabricación y encolado de las vigas dúo o probetas con adhesivos.

Taladro + mezclador espiral “cola de cerdo”

Taladro marca BOSCH modelo GSB 13 RE-PROFESSIONAL, de potencia nominal 600 W (potencia útil 301 W), velocidad de giro regulable 0-2.800 rpm y par de giro de 1,8 Nm. A este equipo se le coloca un mezclador tipo espiral (cola de cerdo) de Ø8 mm y 500 mm de longitud. Utilizado para mezclar los componentes de las resinas.

Tronzadora abatible VIRUTEX TM33W

Tronzadora abatible marca VIRUTEX modelo TM33W, de potencia nominal 1.500 W y velocidad en vacío de 3.700 rpm. Con disco circular de diámetro 300 mm, equipada con mesa superior con guía y separador de corte.

Útil para extender la resina

Para la aplicación de la resina sobre la banda de refuerzo se ha fabricado un útil recomendado en los documentos de información de la marca Sika (Fig. 63), con el cual una vez aplicada y trabajada la resina sobre la banda se hace pasar a esta por un tope con el fin de obtener un espesor de resina constante en toda la banda.

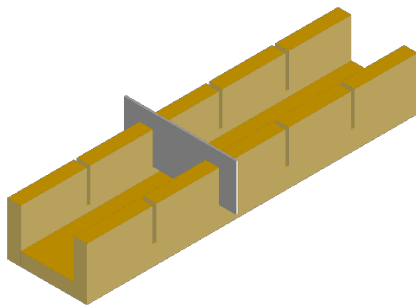


Fig. 63. Útil para la aplicación de la resina sobre la banda de refuerzo.

3.2. Materiales

En la investigación se utiliza madera de chopo (*Populus x euroamericana* I-214) y madera de pino pinaster (*Pinus pinaster* Ait.), en distintos formatos y dimensiones. Toda la madera utilizada a lo largo de la investigación proviene de 3 lotes, manteniéndose en todo momento su trazabilidad a través del lote y proveedor; y limitándose, en la medida de lo posible, la dispersión de resultados basada en el origen de la madera. En la Tabla 14 y Tabla 15 se describen los lotes, origen y propiedades observadas, en la recepción de la madera en el Laboratorio de Maderas (ETSIIAA de Palencia).

Tabla 14. Origen y propiedades en acopio de la madera de chopo utilizada en esta investigación.

1. DESCRIPCIÓN			
Lote:	Partida 1	Partida 2	Partida 3
Fecha:	Octubre 2010	Febrero 2015	Julio 2015
Genero:	<i>Populus x euroamericana</i> l-214		
Dimensiones nominales:	50x130x4.000 mm	80x150x2.500 mm	60x150x2.500 mm
Unidades:	120 piezas	140 piezas	90 piezas
2. ORIGEN			
Proveedor:	Almacenes Cámara S.L (Valladolid)		
Aserradero de origen:	Maderas Juez S.L (Cervera de Pisuerga - Palencia)		
Área geográfica de explotación:	Berzosilla (Palencia)		
Lote de explotación:	L2009	L2013	L2013
3. PROPIEDADES OBSERVADAS EN ACOPIO			
Clasificación visual (UNE 56544:2011):	Madera limpia. Asimilable a ME-1	Madera limpia. Asimilable a ME-1	Madera limpia. Asimilable a ME-1
Humedad media (UNE-EN 14081-1:2016):	<12 %	<15 %	<12%
Densidad media (10 muestras) (UNE-EN 384:2016):	Aprox.345 kg/m ³	Aprox.370 kg/m ³	Aprox.360 kg/m ³

Tabla 15. Origen y propiedades en acopio de la madera de pino pinaster utilizada en esta investigación.

1. DESCRIPCIÓN			
Lote:	Partida 1	Partida 2	Partida 3
Fecha:	Octubre 2010	Febrero 2015	Julio 2015
Genero:	<i>Pinus pinaster</i> Ait.		
Dimensiones nominales:	60x130x2.500 mm	45x290x2.500 mm	60x150x2.500 mm
Unidades:	170 piezas	90 piezas	110 piezas
2. ORIGEN			
Proveedor:	Almacenes Cámara S.L (Valladolid)		
Aserradero de origen:	Maderas Juez S.L (Cervera de Pisuerga - Palencia)		
Área geográfica de explotación:	Sierra de Oña		
Lote de explotación:	L2009	L2014	L2014
3. PROPIEDADES OBSERVADAS EN ACOPIO			
Clasificación visual (UNE 56546:2011):	Madera limpia. Clase visual ME-2	Madera limpia. Clase visual ME-2	Madera limpia. Clase visual ME-2
Humedad media (UNE-EN 14081-1:2016):	<12 %	<14 %	<10%
Densidad media (10 muestras) (UNE-EN 384:2016):	Aprox.480 kg/m ³	Aprox.535 kg/m ³	Aprox.510 kg/m ³

De estos lotes se tomaron piezas para la fabricación de las probetas necesarias en cada tipo de ensayo, bien en las propias instalaciones del laboratorio o en otras instalaciones (carpintería).

3.2.1. Maderas

La estimación previa de las propiedades físicas y mecánicas de la madera utilizada a lo largo de la investigación se obtienen a partir de 3 tipos de ensayos.

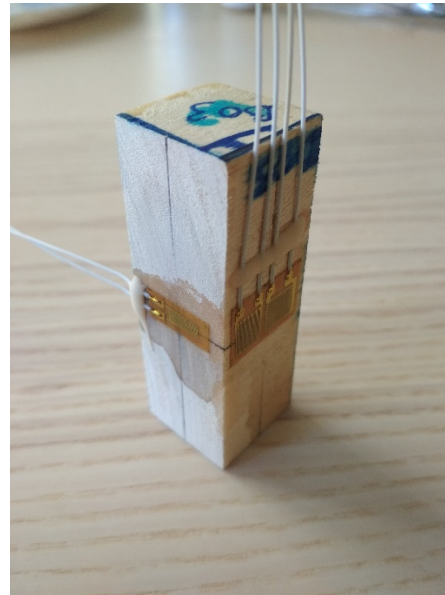
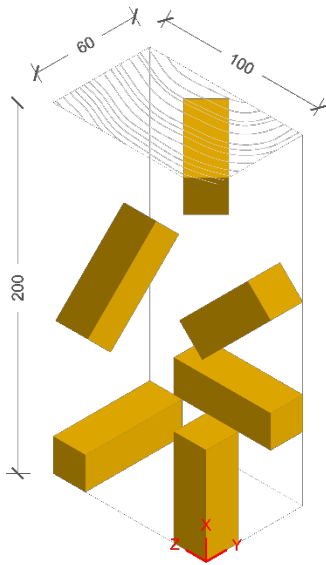
A. Ensayos de compresión

A partir de 5 piezas tomadas al azar de madera de chopo y pinaster, se extraen 6 probetas de cada una de ellas obtenidas en distintas direcciones, concretas y específicas, respecto a su eje axial (Fig. 64a), de dimensiones nominales 20x20x60 mm para su ensayo a compresión según UNE 56535:1977⁴²³. Las probetas se extraen de madera limpia, sin defectos ni anomalías visibles, y se preparan de acuerdo con la norma UNE 56528:1978⁴²⁴, manteniéndose

⁴²³ Norma UNE 56535:1977 "Características físico-mecánicas de la madera. Determinación de la resistencia a compresión axial".

⁴²⁴ Norma UNE 56528:1978 "Características físico-mecánicas de la madera. Preparación de probetas para ensayos".

estabilizadas bajo condiciones de laboratorio a una humedad de equilibrio higroscópico equivalente al 12% hasta su ensayo (Fig. 64b).



a) Obtención de las distintas probetas de cada pieza. b) Probeta extraída e instrumentada lista para su ensayo.
Fig. 64. Preparación de las probetas de Poisson.

Los distintos tipos de probetas ensayadas (Fig. 65) permiten determinar en cada tipo de madera la resistencia a compresión perpendicular y paralela, así como 12 constantes elásticas de las piezas en distintas direcciones; 3 Módulos de elasticidad (E_L , E_R , E_T), 3 Módulos de cortante (G_{LR} , G_{LT} , G_{RT}), y 6 coeficientes de Poisson (ν_{LR} , ν_{RL} , ν_{LT} , ν_{TL} , ν_{RT} , ν_{TR}).

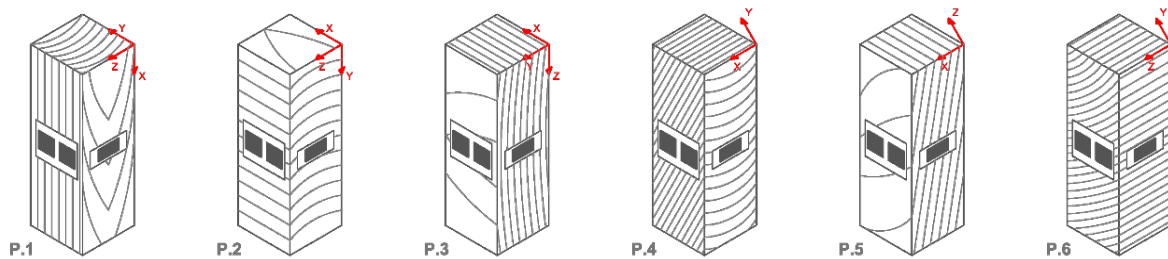


Fig. 65. Probetas con sus distintas direcciones obtenidas de cada una de las piezas.

B. Ensayos de tracción paralela a la fibra

De los tabloncillos de madera de chopo y pinaster se extraen 5 probetas (Fig. 66), de distintas piezas elegidas al azar, de dimensiones nominales 4x20x350 mm para su ensayo a tracción axial según ISO 13061-6:2014⁴²⁵. Las probetas se extraen de madera limpia, sin defectos ni anomalías visibles, y se cortan mediante corte por control numérico según la forma y dimensiones definidas por la norma ISO 13061-6:2014⁴²⁶, manteniéndose estabilizadas bajo condiciones de laboratorio a una humedad de equilibrio higroscópico equivalente al 12% hasta su ensayo.

⁴²⁵ Norma ISO 13061-6 (2014) Physical and mechanical properties of wood -- Test methods for small clear wood specimens -- Part 6: Determination of ultimate tensile stress parallel to grain.

⁴²⁶ Ibidem.

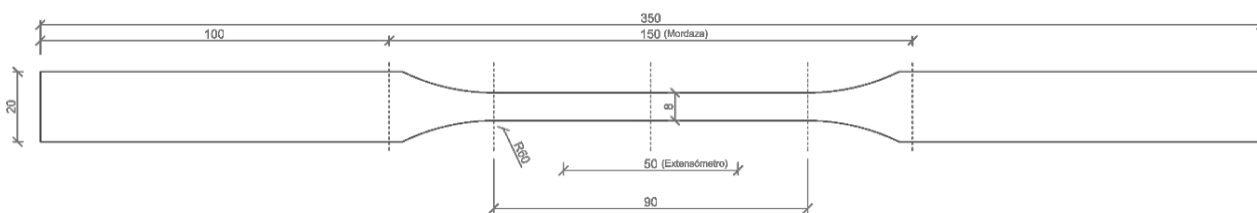


Fig. 66. Probeta a tracción según norma ISO 13061-6:2014.⁴²⁷

Las probetas ensayadas permiten determinar la resistencia a tracción paralela y módulo de elasticidad a tracción.

C. Ensayos de cortante

De los tabloncillos de madera de chopo y pinaster se extraen 10 probetas (Fig. 67), de distintas piezas elegidas al azar, de dimensiones nominales 50x50x60 mm para su ensayo a cortante según UNE 56543:1988⁴²⁸. Las probetas se extraen de madera limpia, sin defectos ni anomalías visibles, y se cortan según la forma y dimensiones definidas por la citada norma⁴²⁹, manteniéndose estabilizadas bajo condiciones de laboratorio a una humedad de equilibrio higroscópico equivalente al 12% hasta su ensayo. Las probetas ensayadas permiten determinar la resistencia a cortante.

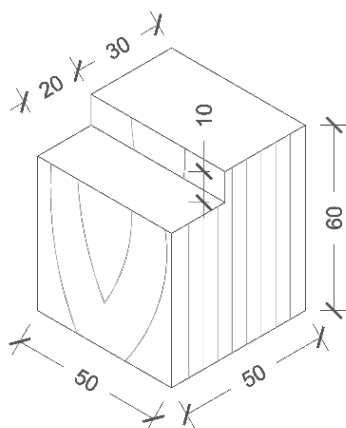


Fig. 67. Probetas a cortante según norma UNE 56543:1988.⁴³⁰

3.2.2. Fibras naturales

Se seleccionaron 6 tipos de refuerzos naturales, de distintas especies de madera y fibras, para el estudio de su eficacia como refuerzo estructural: 5 en forma de banda rígida y 1 en forma de tejido.

A. Chapas

A partir de madera de distintas especies con altos módulos elásticos, se fabrican probetas limpias, de espesor reducido, sin defectos o anomalías aparentes, en dimensión nominal 0,5-1x25x200 mm ensayándose a tracción un mínimo de 6 probetas de cada tipo. Las especies seleccionadas, sus propiedades y características se detallan en la Tabla 16.

⁴²⁷ Ibidem.

⁴²⁸ Norma UNE 56543:1988 "Características físico-mecánicas de la madera. Determinación del esfuerzo cortante".

⁴²⁹ Ibidem.

⁴³⁰ Ibidem.

Tabla 16. Propiedades de la madera utilizada como refuerzo declaradas en origen.

	Bambú natural (Fuente: Catálogo Tuka ⁴³¹)	Bambú tostado (Fuente: Catálogo Tuka ⁴³²)	Arce (Acer sp.) (Fuente: Industrias Losán ⁴³³)	Roble (Q.robur) (Fuente: Eban. Navas ⁴³⁴)	Roble (Q.alba) (Fuente: Industrias Losán ⁴³⁵)
1. DESCRIPCIÓN					
Material:	Bambú natural	Bambú tostado	Madera de Arce europeo (<i>Acer pseudoplatanus</i>)	Madera de Roble europeo (<i>Quercus robur</i> / <i>Quercus pétrea</i>)	Madera de Roble blanco americano (<i>Quercus alba</i>)
Fabricante:	Tuka bamboo	Tuka bamboo	Industrias Grupo Losan (A Coruña)	Ebanistería Navas (Navarra)	Industrias Grupo Losan (A Coruña)
Marca comercial:	"Natural bamboo CVT2500"	"Toasted bamboo CVT2500"	Chapa natural de maple rameado	Chapa natural de roble europeo	Chapa natural de roble americano
Descripción:	Chapa de bambú natural	Chapa de bambú tostado	Chapas de madera de arce obtenidas mediante corte plano de piezas de madera.	Chapas de madera de roble obtenidas mediante corte plano de piezas de madera.	Chapas de madera de roble obtenidas mediante corte plano de piezas de madera.
Origen:	China	China	Europa	España	EE.UU.
2. PROPIEDADES					
Formato	Chapas 2.500x1.250 mm y espesor variable.	Chapas de long., sección y anchura variable.	Chapas de long. 500- 4000mm, y anchura 100 a 500mm.Espesores de 0.50 a 2 mm.	Chapas de long., sección y anchura variable	Chapas de long. 500- 4000mm, y anchura 100 a 500mm.Espesores de 0,50 a 2 mm.
Prop. geométricas:	-	-	-	-	-
Densidad:	700 kg/m ³	700 kg/m ³	610-680 kg/m ³	670-760 kg/m ³	670-770 kg/m ³
Prop. mecánicas:					
<i>Mod. Elasticidad:</i>	N/E	N/E	9,1-12 GPa	10-14,50GPa	13 GPa
<i>Tensión tracción:</i>	N/E	N/E	N/E	N/E	N/E
<i>Deform. rotura:</i>	N/E	N/E	N/E	N/E	N/E
3. COSTES					
Precio aproximado	80 €/m ²	85 €/m ²	50 €/m ²	70 €/m ²	60 €/m ²

B. Tejidos

Se ha seleccionado una fibra de lino, de la marca FIDIA, tipo 'FIDFLAX UNI 300 HS 50', comercializado para su uso en obras de restauración como material de refuerzo. Se presenta como tejido bidireccional compuesto por urdimbre longitudinal (300 g/m²) y trama transversal (50 g/m²) (Fig. 68).

⁴³¹ www.tukabamboo.com [Consultada 29/12/2018].

⁴³² Ibidem.

⁴³³ <https://www.losan.es> [Consultada 29/12/2018].

⁴³⁴ <https://www.ebanisterianavas.com> [Consultada 29/12/2018].

⁴³⁵ <https://www.losan.es> [Consultado 29/12/2018].



Fig. 68. Tejido de lino Fidflax Uni 300 HS 50.

Sus propiedades y características se detallan en la Tabla 17.

Tabla 17. Propiedades declaradas por la marca de fibra de lino Fidia.

FIBRA DE LINO (Tejido) (Fuente: Catálogo Fidia ⁴³⁶)	
1. DESCRIPCIÓN	
Material:	Tejido de fibra de lino
Fabricante:	FIDIA
Marca comercial:	'FIDFLAX UNI 300 HS50'
Descripción:	Tejido de fibra de lino, con fibra principal unidireccional de gramaje 300 g/m ² y urdimbre (90°) de gramaje 50 g/m ² .
Origen:	Italia / China
2. PROPIEDADES	
Formato	Tejido en rollo de 30m de longitud y anchura 1500 mm.
Propiedades geométricas:	Tejido principal unidireccional 0° [300 g/m ²] + tejido urdimbre 90° [50 g/m ²]
Densidad:	Aprox. 1500 g/m ³
Propiedades mecánicas:	
<i>Mod. Elasticidad:</i>	21.400 MPa
<i>Tensión tracción:</i>	512 MPa
<i>Deformación rotura:</i>	3,27%
3. COSTES	
Precio aproximado:	15 €/m ²

3.2.3. Fibras sintéticas

Se seleccionan 6 tipos de fibras sintéticas, de fibra de vidrio y fibra de carbono, para el estudio de su uso como refuerzo estructural: 3 en forma de tejido y 3 en forma de matriz rígida. De esta selección de fibras, tras su estudio y caracterización, se eligió el refuerzo FRP con el que continuar el desarrollo de la investigación.

A. Tejidos

Fibra de vidrio [UNI 300]

Uno de los tejidos seleccionados fue una fibra de vidrio fabricada por la empresa FIDIA denominada comercialmente 'FIDGLASS UNI 300 HT 73' (Fig. 69). Esta fibra es un tejido esencialmente unidireccional con un gramaje de 300 g/m². Se comercializa para aplicaciones de restauración sobre estructuras.

⁴³⁶ http://www.fidiaglobalservice.com/eng/materiali_schede/FIDFLAX%20UNIDIR%20300%20HS50.pdf
29/12/2018]

[Consultada

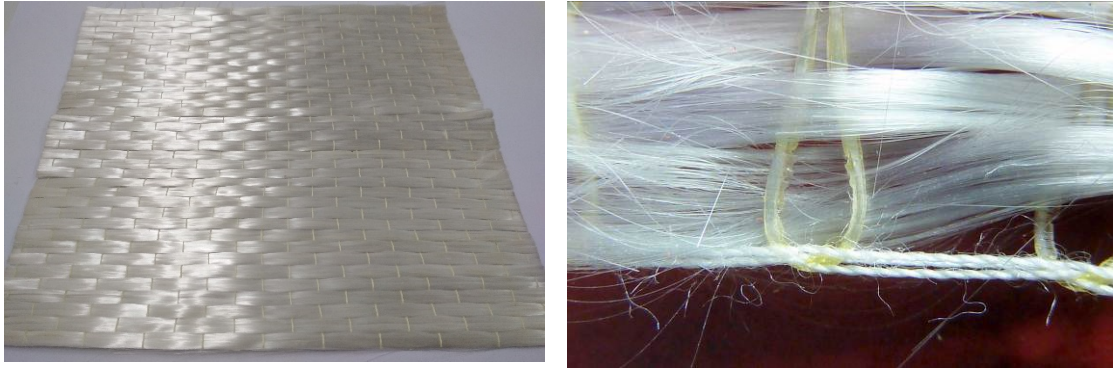


Fig. 69. Tejido de fibra de vidrio Fidglass Uni 300 HT 73.

Fibra de vidrio [UNI 1200]

Otro de los tejidos seleccionados fue una fibra de vidrio proporcionada por la empresa INDEMAT, denominada comercialmente 'OWENS CORNING FIBERGLASS LTx1200/S300' (Fig. 70). Esta fibra es un tejido unidireccional de un mayor gramaje que la anterior, compuesto por urdimbre longitudinal de 1200 g/m² y un MAT de 300 g/m² en una de sus caras. Se comercializa para aplicaciones de moldeo e infusión de elementos estructurales.



Fig. 70. Tejido de fibra de vidrio Owens Corning Fiberglass LTx1200/S300.

Fibra de carbono

Por último, se seleccionó un tejido de fibra de carbono proporcionada por la empresa SIKA denominada comercialmente 'SikaWrap-230 C/45' (Fig. 71). Esta fibra es un tejido esencialmente unidireccional, a base de fibra de carbono de resistencia media para su aplicación por proceso seco. El tejido está compuesto en un 99% de su peso por una urdimbre de fibra de carbono, unida a través de una trama de fibras termoplásticas fijadas por calor.

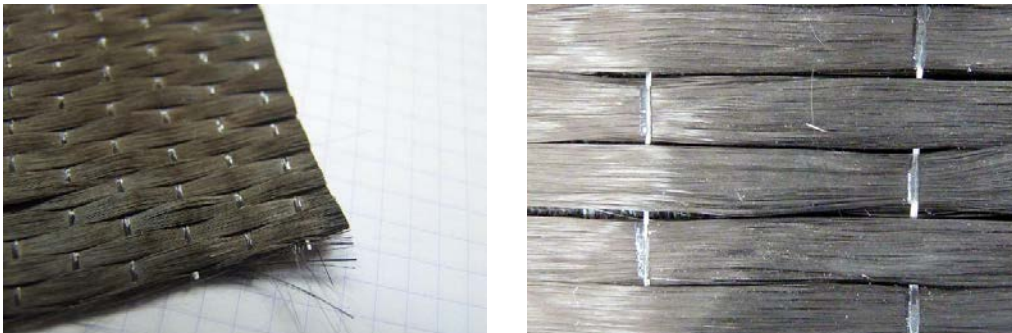


Fig. 71. Tejido de fibra de carbono SikaWrap-230 C/45.

Las propiedades fundamentales de estos tejidos se resumen en la Tabla 18.

Tabla 18. Resumen de las propiedades de los distintos tejidos de fibra sintéticas utilizados, declaradas por la marca.

	Fibra de vidrio [UNI 300] (Fuente: Catálogo Fidia ⁴³⁷)	Fibra de vidrio [UNI 1200] (Fuente: Owens Corning ⁴³⁸)	Fibra de carbono [UNI 230] (Fuente: SIKA ⁴³⁹)
1. DESCRIPCIÓN			
Material:	Tejido de fibra de vidrio	Tejido de fibra de vidrio	Tejido de fibra de carbono
Fabricante:	FIDIA	Owens Corning Fiberglass	SIKA
Marca comercial:	'FIDGLASS UNI 300 HT73'	'OWENS CORNING FIBERGLASS LTx1200/S300'	"SikaWrap®-230 C/45"
Descripción:	Tejido de fibra de vidrio unidireccional de gramaje 300 g/m ² .	Tejido de fibra de vidrio unidireccional de gramaje 1200 g/m ² , con un MAT de montaje de 300 g/m ²	Tejido unidireccional de fibra de carbono para su aplicación en refuerzos estructurales por proceso seco.
Origen:	Italia	Estados Unidos / China	Alemania
2. PROPIEDADES			
Formato	Rollo de 50m de longitud y anchura variable.	Rollo de 50m de longitud y anchura variable.	Rollo de 50m de longitud y anchura 300 mm.
Prop. geométricas:	Tejido principal unidireccional 0° [300 g/m ²]	Tejido unidireccional 0° [1200 g/m ²] con tejido MAT (aleatorio) de montaje [300 g/m ²]	Tejido unidireccional 0° (230±10 g/m ²)
Densidad:	Aprox. 2.500 kg/m ³	Aprox. 2.670 kg/m ³	Aprox. 1.760 kg/m ³
Prop. mecánicas:			
Mod. Elasticidad:	73.000 MPa	> 70.000 MPa	234.000 MPa
Tensión tracción:	2.500 MPa	2.500 MPa	4.300 MPa
Deformación rotura:	3,42%	No especificado	1,8%
Prop. químicas:	Fibra de vidrio tipo E glass	Fibra de vidrio tipo E glass	Fibra de carbono
3. COSTES			
Precio aproximado:	80 €/m ²	60 €/m ²	650 €/m ²

De cada uno de los tejidos se cortan 5 fragmentos de dimensiones nominales 250x250 mm para su caracterización física, y se fabrican 22 probetas de dimensiones nominales 25x150 mm para su caracterización mecánica a tracción.

B. Bandas rígidas

Laminado Fibra de vidrio [UNI 300-600]

Matriz rígida de fibra de vidrio 'Saertex Glass UNI 300' embebida en resina epoxy-vinylester 'Epovia Optimum KRF 4436 Al' fabricado específicamente para esta investigación por la empresa R&B Composites (Toledo) mediante infusión en vacío. Tiene un porcentaje de fibra en los refuerzos >55%, y dimensiones aproximadas 60x1.200 mm. Se realizan dos tipos de laminado: un laminado "simple", compuesto de una capa de tejido unidireccional de gramaje total 300 g/m², y un laminado "doble", compuesto de dos capas de tejido unidireccional y gramaje total 600 g/m² (300+300 g/m²). Las características principales de este laminado se recogen en la Tabla 19.

Tabla 19. Resumen de las propiedades de tejidos y resina utilizados en GFRP UNI-300., declaradas por la marca.

	LAMINADO DE FIBRA DE VIDRIO [UNI 300] (Fuente: Fichas técnicas Saertex / Epovia)	
	<i>TEJIDO</i>	<i>RESINA</i>
1. DESCRIPCIÓN		
Fabricante:	Saertex	CCP Composites
Marca comercial:	'Saertex Glass UNI 300'	'Epovia Optimum KRF 4436 Al'
Descripción:	Tejido de fibra de vidrio unidireccional de gramaje 300 g/m ² .	Resina Epoxy Vinylester Bisphenol A. Preacelerada – Baja viscosidad. Buena mojabilidad de las cargas y refuerzos.
Origen:	Alemania / China	1050-1100 kg/m ³

⁴³⁷ http://www.fidiaglobal.com/eng/materiali_schede/FIDGLASS_Unidir_300_HT73.pdf [Consultada 29/12/2018]

⁴³⁸ <https://www.owenscorning.com/composites> [Consultada 29/12/2018]

⁴³⁹ <https://esp.sika.com/dms/getdocument.get/77e047e0-9003-3c78-bc7f-005a97f059df/SikaWrap-230%20C.pdf> [Consultada 29/12/2018].

2. PROPIEDADES

Morfología:	Presentación de rollo de 50m de longitud y anchura variable (cada 600mm)	Viscosidad a 23°C (M1V50): 110-130 dPa.s. Extracto seco: 54-58 %
Propiedades geométricas:	Tejido único 0° [300 g/m ²]	
Densidad:	2.600 kg/m ³	1.050-1.100 kg/m ³
Propiedades mecánicas:		
Mod. Elasticidad:	73.000 MPa;	3.400 MPa
Tensión tracción:	2.200 MPa;	65 MPa
Deformación rotura:	3,5%	2,35%
Propiedades químicas:	Fibra de vidrio E glass	-
Absorción agua:	0,1 %	-
Propiedades superficiales:	Resistencia eléctrica 10 ⁺¹⁵ Ω·cm	-
Propiedades térmicas:	Transmitancia 1 W/m·K	Temperatura transición vítrea 130°C

3. COSTES

Precio aproximado:	215 €/m ²
---------------------------	----------------------

Las propiedades teóricas del refuerzo se obtienen con la teoría de mezclas, calculándose un módulo de elasticidad teórico del GFRP >40.000 MPa, y una tensión a tracción >1.200 MPa.

$$f_{FRP} = f_{fib} \cdot V_{fib} + f_{matriz} \cdot V_{matriz} \quad [1]$$

Donde: f_{FRP} = propiedad polímero reforzado con fibras; f_{fib} = propiedad fibra; V_{fib} = volumen de fibra; f_{matriz} = propiedad resina; V_{matriz} = volumen de resina (FIB 2007) ⁴⁴⁰

De esta matriz se fabrican 22 probetas de dimensiones nominales 15x250 mm (según probeta tipo ISO 527-5/B ⁴⁴¹) para su caracterización mecánica a tracción. Además, del tejido de fibra de vidrio utilizado se toman en fábrica 4 muestras de dimensiones nominales 250x250 mm para su caracterización física.

Laminado Fibra de vidrio [UNI 1200-2400]

Matriz rígida de fibra de vidrio 'OWENS CORNING FIBERGLASS LTx1200/S300' embebida en resina poliéster 'Resichim 317', fabricado específicamente para esta investigación por la empresa Indemat (Valladolid) mediante infusión en vacío; con un porcentaje de fibra en los refuerzos del >50%, y dimensiones aproximadas 60x2.500 mm. Se realizan dos tipos de laminado: un laminado "simple", compuesto de una capa de tejido unidireccional de gramaje total 1.200 g/m², denominado GFRP UNI-1200; y un laminado "doble", compuesto de dos capas de tejido unidireccional y gramaje total 2.400 g/m² (1.200+1.200 g/m²) denominado GFRP UNI-1200. Las características principales de este laminado se recogen en la Tabla 20.

Tabla 20. Resumen de las propiedades de los tejidos y resina utilizados en GFRP UNI-1200, declaradas por la marca.

LAMINADO DE FIBRA DE VIDRIO [UNI 1200] (Fuente: Fichas técnicas Owens Corning / Resichim)		
	TEJIDO	RESINA
1. DESCRIPCIÓN		
Fabricante:	Owens Corning Fiberglass	Resichim Composites
Marca comercial:	'OWENS CORNING FIBERGLASS LTx1200/S300'	'Resichim 317'
Descripción:	Tejido de fibra de vidrio unidireccional de gramaje 1200 g/m ² , con un MAT de montaje de 300 g/m ² unido por una de sus caras al unidireccional.	Resina poliéster insaturado, isoftálica, semirígida, de baja reactividad y viscosidad.
Origen:	Estados Unidos / China	1.050-1.100 kg/m ³
2. PROPIEDADES		
Morfología:	Presentación de rollo de 50m de longitud y anchura variable (cada 600mm)	Viscosidad a 23°C (M1V50): 100-150 MPa.s. Extracto seco: 43-47 %

⁴⁴⁰ Fédération internationale du béton (FIB) (2007) Op. cit.

⁴⁴¹ Norma ISO-527-5 :2010. Op. cit.

Propiedades geométricas:	Tejido superior 0° [1200 g/m ²] + tejido inferior MAT (aleatorio) de montaje [300 g/m ²]	
Densidad:	2.670 kg/m ³	1200 kg/m ³
Propiedades mecánicas:		
Mod. Elasticidad:	70.000 MPa	3.000 MPa
Tensión tracción:	2.500 MPa	70-80 MPa
Deformación rotura:	No especificado	3%
Propiedades químicas:	Fibra de vidrio tipo E glass	-
Absorción agua:	No especificado	-
Propiedades superficiales:	No especificado	-
Propiedades térmicas:	No especificado	Temperatura transición vítrea 120°C
3. COSTES		
Precio aproximado:	105 €/m ²	

Las propiedades teóricas del refuerzo se obtienen con la teoría de mezclas, calculándose un módulo de elasticidad teórico del GFRP > 35.000 MPa, y una tensión a tracción > 1.300 MPa.

$$f_{FRP} = f_{fib} \cdot V_{fib} + f_{matriz} \cdot V_{matriz} \quad [2]$$

Donde: f_{FRP} = propiedad polímero reforzado con fibras; f_{fib} = propiedad fibra; V_{fib} = volumen de fibra; f_{matriz} = propiedad resina; V_{matriz} = volumen de resina (FIB 2007)⁴⁴².

De esta matriz se fabrican 22 probetas de dimensiones nominales 15x250 mm (según probeta tipo ISO 527-5/B⁴⁴³) para su caracterización mecánica a tracción. Además, del tejido de fibra de vidrio utilizado se toman en fábrica 4 muestras de dimensiones nominales 250x250 mm para su caracterización física.

Laminado Fibra de carbono

Matriz rígida de fibra de carbono "Sika CarboDur" embebida en resina epoxi y fabricada por la empresa Sika mediante pultrusionado; con un porcentaje de fibra en los refuerzos > 70% y módulo de elasticidad declarada por su fabricante de 235.000 MPa, de dimensiones aproximadas 1,2x50x2.500 mm. Las características principales de este laminado se recogen en la Tabla 21.

Tabla 21. Resumen de las propiedades declaradas por la marca del laminado CFRP.

LAMINADO DE FIBRA DE CARBONO (Fuente: Catálogo SIKA ⁴⁴⁴)		
	TEJIDO	RESINA
1. DESCRIPCIÓN		
Fabricante:	Sika	Sika
Marca comercial:	'Sika CarboDur'	
Descripción:	Laminado rígido de fibras de carbono pultrusionadas (CFRP).	Resina Epoxy
Origen:	Alemania	
2. PROPIEDADES		
Morfología:	Presentación en longitudes variables (25,50,125 y 250m), anchos de 50/80 mm y espesores de 1.2 mm.	
Propiedades geométricas:	Tejido único 0°	
Densidad:	1.600 kg/m ³	
Propiedades mecánicas:		
Mod. Elasticidad:	235.000 MPa;	
Tensión tracción:	3.100 MPa;	
Deformación rotura:	1,7%	
Propiedades químicas:	Fibra de carbono	-
Absorción agua:		-

⁴⁴² Fédération internationale du béton (FIB) (2007) Op. cit.

⁴⁴³ Norma ISO-527-5 :2010. Op. cit.

⁴⁴⁴ <https://esp.sika.com/dms/getdocument.get/86bc0479-a66f-3707-87d5-e6342b961d93/Sika%20CarboDur%20E.pdf> [Consultada 29/12/2018].

<i>Propiedades superficiales:</i>	-
<i>Propiedades térmicas:</i>	Resistencia térmica 150°C
3. COSTES	
<i>Precio aproximado:</i>	800 €/m ²

De esta matriz se fabrican 22 probetas de dimensiones nominales 15x250 mm (según probeta tipo ISO 527-5/B⁴⁴⁵) para su caracterización mecánica a tracción.

3.2.4. Adhesivos estructurales

Existe una amplia oferta de adhesivos estructurales, de distintas marcas comerciales y características, extensamente utilizados en madera. Sin embargo, los refuerzos de FRP, materiales no polares e hidrofílicos, dificultan la adherencia y limitan su uso a adhesivos específicos de altas prestaciones; además de hacer necesaria la realización de tratamientos superficiales sobre los refuerzos que mejoren la adherencia y prestaciones del encolado. Los adhesivos más adecuados, de acuerdo con las investigaciones consultadas en el estado del arte⁴⁴⁶, son principalmente las resinas epoxi (EPX). No obstante, también son comunes los adhesivos de poliuretano (PUR) y en menor medida otros tipos de adhesivos⁴⁴⁷. De todos ellos se seleccionaron, partiendo de las recomendaciones de las marcas comerciales consultadas, varios adhesivos de distintos tipos; se analizaron sus características técnicas, precio y disponibilidad. Posteriormente se adquieren los adhesivos más destacados, y se realizaron una serie de ensayos con el fin de escoger el adhesivo más idóneo para la fabricación de las vigas dúo.

En este apartado se detallan los adhesivos estructurales potencialmente viables para la fabricación de vigas dúo reforzadas, de marcas comerciales reconocidas y de fácil adquisición, seleccionados y estudiados. Partiendo de las características y propiedades de los adhesivos estructurales publicadas por los fabricantes se ha elaborado una tabla resumen (Tabla 22).

Tabla 22. Resumen de las principales características y propiedades de los adhesivos epoxi estudiados. Sombreados los adhesivos seleccionados para ensayos de compatibilidad con probetas madera y FRP.

	RESINA EPOXI							POLIURETANO			MUF	
	SPABOND	SIKA		MAPEI		ROTAFIX	CRESTOMER			Akzo Nobel		
	STANDARD	SIKADUR 31 CF	SIKADUR 30	SIKADUR 330	MAPEWOOD PRIMER 100	MAPEWOOD GEL 120	MAPEWOOD PASTE 140	TIMBERSET	1152PA	1186PA	ADVANTAG E 30	MUF 1247/2526
DURABILIDAD												
CLASE DE SERVICIO	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3
PROPIEDADES RESISTENTES												
RESISTENCIA TRACCIÓN (MPa)	N/E	24	31	30	N/E	30	18	13	26	14	15	N/E
MOD. ELAST. FLEXIÓN (MPa)	N/E	7700	4500	3800	N/E	2000	4000	N/E	N/E	N/E	N/E	N/E
ALARGAMIENTO ROTURA (%)	N/E	0,3 ± 0,1	1	0,9	N/E	1,2	1	16	10	6	8,5	N/E
PREPARACIÓN												
MEZCLA	2:1	3:1	3:1	4:1	1:1	4:1	2:1	4:1	50:1	50:1	Dispensador	1:1
VISCOSIDAD (a 23°C) (mPas)	25500	N/E	N/E	6000	700	11400	490000		320	600	350	1700
PREPARACIÓN		Mezclar con batidora			Mezclar con batidora				Añadir catalizador a la base y mezclar			
RENDIMIENTO APROX. (kg/m ²)	N/E	1,7	2,5	0,7 - 1,5	0,15	2	3	3,2	N/E	N/E	N/E	< 0,45
APLICACIÓN												
TEMP. TRABAJO (°C)	15 - 25	10 - 30 120 (a 10°C)	11 - 30	10 - 35	10 - 30	10 - 30	10 - 30 150 (a +10°C)	5 - 25	15 - 33	15 - 30	15 - 30	20
TIEMPOS TRABAJO (minutos)	30 (a 20°C)	80 (a 23°C) 42 (a 35°C) 30 (a 40°C)	120 (a 8°C) 90 (a 20°C) 20 (a 35°C)	90 (a 10°C) 30 (a 35°C)	30 - 40	40 (a +23°C) 20 (a +30°C)	60 (a +23°C) 60 (a +23°C) 30 (a +30°C)	50 (a 20°C)	50 (a 25°C)	50 (a 25°C)	30 (a 25°C)	8 (a 20°C)
ESPESOR MÁX. (mm)	N/E	N/E	N/E	max. 30	N/E	N/E	N/E	3	25	30	20	<1
PRESIÓN (Mpa)	N/E	N/E	N/E	N/E	N/E	N/E	N/E	N/E	N/E	N/E	N/E	0,5-1
RETRACCIÓN (%)	N/E	Endurece sin	retracción 0,04	N/E	N/E	N/E	N/E	N/E	5	5	N/E	N/E
PROPIEDADES ACABADO												
COLOR	crema	gris	gris claro	gris claro	amarillo	marrón claro	marrón claro	marrón	marrón	gris	blanco	Blanco

*Sombreado en rojo los adhesivos finalmente seleccionados para su ensayo experimental.

⁴⁴⁵ Norma ISO-527-5 :2010. Op. cit.

⁴⁴⁶ Steiger et al. (2015) Op. cit.

⁴⁴⁷ Serrano (2001) Op. cit.

Partiendo de los datos generales presentados anteriormente pudo realizarse una primera comparación y selección de los adhesivos aparentemente más adecuados para la fabricación de las vigas dúo, valorando sus características y propiedades, facilidades de aplicación, requerimientos y/o precio. No obstante, una vez seleccionados un número reducido de los adhesivos potencialmente más idóneos, fue necesario someterlos a una campaña de ensayos de laboratorio para comprobar sus propiedades mecánicas reales de adherencia y resistencia a cortante, así como su comportamiento y bondades con los distintos materiales de refuerzo utilizados. A partir de estos ensayos se definió que adhesivo utilizar para la fabricación de vigas dúo con refuerzos tipo textil y con refuerzos tipo laminado rígido.

A. Resinas epoxi (EPX)

Las resinas epoxi de formulaciones bicomponente, permiten el curado bajo condiciones de temperatura y humedad poco exigentes, y sin requerir la aplicación de grandes presiones, lo que ha extendido su uso a uniones realizadas in situ. Sin embargo, la ventaja principal es que permite realizar uniones resistentes, seguras y duraderas entre madera y otros tipos de materiales, como metal, plástico, tejidos, ... Además, las resinas epoxi presentan multitud de formulaciones, que modifican su viscosidad o tiempos de curado, y que pueden incorporar cargas seleccionadas (áridos) que permiten aumentar los espesores de la línea de encolado sin disminuir las propiedades mecánicas de la misma. Una vez curado, presenta una buena durabilidad siendo resistentes a condiciones ambientales de humedad y temperatura cambiantes y exigentes.

De entre la amplia oferta de resinas epoxi se han seleccionado varias formulaciones de marcas comerciales conocidas y de fácil adquisición. Spabond, Sika y Mapei; empresas fabricantes de productos químicos para ingeniería y construcción de reconocido prestigio.

Spabond 340LV

Spabond 340 LV es una resina epoxi de alto rendimiento ampliamente utilizada para la unión de estructuras y piezas industriales, usado habitualmente en la fabricación de cascos de yates y palas de aerogeneradores. Su fabricante, la empresa Gurit, le otorga buenas propiedades térmicas y mecánicas. Se compone de una resina bicomponente que se mezcla con un endurecedor, a determinar entre una gama según su velocidad de endurecimiento: rápido, standard, lento y extra-lento. Cada uno de los anteriores tiene una pigmentación diferente para dar una indicación visual de la calidad de la mezcla, lo cual puede ser útil cuando se manejan habitualmente varios tipos de endurecedores. El sistema tiene una sencilla relación de mezcla 2:1 en peso y el volumen. Se caracteriza por tener una alta resistencia y tenacidad, por su alta capacidad de relleno de huecos, por su baja exotérmica y contracción. Según el fabricante, muestra un buen funcionamiento con temperaturas de hasta 80°C.

Sikadur-330

Sikadur®-330 es un adhesivo estructural a base de resina epoxi, bicomponente, tixotrópico y libre de disolventes. La empresa fabricante SIKA recomienda su uso como resina de impregnación para la aplicación de tejido de refuerzo SikaWrap® por método seco, así como resina de imprimación para el sistema de aplicación húmedo y como adhesivo estructural para el pegado de laminados Sika® CarboDur® en superficies muy lisas. El fabricante destaca como principales ventajas un fácil mezclado y aplicación, buena aplicación tanto en superficies verticales como techos, buena adherencia a gran variedad de soportes, altas propiedades mecánicas.

Sikadur-30

Sikadur®-30 es un adhesivo estructural a base de resina epoxi, bicomponente, tixotrópico y libre de disolventes; compuesto por una combinación de resinas epoxi y cargas seleccionadas. La empresa fabricante Sika lo recomienda para su uso como adhesivo estructural para la aplicación de su laminado de carbono Sika Carbodur sobre superficies rugosas como hormigón, ladrillo o madera; así como para el pegado de refuerzos estructurales de chapa de acero a hormigón. El fabricante destaca como principales ventajas un fácil mezclado y aplicación, buena aplicación tanto en superficies verticales como techos, buena adherencia a gran variedad de soportes y altas propiedades mecánicas. Permite espesores de línea de encolado de hasta 30 mm, sin incidencia en la resistencia de la unión.

Sikadur-31 CF

Sikadur®-31 CF es un adhesivo estructural y mortero de reparación de dos componentes a base de resinas epoxi y cargas especiales, que no contiene disolventes, es tixotrópico y tolera la humedad. Igualmente, SIKA lo recomienda como adhesivo estructural y mortero para piedra natural, piezas cerámicas, fibrocemento, mortero, ladrillos y obras de fábrica, acero, hierro, madera, y poliéster. También se utiliza como mortero de reparación adhesivo para bordes, cantos, huecos, coqueras aplicaciones en vertical y techos, y reparación de labios de juntas y fisuras.

Mapewood Primer 100

Mapewood Primer 100 es una resina epoxi de la marca MAPEI, de consistencia fluida, en dispersión acuosa, utilizada normalmente para la consolidación de elementos estructurales de madera. Suele usarse en vigas, pilares o cerchas afectadas por hongos o degradadas a causa del ataque de insectos xilófagos y también para la imprimación (una vez eliminadas las partes degradadas) de los cabezales de los elementos estructurales de madera que deban ser reconstruidos mediante el encolado de nuevas prótesis. El fabricante destaca su baja viscosidad, por lo que penetra e impregna eficazmente cualquier tipo de madera porosa, mejorando la cohesión y resistencia a ataques biológicos. Así mismo, se recomienda como base para Mapewood Gel 120 y Mapewood Paste 140 en maderas poco absorbentes.

Mapewood Gel 120

Mapewood Gel 120 es una resina epoxi bicomponente de la marca MAPEI, de viscosidad media, utilizado normalmente en restauración de elementos estructurales de madera mediante encolado de nuevas prótesis. Suele emplearse en el relleno de los agujeros realizados en las estructuras de madera a reparar (vigas, pilares, cerchas y sus prótesis) con el objetivo de anclar barras y placas de unión. Según el fabricante, se aplica fácilmente y endurece sin retracción.

Mapewood Paste 140

Mapewood Paste 140 es una resina epoxi bicomponente de la marca MAPEI, de consistencia tixotrópica, para la restauración de elementos estructurales de madera mediante encolado de nuevas prótesis. Se usa habitualmente como relleno de los agujeros realizados en los elementos estructurales de madera a reparar con el objetivo de realizar encolados madera/madera, o de anclar barras o placas de unión de metal o de material compuesto. Permite espesores de capa de hasta 5 mm.

B. Resinas poliuretano (PUR)

De entre la amplia oferta de adhesivos de poliuretano disponible en el mercado, se han seleccionado varios tipos de la marca comercial Crestomer; empresa fabricante de productos químicos para ingeniería y construcción de reconocido prestigio.

Crestomer 1152 PA

Crestomer 1152PA es un adhesivo estructural bicomponente pre-acelerado, tixotrópico, basado en un monómero insaturado uretano-acrilato de estireno. Tiene numerosas aplicaciones estructurales y por su buena adhesión a los laminados de FRP, madera y metales.

Crestomer 1186 PA

Crestomer 1186PA es un adhesivo estructural multiusos para una amplia gama de aplicaciones con materiales FRP. Se basa en la tecnología de Scott Bader de uretano-acrilato y, según su fabricante, muestra muy buena resistencia al impacto, tenacidad y resistencia a la propagación de grietas. Crestomer 1186PA muestra buena adhesión a una amplia gama de metales, cerámicas y materiales poliméricos. Permite uniones con espesor de hasta 30 mm.

Crestomer Advantage 30

Crestomer Advantage 30 se basa en el acrilato de uretano. Su fabricante expone que su producto posee una resistencia al impacto y dureza excepcional, así como una excelente adhesión y capacidad de relleno de espacios. Es un adhesivo estructural que se adhieren a una amplia gama de materiales con una preparación mínima de la superficie. Con un tiempo de gelificación rápido de 30 minutos, las piezas pegadas pueden estar puestas en servicio en un tiempo mínimo de 2 horas y 20 minutos.

C. Adhesivos formaldehídos (MUF)

Se selecciona un adhesivo MUF ampliamente utilizado en la fabricación de vigas laminadas de la marca comercial Akzo Nobel.

MUF 1247/2526

Adhesivo industrial melamina-urea-formol de la marca AzkoNobel MUF 1247/2526 extensamente utilizado por la industria maderera para la fabricación de vigas de madera laminadas.

3.2.5. Probetas para ensayos a flexión en pequeñas dimensiones [1:25]

Para la realización de los ensayos a flexión se han utilizado vigas dúo de dimensión nominal 40x60x1.200 mm, equivalentes a una viga a escala 1:25, de madera de chopo con distintos tipos de materiales de refuerzo. También se ha empleado vigas dúo de las mismas dimensiones fabricadas con tablero de fibras de densidad media reforzadas con matrices rígidas de fibra de vidrio.

A. Serie 0 (testigos)

A partir de los tabloncillos de madera de chopo de la partida 1 se fabrica un lote de vigas de madera aserrada maciza (Fig. 72a) junto con un lote vigas dúo de madera de chopo sin refuerzo (Fig. 72b) encoladas con resina epoxi Sikadur-330, previa preparación de las superficies mediante cepillado. Las características de ambos lotes se resumen en la Tabla 23.

Tabla 23. Resumen de las vigas testigo de pequeñas dimensiones de la Serie 0 ensayadas.

	Dimensiones nominales (mm)	Serie	Unidades ensayadas	Lote madera
Viga madera maciza de chopo	40x60x1200	M.00.xx	79	P1
Viga dúo chopo sin refuerzo	(20+20)x60x1200	DT.00.xx	83	P1

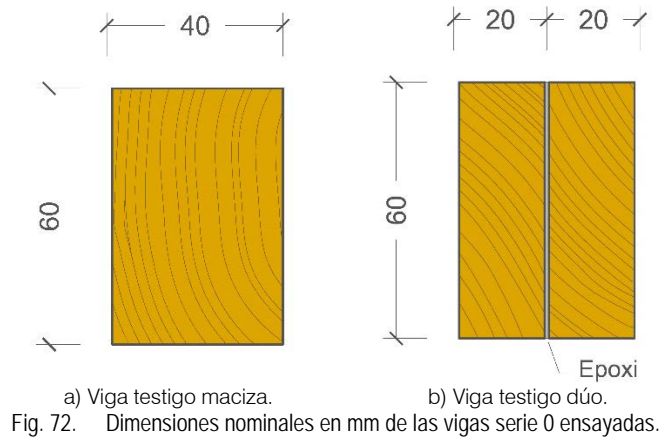


Fig. 72. Dimensiones nominales en mm de las vigas serie 0 ensayadas.

B. Serie 1 (comparación de refuerzos)

A partir de los tablones de madera de chopo de la partida 1 se fabricaron cuatro lotes de vigas dúo reforzadas con distintos tipos de tejidos de refuerzo (Tabla 24), descritos en el apartado 3.2.2 y apartado 3.2.3, realizando la adhesión entre las piezas con resina epoxi Sikadur-330. Todas las vigas dúo tienen unas dimensiones nominales de 20+20x60x1.200 mm (Fig. 73).

Tabla 24. Resumen de las vigas dúo reforzadas de pequeñas dimensiones de la Serie 1 ensayadas.

	Material de refuerzo	Serie	Unidades ensayadas	Lote madera
Viga dúo chopo con refuerzo de tejido de lino	FIDIA 'FIDFLAX UNI 300 HS50'	L.01.xx	109	P1
Viga dúo chopo con refuerzo de tejido fibra de vidrio	FIDIA 'FIDGLASS UNI 300 HT73'	F.01.xx	107	P1
Viga dúo chopo con refuerzo de tejido fibra de carbono	SIKA 'SikaWrap-230 C/45'	C.01.xx	100	P1

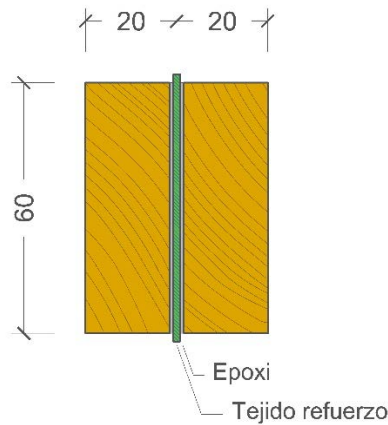


Fig. 73. Dimensiones nominales en mm de las vigas serie 1 ensayadas.

C. Serie 2 (estimación de la mejora del refuerzo)

Con el fin de reducir la heterogeneidad natural de la madera y poder comparar de forma clara la mejora de cada tipo de refuerzo, se fabrican vigas dúo de dimensiones nominales 20+20x60x1200 mm a partir de tableros de fibra de densidad media reforzadas con matrices rígidas de fibra de vidrio (Fig. 74). Se utiliza un tablero de fibras de densidad media, tipo 'DMF FIBRALAC' fabricado por la empresa FINSA, con dimensiones comerciales de 2.440x1.220x19 mm, comprándose un lote (enero 2015) de 5 tableros. En cuanto a sus características técnicas, la empresa presenta las siguientes propiedades (Tabla 25) para su producto:

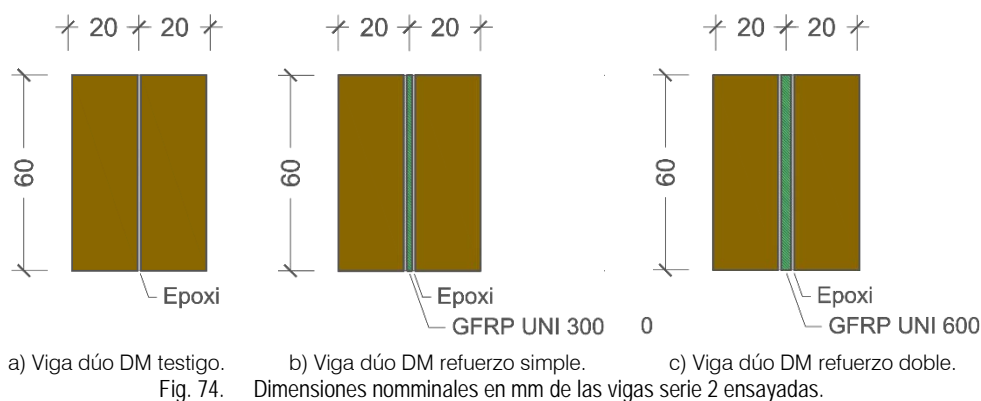
Tabla 25. Características técnicas DMF FIBRALAC (Fuente: Catálogo Finsa⁴⁴⁸)

Propiedad	Norma	e = 10 a 19 mm	Ud.
Densidad	EN 323	775/760	kg/m ³
Tracción interna	EN 319	1,1	N/mm ²
Resistencia a Flexión	EN 310	30	N/mm ²
Módulo de elasticidad	EN 310	3000	N/mm ²
Hinchamiento en agua 24 h	EN 317	12	%
Estabilidad dimensional largo/ancho	EN 318	0,4	%
Estabilidad dimensional espesor	EN 318	6	%
Tracción superficial	EN 311	> 1,2	N/mm ²
Absorción superficial (ambas caras)	EN 382-1	> 150	mm
Humedad	EN 322	7 ±3	%
Contenido en sílice	ISO 3340	Máx.0,05	% Peso

Los refuerzos utilizados fueron matrices rígidas de fibra de vidrio (GFRP UNI 300 y GFRP UNI 600) fabricadas por infusión con resina epoxy-vinylester y tejido de fibra de vidrio 'Saertex Glass UNI 300' fabricada por la empresa R&B Composites. Estas matrices rígidas unidireccionales de fibra de vidrio se fabrican en gramajes de 300 gr/m² y 600 gr/m², descritas en el apartado 3.2.3, con unas dimensiones nominales de 60x1.500 mm y espesores medios de 1 mm. El encolado de las vigas dúo se realiza empleando resina epoxi bicomponente, tipo Sika 'Sikadur-330'. Esta serie de vigas dúo se ensayan en tres tipos (Tabla 26);

Tabla 26. Resumen de vigas dúo de tablero DM de la SERIE 2 ensayadas.

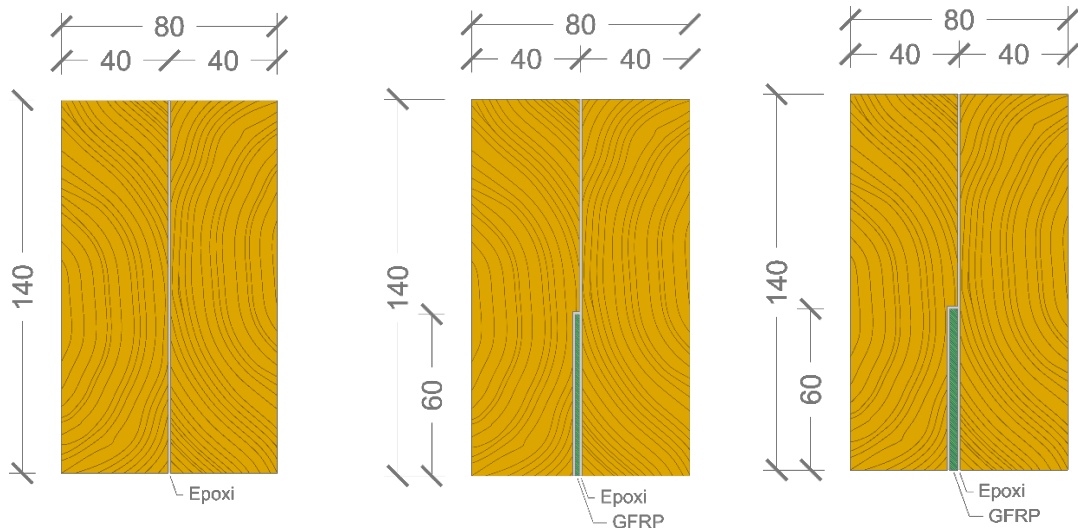
	Serie	Unidades ensayadas
Viga dúo sin refuerzo (testigo)	DM-T.02.xx	21
Viga dúo refuerzo GFRP UNI 300	DM-RS.02.xx	21
Viga dúo refuerzo GFRP UNI 600	DM-RD.02.xx	21



3.2.6. Probetas para ensayos a flexión en dimensiones estructurales [1:2]

A partir de los tabloncillos de madera de chopo y pinaster, de la partida 2 y 3, se fabrican vigas dúo laminadas de dimensiones nominales 80x140x2.500 mm, con dos tipos de refuerzo (Serie A / Serie B) y un tipo sin refuerzo (Serie T). Las vigas dúo se realizan mediante el pegado de la cara central de sus dos piezas de madera insertando dentro de la línea de encolado, en posición vertical, los laminados de refuerzo. La geometría de las vigas dúo reforzadas se muestran en la Fig. 75. Los refuerzos utilizados son laminados rígidos de fibra de vidrio fabricados por infusión, tipo GFRP UNI 1200 y GFRP UNI 2400, descritos en el apartado 3.2.3, con unas dimensiones nominales de 60x2.500 mm y espesores medios de 2 y 3 mm respectivamente. El adhesivo utilizado es resina epoxi tipo Sikadur 30, descrita en el apartado 3.2.4.

⁴⁴⁸ <https://www.finsa.com/publicaciones/doc-prod05.nsf/fichastec/16-es?OpenDocument&L=ES> [Consultada 29/12/2018].



a) Serie T: Dúo sin reforzar b) Serie A: Dúo reforzada (1200g/m²) c) Serie A: Dúo reforzada (2400g/m²)
 Fig. 75. Dimensiones nominales en mm de las vigas dúo reforzadas ensayadas.

De cada serie se fabrican 30 unidades, sumando un total de 180 vigas, de las cuales finalmente se ensayan las siguientes (Tabla 27):

Tabla 27. Vigas dúo de dimensión nominal 80x140x2500 mm ensayadas.

	Ud.	Chopo		Pino Pinaster	
		Lote madera	Ud.	Lote madera	Ud.
Serie T: Viga dúo sin refuerzo (testigo)	29	P2	28	P2	
Serie R1200: Viga dúo refuerzo sencillo (1200gr/m ²)	30	P2	27	P2	
Serie R2400: Viga dúo refuerzo doble (2400gr/m ²)	30	P3	30	P3	

Las vigas dúo han sido fabricadas por un carpintero y el autor de esta tesis en el taller de carpintería “Woodonhouse”, en Corcos del Valle (Valladolid), utilizando la maquinaria ordinaria disponible en cualquier carpintería. Antes de fabricar las vigas dúo, se estabilizaron los tablones de madera en el Laboratorio de Maderas (ETSIIAA) hasta alcanzar una humedad de equilibrio higroscópico próxima al 12%. La fabricación de las vigas se realiza en cuatro pasos:

A. Regruessado y cepillado

Es necesario cepillar todas las caras de las piezas para escuadrar la sección y regruesar los tablones hasta las dimensiones marcadas. Esta operación se realiza con la cepilladora de la mesa combinada Woodman mod.310N/1500 (Fig. 76).



a) Regruessado inicial. b) Cepillado final.
 Fig. 76. Proceso de cepillado por las cuatro caras de cada pieza.

B. Cajeadado para la colocación del refuerzo GFRP

Para incorporación de la lámina de refuerzo es preciso realizar un cajeadado que permita asentar el espesor del refuerzo en la línea de encolado. El espesor de este rebaje depende del refuerzo a encolar, en este caso 2 mm (GFRP UNI 1200) y 3 mm (GFRP UNI 2400) (Fig. 77).

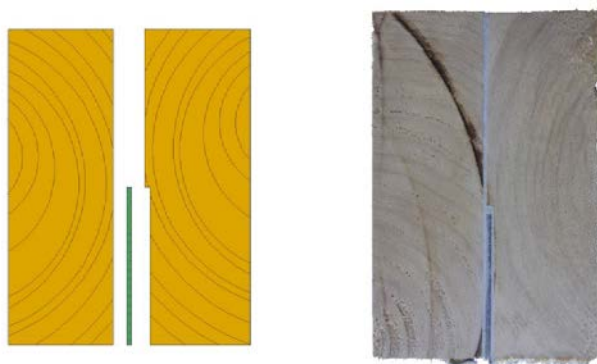


Fig. 77. Detalle de la sección de las vigas dúo fabricadas.

Para conseguir un fresado homogéneo en profundidad y en anchura de caja (dimensión nominal 62 mm) se monta una fresa INCASTRI Ø200x6/4x50 mm, adaptada (original 30 mm), y se complementa la fresadora con dos suplementos; una guía de corte fija a la mesa, para fijar la anchura de la caja; y un motor de arrastre, para arrastrar la pieza sobre la mesa en el sentido de fresado y generar una presión constante sobre la cuchilla que garantiza un fresado homogéneo (Fig. 78).



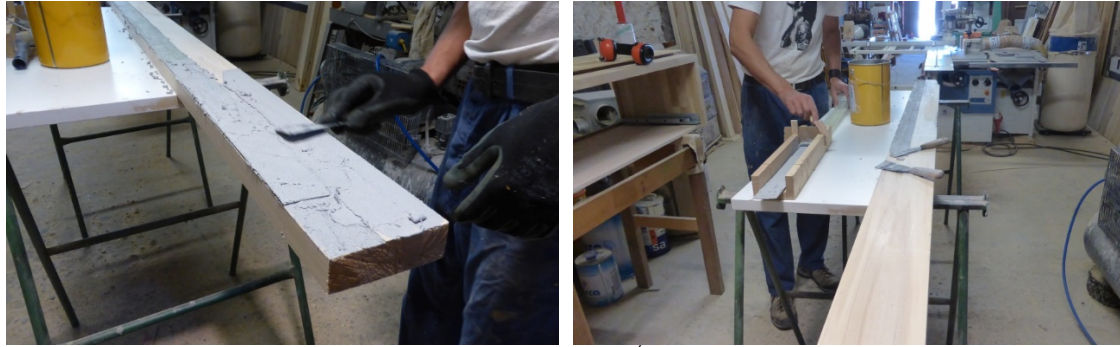
a) Fresa con guía de corte y motor de arrastre montados.

b) Comprobación inicial del rebaje.

Fig. 78. Labores de cajeadado del rebaje para la introducción del refuerzo GFRP.

C. Encolado

El encolado de las vigas dúo se realiza en un periodo máximo de 48 horas desde el cepillado de las tablas. Se emplea resina epoxi bicomponente tipo Sikadur 30, descrita en el apartado 3.2.4, mezclada en proporción 3:1 mecánicamente con la ayuda del taladro y una varilla mezcladora en espiral tipo "cola de cerdo", a velocidad reducida (<600 rpm) hasta alcanzar una consistencia homogénea y color uniforme. Este tipo de resina epoxi no necesita unas condiciones ambientales controladas para su aplicación y curado, mostrando un rango de temperatura de aplicación de 8-35°C. Sin embargo, el aumento de temperatura acelera su reacción química, reduciendo los tiempos de trabajo y curado. Con el fin de controlar los tiempos de trabajo de la resina, ésta se mantiene refrigerada durante las 24 horas previas a su utilización a una temperatura media de 8°C, aumentando el tiempo de trabajo efectivo hasta aproximadamente los 120 minutos. Una vez amasada la resina se aplica con espátula sobre todas y cada una de las superficies a encolar, ayudándose de un útil en la aplicación sobre el laminado de refuerzo para garantizar un espesor homogéneo (Fig. 79). El rendimiento aproximado de la resina fue de 1.500 g/m².



a) Aplicación a espátula sobre uno de los tablonos a encolar.

b) Útil de aplicación de la resina sobre el laminado.

Fig. 79. Encolado de las vigas dúo con resina epoxi.

D. Prensado

Una vez montadas las vigas se aplica una presión homogénea superior a $0,5 \text{ N/mm}^2$ durante un mínimo de 48 h, mediante la colocación sargentos cada 500 mm en cada viga dúo, con un tablón intermedio a cada lado (Fig. 80). Retirados los sargentos las vigas dúo se mantienen en condiciones estables de temperatura y humedad durante un periodo mínimo de 7 días desde su fabricación hasta su ensayo.



a) Vista general del prensado viga a viga.

b) Detalle del prensado y rebose de resina.

Fig. 80. Prensado de las vigas dúo con resina epoxi.

3.2.7. Probetas para ensayo de fluencia

Se emplean 4 vigas dúo laminadas de dimensiones nominales $80 \times 140 \times 2.500 \text{ mm}$ de madera de chopo, de la partida 3, con un refuerzo laminado GFRP UNI 2400 y sin refuerzo. La fabricación y características de las vigas es la misma que la descrita en el apartado 3.2.6.

4. MÉTODOS

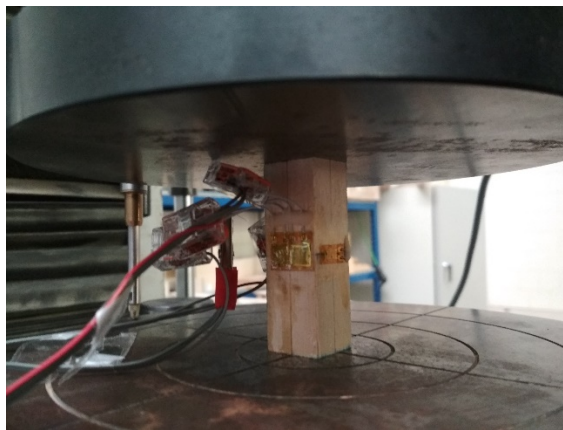
La investigación se centra en el refuerzo de vigas dúo a flexión; sin embargo, es necesario previamente caracterizar los distintos refuerzos, adhesivos y maderas utilizados. La metodología se divide en las siguientes etapas.

4.1. Métodos específicos

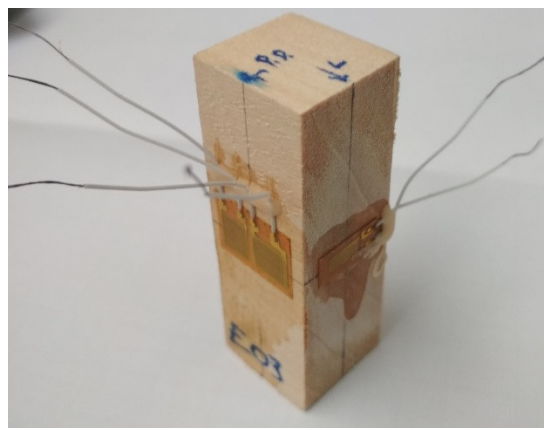
4.1.1. Estimación de propiedades elastomecánicas de la madera

A. Ensayos de compresión

Los ensayos a compresión se realizaron con probetas de pequeñas dimensiones (20x20x60 mm) de madera limpia de acuerdo con la norma UNE 56535:1977⁴⁴⁹. Todos los ensayos se realizaron con probetas estabilizadas bajo unas condiciones normalizadas de $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ y $(65\pm 5)\%$ de humedad relativa para alcanzar una humedad de referencia en la madera próxima al 12%HEH. Las probetas se instrumentaron con 3 bandas extensométricas de longitud de rejilla 6 mm; colocando en el plano principal una roseta T tipo HBM XY31-6/120 con dos bandas extensométricas colocadas a 90° midiendo tanto en la dirección principal (SG.1) como en la dirección perpendicular (SG.2) al eje de carga, y en el plano secundario una banda lineal tipo HBM LY41-6/120 midiendo únicamente en la dirección perpendicular (SG.3) (Fig. 81b). Ambas bandas extensométricas presentan idéntico comportamiento, con mismo material de rejilla, respuesta térmica, longitud de rejilla y resistencia óhmica. Las bandas extensométricas se pegan utilizando adhesivo de cianocrilato marca HBM tipo Z-70. La medida de las bandas extensométricas se realizó con el equipo de adquisición de datos HBM QuantumX MX840B, mediante un circuito a cuarto de puente de Wheatstone simple (DMS1) con resistencias 120 Ohms, individual y aislado para cada una de las bandas. Para eliminar la influencia de la longitud del cable en las mediciones se utilizó un cable de compensación adicional. Antes de su instrumentación cada probeta se mide con el calibre Mitutoyo y se pesa con la balanza de precisión Gibertini.



a) Colocación de la probeta en los platos de ensayo.



b) Probeta instrumentada con bandas extensométricas.

Fig. 81. Ensayo a compresión de probetas.

⁴⁴⁹ Norma UNE 56535:1977 Op. cit.

Los ensayos se realizaron en la máquina universal de ensayos IBERTEST con una célula de carga instalada de 100 kN. Se mantiene durante su ejecución una velocidad de desplazamiento constante de +0,05 kN/s, realizándose el ensayo en un tiempo de 60 ± 20 segundos. Antes del ensayo cada probeta es cuidadosamente colocada en el centro de los platos, iniciándose el ensayo bajo una precarga de 100 N (Fig. 81a). La deformación total de la probeta durante el ensayo se mide con un LVDT tipo HBM WA/50 (LVDT 1), fijado a la cara interior de los platos de ensayo. El plato superior de ensayo dispone de una rótula que permite su giro libre; para detectar posibles giros o anomalías durante el ensayo, se colocan 3 LVDT tipo HBM WA/100 adicionales (LVDT 2 a 4). Se posicionan cada 120° , anclados al plato superior y midiendo exteriormente permiten comparar los desplazamientos relativos y detectar cualquier giro y medir su entidad (Fig. 82).

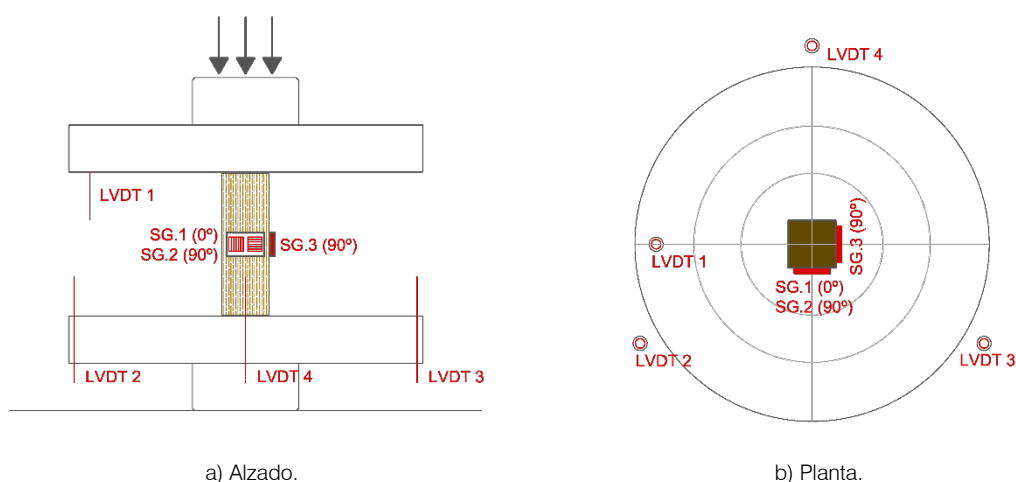


Fig. 82. Esquema de la instrumentación realizada.

B. Ensayos de tracción paralela a la fibra

Los ensayos a tracción paralela se realizaron con probetas de madera limpia de dimensiones (4x20x350 mm) de acuerdo con la norma ISO 13061-6:2014 ⁴⁵⁰. Todos los ensayos se realizaron con probetas estabilizadas en valores próximos al 12%HEH. Las probetas se instrumentaron con una banda lineal tipo HBM LY41-10/120 de longitud de rejilla 10 mm colocada en el centro de la probeta para medir la deformación durante el ensayo (Fig. 83). La banda extensométrica se pega utilizando adhesivo de cianocrilato marca HBM tipo Z-70. La medida de la banda extensométrica se realiza con el equipo de adquisición de datos HBM QuantumX MX840B, mediante un circuito a cuarto de puente de Wheatstone simple (DMS1) con resistencias de 120 Ohms. Para eliminar la influencia de la longitud del cable en las mediciones se utiliza un cable de compensación adicional. Antes de su instrumentación cada probeta se mide con el calibre pie de rey Mitutoyo.

⁴⁵⁰ Norma ISO 13061-6:2014. Op. cit.

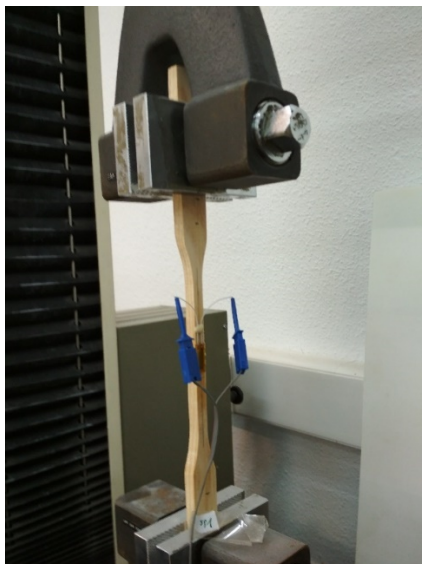


Fig. 83. Ensayo a tracción paralela.

Los ensayos se realizan en la máquina universal de ensayos IBERTEST con una célula de carga instalada de 100 kN. Se mantiene durante su ejecución una velocidad de desplazamiento constante de $-0,02\text{kN/s}$, realizándose el ensayo en un tiempo de 300 ± 180 segundos.

C. Ensayos de cortante

Para la realización de los ensayos de cortante es preciso emplear un útil de carga y apoyo que cumpla con las características expuestas en la norma UNE 56543:1988 ⁴⁵¹. Los ensayos se realizaron en la máquina universal de ensayos IBERTEST con una célula de carga instalada de 100 kN. El ensayo se realiza con una velocidad de desplazamiento constante de $+0,2\text{ kN/s}$, en un intervalo de tiempo de 60 ± 20 segundos. Para medir las deformaciones de la probeta se coloca un extensómetro LVDT HBM WA/20 (Fig. 84) sobre la cara comprimida de la probeta con la ayuda de un herraje (angular metálico de dimensiones $1\times 40\times 25\text{ mm}$) firmemente adherido a la probeta con adhesivo termofusible. Antes de cada ensayo cada probeta es cuidadosamente colocada en su posición dentro del útil y precargada con 100 N.



Fig. 84. Ensayo a cortante según norma UNE 56543:1988.

⁴⁵¹ Norma UNE 56543:1988 Op. cit.

4.1.2. Estudio y caracterización de fibras naturales

A. Caracterización de propiedades mecánicas

Los ensayos para la caracterización de resistencia a tracción y módulo de elasticidad chapas de refuerzo de madera se realizaron de acuerdo la norma UNE-EN ISO 13934-1:2013 ⁴⁵². Se realizaron 6 probetas de cada tipo de refuerzo, de dimensión nominal 25x200 mm, y unos espesores de 0,5 a 1 mm (Fig. 85).

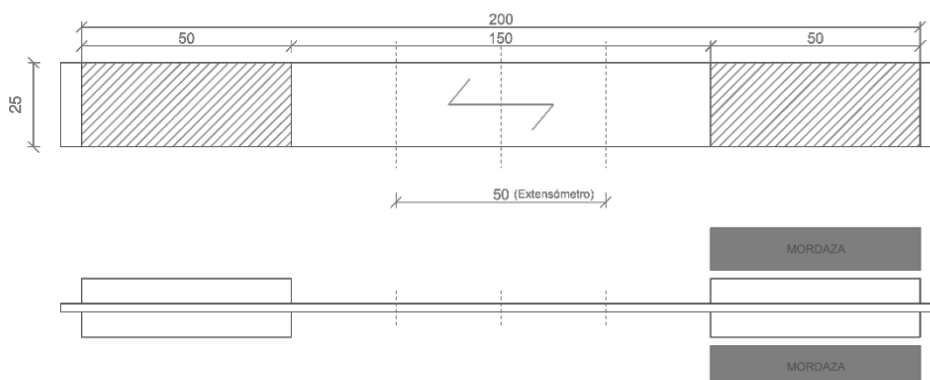


Fig. 85. Dimensiones nominales en mm de la probeta ISO 13934-1.

Por tratarse de probetas de chapas de madera de espesores muy finos, fue necesario proteger la cabeza de las chapas para evitar la rotura de la probeta al apretar las mordazas (Fig. 86). Para ello, en las cabezas de las probetas se adhieren con resina epoxi unas piezas de sacrificio en tablero de fibras de densidad media (DM) de dimensiones 25x50x4 mm. Los tacones se pegaron a la chapa de madera con resina epoxi Sikadur 330.



Fig. 86. Probetas de chapa de madera de limitado espesor ensayadas.

Los ensayos se realizaron en el laboratorio de estructuras de la ETS Arquitectura (UVA), en la máquina de tracción Instron electromecánica SHIMADZU AGS-500, con célula de carga de 5 kN. La velocidad de ensayo se ajusta en cada tipo de refuerzo, utilizando dos probetas adicionales de calibración, de modo que el tiempo de rotura se sitúe en torno a 300 ± 180 segundos. De estos ensayos se obtiene fuerza de rotura y módulo de elasticidad de cada probeta. La determinación del módulo de elasticidad se ha obtenido con la pendiente de la recta en un gráfico de tensión-

⁴⁵² Norma UNE-EN ISO 13934-1:2013 "Textiles. Propiedades de los tejidos frente a la tracción. Parte 1: Determinación de la fuerza máxima y del alargamiento a la fuerza máxima por el método de la tira".

deformación para los valores del 10% y el 40% de la carga de rotura. Si alguna de las probetas tiene un módulo inferior al 20 % de la media de la serie, o si se observa deslizamiento en las mordazas, el ensayo se considera nulo. El número mínimo de probetas a considerar será de 5, por lo que en caso de que se clasifiquen nulos algunos ensayos y no haya suficientes se procederá a realizar los necesarios hasta llegar a este número mínimo.

4.1.3. Estudio y caracterización de fibras sintéticas

El estudio de las fibras sintéticas permite caracterizar las propiedades físicas y mecánicas de las fibras utilizadas en los distintos ensayos desarrollados en esta investigación. La metodología de ensayo se divide en varios métodos específicos.

A. Metodología para la determinación de la sección eficaz de los tejidos

Para determinar con precisión las propiedades mecánicas de los distintos tejidos previamente fue necesario obtener la sección real de fibra (mm^2/cm) en la dirección principal del refuerzo de cada uno de ellos. Como se cita en varios trabajos previos de los antecedentes (Tabla 10), los tejidos de fibras sintéticas están fabricados a partir de fibras de diámetros minúsculos, del orden de 10-20 μm , unidos en hilos que forman un tejido principal (urdimbre) y otro secundario (trama). El pequeño tamaño de las fibras de los tejidos, y la composición en varias direcciones, obliga a plantear una metodología con varios procedimientos redundantes que garantice la certidumbre de los datos obtenidos.

En este punto de la investigación se desarrollan tres procedimientos paralelos y redundantes para obtener la sección eficaz de los tejidos de forma contrastada y fiable.

Procedimiento I: medición del diámetro de los filamentos

Este procedimiento determina el área eficaz de la sección a partir de la medición del diámetro de filamentos y contabilización del número de filamentos por hilo. Los ensayos se desarrollan de acuerdo con las especificaciones de la norma americana ASTM D578-00⁴⁵³. Siguiendo las recomendaciones marcadas en el punto 26 de esta norma, referente a la determinación del diámetro medio de tejidos de fibra con técnicas de microscopía, pueden contarse el número de fibras o filamentos existentes en un hilo, entendiendo como hilo cada grupo de fibras perceptible macroscópicamente.

Para ello, se preparan 5 muestras de 150x150 mm de cada tejido, y con el equipo estereomicroscopio MOTIC SMZ-168 previamente calibrado, se han tomado imágenes en 50 aumentos de las muestras con la cámara Motican del equipo. Mediante el uso del software informático Motic Images Plus 3.0 se han realizado mediciones del diámetro de 50 filamentos elegidos aleatoriamente en cada imagen (Fig. 87a). De acuerdo con las especificaciones del fabricante la precisión de medida del equipo que es de 0,1 μm , superior a la precisión mínima de 0,25 μm recomendada por la norma ASTM D578-00.

Además, de cada muestra se extrae un hilo de la urdimbre principal y se contabilizan, con ayuda del estereomicroscopio, el número total de filamentos que contiene cada hilo (Fig. 87b). Para no perder filamentos durante su manipulación, antes de la extracción del hilo se coloca una cinta adhesiva en la cabeza de modo que se garantice la unidad del hilo, se numera, y

⁴⁵³ Norma ASTM D578:2000 "Standard Specification for Glass Fiber Strands".

posteriormente se separa, corta y extrae el hilo para colocarlo lo más abierto posible en el plato del estereomicroscopio (Fig. 87a), y proceder al recuento de filamentos (Fig. 87b). Finalizado el recuento, y conocido el diámetro medio de los filamentos, puede determinarse el área eficaz de fibra en la dirección principal de cada hilo ($A_{ef.hilo}$).

$$A_{ef.hilo} = N_{fib.hilo} * \pi * (\varnothing_{fib.mean} / 2)^2 \quad [mm^2/hilo] \quad [3]$$

Donde,

$A_{ef.hilo}$: Área eficaz por hilo de tejido ($mm^2/hilo$)

$N_{fib.hilo}$: número de fibras en cada hilo (ud)

$\varnothing_{fib.mean}$: Diámetro medio de la fibra (mm^2)

Medido y conocido el número de hilos por centímetro de anchura, también puede determinarse el área eficaz por centímetro de tejido ($A_{ef.tej.}$).

$$A_{ef.tej.} = A_{ef.hilo} * N_{hilo.cm} \quad [mm^2/cm] \quad [4]$$

Donde,

$A_{ef.tej.}$: Área eficaz por centímetro de tejido (mm^2/cm)

$A_{ef.hilo}$: Área eficaz por hilo de tejido ($mm^2/hilo$)

$N_{hilo.cm}$: número de hilos por cada centímetro de tejido (ud)



a) Hilo de tejido extraído y preparado para su ensayo.

b) Imagen microcópica (50x) de los filamentos.

Fig. 87. Hilo de tejido ensayado con el con el equipo estereomicroscopio MOTIC SMZ-168.

Procedimiento II: medición del volumen

Este segundo procedimiento determina el área eficaz de la sección a partir del volumen conocido. Para la determinación del volumen se ha utilizado el principio de Arquímedes, introduciendo las probetas en un recipiente lleno de agua, pesándose la cantidad de agua desplazada equivalente al volumen de la probeta introducida. Para ello, se preparan 5 muestras de 150x150 mm de cada tejido, las cuales se introducen previamente al ensayo en la estufa IBERTEST mod. ES-6 a $103 \pm 2^\circ C$ durante 48h para garantizar su estado anhidro debido a que algunos tipos de fibras ensayadas absorben agua.

Las probetas extraídas de la estufa, una vez enfriadas en el desecador, se han pesado con la balanza de precisión Gibertini mod. EU3000HR para conocer su peso seco (P_s). Posteriormente, se han introducido por completo en un recipiente con agua destilada, y mantenido en reposo hasta su completa saturación, durante un tiempo mínimo de 48h. Saturadas las probetas se han extraído y pesado para conocer su peso húmedo (P_h). Para determinar el volumen real de la probeta se introduce en un recipiente lleno de agua destilada, colocado dentro de otro recipiente previamente tarado (Fig. 88). Al introducir la probeta saturada en el recipiente el agua rebosa, y el peso de esa agua desalojado equivale al volumen

de la probeta saturada. Para conocer el volumen de la probeta seca basta con conocer el peso de agua absorbido por la probeta saturada ($P_h - P_s$), y restarlo del peso de agua total desalojado.



Fig. 88. Imagen del procedimiento de ensayo.

Este volumen incluye urdimbre (tejido unidireccional principal) y trama (tejido secundario), por lo que fue necesario el destejido y pesado del material en cada dirección para determinar el volumen real del tejido unidireccional de la urdimbre. Este proceso se realiza de acuerdo con la norma UNE 40600-6:1996⁴⁵⁴. Debido a que los tejidos ensayados estaban compuestos del mismo material, de idéntica densidad y características, pero tejido en distinta dirección, puede determinarse la relación volumétrica a partir de la masa. Previamente, las probetas vuelven a introducirse en la estufa IBERTEST mod. ES-6 a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 48h para recuperar su estado anhidro. Una vez secadas, se ha procedido a deshilar y separar con sumo cuidado sobre unas bandejas previamente taradas el tejido unidireccional del resto, pesando posteriormente urdimbre y trama por separado (Fig. 89). Conocida la relación entre masas puede determinarse el volumen real del tejido unidireccional, a partir del cual se obtiene el área eficaz del tejido.



Fig. 89. Proceso de deshilado y pesado del tejido.

⁴⁵⁴ Norma UNE 40600-6:1996 "Textiles. Tejidos. Construcción. Métodos de análisis. Parte 6: Determinación de la masa de los hilos de urdimbre y de trama por unidad de superficie, en un tejido".

Procedimiento III: medición de la masa

El tercer procedimiento permite determinar el área eficaz de la sección a partir del peso. Para ello es necesario conocer con suficiente fiabilidad el valor de la densidad del material, indicado por el fabricante de los tejidos en su ficha técnica, o bien determinada a partir de los datos de peso y volumen secos obtenidos durante el procedimiento II. Para ello, se preparan 5 muestras de 150x150mm de cada tejido, las cuales se miden y pesan de acuerdo con la norma UNE 12127:1998.⁴⁵⁵

Conocida la densidad, y determinadas las dimensiones y peso (P_s) de cada probeta puede obtenerse con facilidad su área eficaz de sección por centímetro de tejido.

$$A_{ef.tej} = P_s / (\rho * L_{fib}) * 1cm \quad [mm^2/cm] \quad [5]$$

Donde,

$A_{ef.tej}$: Área eficaz por centímetro de tejido

P_s : Peso seco

ρ : Densidad

L_{fib} : Longitud fibra

En el caso de tejido con urdimbre y trama, es necesario el deshilado y pesado de la muestra de acuerdo con la norma UNE 40600-6:1996⁴⁵⁶, con idéntica metodología a la descrita en el procedimiento II.

B. Caracterización de tejidos: módulo de elasticidad y resistencia a tracción

Los ensayos para la caracterización de resistencia a tracción y módulo de elasticidad de tejidos de fibras se realizan de acuerdo la norma UNE-EN ISO 13934-1:2013⁴⁵⁷. Se realizan 6 probetas de cada tipo de tejido, de dimensión nominal 25x200 mm (Fig. 90). Pese a que la norma establece una anchura superior, en su punto 6.1.6 especifica que la anchura de la probeta no debe ser superior a la anchura de las mordazas. Por esta razón, se limita la anchura de la probeta a las mordazas ($b=25mm$) disponibles en la máquina de ensayo utilizada. Por tratarse de probetas de tejidos fundamentalmente unidireccionales es necesario mejorar el agarre en la cabeza del tejido para evitar el deslizamiento del tejido en las mordazas. Para ello, en las cabezas del tejido se han adherido con resina epoxi unas piezas de sacrificio en tablero de fibras de densidad media (DM) de dimensiones 25x50x4 mm, que permiten transmitir la tensión del tejido a las mordazas limitando el deslizamiento. Los tacones se pegan al tejido con resina epoxi Sikadur 330.

⁴⁵⁵ Norma UNE 12127:1998. Textiles. Tejidos. Determinación de la masa por unidad de superficie de muestras pequeñas.

⁴⁵⁶ Norma UNE 40600-6:1996. Op. cit.

⁴⁵⁷ Norma UNE-EN ISO 13934-1:2013. Op. cit.

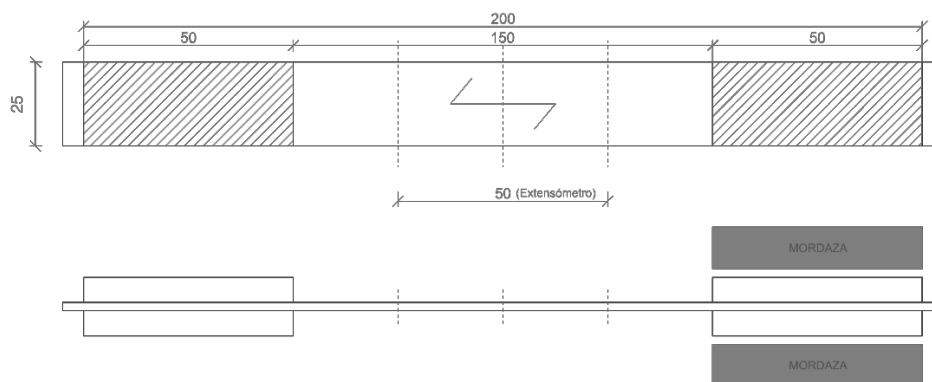


Fig. 90. Dimensiones nominales en mm de la probeta ISO 13934-1 para tejidos.

Los ensayos se realizan en el laboratorio del CIFOR-INIA (Madrid), en la máquina de tracción Instron Mod. 1195, ajustando la velocidad de ensayo en cada tejido, utilizando dos probetas adicionales de calibración, de modo que el tiempo hasta la rotura se sitúe en torno a 300 ± 180 segundos. De estos ensayos se obtiene la fuerza de rotura y el módulo de elasticidad en cada probeta. La determinación del módulo de elasticidad se ha obtenido con la pendiente de la recta en un gráfico de tensión-deformación para los valores del 10% y el 40% de la carga de rotura.

C. Caracterización de matrices rígidas: módulo de elasticidad y resistencia a tracción

Los ensayos se realizan de acuerdo la norma ISO 527-5:2010⁴⁵⁸. Esta norma engloba el ensayo de polímeros reforzados con fibra (FRP) de vidrio, carbono, aramida y otras similares en formato de tejido unidireccional. Para la realización de ensayos según la dirección principal de la fibra, la norma especifica la probeta ISO 527-5/B con dimensiones definidas en la Fig. 91. Además, la norma obliga a la colocación de tacones de sacrificio de mismo material, pegados a 45° respecto de la dirección longitudinal de la fibra, en las cabezas del cuerpo principal de la probeta con el fin de limitar los posibles problemas de deslizamiento o roturas en mordaza. Los tacones se pegan a la probeta con resina epoxi Sikadur 330.

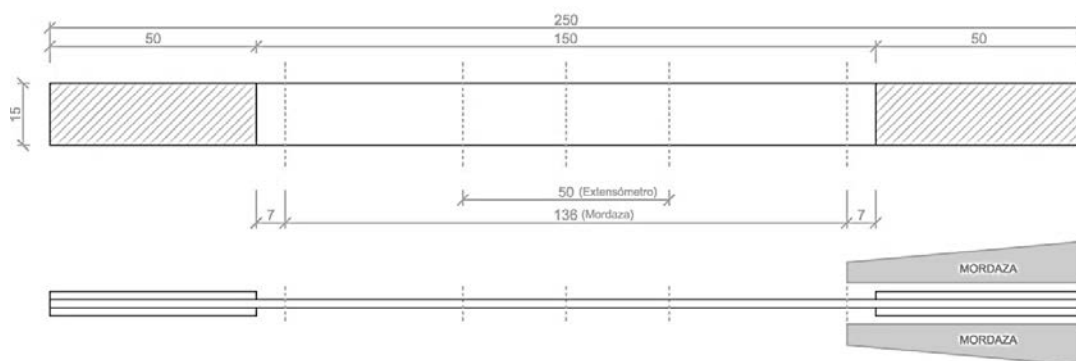


Fig. 91. Dimensiones nominales en mm de la probeta ISO 527-5/B para matrices rígidas GFRP.

Los ensayos se realizan en el laboratorio de calidad de la empresa ATISAE (Madrid) en la máquina de tracción INSTRON Mod. MEN-102/100, con una célula de carga instalada de 1.000 kN, equipada con cierre neumático de mordazas y un ajuste total de las cuñas ($\pm 0,0$ mm), siendo posible el ensayo de probetas < 1 mm de espesor. La velocidad de ensayo se fija en 0,2 kN/s, de acuerdo con las recomendaciones de la norma ISO 527-5:2010⁴⁵⁹ para este tipo material, estableciéndose el tiempo hasta la rotura en unos 300 ± 180 segundos.

⁴⁵⁸ Norma ISO 527-5:2010. Op. cit.

⁴⁵⁹ Ibidem.

Probetas utilizadas

Partiendo de las matrices de fibra de vidrio GFRP UNI 1200 y GFRP UNI 2400 fabricadas de dimensiones de 60x2.500 mm se recortan mediante corte con chorro de agua las probetas según norma ISO 527-5:2010⁴⁶⁰ tipo B junto con sus correspondientes tacones a 45° respecto a la dirección principal de la fibra, tal y como se representa en la Fig. 92.

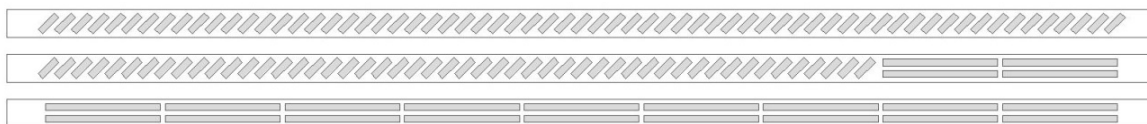
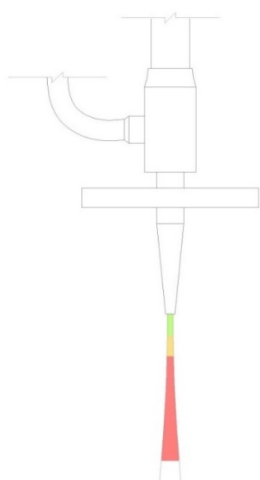


Fig. 92. Despiece de probetas según ISO 527-5/B a partir de las bandas de refuerzo GFRP 1200/2400.

El corte de las probetas de fibra de vidrio se realiza en las instalaciones de la empresa Cortes Metalúrgicos Oviedo (Valladolid), con una máquina de corte por chorro de agua controlada por control numérico, marca *TCl waterjet*. El corte se ejecuta mediante un chorro de agua con arena proyectado a una presión de 3800 bares, a través de un cabezal de diámetro calibrado. El ajuste de la precisión del corte con el chorro de agua depende principalmente de la distancia de separación entre el cabezal y el material a cortar. A diferencia de otros sistemas de corte, como la sierra o fresado, donde el área de corte es igual en toda la longitud de la hoja, en el corte por chorro de agua según se va aumentando la distancia recorrida por el chorro se produce un aumento de su diámetro (Fig. 93), siendo necesario realizar un ajuste previo de la precisión en el corte para este tipo de material.



a) Precisión del cabezal en función de la separación.



b) Corte de probetas mediante chorro de agua a partir de laminados GFRP.

Fig. 93. Corte de probetas por chorro de agua, mediante máquina de control numérico.

El guiado y correcto ajuste de todos los parámetros del corte se realiza mediante control numérico, con un software tipo CAD propio de la máquina, en el cual partiendo de un archivo previo se marca el recorrido de corte, ajuste de las tolerancias de corte, presión del chorro, distancia del cabezal a la pieza, etc. Con este sistema se obtiene una precisión en las dimensiones de las probetas dentro de las tolerancias impuestas por la norma (ISO 527-5:2010⁴⁶¹), con errores medios de 0,2 mm en las dimensiones de estas.

⁴⁶⁰ Ibidem.

⁴⁶¹ Ibidem.

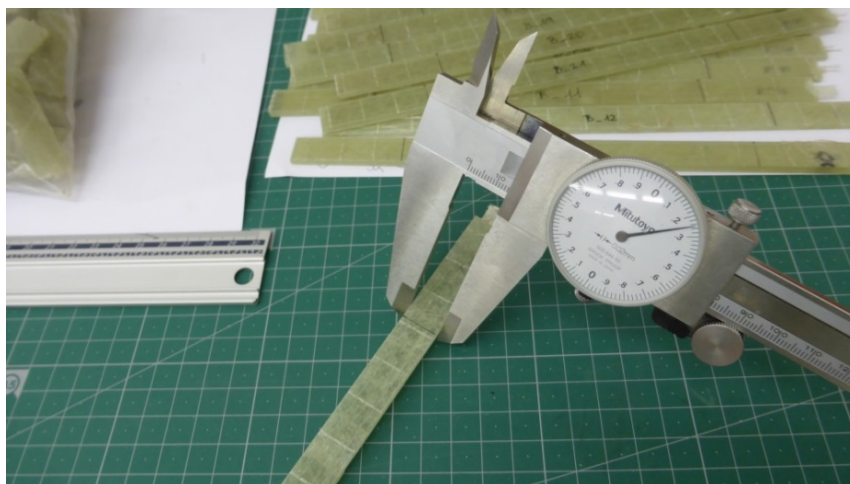


Fig. 94. Medición de probetas con un calibre Mitutoyo.

Recibido el acopio de probetas cortadas, se realiza el control, medición y numerado de cada una (Fig. 94). La nomenclatura empleada para definir a cada probeta se basa en la simbología de la imagen (Fig. 95).

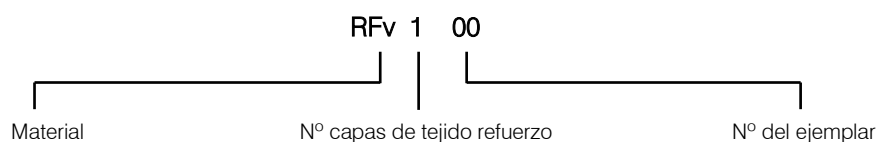


Fig. 95. Simbología empleada en la nomenclatura de las probetas.

Cortadas las probetas (cuerpo longitudinal y tacones a 45°) según las dimensiones expuestas en la norma ISO 527-5:2010⁴⁶² para la probeta tipo B, y realizada la medición de cada una de ellas, se procede al montaje final de las mismas mediante el pegado de los tacones al cuerpo longitudinal central. Tras varios ensayos con distintos tipos de adhesivos, para pegar ambas piezas se emplea un adhesivo epoxi marca Sikadur-330, cuyas características técnicas fueron las más próximas a las recomendadas por la norma ISO 527-5:2010⁴⁶³ en su Anexo A-punto C. Además, para controlar visualmente durante la ejecución de los ensayos que no se produzcan fallos de adhesión en mordaza (ensayo nulo), se realizan un marcado transversal sobre los tacones (Fig. 96).



Fig. 96. Realización del marcado en las cabezas de las probetas.

⁴⁶² Ibidem.

⁴⁶³ Ibidem.

El ensayo se desarrolla en cuatro etapas fundamentales:

Etapas 1_ Colocación de la probeta en las mordazas

El posicionamiento de la probeta dentro de las mordazas debe ser vertical para realizar el ensayo de acuerdo con la dirección principal de la fibra (Fig. 97). Para evitar el deslizamiento de la probeta durante la primera fase de carga, donde las cuñas aún no están totalmente ajustadas, se utiliza un cierre neumático que aplica una fuerte presión de cierre inicial. La presión aplicada no daña al cuerpo principal de la probeta al estar cubierta y protegida por los tacones.

Etapas 2_ Colocación del extensómetro

El extensómetro de pinza, marca IBERTEST Mod. IB-MFA 2, se coloca en la zona central de la probeta tal y como se expone en la norma ISO 527/5:2010⁴⁶⁴ (Fig. 98). Antes de iniciar la carga de la probeta se coloca el extensómetro sobre la zona central, evitando resaltes, ondulaciones o cualquier otro defecto destacable bajo el anclaje del extensómetro. Para evitar dañar el equipo de medida se realiza su retirada antes de la rotura de la probeta en un punto de carga semejante en todos los ensayos y siempre dentro del tramo elástico del material.

Etapas 3_ Rotura de la probeta

Una vez retirado el extensómetro se continúa con el ensayo hasta la rotura de la probeta (Fig. 99). Pese a realizarse sin el extensómetro, los parámetros de deformación pueden controlarse por la carrera de la máquina, lo que permitirá posteriormente elaborar y contrastar las gráficas de fuerza-carrera de todos los ensayos para comprobar que no haya anomalías en los tramos finales del ensayo.

Etapas 4_ Adquisición de datos y análisis de las probetas

Terminado el ensayo se guardan los resultados y se retira la probeta de las mordazas. Cada probeta retirada se analiza en busca de signos de deslizamiento, fallos de adhesión de los tacones o rotura en mordaza (Fig. 100); anotando las anomalías detectadas para proceder si fuese necesario al rechazo del ensayo.



Fig. 97. Ajuste y cierre neumático.



Fig. 98. Colocación del extensómetro.

⁴⁶⁴ Ibidem.



Fig. 99. Rotura de la probeta.



Fig. 100. Estado de la probeta tras el ensayo.

4.1.4. Estudio y caracterización de los adhesivos estructurales

Para la selección de los adhesivos estructurales se realizan varios ensayos específicos. En esta selección puede diferenciarse una etapa inicial de ensayos realizada al comienzo de la investigación para la selección de adhesivos compatibles con el uso en tejidos de refuerzo empleados en las vigas dúo de pequeñas dimensiones; y una etapa final realizada para la selección de adhesivos compatibles con los laminados de refuerzo elegidos entre todos los refuerzos posibles para el refuerzo de las vigas dúo a escala estructural.

A. Ensayos de doble cortante (tejidos) sobre la línea de cola

Previamente a la fabricación y ensayo de las vigas dúo pequeñas ($L=1.200$ mm) reforzadas con distintos tejido y láminas rígidas, se realizan unos ensayos a doble cortante en los cuales se introducen distintos tipos de refuerzo en la línea de encolado para comprobar el comportamiento de la unión. Las probetas se realizaron en madera de chopo, encolando tres piezas de madera de dimensiones $20 \times 50 \times 100$ mm, dispuestas de modo que la pieza central sobresaliese 20 mm respecto a las laterales (Fig. 101a). La superficie de contacto entre las piezas tenía una medida de 50×80 mm, lo que representa un área encolada de 4.000 mm². En los ensayos se testan distintos tipos de adhesivos estructurales comerciales potencialmente idóneos para su uso con tejidos; en concreto resina epoxi marca Sika tipo Sikadur 330 (EPX1); y adhesivo de poliuretano marca Cretomer tipo 1152PA (PUR 1). En la Tabla 28 se detallan los tipos y número de probetas ensayadas.

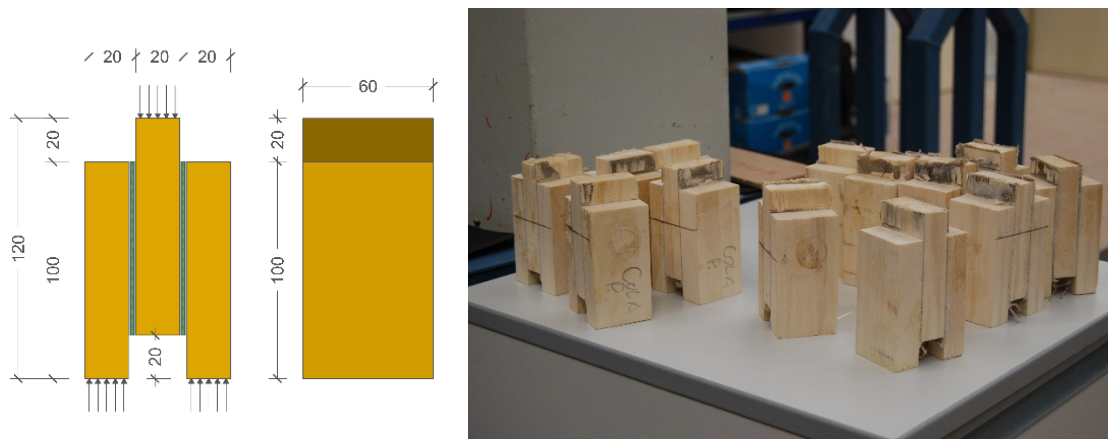
Tabla 28. Tipo y número de probetas de cortante ensayadas a doble cortante.

Tipo de encolado	<i>Populus euramericana</i> I-214 #
EPX 1 _ W-W	6
EPX 1 _ W-FRP-W Tejido fibra de vidrio FIDIA 'FIDGLASS UNI 300 HT73'	6
EPX 1 _ W-FRP-W Tejido de lino FIDIA 'FIDFLAX UNI 300 HS50'	6
EPX 1 _ W-FRP-W tejido de fibra de carbono SIKA 'SikaWrap-230 C/45'	6
PUR 1 _ W-W	6
PUR 1 _ W-FRP-W Tejido fibra de vidrio FIDIA 'FIDGLASS UNI 300 HT73'	6
PUR 1 _ W-FRP-W Tejido de lino FIDIA 'FIDFLAX UNI 300 HS50'	6
PUR 1 _ W-FRP-W tejido de fibra de carbono SIKA 'SikaWrap-230 C/45'	6

Dónde:

W-W ensayo madera-madera / **W-FRP-W** ensayo madera-FRP-madera

Los ensayos se realizan en la máquina universal de ensayos IBERTEST con una célula de carga instalada de 100 kN. El ensayo se ejecuta con una velocidad de desplazamiento constante de $+0,2$ kN/s, durando un tiempo de 60 ± 20 segundos. Antes del ensayo cada probeta es cuidadosamente colocada en el centro de los platos, iniciándose el ensayo bajo una precarga de 100 N (Fig. 101b).



B. Ensayos de cortante (laminados) sobre la línea de cola

La evaluación de la resistencia a cortante de las uniones encoladas se realiza de acuerdo con la norma ISO 6238:2018⁴⁶⁵, específica para el ensayo de adhesivos en madera. Se realizan dos campañas experimentales: una primera, con probetas en condiciones de laboratorio, y otra con probetas sometidas a ciclos de envejecimiento, variando las condiciones ambientales de temperatura y humedad. Todos los ensayos se realizan con probetas estabilizadas en valores próximos al 12%HEH. Las dimensiones de las probetas se muestran en la Fig. 102.a. Su fabricación se realiza a partir de tablas seleccionadas de madera limpia (partida 3), de dimensiones 50x20x1200 mm, estabilizadas previamente bajo condiciones de laboratorio a $20 \pm 2^\circ\text{C}$ de temperatura y $65 \pm 5\%$ de humedad relativa, y cepilladas un máximo de 48 horas antes del encolado. El proceso de encolado es el mismo al utilizado en la fabricación de las vigas dúo (Apartado 3.2.6). Una vez fabricadas las piezas se mantienen bajo condiciones de laboratorio durante un mínimo de 15 días, hasta su corte y mecanizado para la obtención de las probetas finales con la tronzadora abatible (Fig. 102.b). Se fabrican probetas en madera de chopo y madera de pino pinaster, con encolado madera-madera, e incorporando un laminado de refuerzo tipo GFRP UNI 1200 dentro de la línea de encolado. Antes de ensayarse todas las probetas son numeradas y medidas con un calibre Mitutoyo.

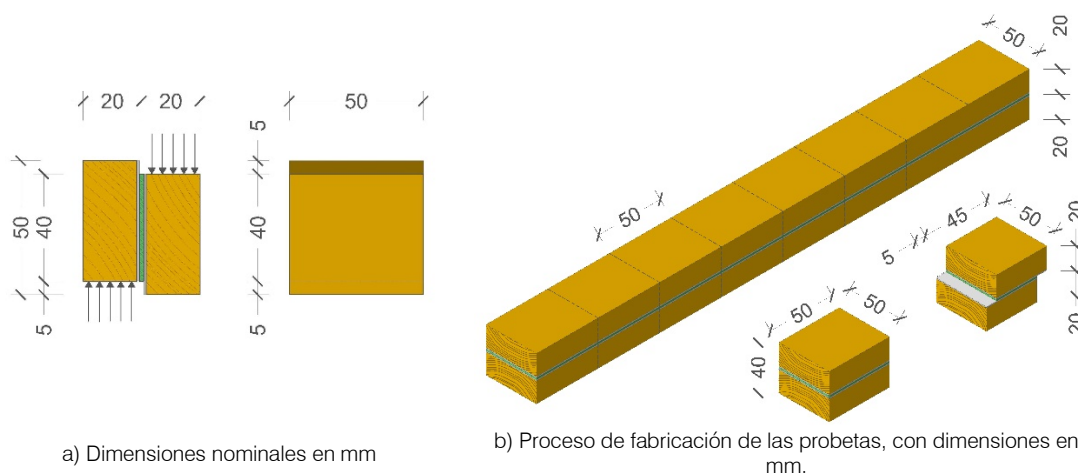


Fig. 102. Características de las probetas de cortante.

En los ensayos se testan distintos tipos de adhesivos estructurales comerciales, en concreto 2 resinas epoxi suministradas por la marca Sika, Sikadur 330 (EPX 1) y Sikadur 30 (EPX 2); y 1 resina

⁴⁶⁵ Norma ISO 6238: 2018. Op. cit.

epoxi suministrada por la marca Mapei, Mapewood Paste 14 (EPX 3). Todas ellas resinas epoxi bicomponente, tixotrópicas, de curado a temperatura ambiente y especialmente formuladas para su uso con refuerzos FRP. Además, se testa 1 adhesivo de poliuretano de la marca Crestomer - Cretomer 1152PA (PUR 1) formulado para uso con refuerzos FRP/metálicos; y un adhesivo industrial melamina-urea-formol de la marca AzkoNobel - MUF 1247/2526 (MUF 1), extensamente utilizado para la fabricación de vigas de madera laminadas. En la Tabla 29 se detallan los tipos y número de probetas ensayadas:

Tabla 29. Tipo y número de probetas de cortante ensayadas según norma ISO 6238: 2018.

Tipo de encolado	<i>Populus euramericana</i> I-214	<i>Pinus pinaster</i> Ait
	Ud.	Ud.
Piezas de Control (probeta madera maciza)	15	15
EPX 1 _ W-W (12%HEH)	15	10
EPX 1 _ W-W (CC)	15	-
EPX 1 _ W-FRP-W (12% HEH)	15	10
EPX 1 _ W-FRP-W (CC)	15	-
EPX 2 _ W-W (12% HEH)	15	10
EPX 2 _ W-W (CC)	15	-
EPX 2 _ W-FRP-W (12% HEH)	15	10
EPX 2 _ W-FRP-W (CC)	15	-
EPX 3 _ W-W (12% HEH)	15	10
EPX 3 _ W-W (CC)	15	-
EPX 3 _ W-FRP-W (12% HEH)	15	10
EPX 3 _ W-FRP-W (CC)	15	-
PUR 1 _ W-W (12% HEH)	15	10
PUR 1 _ W-W (CC)	15	-
PUR 1 _ W-FRP-W (12% HEH)	15	10
PUR 1 _ W-FRP-W (CC)	15	-
MUF 1 _ W-W (12% HEH)	15	10
MUF 1 _ W-W (CC)	15	-
MUF 1 _ W-FRP-W (12% HEH)	15	10
MUF 1 _ W-FRP-W (CC)	15	-

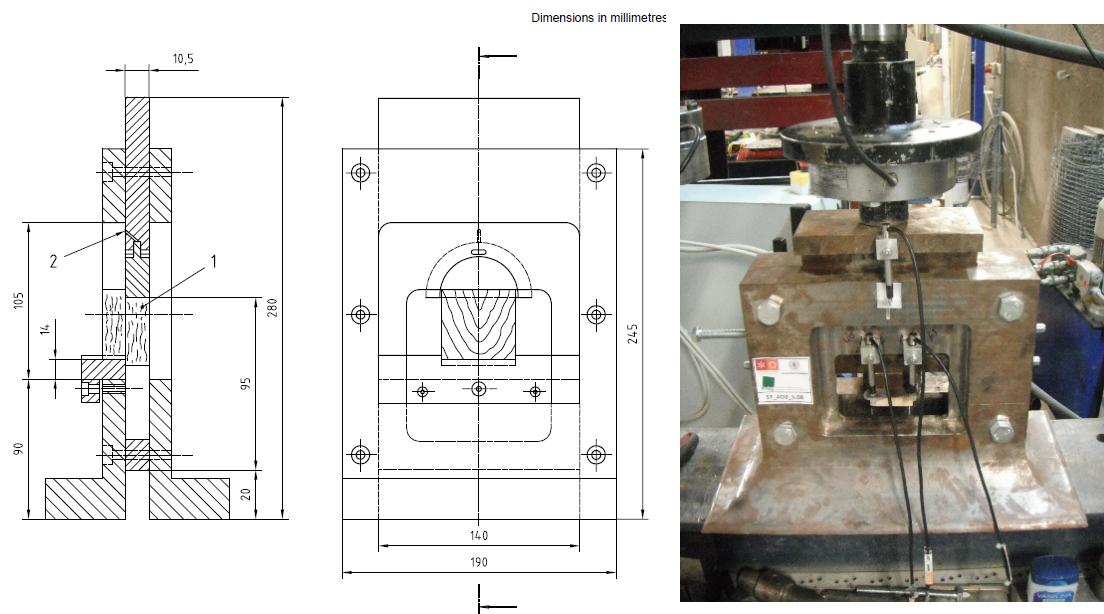
Dónde:

W-W: ensayo madera-madera / **W-FRP-W:** ensayo madera-FRP-madera.

12%HEH: probetas condiciones de laboratorio / **CC:** probetas sometidas a ciclos de envejecimiento.

Para la realización de los ensayos de cortante es preciso emplear un útil de carga y apoyo que cumpla con las características expuestas en la norma ISO 6238: 2018⁴⁶⁶. Este útil se coloca bajo un actuador hidráulico a compresión con una célula de carga instalada de 100 kN, colocándose además 3 LVDT, tipo INELTA ISDB/20 de 20 mm, para medir las deformaciones de la probeta (Fig. 103). El ensayo se realiza con una velocidad de desplazamiento constante de +0,01 mm/s, realizándose el ensayo en un tiempo de 60±20 segundo. Antes de cada ensayo cada probeta es cuidadosamente colocada en su posición y precargada con 50 N.

⁴⁶⁶ Ibidem.



a) Útil para los ensayos de cortante según norma ISO 6238:2018⁴⁶⁷.

b) Configuración de ensayo.

Fig. 103. Detalle del útil y configuración de un ensayo a cortante de la línea de encolado. Dimensiones en mm.

Ciclos de envejecimiento

Se realiza una campaña experimental sometiendo un lote de probetas a ciclos de envejecimiento, bajo condiciones de temperatura y humedad cambiantes, utilizando para ello una cámara climática marca ARALAB, mod. Fitoclima 1000 programada con 2 ambientes específicos y diferentes (Tabla 30). Los ambientes definidos tratan de someter las piezas al efecto cambiante de clima muy húmedo a muy seco, continuando otros trabajos experimentales previos realizados por otros investigadores^{468; 469}. De este modo, se programa un ambiente seco, con una temperatura de 5°C y una humedad relativa del aire de 40% (equivalente a una humedad equilibrio higroscópico menor del 8%⁴⁷⁰) durante 96 horas -4 días-; y un ambiente húmedo, con una temperatura de 40°C y una humedad relativa del aire de 90% (equivalente a una humedad equilibrio higroscópico mayor al 18%⁴⁷¹) durante 72 horas -3 días-. Estas condiciones ambientales se repiten durante 6 ciclos a lo largo de 1.080 horas -45 días- de ensayo. Una vez finalizados los ciclos se mantienen las probetas dentro de la cámara climática bajo condiciones de laboratorio, a 20±2°C de temperatura y 65±5% de humedad relativa, durante un mínimo de 168 horas -7 días- hasta conseguir estabilizar las probetas a una humedad equilibrio higroscópico en valores próximos al 12%.

Tabla 30. Características de los ciclos de envejecimiento realizados.

Número de ciclo	Tiempo (horas)	Temperatura (°C)	Humedad aire (%)	HEH madera estimada
#0 (estabilización inicial)	72	20	60	12%
#1	96	5	40	8%
	72	40	90	18%
#2	96	5	40	8%
	72	40	90	18%
#3	96	5	40	8%
	72	40	90	18%
#4	96	5	40	8%
	72	40	90	18%
#5	96	5	40	8%

⁴⁶⁷ Ibidem.

⁴⁶⁸ AA.VV. (2001) GIROD – *Glued-in Rods for timber structures*. SMT4-CT97-2199 :1999-2001

⁴⁶⁹ Silva, C.; Branco, J.; Ringhofer, A.; Lourenco, P.; Schickhofer, G. (2016) "The influences of moisture content variation, number and width of gaps on the withdrawal resistance of self-tapping screws inserted in cross laminated timber". *Construction and Building Materials* 125, pp. 1205–1215. [DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.008].

⁴⁷⁰ Kollmann, F (1959). Op. cit.

⁴⁷¹ Ibidem.

	72	40	90	18%
#6	96	5	40	8%
	72	40	90	18%
#7(estabilización final)	168	20	60	12%
1248 (52 días)				

C. Ensayos de tracción tipo “pull-off” (laminados) sobre la línea de cola

La evaluación de las uniones encoladas se completa con la realización de ensayos a tracción, tipo “pull-off” sobre piezas encoladas con y sin laminado de refuerzo. Los ensayos se realizan de acuerdo con la norma UNE-EN-ISO 4624:2016⁴⁷², considerando también las recomendaciones en la ejecución recogidas en las normas ASTM D4541-17⁴⁷³ y UNE-EN 1542:2000⁴⁷⁴. De igual modo que en los ensayos de cortante, se realizan dos campañas experimentales: una primera con probetas en condiciones de laboratorio, y otra con probetas sometidas a ciclos de envejecimiento variando las condiciones ambientales de temperatura y humedad. Las condiciones ambientales y tiempos de exposición de los ciclos de envejecimiento mantienen las mismas características expuestas anteriormente en la Tabla 30. Todos los ensayos se realizan con probetas estabilizadas en valores próximos al 12%HEH.

Para realizar el ensayo fue precisa la ejecución de varios cortes circulares con una sierra de corona, de diámetro interior de 48 mm, y 55 mm de profundidad que superen la línea de encolado de las probetas (Fig. 104.a). Las probetas se fabrican en madera de chopo (partida 3) a partir de tabloncillos de dimensiones 40x120x1200 mm, de clasificación visual equivalente a ME-1, estabilizadas previamente bajo condiciones de laboratorio a $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ de temperatura y $65\pm 5\%$ de humedad relativa. Ambas tablas fueron cepilladas un máximo de 48 horas antes del encolado, y sobre una de ellas se realiza un cajeadado central, de profundidad 2mm y anchura 62 mm, en el que se inserta el laminado de refuerzo tipo GFRP UNI 1200 dentro de la línea de encolado (Fig. 104.b). El proceso de encolado es el mismo al utilizado en la fabricación de las vigas dúo (Apartado 3.2.6). Una vez fabricadas las probetas se mantiene bajo condiciones de laboratorio durante un mínimo de 15 días, hasta la realización de los cortes con la corona. Previamente a su corte, se cepilla toda la superficie y, una vez realizados los cortes, se pega sobre el cilindro de madera interior ($\varnothing 48$ mm) un disco metálico de latón de diámetro 50 mm y espesor 25 mm, con un mecanizado central de rosca de diámetro 10 mm. Para adherir el disco se emplea resina epoxi de altas prestaciones específicamente formulada para este tipo de aplicaciones, de la marca comercial Sika, tipo Sikalcosit K101N. Se aplica presión ($>0,5$ MPa) y se cura durante 15 días bajo condiciones de laboratorio. Superado este periodo se ensayan, numerando y midiendo con un calibre cada una de las muestras.

⁴⁷² Norma UNE-EN-ISO 4624:2016. Op. cit.

⁴⁷³ Norma ASTM D4541-17 “Pull-off strength of coatings using portable adhesion testers”.

⁴⁷⁴ Norma UNE-EN 1542:2000 “Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Measurement of bond strength by pull-off”.

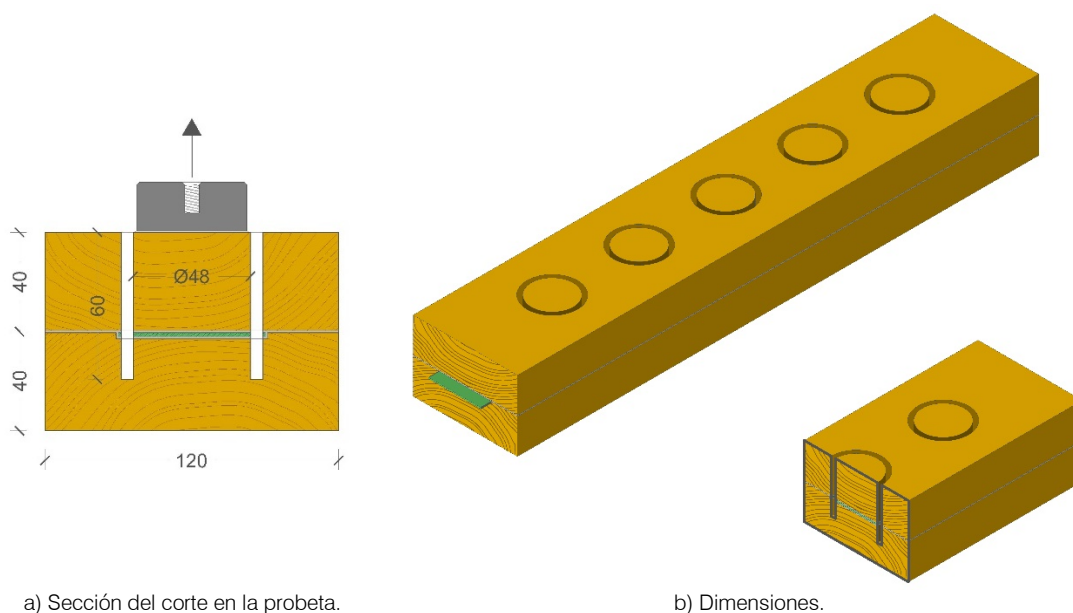


Fig. 104. Características y dimensiones nominales en mm de las probetas de pull-off.

En los ensayos se testan únicamente los adhesivos estructurales de resina epoxi empleados en los ensayos de cortante (Apartado 4.1.4). En la Tabla 31 se detallan los tipos y número de probetas ensayadas:

Tabla 31. Tipo y número de probetas de pull-off ensayadas según norma EN-ISO 4624:2016⁴⁷⁵.

Tipo de encolado	Populus euroamericana I-214
	Ud.
EPX 1 _ W-W (12%HEH)	6
EPX 1 _ W-W (CC)	6
EPX 1 _ W-FRP-W (12%HEH)	6
EPX 1 _ W-FRP-W (CC)	6
EPX 2 _ W-W (12%HEH)	6
EPX 2 _ W-W (CC)	6
EPX 2 _ W-FRP-W (12%HEH)	6
EPX 2 _ W-FRP-W (CC)	6
EPX 3 _ W-W (12%HEH)	6
EPX 3 _ W-W (CC)	6
EPX 3 _ W-FRP-W (12%HEH)	6
EPX 3 _ W-FRP-W (CC)	6

Dónde:

W-W: ensayo madera-madera / **W-FRP-W**: ensayo madera-FRP-madera

12%HEH: probetas condiciones de laboratorio / **CC**: probetas sometidas a ciclos de envejecimiento.

Para la realización de los ensayos de tracción (pull-off) se requiere colocar un útil de carga con rótula superior y barra roscada, que permita unir adecuadamente el actuador al disco adherido a la madera. Este útil se coloca bajo un actuador hidráulico a tracción con una célula de carga instalada de 25kN; se coloca un LVDT, tipo INELTA ISDB/50 de 50 mm, para controlar el desplazamiento del actuador; montándose además una roseta anclada al disco metálico con 3 LVDT, tipo INELTA ISDB/20 de 20 mm, cada 120°, para medir las deformaciones experimentadas en la madera durante el desarrollo del ensayo (Fig. 105). El ensayo se realiza con una velocidad de desplazamiento constante de -0,05 mm/s, realizándose en un tiempo de 90±20 segundo.

⁴⁷⁵ Norma UNE-EN-ISO 4624:2016. Op. cit.



a) Útil de tracción empleado durante el ensayo.



b) Detalle de la colocación de la roseta con LVDTs.

Fig. 105. Detalle del útil y configuración de un ensayo a tracción (*pull-off*) de la línea de encolado.

D. Preparación de superficies

Valorando las características y propiedades, condiciones de aplicación, requerimientos y/o precio, facilitados por los fabricantes y expuestos en la Tabla 22 se selecciona las resinas epoxi Sikadur 330, y resina de poliuretano Crestomer 1152PA para su adquisición y ensayo con refuerzos de tejido utilizados en las vigas de pequeña escala. Para los refuerzos con laminados rígidos se han seleccionado y adquirido las resinas epoxi Sikadur 30, Sikadur 330, Mapei Mapewood paste 140, y la resina de poliuretano Crestomer 1152PA. También se ha testado el comportamiento del adhesivo MUF 1247/2526 de la marca Azko Nobel. La elección de estos adhesivos se realiza por sus propiedades mecánicas, y a igualdad de características, por facilidad de adquisición y precio.

Preparación previa al uso de los adhesivos

Es conocido que la calidad de la unión no depende únicamente del tipo y propiedades del adhesivo, siendo la interfase madera-adhesivo y FRP-adhesivo el punto crítico de la calidad de la unión⁴⁷⁶. Por ello, para garantizar la correcta aplicación de los adhesivos es fundamental garantizar la adecuada preparación previa de las superficies de la unión. Todas las uniones (vigas, probetas o testigos) realizadas a lo largo de la investigación con cualquiera de los adhesivos expuestos anteriormente deben someterse a una preparación previa de las superficies.

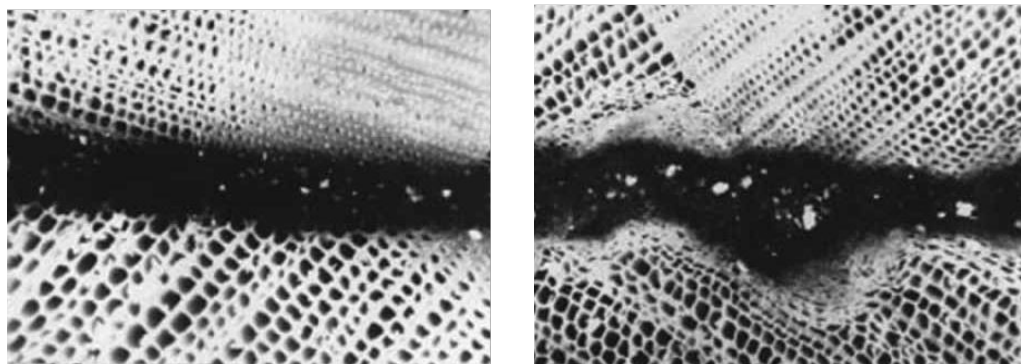
Acabado de la madera

El acabado superficial de la madera para una correcta adhesión debe ser una superficie plana, suave y sin irregularidades (desgarros, astillados, marcas mecánicas, fendas, ...), y libre de suciedad o contaminantes químicos. Debe mecanizarse todas las piezas de madera hasta alcanzar una perfecta planeidad de las caras de las piezas a encolar, garantizando que no se puedan producir líneas de encolado discontinuas, espesores de unión no uniformes, o áreas con escasa superficie de adhesivo que resulten insuficientes.

Para obtener un acabado con estas propiedades, se mecanizaron todas las piezas mediante un método con garantías y fácil repetitividad, como el cepillado a máquina. Realizando el mecanizado con un cepillado a velocidades moderadas, con las cuchillas bien afiladas y pasadas sucesivas con una profundidad de corte superficial. Fue fundamental garantizar el

⁴⁷⁶ Hernandez et al. (1997) Op. cit.

adecuado afilado de las cuchillas; una máquina con cuchillas mal afiladas produce desgarros en las células de la madera, obteniéndose superficies irregulares y débiles. En la Fig. 106 se compara una superficie con un acabado correctamente preparado (a), junto a un acabado inadecuado (b).



a) Superficie correctamente preparada. b) Superficie trabajado con equipo mal afilado.

Fig. 106. Imagen microscópica de una una unión encolada (Fuente:FPL 2010)⁴⁷⁷

Otro método alternativo utilizado consiste en el lijado de la superficie con papel de lija de gramajes 60-80 gr/m² (lija fina), no siendo recomendable utilizar papel de lija de gramajes superiores a 200 gr/m² (lija gruesa). Este método se utilizará para preparar las superficies de los laminados de refuerzo, y de los tableros de fibras.

Una vez mecanizadas superficialmente las piezas se comprobó el correcto acabado de la superficie de madera a encolar mediante un ensayo de tensión superficial en líquidos. Basta añadir una gota de agua sobre la superficie de madera mecanizada y observar la forma que adquiere la gota (Fig. 107). Sobre superficies con acabado irregular (como el aserrado), con desgarros o marcas de mecanizado, la gota no impregna con facilidad en la madera formando una gota alta. Por el contrario, en superficies con un correcto acabado superficial al aplicar la gota de agua ésta impregna con facilidad y rapidez la madera, formando gotas muy planas.



a) Acabado sin tratar (aserrado) b) Acabado superficial incorrecto c) Acabado superficial correcto

Fig. 107. Comprobación del correcto acabado de las superficies (Fuente: FPL 2010).⁴⁷⁸

Inactivación de las superficies

Es importante que el trabajo de acabado superficial de la madera se realice en las horas previas al encolado de las piezas, puesto que, una vez realizado, las superficies de madera comienzan a sufrir un proceso de inactivación que limitan la penetración y adhesión de las resinas. Esta inactivación superficial consiste en una progresiva oxidación de la superficie por contacto con el aire, y una lenta obturación de los lúmenes de las células cortadas; mermando ambos procesos la capacidad de la madera para recibir el adhesivo y que éste fluya libremente

⁴⁷⁷ Forest Products Laboratory (2010). Op. cit.

⁴⁷⁸ Ibidem.

impregnando la porosidad de la estructura interna. La velocidad y severidad con que ocurre este proceso de inactivación depende de la especie de madera, de su contenido de humedad, temperatura y tiempo de exposición al aire⁴⁷⁹. Para conseguir una adhesión óptima y minimizar el impacto producido por el proceso de inactivación, se limitó el tiempo máximo de encolado a 48 horas tras la preparación de la superficie. Además, las piezas una vez mecanizadas fueron almacenadas en una zona limpia, sin polvo ni productos químicos, manteniéndose protegidas con un plástico limpio (film de alimentación) para impedir su contaminación superficial. Estos cuidados permitieron garantizar la idoneidad de la superficie para obtener una línea de encolado óptima. De lo contrario, son varios los estudios^{480, 481} que advierten que, ante entornos incontrolados a partir de las 24h de preparar la superficie se acelera la inactivación, reduciendo significativamente la capacidad de la madera para recibir el adhesivo.

E. Preparación de las superficies de los laminados de refuerzo

Los laminados de refuerzo GFRP utilizados en la fabricación de las vigas dúo, así como los utilizados en los ensayos de adhesivos, han sido diseñados y fabricados específicamente para el desarrollo de esta investigación. Por ello, y a diferencia de otros refuerzos FRP comerciales, fue preciso preparar previamente el acabado superficial aumentando su acritud mediante algún tipo de proceso para garantizar una correcta adherencia. De los tres métodos principales utilizados en la industria (adición de partículas durante la fabricación, tratamiento superficial químico, o tratamiento superficial mecánico), se seleccionan y ensayan dos tipos de tratamiento superficial; el granallado y el lijado mecánico.

Granallado

Este tratamiento superficial, ampliamente utilizado en la preparación de piezas metálicas, se basa en proyectar a alta presión partículas diminutas de distinta naturaleza contra la superficie de un material. Existen multitud de variantes en la técnica en función del material de partículas utilizadas (partículas de acero, arenas de sílices, ...), del diámetro del grano, de la presión, o del fluido base utilizado. Para elegir con certidumbre los parámetros más idóneos en la aplicación del granallado sobre las bandas de refuerzo (GFRP) se realiza una consulta técnica a la empresa FERCARE, especializada en este tipo de aplicaciones, ubicada en el polígono de San Cristóbal (Valladolid). De esta consulta técnica se determina el tipo de partícula abrasiva recomendada para el tipo de material de las bandas de refuerzo (Tabla 32).

Tabla 32. Tabla para la selección del tipo de partícula abrasiva en función del material.

Material a granallar	Microesferas		Abrasivos angulares					Gran angular Acero	Granallas esféricas	
	Vidrio	Cerámica	Vegetal	Plástico	Silicato	Polvo vidrio	Sílice		Acero	Acero Inox.
Acero	O	B	-	-	B	-	X	O	O	-
Acero Inox.	O	O	-	-	-	-	X	-	-	O
Aleaciones no férricas	O	O	-	-	-	-	X	-	-	B
Aluminio	O	O	-	-	-	-	X	-	-	B
Madera	O	-	-	-	B	B	X	-	-	-
Mármol y granito	-	-	-	-	B	-	X	-	B	B
Plásticos varios	B	O	B	-	-	-	X	-	O	-
Vidrio	B	-	-	-	-	-	X	-	-	-

Donde, O = Óptimo; B = Bueno; X = Prohibido

⁴⁷⁹ Custodio et al. (2009) Op. cit.

⁴⁸⁰ Nussbaum, R. M (1999). "Natural surface inactivation of Scots pine and Norway spruce evaluated by contact angle measurements". *European Journal of Wood and Wood Products* 57(6), pp. 419-424. [DOI: 10.1007/s001070050]

⁴⁸¹ Nussbaum, R. M (1995). The critical time limit to avoid natural inactivation of spruce surfaces (*Picea abies*) intended for painting or gluing. *European Journal of Wood and Wood Products*, 53(6), pp. 384-384. [DOI: 10.1007/BF03034905]

Determinado el tipo de partícula abrasiva a emplear, la empresa recomienda unos gramajes de partículas aproximados basándose en su experiencia profesional (Tabla 33).

Tabla 33. Características de las partículas abrasivas seleccionadas.

Granalla de acero			Granalla cerámica		
GRANULOMETRÍA			GRANULOMETRÍA		
Esférica	mm	Angular	Esférica	mm	Angular
S-110	0,3	G-50	B-60	0,125 - 0,250	-
CARACTERÍSTICAS			CARACTERÍSTICAS		
Dureza	46-51	HRC	Dureza	7-7,5	HRC
Color	Acero		Color	Blanco	
Densidad	7,4	g/cm ³	Densidad	3,85	g/cm ³
Forma	Esfera / angular		Forma	Esfera	

Partiendo de la selección de estos dos tipos de partículas se realizan varias pruebas de granallado (Fig. 108) sobre varios laminados GFRP UNI 2400 en las instalaciones de FERCARE.

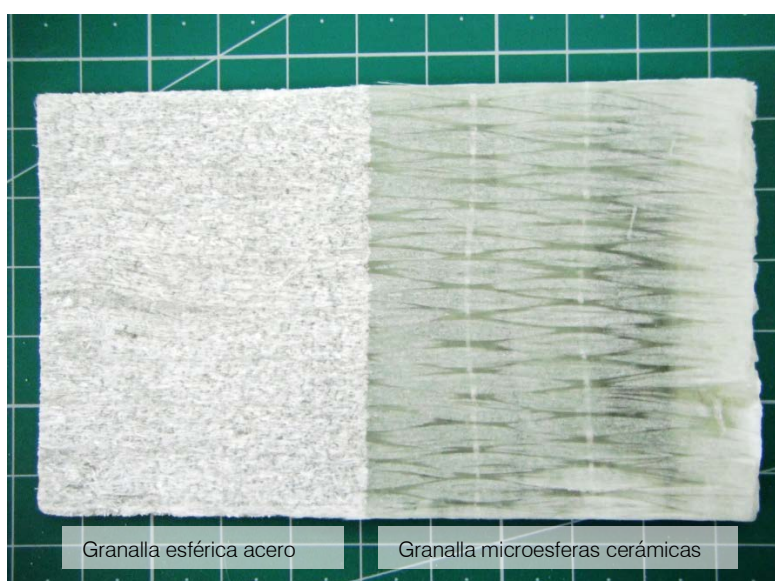
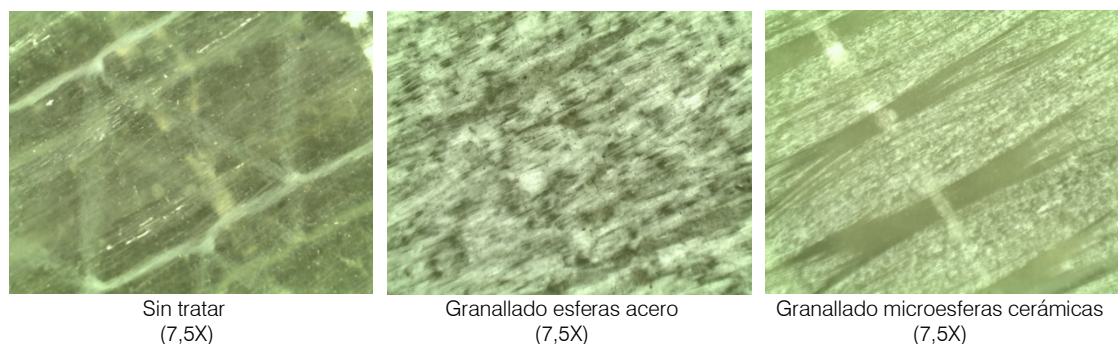


Fig. 108. Prueba de granallado sobre una banda de refuerzo de fibra (2400 gr/m²).

Sobre estas pruebas se realizan fotografías con el estereomicroscopio MOTIC bajo distintos tipos de aumento para comprobar el estado de la superficie (Fig. 109).



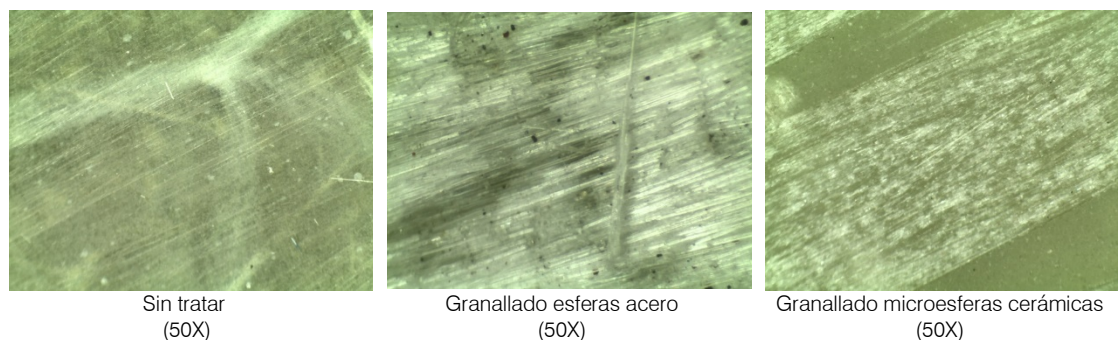


Fig. 109. Imágenes microscópicas de distintos tipos de partículas de granallado empleadas sobre los laminados.

De ellas se desprende que el tipo de granalla más recomendable de los probados para el tratamiento de los laminados, son las partículas de microesferas cerámicas de $\text{Ø}125\text{-}250\ \mu\text{m}$.

Lijado mecánico

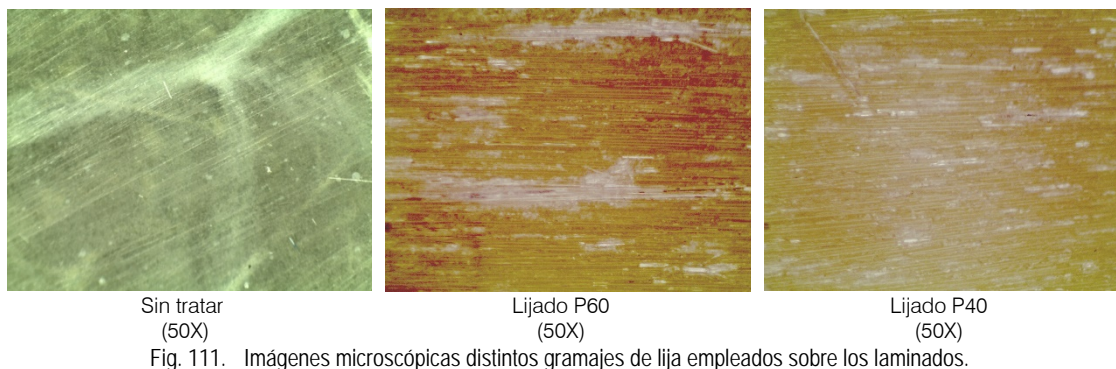
Se realizan ensayos de tratamiento superficial mecánico para mejorar la acritud de los laminados mediante un lijado mecánico con amoladora y un disco abrasivo de papel de lija. Se seleccionan discos abrasivos de láminas con dos gramajes distintos de papel de lija correspondientes a lija gruesa (P-60) con diámetro de partícula de $1.000\ \mu\text{m}$, y lija media (P-40) con diámetro de $425\ \mu\text{m}$. Con estos dos tipos de discos abrasivos se realizan varias pruebas (Fig. 110) sobre laminados GFRP UNI 2400 en el laboratorio de estructuras de la ETSIAA (Palencia).



Fig. 110. Prueba de lijado sobre una muestra de banda de refuerzo de fibra ($2400\ \text{gr/m}^2$).

Sobre estas pruebas se realizan fotografías con el estereomicroscopio MOTIC bajo distintos tipos de aumento para comprobar la superficie (Fig. 111)





De ellas se desprende que el tipo disco de lija más recomendable de los probados para el tratamiento de los laminados es el gramaje P40 (papel de lija media).

Comparación de tratamientos

Para elegir el tratamiento superficial finalmente empleado sobre los laminados se realizan 12 testigos dúo con tabloncillos de 40x140x500 mm de madera de pino pinaster (partida 2) y resina epoxi Sikadur-30, colocando un laminado de refuerzo tipo GFRP UNI 2400 intermedio con distintos tipos de tratamiento superficial. Los testigos se reparten en 4 laminados sin tratar superficialmente, 4 laminados con granallado de microesferas cerámicas de $\text{Ø}125\text{-}250\ \mu\text{m}$, y 4 laminados con lijado mecánico de lija P-40. Con estos tres lotes de probetas dúo se compara la adherencia mediante el análisis del tipo de rotura producido tracción indirecta mediante hendido con cuña (Fig. 112).

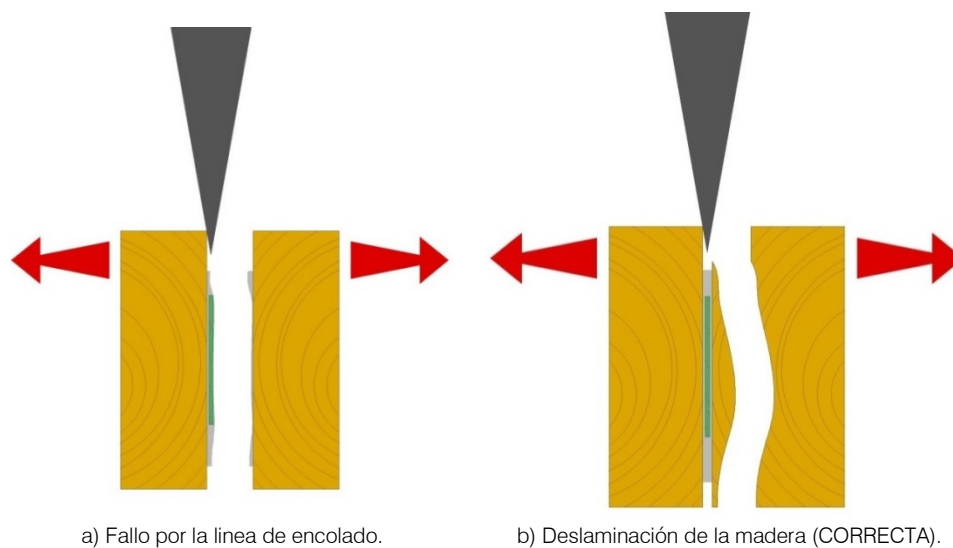


Fig. 112. Análisis de adherencia mediante el hendido con cuña.

Tanto en los tratamientos superficiales mediante granallado, como mediante lijado mecánico, la adherencia de los testigos fue correcta (Fig. 112.b). Por ello, se selecciona el tratamiento más económico: lijado mecánico con lija de gramaje P40, para el tratamiento de todos los laminados utilizados en la investigación.

4.1.5. Ensayos a flexión en vigas de pequeñas dimensiones [1:25]

Se ensayan un total de 640 vigas dúo con distintos tipos de refuerzo de dimensión nominal 40x60x1.200 mm (Tabla 34).

Tabla 34. Vigas dúo de madera de chopo y tablero de fibras DM ensayadas.

Tipo de viga	Material de refuerzo	Serie	Nº Probetas ensayadas
Viga madera maciza	Sin refuerzo	M.00.xx	79 ud.
Viga dúo sin refuerzo	Sin refuerzo	DT.00.xx	83 ud.
Viga dúo con refuerzo de tejido de lino seco	FIDIA 'FIDFLAX UNI 300 HS50'	L.01.xx	109 ud.
Viga dúo con refuerzo de tejido lino húmedo	FIDIA 'FIDFLAX UNI 300 HS50'	LH.01.xx	99 ud.
Viga dúo con refuerzo de tejido fibra de vidrio	FIDIA 'FIDGLASS UNI 300 HT73'	F.01.xx	107 ud.
Viga dúo con refuerzo de tejido fibra de carbono	SIKA 'SikaWrap-230 C/45'	C.01.xx	100 ud.
Viga dúo DM sin refuerzo (testigo)	Sin refuerzo	DM-T.02.xx	21 ud.
Viga dúo DM refuerzo GFRP UNI 300	GFRP UNI 300	DM-RS.02.xx	21 ud.
Viga dúo DM refuerzo GFRP UNI 600	GFRP UNI 600	DM-RD.02.xx	21 ud.

Los ensayos se realizan en la máquina universal de ensayos Ibertest con una célula de carga instalada de 20 kN. Las distancias entre bancadas y puntos de aplicación de la carga en el puente de carga se configuran de acuerdo con la norma UNE EN 408:2012⁴⁸², en función del canto (h) de las vigas a ensayar, realizándose los ensayos según las distancias especificadas en la Fig. 113. Los ensayos se realizaron con una velocidad de desplazamiento constante de 10 mm/min.

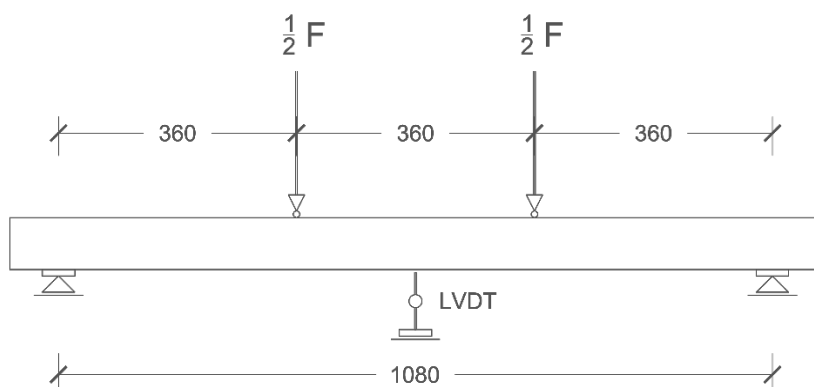


Fig. 113. Esquema de distancias (dimensiones en mm) entre puntos de carga y apoyos de vigas dúo escala 1:25 según UNE EN 408:2012.⁴⁸³

Las deformaciones alcanzadas durante la realización del ensayo se miden con un extensómetro LVDT HBM WA/50 (Fig. 114), fijado mediante una arboladura articulada con apoyo magnético, para poder registrar con precisión la deformación producida durante los ensayos en el centro del vano. El tiempo de rotura de las vigas se sitúa en 300 ± 120 s. Después de la rotura, se inspecciona el modo de fallo, anotando su ubicación y características.

⁴⁸² Norma UNE EN 408:2012. Op. cit.

⁴⁸³ Ibidem.



a) Ensayo en tramo elástico con extensómetro.



b) Final de ensayo hasta rotura con extensómetro retirado.

Fig. 114. Ensayo de vigas dúo de pequeñas en la máquina universal de ensayos Ibertest.

4.1.6. Ensayos a flexión en vigas de dimensiones estructurales [1:2]

En este apartado se describe la metodología empleada en los ensayos destructivos a flexión realizados sobre un total de 174 unidades de vigas reforzadas a escala 1:2 para determinar el módulo de elasticidad local (MOE) y el módulo de rotura (MOR). Los ensayos se realizan sobre tres series de vigas de chopo (*Populus x euroamericana* I-214) y pino pinaster (*Pinus pinaster* Ait.) con distinto tipo de refuerzo (Tabla 35) de dimensiones nominales (40+40) x 140 x 2500 mm.

Tabla 35. Vigas dúo de dimensión nominal 80x140x2500mm ensayadas.

Tipo de serie	Chopo (Ud.)	Pino Pinaster (Ud.)
Serie T: Viga dúo sin refuerzo (testigo)	29	28
Serie R1200: Viga dúo refuerzo sencillo (GFRP UNI 1200)	30	27
Serie R2400: Viga dúo refuerzo doble (GFRP UNI 2400)	30	30

Los ensayos se realizan en la máquina universal de ensayos Ibertest con una célula de carga instalada de 100 kN. Las distancias entre bancadas y puntos de aplicación de la carga en el puente de carga se configuran de acuerdo con la norma UNE EN 408:2012⁴⁸⁴. en función del canto (h) de las vigas a ensayar. Siguiendo estas especificaciones se ajustan las distancias del puente de carga ($6h \pm 1,5h$) y de las bancadas de apoyo ($18h \pm 3h$), realizándose los ensayos según las distancias especificadas en la Fig. 115. Los ensayos se realizaron con una velocidad de desplazamiento constante de 12 mm/min.

⁴⁸⁴ Ibidem.

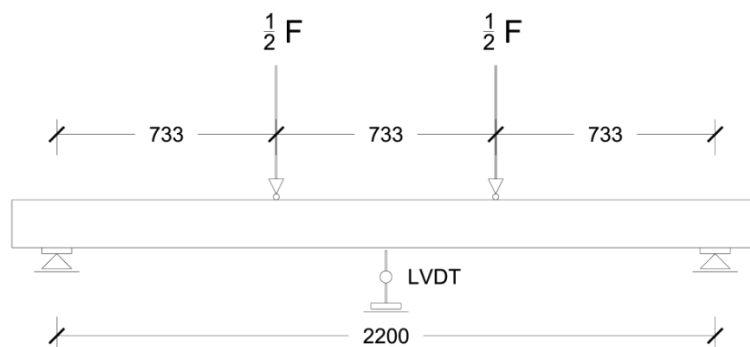


Fig. 115. Esquema de distancias (dimensiones en mm) entre puntos de carga y apoyos según UNE EN 408:2012.⁴⁸⁵

El módulo de elasticidad global a flexión (MOEG) es obtenido mediante el registro de las deformaciones medidas durante la realización del ensayo con un extensómetro LVDT HBM WA/50 localizado en el centro del vano (Fig. 116). El tramo de la curva tensión-deformación para el que se ha medido la rigidez de la viga corresponde al rango entre el 10 y el 40% de la carga máxima estimada para todas las vigas. Al alcanzar este 40% de la carga máxima estimada, se retira el LVDT y se continúa con el ensayo hasta la rotura (Fig. 117). El tiempo de rotura de las vigas se sitúa en 300 ± 120 s. Después de la rotura, se inspecciona el modo de fallo, anotando su ubicación y características.



Fig. 116. Medición de la deformación con el extensómetro.



Fig. 117. Rotura de viga ensayada.

⁴⁸⁵ Ibidem.

De cada viga ensayada se extrajo una probeta, de una zona próxima al punto de rotura, de dimensiones nominales 80x140x80 mm (Fig. 118), con la que obtener el contenido de humedad por secado en estufa de acuerdo con la norma UNE EN 13183-1:2002⁴⁸⁶ y su densidad real. Conocida la humedad de cada viga ensayada pueden ajustarse los valores de módulo de elasticidad a flexión obtenidos aplicando las correcciones propuestas en la norma UNE-EN 384:2016⁴⁸⁷.



Fig. 118. Muestras extraídas de vigas dúo ensayadas para obtención de humedad según UNE EN 13183-1:2002⁴⁸⁸. Dimensiones en mm.

4.1.7. Ensayo de fluencia

El ensayo de fluencia se realiza sobre un grupo de vigas dúo de chopo reforzadas con laminados GFRP UNI 2400 y otro grupo de vigas dúo chopo sin reforzar (testigos), de dimensiones nominales 80x140x2500 mm según las normas UNE-EN 380:1998⁴⁸⁹ y UNE EN 408:2012⁴⁹⁰. Para ello se fabricó un lote de 10 vigas dúo de chopo sin refuerzo (testigos), y un segundo lote de 10 vigas dúo reforzadas (madera de partida 3), de los cuales se seleccionaron 2 vigas de cada lote para cada ensayo de fluencia, reservando el resto para posteriores ensayos. Los ensayos fueron realizados bajo condiciones ambientales controladas y monitorizadas, con temperatura ($20 \pm 2^\circ\text{C}$) y humedad ($65 \pm 5\%$ HR) relativamente constantes, que se corresponden con una humedad de equilibrio higroscópico aproximado del 12% en la madera. La monitorización de las condiciones ambientales del laboratorio se realizó con un termohigrómetro modelo TESTO 635. Al inicio de cada ensayo se determinaron las dimensiones exactas de las piezas, así como la temperatura ambiental y la humedad de la pieza (Tabla 36), esta última por el método de la resistencia eléctrica según UNE-EN 13183-2:2002⁴⁹¹, utilizando un xilohigrómetro de resistencia, mod. SECAMAD HD-3.

Tabla 36. Dimensiones, humedad y temperatura medidos antes de cada ensayo.

Especie	# Pieza	Dimensiones [mm]	Humedad [%]	Temperatura [°C]
<i>Populus x euroamericana I-214</i>	V1 (testigo)	141x85x2500	10,4	20,4
	V2 (testigo)	142x85x2500	10,7	20,4
	V3 (GFRP UNI 2400.)	142x81x2500	10,8	20,4
	V4 (GFRP UNI 2400)	140x83x2500	10,4	20,4

Las vigas dúo fueron colocadas sobre dos bancadas de acero paralelas e independientes con idéntica disposición e instrumentación; colocando en cada ensayo las vigas dúo en parejas, dos

⁴⁸⁶ Norma UNE EN 13183-1:2002. Op. cit.

⁴⁸⁷ Norma UNE-EN 384:2016 "Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad".

⁴⁸⁸ Norma UNE EN 13183-1:2002. Op. cit.

⁴⁸⁹ Norma UNE EN 380:1998. Op. cit.

⁴⁹⁰ Norma UNE EN 408:2012. Op. cit.

⁴⁹¹ Norma UNE-EN 13183-2:2002. Op. cit.

vigas dúo reforzadas en una bancada, y dos vigas dúo sin reforzar como testigos en la otra (Fig. 119). Sobre ellas se aplica una carga conocida semejante y se monitorizar a largo plazo (>6 meses) el comportamiento de ambos grupos de vigas para poder determinar la mejora que supone la adición del refuerzo GFRP sobre los fenómenos de fluencia producidos en la madera.

La carga total aplicada en cada bancada es de 10 kN. Esta carga representa aproximadamente el 50% de la fuerza de rotura de las vigas sin refuerzo, de acuerdo con los datos obtenidos en los ensayos de rotura (UNE EN 408:2012⁴⁹²) realizados con anterioridad sobre piezas de madera y dimensiones análogas. Una vez nivelada con precisión la bancada, la carga se introduce mediante la colocación de depósitos con agua sobre las vigas. Se emplean depósitos de pared simple de polietileno (PE) con una capacidad útil de 1000 litros y dimensiones 1.650x720x1.260 mm, con bocas de llenado superiores y racor de vaciado con llave inferior. El apoyo del depósito sobre las vigas se realiza con una plataforma resistente intermedia que recoge la carga repartida del depósito y la aplica sobre dos puntos, manteniendo la configuración de ensayos a flexión de acuerdo con la norma UNE EN 408:2012⁴⁹³. Esta configuración de ensayo permite comparar los valores obtenidos con otros ensayos realizados en laboratorio sobre la máquina universal de ensayos.

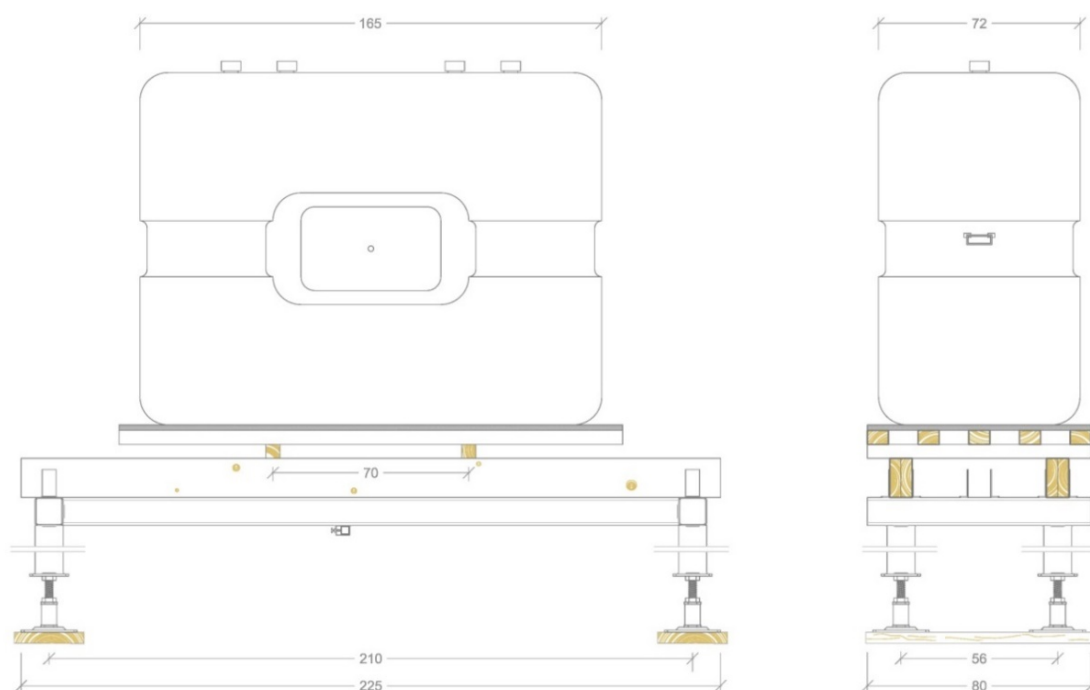
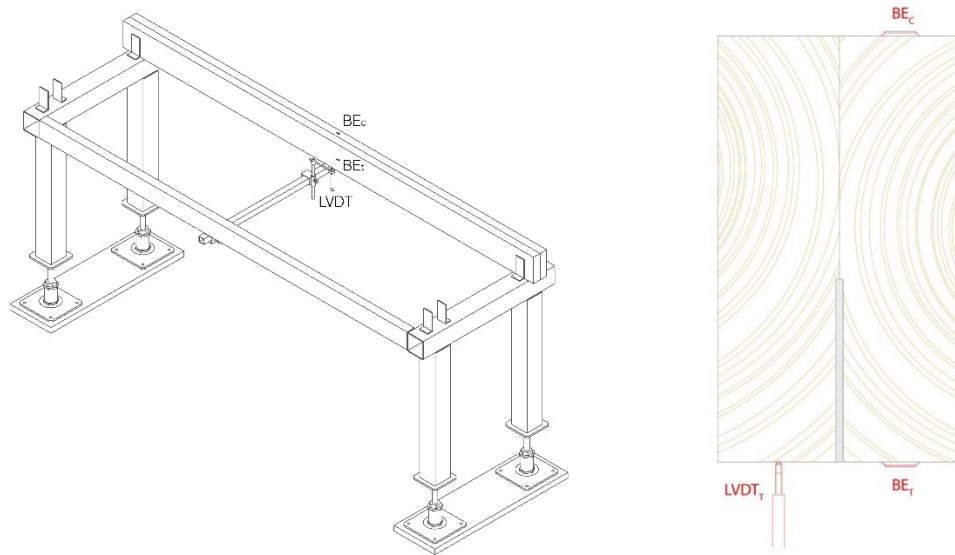


Fig. 119. Esquema de apoyo de la carga sobre las vigas (dimensiones en mm).

Para la monitorización de las piezas durante toda la duración del ensayo se emplean extensómetros inductivos (LVDT) tipo HBM WA/100 y bandas extensométricas lineales HBM LY41-10/120. Las mediciones de deformación se realizan en el centro del vano de cada viga ($L/2$), colocando dos bandas extensométricas; una en la cara inferior (BE_T) y otra en la cara superior (BE_C), situando en el mismo punto un extensómetro en paralelo a la banda extensométrica (Fig. 120a). Este esquema de monitorización se muestra en la Fig. 120b, siendo común en todas las vigas dúo ensayadas.

⁴⁹² Norma UNE EN 408:2012. Op. cit.

⁴⁹³ Ibidem.



a) Posicionamiento bandas extensométricas y extensómetro en cada viga. b) Detalle instrumentación.
 Fig. 120. Esquema de monitorización de una viga dúo.

Por tratarse ensayos de larga duración, las bandas extensométricas se pegan utilizando un adhesivo bicomponente tipo HBM X60 (metacrilato de metilo), y se protegen superficialmente con una laca de poliuretano tipo HBM PU140. El esquema de montaje empleado se basa en una configuración a cuarto de puente de Wheatstone con banda de compensación (DMS1 + K) de temperatura y humedad, mediante una banda extensométrica adicional adherida en un testigo de madera misma especie y partida, sin carga. Con la colocación de las bandas extensométricas en esta configuración, la distorsión en la medida originada por una variación dimensional de la pieza debido a las condiciones ambientales (Δ Temperatura, Δ Humedad, ...) queda compensada, al restarse (o sumarse) la variación dimensional medida por la banda de compensación. De este modo se obtienen medidas precisas y fiables a largo plazo, sin influencia de las condiciones ambientales. Todas las bandas extensométricas se conectaron a un sistema de adquisición de datos tipo HBM-CanHead-CB1010. Los equipos utilizados, el QuantumX-MX840B y el CanHead CB1010 se controlan sincrónicamente con el software Cadman, permitiendo utilizar distintos sensores y configuraciones de medida de forma precisa (Fig. 121).



a) Banda de compensación (fondo) sobre taco de chopo. b) Detalle instrumentación.
 Fig. 121. Instrumentación utilizada durante los ensayos.

Puesta en carga

La puesta en carga de las vigas se realiza en varias etapas o escalones de carga, con el fin de registrar el comportamiento progresivo de la estructura, permitir su estabilización, y comprobar el correcto reparto de cargas y deformación sobre cada una de las piezas. De acuerdo con las directrices marcadas por la UNE-EN 380:1998⁴⁹⁴ para ensayos a largo plazo (procedimiento 3), se ha elaborado un procedimiento de carga específico para este ensayo (Tabla 37), adecuando la entidad de las cargas y ajustando los tiempos de ensayo.

Tabla 37. Procedimiento de carga para el ensayo de fluencia.

Etapas (Ver Fig. 122)	Procedimiento de carga	Duración
0	Puesta a cero, $F_{\text{inicial}}=0$ kN	-
0-1	Aplicar G_2 (4 kN)	45 min
1-2	Mantener G_2 (4 kN)	15 min
2-3	Aplicar $G_2 + 0,5 Q_1$ (6 kN)	20 min
3-4	Suprimir $0,5 Q_1$ (4 kN)	20 min
4-5	Aplicar $G_2 + Q_1$ (8 kN)	45 min
5-6	Mantener $G_2 + Q_1$ (8 kN)	2h 30 min
6-7	Aumentar hasta F_{max} (10 kN)	20 min
7-10	Mantener F_{max} (10 kN)	3-6 meses
10-11	Descargar	120 min
11-12	Recuperación $F_{\text{Final}}=0$ kN	24 h

Donde,

G_1 = peso propio = 0,3 kN

G_2 = carga permanente = 4 kN

Q_1 = cargas variables = 4 kN

$F_{\text{máx, est}}$ = fuerza máxima estimada = 10 kN

El procedimiento de carga se detalla gráficamente en la Fig. 122, donde se representa el proceso de carga, ensayo a largo plazo o fluencia, descarga y periodo de recuperación.

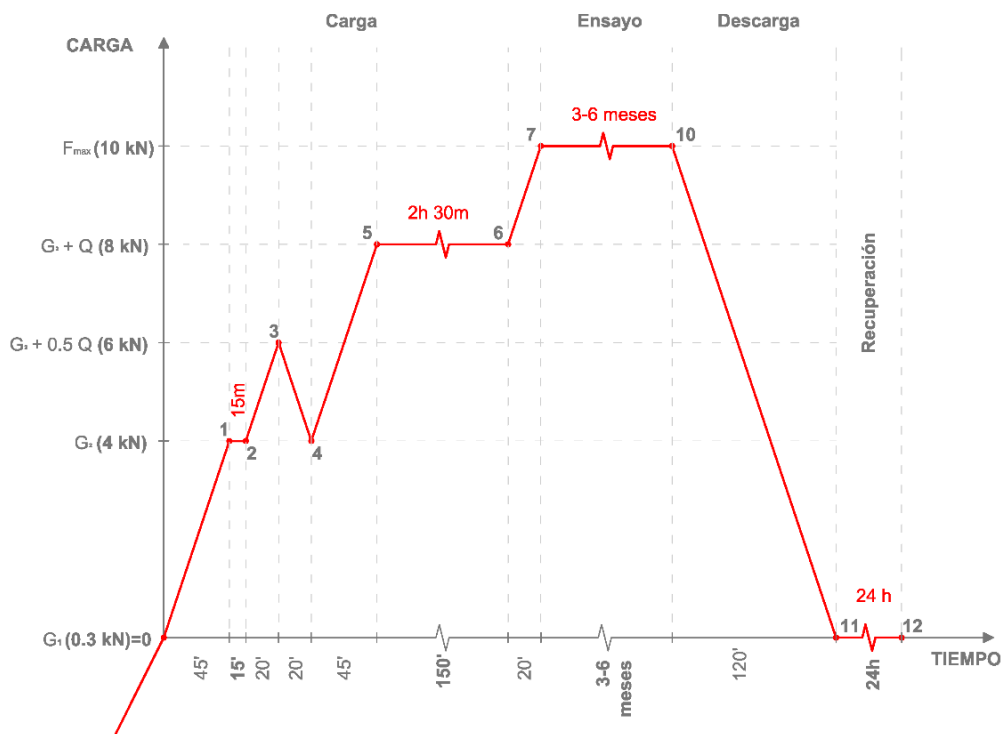


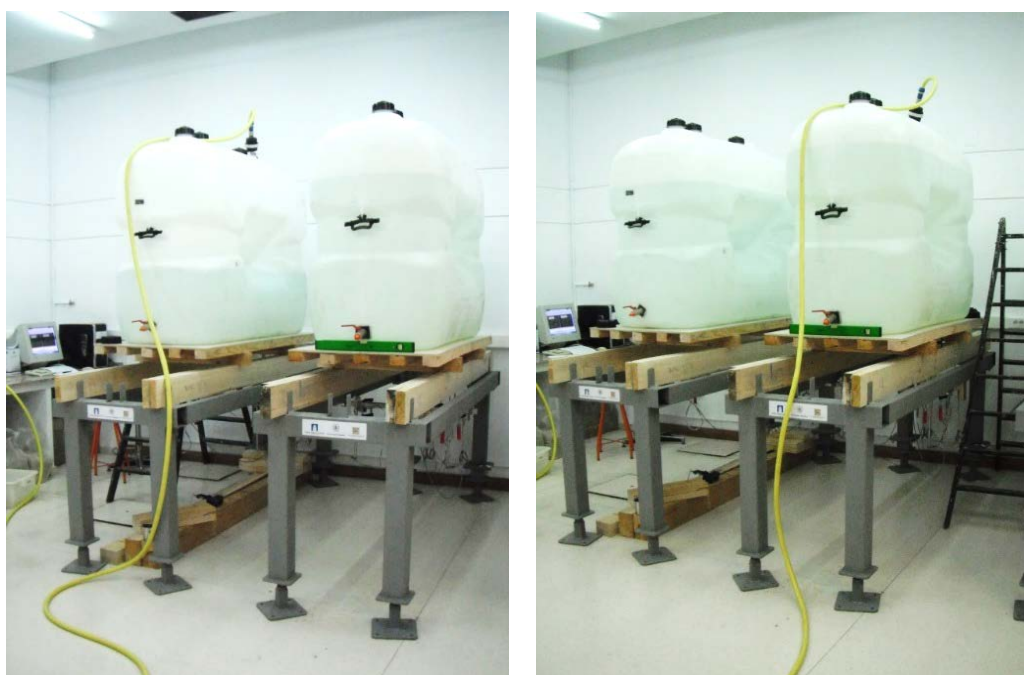
Fig. 122. Ciclo de carga/descarga del ensayo de fluencia de acuerdo a UNE-EN 380:1998⁴⁹⁵

⁴⁹⁴ Norma UNE EN 380:1998. Op. cit.

⁴⁹⁵ Ibidem

El proceso de carga se realiza en varios escalones, comenzado con la aplicación de la carga permanente (G_2) y aplicando, por fases, el resto de la carga (Q_1 ; F_{max}). Entre los escalones de carga se mantuvo un tiempo espera o estabilización, que permita una correcta deformación y asentamiento de las piezas, de modo que cada pieza pudiese alcanzar correctamente, y sin sobreesfuerzos, una adecuada posición de ensayo. Una vez descargadas por completo las vigas se continúa con la monitorización del ensayo durante 24 horas adicionales en una última fase de recuperación, con el fin de conocer la deformación permanente adquirida por las vigas tras el ensayo. Las vigas fueron monitorizadas sin interrupción durante toda la duración del ensayo (6 meses).

La aplicación de la carga se realiza mediante el llenado de los depósitos con agua, con una velocidad de llenado/vaciado de $0,15 \text{ dm}^3/\text{s}$. Para conocer con precisión la carga total aplicada, se utiliza un contador volumétrico de pistón rotativo Zenner modelo RNK-L-RP-N, midiéndose el volumen de agua introducido o vaciado del depósito en cada momento del ensayo (Fig. 123).



a) Llenado depósito A.

b) Llenado depósito B.

Fig. 123. Puesta en carga de las vigas dúo por escalones de carga.

4.2. Métodos estadísticos

Durante la realización de los ensayos se comprueban los datos, excluyendo únicamente los valores anómalos resultantes de una mala ejecución del ensayo, una instrumentación errónea o cualquier otra anomalía significativa detectada. Estos datos anómalos son recogidos en las tablas de datos, marcados como anómalos y excluidos del análisis estadístico. En campañas experimentales con ejemplares limitados, se ensayan probetas adicionales.

Para realizar los análisis estadísticos de los datos se utiliza el software específico "Statgraphics Centurion Version 18". Todos los datos son sometidos a un análisis estadístico previo, comprobando su normalidad para todas las poblaciones mediante las pruebas "Kolmogorov-Smirnov", "Shapiro-Wilk test" y "Q-Q normal probability plot", pudiendo asumirla en todos los casos. La condición de homocedasticidad de los datos para todas las poblaciones también fue analizada mediante las pruebas "Barlett's test" y "Levene's test". En todos ellos, si el P-valor de la muestra

4. MÉTODOS

es mayor o igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que los datos analizados forman una distribución normal con 95% de confianza.

Superado este análisis estadístico previo, los datos pueden tomarse como seguros para continuar trabajando estadísticamente sobre ellos, o analizar sus distribuciones, gráficas y tendencias.

5. ESTUDIO TEÓRICO Y NUMÉRICO

En este apartado se expone el modelo teórico utilizado para estimar la capacidad resistente y la rigidez de las vigas dúo, testigo y reforzadas ensayadas. El comportamiento de la madera depende en gran medida de las propiedades mecánicas propias de cada especie, pero, además, se ve influenciado por la presencia de singularidades, la zona del árbol de donde se ha sacado la pieza o las condiciones de crecimiento del mismo. Por ello, son varios los investigadores que han propuesto distintos modelos analíticos para aproximarse al comportamiento elastoplástico real de la madera.

Los objetivos de este apartado son:

- Definir el modelo analítico teórico utilizado para la estimación de las prestaciones de resistencia y rigidez de las vigas dúo propuestas.
- Posteriormente, y a partir de este modelo teórico, comparar el análisis teórico previo con los resultados obtenidos mediante ensayo en el laboratorio.

5.1. Modelo analítico

Durante años los investigadores han tratado de ajustar un modelo para predecir el comportamiento en flexión de los elementos de madera. En el análisis tradicional de las secciones de vigas de madera se ha supuesto una distribución de deformaciones lineal, donde se presume un comportamiento elástico de la madera, tanto a tracción como a compresión, desde estados tensionales iniciales hasta la rotura de la sección⁴⁹⁶. Sin embargo, el estudio de las roturas de piezas de madera sometidas a esfuerzos de flexión permite observar, en muchas de ellas, signos de plastificación en zonas comprimidas acompañado de la rotura final a tracción. Estos signos permiten comprender como el comportamiento real de la madera se rige por una distribución no lineal de tensiones (comportamiento elastoplástico) a partir de ciertos valores de deformación. La variación de la distribución de tensiones teórica en una viga de madera a flexión (sin considerar problemas de inestabilidad o efectos locales por singularidades de la madera) puede simplificarse, según diversos autores^{497,498,499}, en la sucesión de tres fases tensionales hasta rotura (Fig. 124).

⁴⁹⁶ Argüelles, R.; Arriaga, F.; Martínez, J. J (2000). *Estructuras de madera. Diseño y cálculo*. Asociación de Investigación Técnica de la Industria de la Madera y del Corcho (AITIM).

⁴⁹⁷ Cizmar, D.; Damjanovit, D.; Pavkovic, K.; Rajoit, V (2014). Ductility analysis of laminated timber beams of small section height. *Journal Gradevinar*, Vol. 55(5), pp. 395–406. [DOI: 10.14256/JCE.874.2013].

⁴⁹⁸ Argüelles et al. (2000) Op. cit.

⁴⁹⁹ Thelandersson et al. (2003) Op. cit.

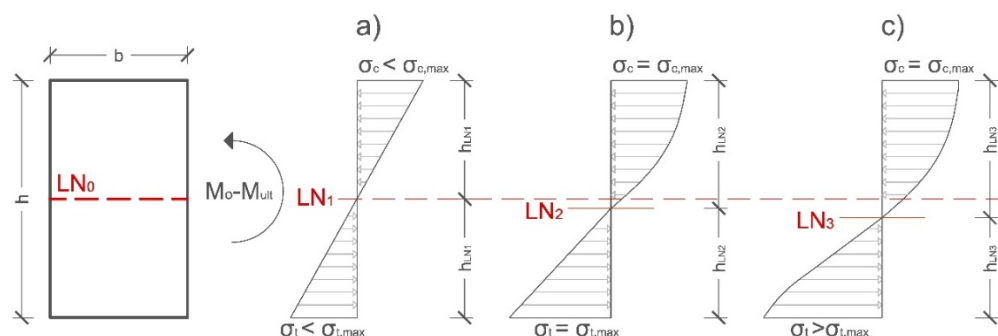


Fig. 124. Sucesión de fases tensionales de una pieza de madera sometida a flexión hasta su rotura. a) Fase elástica; b) Fase elasto-plástica con inicio de plastificación en compresión; c) Fase rotura con plastificación completa en compresión y fallo en tracción.

En un primer estado tensional de baja tensión el comportamiento de la sección es totalmente elástico, con un esquema bi-triangular de tensiones donde la línea neutra se sitúa en el centro de gravedad de la sección (Fig. 124.a). Al aumentar la tensión, las fibras comprimidas exteriores llegan a su máxima tensión, iniciándose un comportamiento elastoplástico no lineal en la zona de compresión, y produciéndose consecuentemente una desviación de la fibra neutra hacia la zona traccionada (Fig. 124b). Finalmente, la plastificación de la zona comprimida continúa, descendiendo aún más la fibra neutra, y aumentando la tensión sobre las fibras traccionadas hasta alcanzar la rotura final de la sección (Fig. 124.c).

A partir de ensayos con piezas de madera limpia, puede observarse (Fig. 125) como el comportamiento de la madera en tracción y en compresión difieren considerablemente⁵⁰⁰. Así mientras que a tracción la madera presenta una relación tensión-deformación puramente elástica para cualquier valor de deformación ($\epsilon_{t,0}$); a compresión a partir de una deformación concreta ($\epsilon_{c,0,e}$) se observa un comportamiento elastoplástico hasta alcanzar una deformación ($\epsilon_{c,0,u}$) a partir de la cual el comportamiento es puramente plástico. Los valores de deformación que delimitan este comportamiento en distintas fases en compresión varían de una especie de madera a otra e incluso entre madera de la misma especie y distintas procedencias.

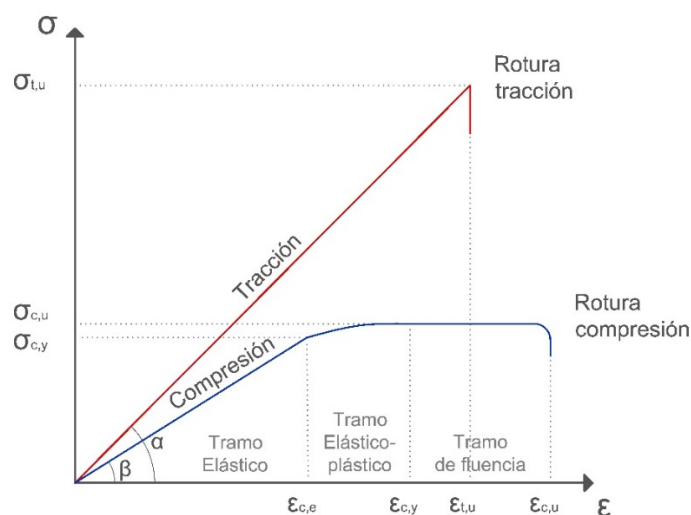


Fig. 125. Gráfica tensión-deformación (tipo) con valores de límite elástico y resistencia última para madera.^{501,502}

⁵⁰⁰ Perlas, J.; Fiori, L.; Castrillo, P.; Baño, V.; Zerpa, J. P. (2014). Comparación de métodos de cálculo de solicitaciones de madera libre de defectos. *XXXV Jornadas Sudamericanas de ingeniería estructural*. Montevideo (Uruguay).

⁵⁰¹ Ibidem.

⁵⁰² Baño, V.; Argüelles-Bustillo, R.; Regueira, R.; Guaita, M. (2012). Determinación de la curva tensión-deformación en madera de "Pinus sylvestris L." para la simulación numérica de vigas de madera libre de defectos. *Materiales de Construcción* Vol.62 (306), pag 269-284. [DOI: 10.3989/mc.2012.64110]

Analizando en detalle esta gráfica genérica tensión-deformación para madera, puede observarse como las pendientes de las curvas, y con ello los módulos de elasticidad, de tracción y de compresión para madera libre de defectos son distintas. Sin embargo, en la práctica y fruto de la influencia de las singularidades de la madera, se emplea un módulo de elasticidad aparente (E_m) común a tracción y compresión, calculado como una interacción entre los valores de los módulos de elasticidad a tracción y compresión obtenidos en la fase elástica. Además, en función de la especie de madera la relación entre los módulos de tracción y compresión puede variar con valores ($n=E_t/E_c$) comprendidos entre $n=1$ a $n=1,4$ ⁵⁰³. Esta relación entre módulos es importante, como determinará Buchanan (1984)⁵⁰⁴ en sus investigaciones, ya que definirá el comportamiento de la pieza y su tipo de rotura.

5.1.1. Modelos tensión-deformación madera

Partiendo del método elástico clásico de Coulomb (1773)⁵⁰⁵, será Neely (1898)⁵⁰⁶ el primero en proponer una distribución de tensiones no lineal para madera, con un gráfico tensión deformación que presenta un comportamiento bilineal elastoplástico definido por un bloque a compresión con plastificación parcial (Fig. 126).

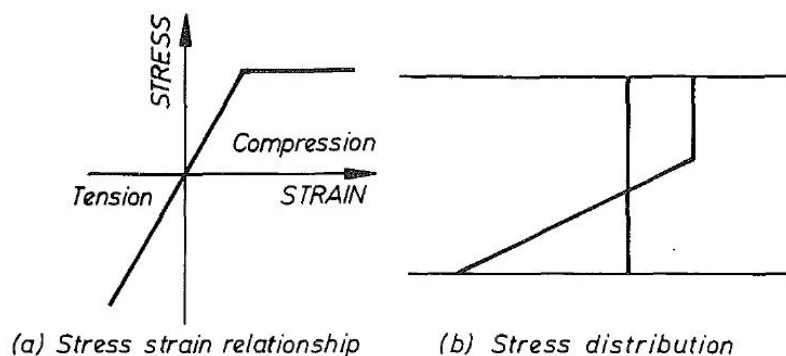


Fig. 126. Distribución estrés deformación propuesto por Neely (1898) (Fuente: Buchanan, A. H. (1984).⁵⁰⁷

Tomado de base este modelo, con un bloque elastoplástico a compresión y considerando un mismo módulo de elasticidad de la madera a tracción y compresión, son varios los investigadores que han propuesto modelos no lineales para madera. Moe (1961)⁵⁰⁸ en sus investigaciones propone un diagrama tensión deformación semejante al propuesto por Neely con un bloque de compresión rectangular, pero con salto en los valores a partir de cierto valor de tensión, generándose un diente o escalón en el bloque de compresión. Nwokoye (1975)⁵⁰⁹ propone un modelo semejante al de Neely (1898)⁵¹⁰ con algunas modificaciones y ajustes. Plantea el mismo modelo de tensión deformación trapezoidal, con un eje neutro que no pasa por el centro de la sección, sino que se desplaza ligeramente hacia la zona de tracción, y manteniendo la distribución triangular y lineal propuesta hasta la rotura. Por su parte, Zakic (1973)⁵¹¹ propone un diagrama de tensión deformación donde la zona de compresión toma forma parabólica. Al igual que los investigadores anteriores supone que la línea neutra no se localiza en el centro de la sección y

⁵⁰³ Ibidem.

⁵⁰⁴ Buchanan, A. H (1984). Strength model and design methods for bending and axial load interaction in timber members. The university of British Columbia (PhD Thesis).

⁵⁰⁵ Timoshenko, S (1953) *History of strength of materials*. Ed. McGraw-Hill, New York.

⁵⁰⁶ Buchanan, A. H (1984). Op. cit.

⁵⁰⁷ Ibidem.

⁵⁰⁸ Moe, J. (1961) *The mechanism of failure of wood in bending*. Publication International Association for Bridge and Structural Engineering 21, pp. 178.

⁵⁰⁹ Nwokoye, D. N. (1972) An Investigation into an Ultimate Beam Theory for Rectangular Timber Beams – Solid and laminated. Timber Research and Development Association (TRADA).

⁵¹⁰ Buchanan, A. H. (1984). Op. cit.

⁵¹¹ Zakic, B. D. (1973) Inelastic bending of wood beams. *Journal of the Structural Division (ASCE)*, 99(10), pp. 2079-2095.

afirma que la resistencia última a tracción ($f_{t,o,u}$) es mayor a la de compresión ($f_{c,o,u}$). Igualmente dibuja una distribución a tracción lineal hasta la rotura. Buchanan (1990)⁵¹², basándose en el modelo propuesto por Bazán (1980), propone que la relación entre la reducción de la resistencia a compresión ($f_{c,o,u}$), y el incremento de deformación, ($\epsilon_c - \epsilon_o$), está directamente relacionada el módulo de elasticidad a compresión.

Más recientemente, son varios los autores que han desarrollado modelos no lineales considerando diferentes módulos de elasticidad a compresión y tracción. Zaw et al. (2005)⁵¹³ proponen un modelo de tensión deformación donde la distribución de tensiones a compresión mantiene valores constantes hasta cierta profundidad de la sección a partir de la cual se definen mediante una curva de segundo orden (parábola). Argüelles et al. 2000)⁵¹⁴ proponen un modelo bitriangular con distintos módulos de elasticidad y una doble rama en el bloque de compresiones.

Todos estos modelos citados se comparan en la Fig. 127. Excepto el modelo de tensión elástica, todos los demás han sido desarrollados en base a la naturaleza no lineal de la madera en la compresión y a la mayor resistencia de la madera a tracción ($f_{t,o,u}$) que a compresión ($f_{c,o,u}$).

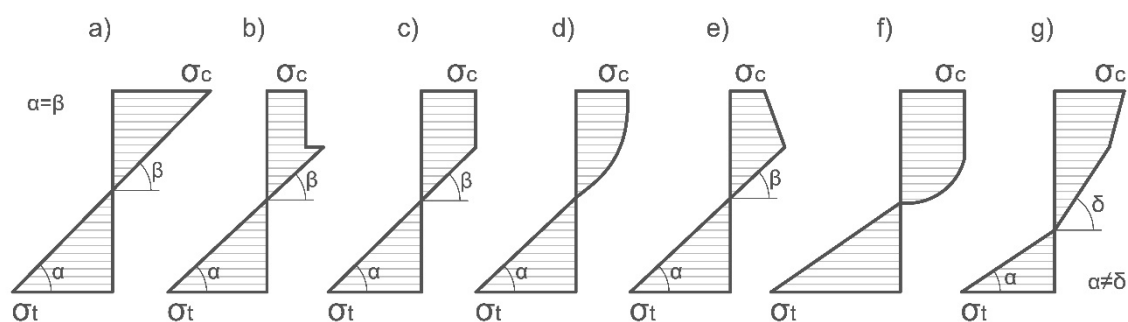


Fig. 127. Distintos modelos analíticos de tensiones para madera: a) Elástico; b) Moe (1961)⁵¹⁵; c) Nwokoye (1975)⁵¹⁶; d) Zakic (1973)⁵¹⁷; e) Bazán-Buchanan (1990)⁵¹⁸; f) Zaw (2005)⁵¹⁹; g) Argüelles (2000)⁵²⁰.

5.1.2. Modelos analíticos utilizados para el cálculo de la capacidad de carga

Para la estimación de la capacidad resistente de las vigas reforzadas ensayadas en esta tesis doctoral, se plantea el cálculo y comparación del momento último. El momento último que una sección de madera es capaz de resistir está relacionado con el tipo de fallo de la sección. El "Modo de fallo tipo 1", como un modo de fallo por rotura a compresión en el cual no se llegan a producir fenómenos de plastificación en la zona de compresiones, por lo que puede analizarse a partir de un modelo elástico clásico. El "Modo de fallo tipo 2", es un modo de fallo por rotura a tracción con la consiguiente plastificación previa en la zona comprimida, y un comportamiento elastoplástico de la sección. Este segundo modo de fallo es común en piezas a flexión reforzadas a tracción con proporciones significativas de refuerzos FRP, al incrementarse notablemente la resistencia a tracción de la pieza a la vez que se minimiza la influencia de las singularidades de la madera por la

⁵¹² Buchanan, A. H (1990) Bending strength of lumber. Journal of Structural Engineering (ASCE). 116(5): 1213-1229. [DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1990)116:5(1213)].

⁵¹³ Zaw, K. M.; Mohamed, Z.; Saleh, A. L.; Bakar, S. A. (2005). A modified stress model to predict the ultimate bending strength of solid timber beams using plastic approach. Jurnal Kejuruteraan Awam, Vol.17 (2), pp. 30-45. [DOI: 10.11113/mjce.v17.124].

⁵¹⁴ Argüelles et al. (2000) Op. cit.

⁵¹⁵ Moe (1961) Op. cit.

⁵¹⁶ Nwokoye (1972) Op. cit.

⁵¹⁷ Zakic (1973) Op. cit.

⁵¹⁸ Buchanan (1990) Op. cit.

⁵¹⁹ Zaw et al. (2005). Op. cit.

⁵²⁰ Argüelles et al. (2000) Op. cit.

homogeneización de la sección, lo que evita el fallo a tracción y produce la plastificación de la zona comprimida de la pieza. Para analizar este modo de fallo tipo 2 se utilizan los modelos Bazan-Buchanan, y Nwokoye (EC5) (bitriangular, elastoplástico y con módulos elásticos comunes a tracción y compresión).

A. Modelo elástico

Se trata del modelo de análisis de tensiones clásico, preciso en estados tensionales medios previos a la plastificación del bloque de compresiones, y suponiendo un modo de rotura a compresión (Fig. 128).

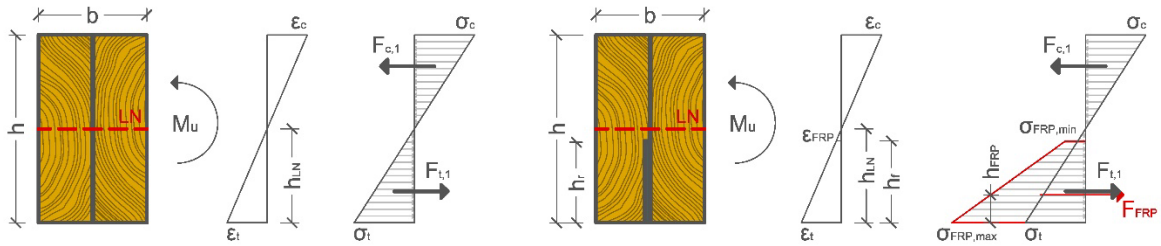


Fig. 128. Modelo elástico con una sección sin refuerzo (izq.) y reforzada (dcha.)

El momento último para el modo de fallo tipo 1 definido con el modelo de análisis elástico se muestra en la Ec.6 para la viga testigo, y en la Ec.7 para la viga reforzada.

$$M_{u, \text{testigo}} = F_{c,1} \cdot 2/3 (h-h_{LN}) + F_{t,1} \cdot 2/3 (h_{LN}) \tag{6}$$

$$M_{u, \text{FRP}} = F_{c,1} \cdot 2/3 (h-h_{LN}) + F_{t,1} \cdot 2/3 (h_{LN}) + F_{\text{FRP}} (h_{LN} - h_{\text{FRP}}) \tag{7}$$

Donde,

$$h_{\text{FRP}} = (\sigma_{\text{FRP,max}} \cdot 2 \cdot \sigma_{\text{FRP,min}} / \sigma_{\text{FRP,max}} \cdot \sigma_{\text{FRP,min}}) \cdot (h_f / 3) \tag{8}$$

B. Modelo Nwokoye (EC5)

Uno de los modelos utilizados extensamente para el cálculo de secciones de madera a flexión (Fig. 129) por simplificación es el modelo Nwokoye.

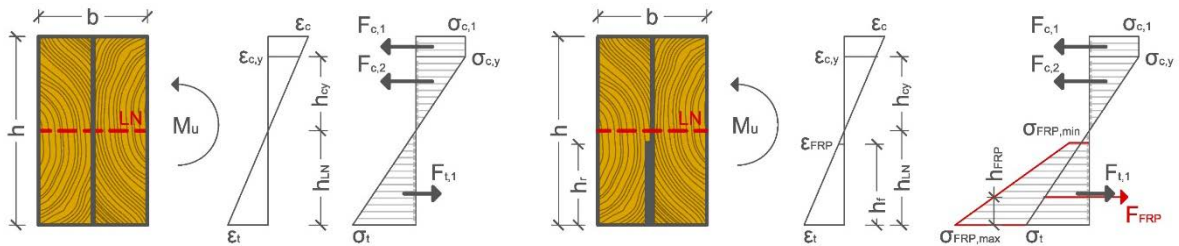


Fig. 129. Modelo Nwokoye (EC5) con una sección sin refuerzo (izq.) y reforzada (dcha.)

El momento último para el modo de fallo tipo 2 definido con el modelo de Nwokoye (EC5) se muestra en la Ec.9 para la viga testigo, y en la Ec.10 para la viga reforzada.

$$M_u = F_{c,1} \cdot \{ [h - (h_{cy} + h_{LN})] / 2 + h_{cy} \} + F_{c,2} \cdot 2/3 \cdot h_{cy} + F_{t,1} \cdot 2/3 (h_{LN}) \tag{9}$$

$$M_{u, \text{FRP}} = F_{c,1} \cdot \{ [h - (h_{cy} + h_{LN})] / 2 + h_{cy} \} + F_{c,2} \cdot 2/3 \cdot h_{cy} + F_{t,1} \cdot 2/3 (h_{LN}) + F_{\text{FRP}} \cdot (h_{LN} - h_{\text{FRP}}) \tag{10}$$

C. Modelo de Bazan-Buchanan

De los modelos analíticos de tensiones desarrollados para el cálculo de secciones de madera a flexión (Fig. 127), uno de los más utilizados es el modelo Bazan-Buchanan. En este modelo de análisis se considera un comportamiento elastoplástico de la madera, con una distribución de tensiones lineal a tracción y bilineal a compresión, con uno los módulos de elasticidad a tracción y compresión, simplificada, iguales (Fig. 130). La plastificación del bloque de compresión supone el descenso de la línea neutra de la sección y una rotura frágil a tracción.

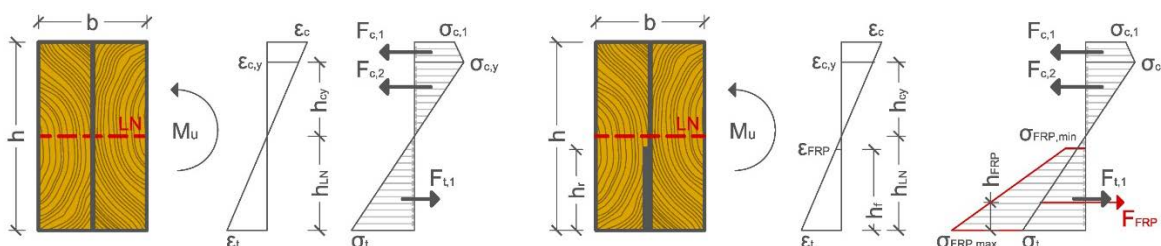


Fig. 130. Modelo Bazan-Buchanan con una sección sin refuerzo (izq.) y reforzada (dcha.)

El momento último para el modo de fallo tipo 2 definido con el modelo de Bazan-Buchanan se muestra en la Ec.11 para la viga testigo, y en la Ec.12 para la viga reforzada.

$$M_u = F_{c,1} \{ h_{cy} + [(h-h_{LN})-h_{cy}] \cdot (2 \sigma_{c,y} - \sigma_{c,1}) / 3 \cdot (\sigma_{c,y} - \sigma_{c,1}) \} + F_{c,2} \cdot 2/3 h_{cy} + F_{t,1} \cdot 2/3 (h_{LN}) \quad [11]$$

$$M_{u,FRP} = F_{c,1} \{ h_{cy} + [(h-h_{LN})-h_{cy}] \cdot (2 \sigma_{c,y} - \sigma_{c,1}) / 3 \cdot (\sigma_{c,y} - \sigma_{c,1}) \} + F_{c,2} \cdot 2/3 h_{cy} + F_{t,1} \cdot 2/3 (h_{LN}) + F_{FRP} (h_{LN} - h_{FRP}) \quad [12]$$

Donde,

$$h_{cy} = \epsilon_{c,y} h_{LN} / \epsilon_t \quad [13]$$

$$h_{FRP} = (\sigma_{FRP,max} \cdot 2 \cdot \sigma_{FRP,min} / \sigma_{FRP,max} \cdot \sigma_{FRP,min}) (h_t/3)$$

5.2. Modelos analíticos utilizados para el cálculo de deformaciones

Para el cálculo de las deformaciones, y otros aspectos relacionados con los estados límites de servicio, se asume un comportamiento elástico de las secciones analizadas. Utilizándose el método de la sección transformada o equivalente para obtener una sección de madera equivalente a la rigidez de la sección compuesta por madera + refuerzo FRP.

Para analizar una pieza sometida a flexión pura se admiten las siguientes hipótesis (*Hipótesis en la flexión*):

1. **Hipótesis de Navier.** El sólido en flexión se mantiene en elasticidad proporcional. Enunciando la *ley de Navier*. En una sección sometida a flexión pura, los módulos de tensiones que se ejercen sobre las distintas fibras son directamente proporcionales a sus distancias a la fibra neutra"
2. **Hipótesis de Bernoulli.** Las secciones planas antes de la deformación siguen siendo planas y normal al eje deformado después de la deformación.
3. **Ley de Hooke.** Las deformaciones son lo suficientemente pequeñas de modo que la acción de las fuerzas exteriores no se vea modificada por ellas.

En la sección recta existirán pues únicamente tensiones normales (Fig. 131) que se pueden obtener aplicando la *ley de Navier* (Ec.14).

$$\sigma = \frac{E}{\rho} \cdot y \quad [14]$$

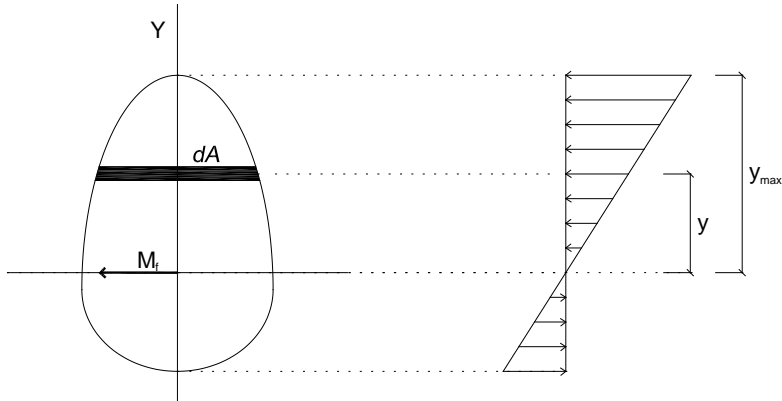


Fig. 131. Distribución de tensiones normales en la sección.⁵²¹

En lo anteriormente expuesto se considera que la sección se compone de un único material homogéneo. No obstante, en esta tesis doctoral se estudian secciones compuestas por varios materiales. En el estudio de este tipo de secciones compuestas se mantiene la hipótesis de Bernoulli; es decir, que las secciones que son planas antes de la deformación lo siguen siendo después de esta.

Considerando una viga formada por dos materiales de sección tipo (Fig. 132.a) sometida a un momento flector M, la sección experimentará una deformación en sentido longitudinal similar a la representada en la Fig. 132.b).

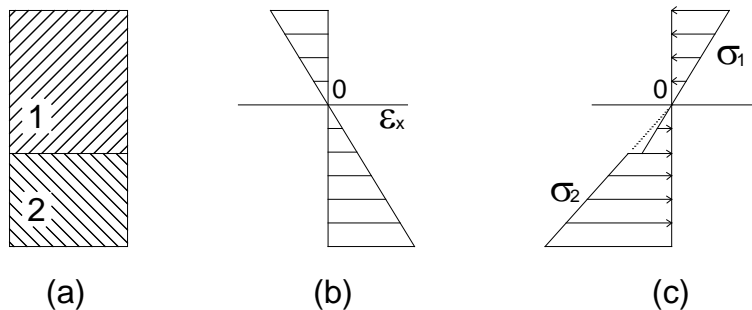


Fig. 132. Distribución de tensiones y deformaciones en la sección compuesta.

Las fibras, según su situación en la sección, se alargan o se acortan existiendo una fibra que no se deformará denominada *línea neutra*. Pero al contrario de lo que sucede en las vigas formadas por un solo material, dicha línea neutra no se situará en el baricentro de la sección.

Las leyes de tensiones normales en cada una de las partes se pueden obtener aplicando la fórmula de Navier (Ec.15)

$$\sigma_1 = \frac{E_1}{\rho} \cdot y \quad ; \quad \sigma_2 = \frac{E_2}{\rho} \cdot y \quad [15]$$

Siendo E_1 y E_2 los módulos de elasticidad de los distintos materiales de la sección; " ρ ", el radio de curvatura de la fibra neutra; e " y ", la distancia de la fibra que se trate a la fibra neutra.

La fuerza que se ejerce sobre una porción de área dA de cada uno de los materiales será:

⁵²¹ Timoshenko, S.P. *Resistencia de materiales*. Ed. Espasa-Calpe. Madrid, 1984.

$$dF_1 = \sigma_1 \cdot dA = \frac{E_1}{\rho} \cdot y \, dA \quad ; \quad dF_2 = \sigma_2 \cdot dA = \frac{E_2}{\rho} \cdot y \, dA \quad [16]$$

Y la relación entre los módulos de elasticidad de ambos materiales:

$$\frac{E_1}{E_2} = n \quad [17]$$

Por lo que las expresiones anteriormente definidas pueden tomar la siguiente forma:

$$dF_1 = \sigma_1 \cdot dA = \frac{n \cdot E_2}{\rho} \cdot y \, dA = \frac{E_2}{\rho} \cdot y \, d(n \cdot A) \quad [18]$$

Deduciendo que la misma fuerza dF_1 se podría aplicar sobre una porción de área $n \cdot dA$ del segundo material, lo que significa que la resistencia a flexión de la sección compuesta sería la misma que la formada por uno de los dos materiales que la integran, pero multiplicando el ancho de la misma por el factor de relación "n", obteniendo de esta forma la denominada *sección transformada o equivalente*.

Una vez deducida la sección transformada, la situación del eje neutro se obtiene de forma inmediata mediante la condición de ser nulo el esfuerzo normal que actúa sobre la sección transversal, por tanto:

$$\int_1 \sigma_1 \cdot dA_1 + \int_2 \sigma_2 \cdot dA_2 = 0 \quad [19]$$

Donde la primera integral debe evaluarse sobre la sección transversal del material 1 y la segunda integral sobre la sección del material 2.

Reemplazando σ_1 y σ_2 en la Ec 19 por la siguiente expresión (Ec.20):

$$\sigma = -E \cdot ky \quad [20]$$

Se obtiene:

$$-\int_1 E_1 \cdot k \cdot y \cdot dA_1 - \int_2 E_2 \cdot k \cdot y \, dA_2 = 0 \quad [21]$$

Como la curvatura (k) es una constante en cualquier sección transversal, no entra en las integrales y puede cancelarse de la ecuación, con lo que también puede expresarse:

$$E_1 \int_1 y \cdot dA_1 + E_2 \int_2 \sigma_2 \cdot dA_2 = E_2 \left[\int_1 y \cdot d(n \cdot A_1) + \int_2 y \cdot dA_2 \right] = 0 \quad [22]$$

Definido el desarrollo teórico de la sección transformada puede aplicarse a los casos concretos de las secciones compuestas, tipo viga dúo, utilizados en esta tesis doctoral.

5.2.1. Aplicación a la sección transformada

A. Obtención del incremento de inercia

Las condiciones anteriormente expuestas ya fueron utilizadas por Parvez et al. (2009)⁵²² para analizar las propiedades mecánicas de una sección compuesta de madera reforzada con otros materiales, método puede resultar de aplicación sobre la sección de viga dúo reforzada con fibras, suponiendo dicha sección como el resultado de la adición en la línea de encolado de un refuerzo FRP firmemente adherido entre las dos escuadrías de madera.

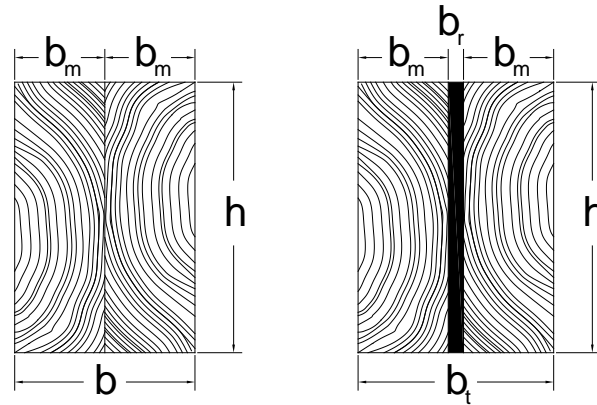


Fig. 133. Sección 'Dúo' homogénea y con refuerzo de fibra.

Para el desarrollo de la comparación entre las vigas dúo, testigo y reforzadas con FRP ensayadas (Fig. 133), se consideran las dimensiones de las secciones como el resultado de la unión de dos elementos iguales de dimensiones ' $b_m \times h$ ', de modo que el ancho resultante de la sección homogénea será $b = 2 b_m$. En el caso de la sección reforzada con fibras se denomina ' b_r ' al espesor del laminado de refuerzo incluido en la línea de encolado entre las escuadrías de madera, resultando un ancho total $b_t = 2 b_m + b_r$.

Igualmente, se designa a los módulos de elasticidad de los materiales que componen la sección como E_m para la madera, y E_r para la matriz de resinas y fibra que componen el refuerzo, y cuya relación se define en la siguiente ecuación (Ec.23).

$$\frac{E_r}{E_m} = n \quad [23]$$

Aplicada esta relación entre los módulos de elasticidad sobre la sección reforzada, se obtiene la sección transformada o equivalente (Fig. 134), compuesta exclusivamente de madera, de dimensiones $b_t \times h$, siendo $b_t = 2 b_m + b_{eq} = 2 b_m + b_r \times n$.

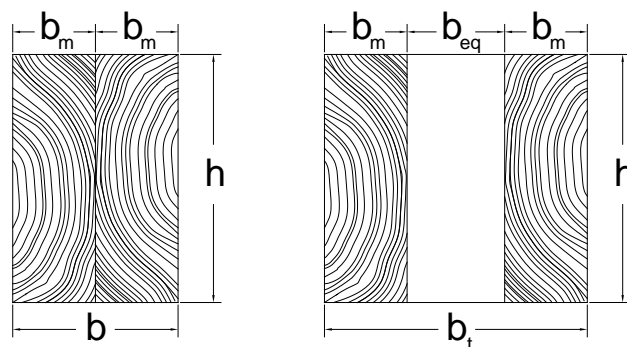


Fig. 134. Sección 'Dúo' homogénea y sección reforzada equivalente.

De modo que se pueden comparar dos secciones formadas por el mismo material (E_m), y que únicamente difieren en el ancho de estas, ya que disponen de igual canto (h), lo que significa que la rigidez frente a la deformación estará definida por el momento de inercia de las mismas respecto de su eje neutro.

⁵²² Parvez et al. (2009) Op. cit.

El momento de inercia I_d de la sección dúo sin refuerzo se define como (Ec.24):

$$I_d = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{2b_m \cdot h^3}{12} = \frac{b_m \cdot h^3}{6} \quad [24]$$

El momento de Inercia I_r de la sección reforzada equivalente se define como (Ec.25):

$$I_r = \frac{(2b_m + b_{eq}) \cdot h^3}{12} = \frac{(2b_m + n \cdot b_r) \cdot h^3}{12} \quad [25]$$

Y la relación entre ambos definirá el incremento de rigidez de la sección reforzada respecto de la sección dúo sin refuerzo, como (Ec.26):

$$\frac{I_r}{I_d} = 1 + \frac{(n \cdot b_r)}{2b_m} = 1 + \Delta I \quad [26]$$

Que expresado en función de las dimensiones y constantes elásticas propias de los materiales que componen la sección reforzada toma la siguiente forma (Ec.27):

$$\Delta I = \frac{E_r \cdot b_r}{2 \cdot E_m \cdot b_m} \quad [27]$$

B. Obtención de la situación del eje neutro en la sección

En la hipótesis desarrollada anteriormente, la altura del refuerzo compuesto por la matriz de fibra y resina es exactamente la misma que el canto de la sección de madera, presumiendo que la deformación de la sección reforzada será simétrica, situando al eje neutro coincidente con el baricentro de la sección, admitiendo en definitiva, que la fibra se comportará de forma análoga ante las tensiones de tracción y de compresión, lo que por sus características mecánicas y geométricas no parece muy probable.

Se supone que los refuerzos FRP utilizados apenas tiene capacidad resistente a compresión, en comparación con sus altas prestaciones a tracción, por lo que los refuerzo utilizados se sitúan únicamente en la zona traccionada de la viga, en una posición semejante a la que se muestra en la Fig. 135.

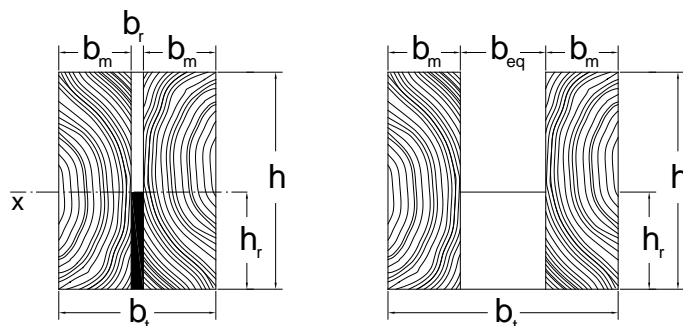


Fig. 135. Sección 'Dúo' reforzada con fibras en la sección traccionada y sección equivalente.

La situación de la línea neutra, por contener el centro de gravedad de la sección transformada, se puede determinar imponiendo la condición de ser nulo el momento estático de la sección respecto del eje x (Ec. 28).

$$\int_{-h_r}^0 (2b_m + nb_r) y dy + \int_0^{h-h_r} 2b_m y dy = 0 \quad [28]$$

Obteniéndose la ecuación de segundo grado (Ec.29) siguiente:

$$\frac{1}{2} n b_r h_r^2 + 2b_m h h_r - b_m h^2 = 0 \quad [29]$$

Cuya raíz válida determina la distancia del eje neutro a la fibra inferior de la sección de la viga compuesta (Ec.30):

$$h_r = \frac{2b_m h}{n b_r} \left(\sqrt{1 + \frac{n b_r}{2b_m} - 1} \right) \quad [30]$$

C. Obtención de la deformación elástica de las vigas ensayadas

Desarrollado el comportamiento teórico de las vigas dúo reforzadas mediante la sección transformada, puede analizarse el comportamiento esperado bajo las condiciones de carga realizada en los ensayos, obteniendo sus diagramas de cortantes, momentos y finalmente las flechas teóricas.

En lo que respecta a las condiciones de carga, se emplea la configuración propuesta por la norma UNE-408:2012⁵²³, donde la aplicación de la carga se realiza en dos puntos ubicados a 1/3 de la luz de la viga medida desde los apoyos (Fig. 136):

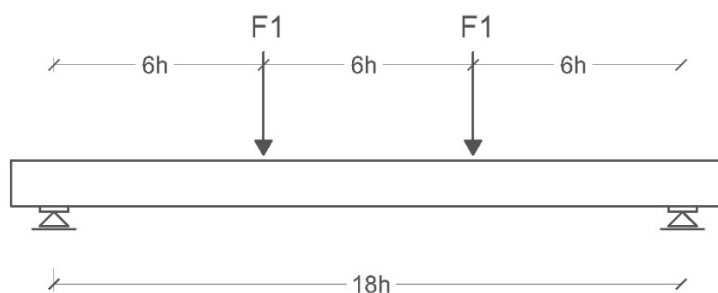
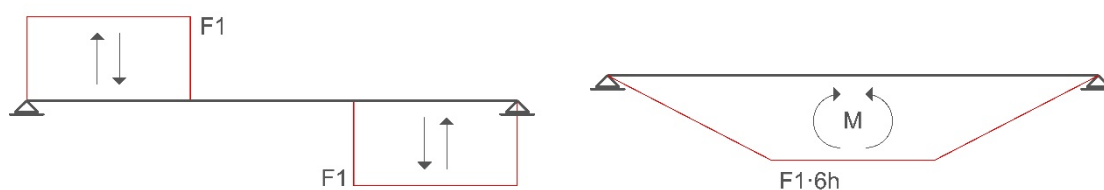


Fig. 136. Condiciones de carga propuestas por la UNE-408:2012.⁵²⁴

Con estas condiciones de cargas los diagramas de cortantes y momentos se muestran en la Fig. 137:



a) Diagrama de cortantes.

b) Diagrama de momentos.

Fig. 137. Diagramas de cortantes y momentos.

Una vez obtenidos los diagramas, y de acuerdo a los principios básicos de la Resistencia de Materiales⁵²⁵, se puede deducir la expresión que define el valor de la flecha elástica de las vigas (Ec. 31).

⁵²³ Norma UNE 408:2012. Op. cit.

⁵²⁴ Ibidem.

⁵²⁵ Timoshenko, S (1984) Op. cit.

$$\delta_x = \frac{F_1 \cdot (6h)}{24 \cdot E_m I_r} \cdot [3 \cdot (18h)^2 - 4 \cdot (6h)^2] \quad [31]$$

Donde h = canto de la viga ensayada.

Esta expresión puede simplificarse como (Ec.32):

$$\delta_x = 207 h^3 \frac{F_1}{E_m I_r} \quad [32]$$

Flecha calculada para $x = 9h$ (centro del vano).

6. RESULTADOS

6.1. Caracterización de la madera

En este capítulo se exponen los resultados de una serie de ensayos (compresión, cortante y tracción) sobre distintos tipos de probetas de madera de chopo y madera de pino pinaster, extraídas de los lotes utilizados con el objetivo de definir las propiedades de la madera utilizada en el desarrollo experimental de esta investigación.

6.1.1. Propiedades a compresión

A partir de ensayos a compresión con probetas limpias de pequeñas dimensiones (20x20x60 mm) realizadas de acuerdo con la norma UNE 56535:1977⁵²⁶, con distintos cortes respecto a la dirección principal de la fibra, y empleando la técnica de medición de deformaciones con bandas extensométricas se obtienen las constantes elásticas y módulos de elasticidad de las maderas estudiadas para las distintas direcciones (longitudinal, radial y tangencial).

Definidas las propiedades elastomecánicas de la madera puede simularse el comportamiento mecánico de la misma mediante programas de elementos finitos. Los resultados obtenidos para las distintas probetas ensayadas se muestran a continuación.

A. Ensayos a compresión en madera de chopo

En la Tabla 38 se exponen los valores medios de fuerza, tensión y deformación, recogidos en las probetas ensayadas hasta rotura, y en el Anexo se recogen los datos completos.

Tabla 38. Valores medios de los ensayos a compresión en probetas de chopo.

Probeta		Área (mm ²)	Fuerza (kN)	Tensión (MPa)	LVDT (mm)	SG 1 ($\mu\text{m}/\text{m}$)	SG 2 ($\mu\text{m}/\text{m}$)	SG 3 ($\mu\text{m}/\text{m}$)
Tipo 1 (compresión axial 0°)	Media	432,60	16,53	38,29	1,68	2008,37	642,49	2504,26
	SD	46,10	2,64	5,37	0,39	618,58	325,46	1985,76
	COV (%)	9,54	14,27	12,55	21,02	27,55	45,31	70,92
Tipo 2 (compresión 90°, radial)	Media	444,10	1,84	4,15	3,51	6725,09	85,69	4785,10
	SD	11,90	0,17	0,40	0,88	3060,42	53,49	1574,56
	COV (%)	2,41	8,04	8,59	22,38	39,41	54,06	28,50
Tipo 3 (compresión 90°, tangencial)	Media	435,60	1,70	3,92	2,19	4910,81	48,74	3308,41
	SD	28,20	0,19	0,58	0,32	1553,81	30,94	1070,92
	COV (%)	5,78	9,89	13,21	12,90	27,40	54,97	28,03
Tipo 4 (compresión 45°, longitudinal)	Media	430,60	3,92	9,11	3,78	4066,36	935,80	4056,92
	SD	20,00	0,70	1,58	1,19	1368,44	529,18	1170,18
	COV (%)	4,16	16,01	15,55	28,14	29,14	48,97	24,98
Tipo 5 (compresión 45°, radial)	Media	427,80	3,16	6,06	3,43	3385,19	1185,05	2456,65
	SD	30,90	0,38	3,51	1,25	2150,18	733,35	1259,87
	COV (%)	6,47	10,52	51,76	31,57	55,01	53,59	44,41
Tipo 6 (compresión 45°, tangencial)	Media	419,50	1,80	4,27	4,50	4161,30	3182,34	142,92
	SD	23,90	0,32	0,55	4,68	1621,96	1440,36	23,68
	COV (%)	5,10	15,86	11,57	93,10	33,76	39,20	14,35

⁵²⁶ Norma UNE 56535:1977. Op. cit.

El comportamiento de los distintos tipos de probetas se representa en el gráfico fuerza-deformación de la Fig. 138. Puede observarse la gran diferencia de resistencia y rigidez entre las probetas axiales y el resto de los cortes (90°-45°), pudiéndose simplificar el comportamiento de la madera como un material aparentemente ortótropo en cuestiones de resistencia.

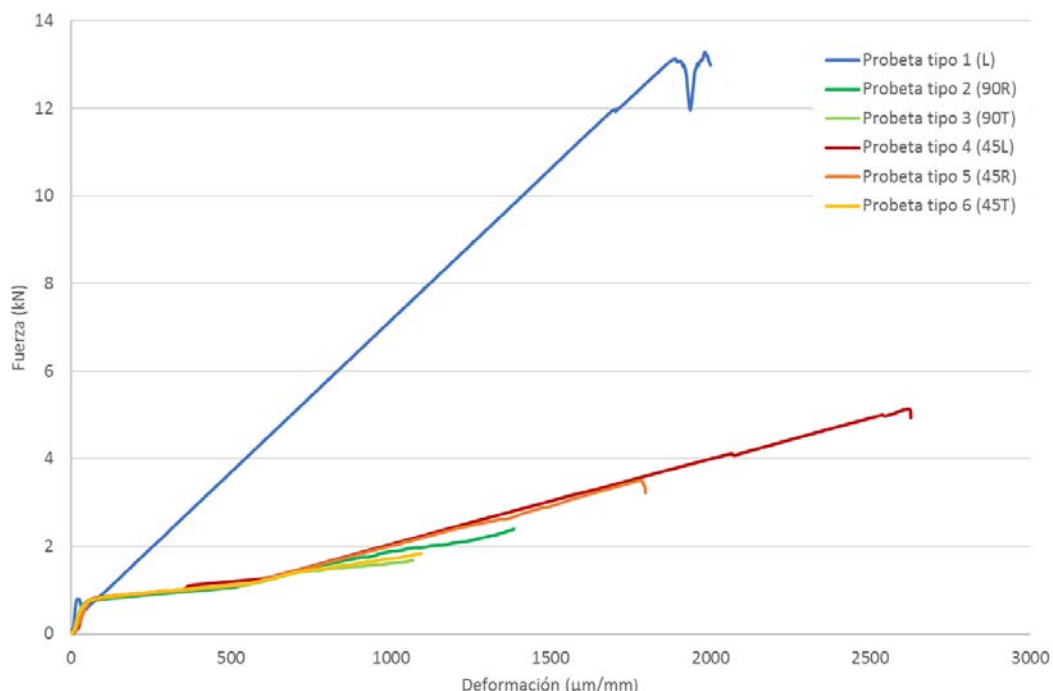


Fig. 138. Gráfico fuerza-deformación de los distintos tipos de probeta de chopo a compresión.

B. Ensayos a compresión en madera de pino pinaster

En la Tabla 39 se exponen los valores medios de fuerza, tensión y deformación, recogidos en las probetas ensayadas hasta rotura.

Tabla 39. Valores medios de los ensayos a compresión en probetas de pino pinaster.

Probeta		Área (mm ²)	Fuerza (kN)	Tensión (MPa)	LVDT (mm)	SG 1 (µm/m)	SG 2 (µm/m)	SG 3 (µm/m)
Tipo 1 (compresión axila 0°)	Media	422,90	18,43	42,50	1,28	2791,98	1063,65	1598,47
	SD	27,75	3,48	5,43	0,33	1066,88	266,94	938,66
	COV (%)	5,87	15,42	10,43	20,88	31,20	20,49	47,95
Tipo 2 (compresión 90°, radial)	Media	419,50	3,70	9,07	1,80	6026,09	1020,60	6275,42
	SD	22,77	0,79	1,12	0,17	4952,24	1251,12	7005,67
	COV (%)	4,86	15,15	8,71	6,57	58,11	86,68	78,94
Tipo 3 (compresión 90°, tangencial)	Media	423,70	3,50	8,18	1,99	6578,35	910,43	4039,88
	SD	8,15	0,70	1,68	0,61	3499,45	949,03	870,09
	COV (%)	1,72	14,13	14,55	21,73	37,62	73,71	15,23
Tipo 4 (compresión 45°, longitudinal)	Media	425,07	4,30	10,29	6,75	3461,12	553,36	3104,84
	SD	18,82	0,14	0,37	4,83	369,59	241,53	1365,23
	COV (%)	3,96	2,67	2,90	58,45	7,55	30,86	31,09
Tipo 5 (compresión 45°, radial)	Media	421,10	6,22	14,29	5,02	1969,43	340,45	1376,41
	SD	24,57	-	-	-	-	-	-
	COV (%)	5,22	-	-	-	-	-	-
Tipo 6 (compresión 45°, tangencial)	Media	422,50	3,46	5,28	6,82	3125,81	1436,61	224,57
	SD	4,74	0,22	4,79	4,84	393,09	1237,83	51,78
	COV (%)	1,00	4,40	70,96	50,23	8,89	60,93	16,30

El comportamiento de los distintos tipos de probetas se representa en el gráfico fuerza-deformación de la Fig. 139. Puede observarse, al igual que sucedía con la madera de chopo, la gran diferencia de resistencia y rigidez entre las probetas axiales y el resto de los cortes (90°-45°), pudiéndose

simplificar el comportamiento de la madera como un material aparentemente ortótropo en cuestiones de resistencia.

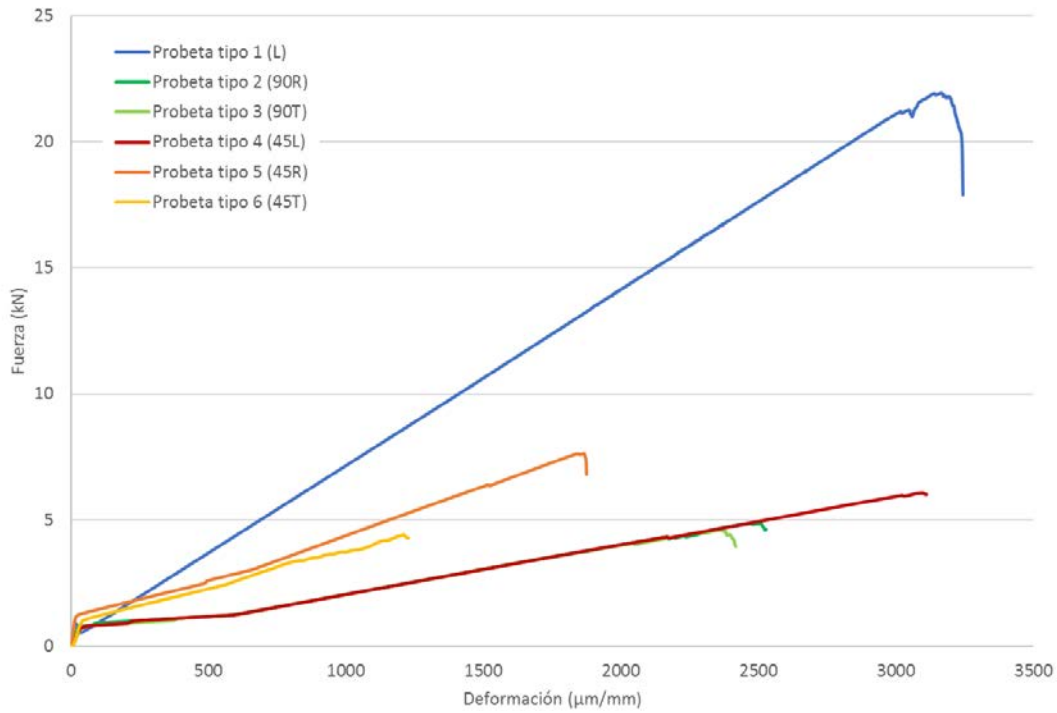


Fig. 139. Gráfico fuerza-deformación de los distintos tipos de probeta de pinaster a compresión.

C. Obtención de las propiedades elastomecánicas

Los valores de fuerza y deformación registrados para cada tipo de probeta permiten obtener las constantes elásticas a partir de las siguientes ecuaciones:

Compresión paralela a la fibra

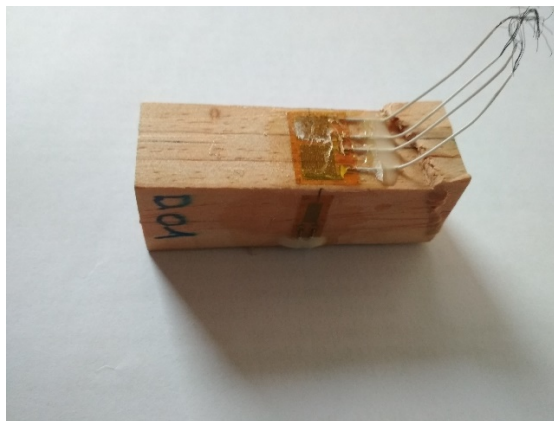
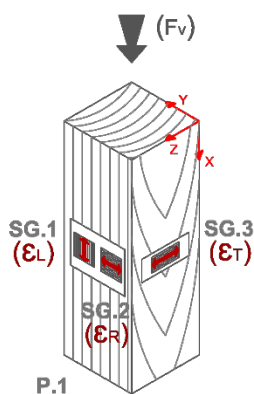
A partir de los resultados de la probeta tipo 1 se obtienen, empleando las siguientes ecuaciones, el módulo de elasticidad longitudinal (E_L) y los poissones ν_{LT} y ν_{LR} .

$$E_L = \frac{\sigma_L}{\varepsilon_L} \quad [33]$$

$$\nu_{LT} = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} \quad [34]$$

$$\nu_{LR} = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_L} \quad [35]$$

Los valores de deformación utilizados se definen en la Fig. 140:



a) Nomenclatura empleada en la probeta tipo 1.

b) Rotura de una probeta tipo 1.

Fig. 140. Probeta tipo 1 (compresión axial 0°).

Compresión perpendicular a la fibra

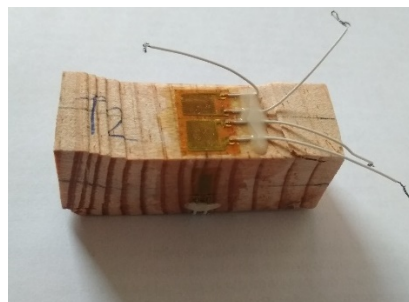
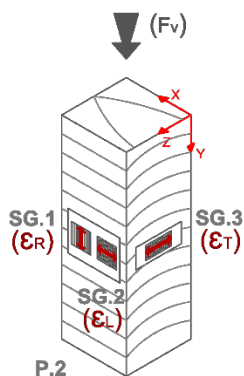
A partir de los resultados de la probeta tipo 2 se obtienen, empleando las siguientes ecuaciones, el módulo de elasticidad longitudinal (E_R) y los *poissones* ν_{RT} y ν_{RL} .

$$E_R = \frac{\sigma_R}{\epsilon_R} \quad [36]$$

$$\nu_{RT} = \frac{\epsilon_T}{\epsilon_R} \quad [37]$$

$$\nu_{RL} = \frac{\epsilon_L}{\epsilon_R} \quad [38]$$

Los valores de deformación utilizados se definen en la Fig. 141.



a) Nomenclatura empleada en la probeta tipo 2.

b) Rotura de una probeta tipo 2.

Fig. 141. Probeta tipo 2 (compresión 90°, radial).

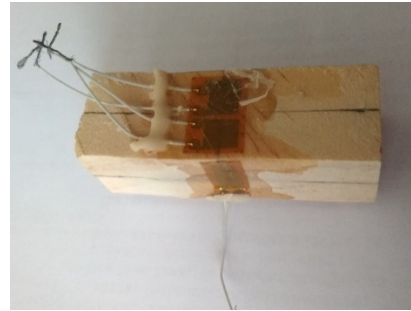
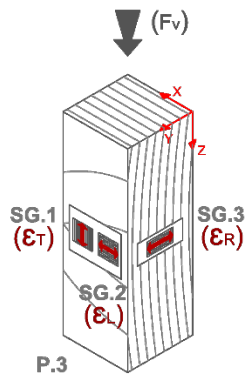
A partir de los resultados de la probeta tipo 3 se obtienen, empleando las siguientes ecuaciones, el módulo de elasticidad longitudinal (E_T) y los *poissones* ν_{TR} y ν_{TL} .

$$E_T = \frac{\sigma_T}{\epsilon_T} \quad [39]$$

$$\nu_{TR} = \frac{\epsilon_R}{\epsilon_T} \quad [40]$$

$$\nu_{TL} = \frac{\epsilon_L}{\epsilon_T} \quad [41]$$

Los valores de deformación utilizados se definen en la Fig. 142:



a) Nomenclatura empleada en la probeta tipo 3.

b) Rotura de una probeta tipo 3.

Fig. 142. Probeta tipo 3 (compresión 90°, radial).

Compresión a 45°

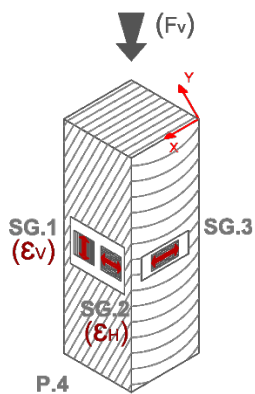
A partir de los resultados de la probeta tipo 4 a 6 se obtienen, empleando las siguientes ecuaciones, los módulos de elasticidad a cortante.

$$G_{LR} = \frac{\tau_{LR}}{\gamma_{LR}} = \frac{\sigma V}{2 \cdot (\epsilon_H - \epsilon_V)} \quad [42]$$

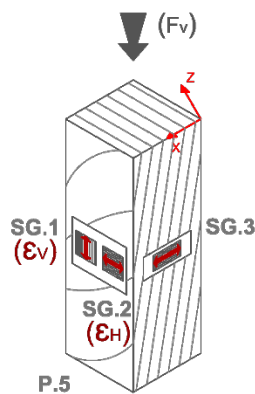
$$G_{LT} = \frac{\tau_{LT}}{\gamma_{LT}} = \frac{\sigma V}{2 \cdot (\epsilon_H - \epsilon_V)} \quad [43]$$

$$G_{RT} = \frac{\tau_{RT}}{\gamma_{RT}} = \frac{\sigma V}{2 \cdot (\epsilon_H - \epsilon_V)} \quad [44]$$

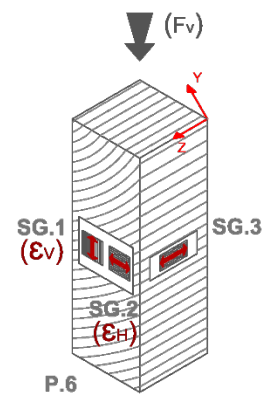
Los valores de deformación utilizados se definen en la Fig. 143.



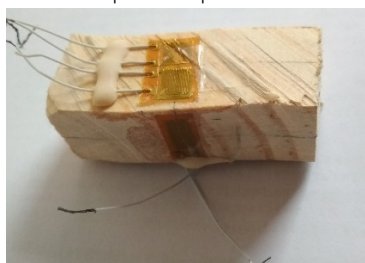
a) Nomenclatura empleada en la probeta tipo 4.



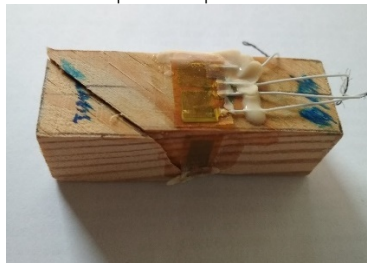
b) Nomenclatura empleada en la probeta tipo 5.



c) Nomenclatura empleada en la probeta tipo 6.



d) Rotura de una probeta tipo 4.



e) Rotura de una probeta tipo 5.



f) Rotura de una probeta tipo 6.

Fig. 143. Probeta tipo 4 (comp. 45°, long.); tipo 5 (comp. 45°, rad.); y tipo 6 (comp. 45°, tang.)

Constantes elásticas

A partir de los valores de fuerza registrados en el tramo elástico de los ensayos a compresión, con diferentes ángulos de corte respecto a la dirección principal de la fibra y los valores de deformación registrados por las bandas extensométrica, es posible obtener las constantes

elásticas de la madera ^{527, 528}. Los distintos módulos de elasticidad y poissons para cada una de las direcciones de la madera se obtienen a partir de las ecuaciones (Ec.33 a Ec.44) expuestas anteriormente. Los poissons son denominados con ν_{LR} , ν_{LT} , ν_{RT} , ν_{TR} , ν_{RL} , ν_{TL} , donde la primera letra indica la dirección de aplicación de la carga, y la segunda letra la dirección de deformación lateral. Las constantes elásticas, módulos de elasticidad y poissons, obtenidas a partir de los ensayos a compresión realizados se detallan en la Tabla 40, para la madera de chopo, y en la Tabla 41, para la madera de pino pinaster. Estos valores medios serán los utilizados en posteriores análisis.

Tabla 40. Valores medios de las constantes elásticas de la madera de chopo obtenidas a partir de los ensayos realizados.

Chopo (<i>Populus euroamericana</i> L-214)												
Especie	E _L	E _R	E _T	G _{LR}	G _{LT}	G _{RT}	ν_{LR}	ν_{LT}	ν_{RT}	ν_{TR}	ν_{RI}	ν_{TL}
Media	18849,1	1305,9	1079,1	1198,1	1750,9	1613,8	0,288	0,536	0,687	0,576	0,016	0,009
Min.	14204,6	779,6	290,9	740,5	597,2	533,2	0,103	0,292	0,423	0,373	0,009	0,002
Max.	27597,1	2136,3	3322,8	2653,6	2785,1	2677,7	0,513	0,709	0,925	0,801	0,024	0,017
SD	4570,0	422,8	667,5	615,4	959,9	971,2	0,121	0,137	0,166	0,133	0,005	0,005
COV(%)	23,00	31,35	59,89	48,73	49,03	55,71	40,19	23,95	23,19	22,35	31,10	53,38

Tabla 41. Valores medios de las constantes elásticas de la madera de pino obtenidas a partir de los ensayos realizados.

Pino pinaster (<i>Pinus pinaster</i> Ait.)												
Especie	E _L	E _R	E _T	G _{LR}	G _{LT}	G _{RT}	ν_{LR}	ν_{LT}	ν_{RT}	ν_{TR}	ν_{RI}	ν_{TL}
Media	18254,0	1884,5	1492,6	2195,2	7521,8	2267,5	0,336	0,515	0,524	0,557	0,128	0,089
Min.	9350,2	868,5	1034,5	1599,3	4385,6	1739,8	0,183	0,109	-	0,421	0,015	0,058
Max.	26286,7	3904,0	1702,3	3886,0	10619,7	3604,5	0,520	0,955	-	0,834	0,200	0,175
SD	5766,0	1371,6	309,3	843,3	3117,2	894,4	0,098	0,312	-	0,189	0,086	0,057
COV(%)	28,84	63,03	17,95	35,07	33,84	34,16	27,27	56,71	-	29,42	60,48	55,97

D. Definición del modelo elástico del material

Pese a ser la madera un material anisótropo, su comportamiento mecánico se aproxima, como puede observarse en las Fig. 138 y Fig. 139, a un material ortótropo con unas propiedades superiores en la dirección de la fibra (0°) y otras propiedades en el resto de direcciones, que si bien no son idénticas, son muy semejantes. Partiendo de esta simplificación, se puede desarrollar un modelo elástico, como material ortótropo⁵²⁹, que permite relacionar las distintas constantes elásticas entre sí a partir de una matriz de conformidad, tanto a nivel celular de la madera⁵³⁰, como a nivel global⁵³¹.

A partir de la ley de Hooke, puede relacionarse tensión y deformación elásticas como:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} * \epsilon_{kl} \quad [45]$$

Donde,

σ_{ij} = tensiones

C_{ijkl} = Constantes elásticas del material

ϵ_{kl} = deformaciones

Donde si $C_{ijkl} \neq 0$, puede expresarse como,

$$\epsilon_{kl} = S_{ijkl} * \sigma_{ij} \quad [46]$$

Donde,

σ_{ij} = tensiones

S_{ijkl} = Constantes elásticas del material

ϵ_{kl} = deformaciones

⁵²⁷ Goncalves, R.; Trinca, A.; Pellegrino, D. (2010) Comparison of elastic constants of wood determined by ultrasonic wave propagation and static compression testing. *Wood and Fiber Science*, 43 (1), pp. 64-75.

⁵²⁸ Aira, J.R.; Arriaga, F.; Íñiguez, G (2014) Determination of the elastic constants of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) Wood by means of compression tests. *Biosystems engineering*, 126, pp12-22. [DOI:10.1016/j.biosystemseng.2014.07.008].

⁵²⁹ Schniewind, A.P.; Barrett, J. D. (1972). Wood as a linear orthotropic viscoelastic material. *Wood Science and Technology*, 6(1), pp.43-57. [DOI: 10.1007/BF00351807].

⁵³⁰ Astley, R.J.; Stol, K.A.; Harrington, J. J. (1998). Modelling the elastic properties of softwood. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 56(1), pp. 43-50. [DOI:10.1007/s001070050].

⁵³¹ Mascia, T.N.; Rocco, F.A. (2006) Remarks on orthotropic elastic models applied to wood. *Materials Research*, vol 9 (3), pp. 301-310. [DOI: 10.1590/S1516-14392006000300010].

Expresado en forma matricial como,

$$\{\varepsilon\} = [S] * \{\sigma\} \quad [47]$$

Puede desarrollarse una matriz simétrica 6x6 para cualquier material ortótropo:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} * \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} \quad [48]$$

En el caso de madera, simplificando su comportamiento mecánico como material ortótropo, la matriz de conformidad queda definida como,

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{RT} \\ \gamma_{LT} \\ \gamma_{LR} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{RL}}{E_R} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LR}}{E_L} & \frac{1}{E_R} & -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & -\frac{\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} \end{bmatrix} * \begin{Bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \tau_{RT} \\ \tau_{LT} \\ \tau_{LR} \end{Bmatrix} \quad [49]$$

Este modelo elástico relaciona tensión y deformación a nivel infinitesimal, lo que permite, una vez completada, su uso para la estimación del comportamiento de la madera mediante modelos informáticos de elementos finitos (FEM). Además, otros investigadores han utilizado esta matriz de conformidad para la obtención de las constantes elásticas de la madera a partir ensayos no destructivos⁵³², o a partir de un único espécimen ensayado.⁵³³

E. Discusión de los resultados

Los valores medios de las constantes elásticas obtenidos para las probetas de chopo ensayadas (Tabla 40) son ligeramente superiores a los valores publicados por otros autores para diferentes especies del género *Populus* sp (Tabla 42). Sin embargo, no se han encontrado datos contrastables de los valores específicos para la especie *Populus x euroamericana* I-214 utilizada en esta tesis doctoral.

Tabla 42. Constantes elásticas de chopo referenciadas por otros investigadores.

Especie	Referencia	E _L	E _R	E _T	G _{LR}	G _{LT}	G _{RT}	ν _{LR}	ν _{LT}	ν _{RT}	ν _{TR}	ν _{RI}	ν _{TL}
<i>Populus deltooides</i> Bartr. ex Marsh.	Kretschmann et al. 2010 ⁵³⁴	10500	872	493	798	546	-	0,344	0,420	0,875	0,292	0,043	0,018
<i>Populus tremuloides</i> Michx.	"	-	-	-	-	-	-	0,489	0,374	-	0,496	0,054	0,022

⁵³² Bucur, V., Archer, R. R. (1984). Elastic constants for wood by an ultrasonic method. *Wood Science and Technology*, 18(4), pp.255-265. [DOI: 10.1007/BF00353361]

⁵³³ Majano-Majano, A.; Fernández-Cabo, J.L.; Hoheisel, S.; Klein, M. (2012) A test method for characterizing clear Wood using a single specimen. *Experimental mechanics* 52, pp. 1079-1096. [DOI 10.1007/s11340-011-9560-6].

⁵³⁴ Kretschmann, D.E (2010). *Wood handbook; Wood as an engineering material*. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 508 pp.

Los valores medios obtenidos para las probetas de pino pinaster ensayadas (Tabla 41), son semejantes a otros datos publicados (Tabla 43). Como puede observarse en esta tabla, en general, los valores de las constantes de elásticas de las especies de coníferas tipo pinoide son suficientemente conocidas.

Tabla 43. Constantes elásticas de pino referenciadas por otros investigadores.

Especie	Referencia	E_L	E_R	E_T	G_{LR}	G_{LT}	G_{RT}	ν_{LR}	ν_{LT}	ν_{RT}	ν_{TR}	ν_{RL}	ν_{TL}
<i>Pinus taeda</i> L.	Kretschmann et al. 2010 ⁵³⁵	12300	1390	959	1008	996	160	0,328	0,292	0,382	0,362	-	-
<i>Pinus serotina</i> Michx.	"	12100	859	496	605	545	109	0,280	0,364	0,389	0,320	-	-
<i>Pinus resinosa</i> Ait.	"	11200	986	493	1075	907	123	0,347	0,315	0,408	0,308	-	-
<i>Pinus radiata</i>	Astley et al. 1998 ⁵³⁶	10710	860	420	740	570	40	0,310	0,280	-	0,420	-	-
<i>Pinus pinaster</i>	Pereira et al. 1998 ⁵³⁷	15133	1912	1010	1115	1042	171	-	-	0,568	-	0,471	0,051
<i>Pinus pinaster</i>	Xavier et al. 2009 ⁵³⁸	-	-	-	1330	1090	239	-	-	-	-	-	-
<i>Pinus sylvestris</i>	Guitard 1987 ⁵³⁹	-	$E_L/13$	$E_L/21$	-	-	-	0,39	0,43	0,51	0,31	0,03	0,02
<i>Pinus sylvestris</i>	Aira et al. 2014 ⁵⁴⁰	10283	1994	994	1334	1280	737	0,399	0,618	1,132	0,796	0,107	0,068

6.1.2. Propiedades a tracción paralela

Las propiedades mecánicas de la madera de chopo y pino pinaster a tracción paralela se obtienen mediante ensayo a tracción axial, según norma ISO 13061-6⁵⁴¹, de probetas de sección central reducida de dimensiones nominales 4x20x350 mm como las expuestas en la Fig. 144.



Fig. 144. Probetas de madera de chopo instrumentadas para su ensayo a tracción axial.

Las probetas son instrumentadas con una banda extensométrica para medir la deformación durante todo el transcurso del ensayo (Fig. 145).

⁵³⁵ Ibidem.

⁵³⁶ Astley et al. (1998) Op. cit.

⁵³⁷ Pereira, J. L., Xavier, J., Morais, J. (2003). Estudo por elementos finitos dum novo método para a determinação das propriedades mecânicas da madeira de Pinus Pinaster AIT. nas direções perpendiculares ao grão. *Livro de actas do VII Congresso Nacional de Mecânica Aplicada e Computacional* (Vol. 2).

⁵³⁸ Xavier, J.; Oliveira, M.; Morais, J.; Pinto, J (2009) Measurement of the shear properties of clear wood by the Arcan test. *Holzforschung* 63, pp.217–225. [DOI : 10.1515/HF.2009.034].

⁵³⁹ Guitard, D (1987). *Mécanique du matériau bois et composites*. Toulouse: Cépadues-Éditions.

⁵⁴⁰ Aira et al. (2014) Op. cit.

⁵⁴¹ Norma ISO 13061-6 (2014) Op. cit.

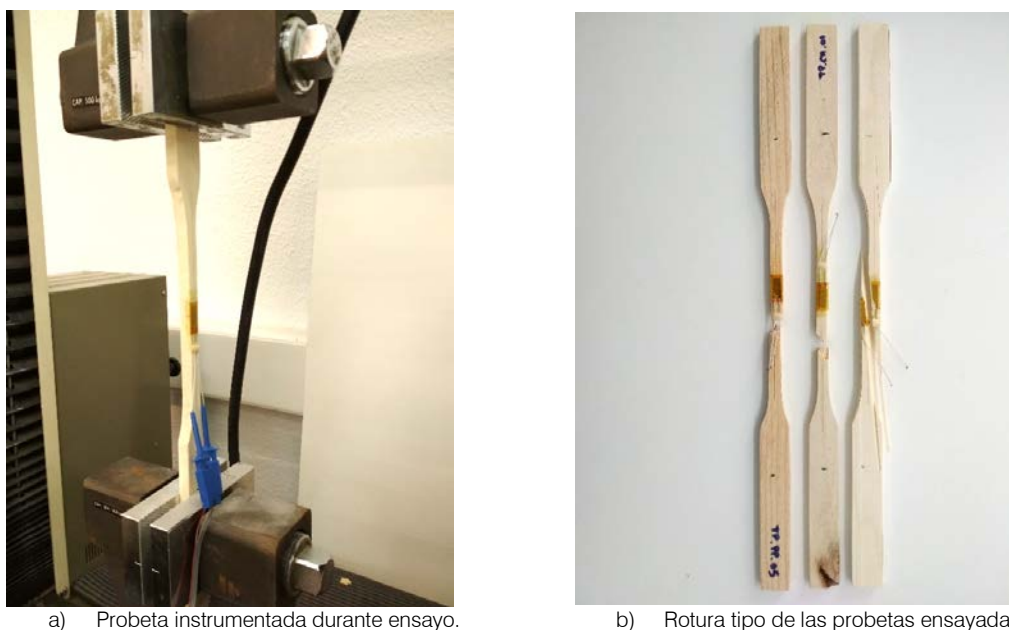


Fig. 145. Ejecución de los ensayos a tracción paralela.

A. Ensayos a tracción paralela en madera de chopo

Los resultados obtenidos de los ensayos a tracción paralela sobre probetas de madera de chopo se resumen en la Tabla 44.

Tabla 44. Valores medios de los resultados de los ensayos a tracción paralela sobre probetas de madera de chopo.

	Área (mm ²)	Fuerza (kN)	Tensión (MPa)	Extensómetro (mm)	Deformación (μm/m)	Módulo de elasticidad (MPa)
TP_CH.01	49,4	2,56	51,83	2,048	2.976,25	15.859,32
TP_CH.02	57,1	5,09	89,27	4,672	3.211,07	24.557,37
TP_CH.03	49,1	3,62	73,82	10,027	3.910,32	30.070,46
TP_CH.04	60,0	4,73	78,95	4,629	4.228,64	22.082,00
TP_CH.05	58,2	3,80	65,50	3,499	2.342,71	32.210,65
Media	54,8	3,97	71,88	4,975	3.333,80	24.955,96
Mínimo.	49,1	2,56	51,83	2,048	2.342,71	15.859,32
Máximo	60,0	5,09	89,27	10,027	4.228,64	32.210,65
SD	5,13	0,99	14,13	3,020	751,38	6.518,36
COV (%)	8,39	22,54	17,59	54,29	20,16	23,36

La tensión de rotura media para las probetas de madera limpia de chopo ensayadas es de 71,88 MPa, y el módulo de elasticidad a tracción medio es de 24.955,96 MPa.

B. Ensayos a tracción paralela en madera de pino pinaster

Los resultados obtenidos de los ensayos a tracción paralela sobre probetas de madera de pino pinaster se resumen en la Tabla 45.

Tabla 45. Valores medios de los resultados de los ensayos a cortante sobre probetas de madera de pino pinaster.

	Área (mm ²)	Fuerza (kN)	Tensión (MPa)	Extensómetro (mm)	Deformación (μm/m)	Módulo de elasticidad (MPa)
TP_PP.01	60,3	4,03	66,78	3,179	2.831,39	14.385,39
TP_PP.02	57,1	3,65	63,89	2,859	3.912,50	17.936,95
TP_PP.03	46,9	3,66	78,10	3,627	3.092,40	28.750,04
TP_PP.04	64,6	4,09	63,32	4,971	2.988,87	30.505,68
TP_PP.05	59,1	4,92	83,12	4,203	4.141,64	21.753,24
Media	57,6	4,07	71,04	3,767	3.393,36	22.666,26
Mínimo.	46,8	3,65	63,32	2,859	2.831,39	14.385,39
Máximo	64,6	4,92	83,12	4,971	4.141,64	30.505,68
SD	6,60	0,52	9,01	0,841	591,49	6.896,41
COV (%)	10,26	11,33	11,34	19,97	15,59	27,21

La tensión de rotura media para las probetas de madera limpia de pino pinaster ensayadas es de 71,04 MPa, y el módulo de elasticidad a tracción medio es de 22.666,26 MPa.

C. Discusión de los resultados

Comparando los valores medios de las Tabla 44 y Tabla 45, la tensión media de rotura a tracción de rotura paralela, así como los módulos de elasticidad obtenidos para ambas especies de madera, muestran un comportamiento semejante, no mostrándose una significativa diferencia entre especies.

6.1.3. Propiedades a cortante

Para la obtención de las propiedades a cortante de la madera se ensayan, según UNE 56543:1988⁵⁴², probetas de madera maciza de chopo y pinaster (Fig. 146) de dimensiones nominales 50x50x60 mm.



a) Probeta de pino pinaster sin ensayar.



b) Probeta ensayada.

Fig. 146. Probetas de madera ensayadas para la obtención de las propiedades de resistencia a cortante.

A. Resultados de los ensayos a cortante en madera de chopo

Los resultados obtenidos para las probetas de madera de chopo se muestran en la Tabla 46.

Tabla 46. Valores medios de los resultados de los ensayos a cortante sobre probetas de madera de chopo.

	# (ud)	Área (mm ²)	Fuerza (kN)	Tensión (MPa)	Deformación (mm)
Media	10	2.025,25	17,43	8,63	1,67
Mínimo.	-	1.963,28	9,38	4,61	1,18
Máximo	-	2.070,85	25,77	13,13	2,43
SD	-	38,70	4,88	2,53	0,40
COV (%)	-	1,80	26,41	27,62	22,74

La tensión de rotura media a cortante de las probetas de madera de chopo es de 8,63MPa, destacando amplia variabilidad de los resultados, con un coeficiente de variación del 27%.

⁵⁴² Norma UNE 56543:1988 Op. cit.

B. Resultados de los ensayos a cortante en madera de pino pinaster

Los resultados obtenidos para las probetas de madera de pino pinaster se muestran en la Tabla 47.

Tabla 47. Valores medios de los resultados de los ensayos a cortante sobre probetas de madera de pino pinaster.

	# (ud)	Área (mm ²)	Fuerza (kN)	Tensión (MPa)	Deformación (mm)
Media	12	2.368,63	28,74	12,13	2,82
Mínimo.	-	2.326,62	25,33	10,73	2,28
Máximo	-	2.395,46	31,19	13,23	3,39
SD	-	19,64	1,89	0,80	0,33
COV (%)	-	0,79	6,28	6,33	11,10

La tensión de rotura media a cortante de las probetas de madera de pino pinaster es de 12,13 MPa.

C. Discusión de los resultados

Los resultados de resistencia a cortante obtenidos para la madera de chopo (*Populus x euroamericana* I-214) son similares a los publicados por Kretschmann et al. 2010⁵⁴³ para otras especies de chopo (*Populus* spp.). Alcanzando valores medios de resistencia a cortante de entre 5,9 MPa (*Populus trichocarpa* Torr. & Gray) a 8,0 MPa (*Populus deltoides* Bartr. ex Marsh), similares a los 8,63 MPa obtenidos en esta tesis.

En la misma publicación Kretschmann et al. 2010⁵⁴⁴ detalla los valores de resistencia media a cortante para distintas especies de pino. Si bien ninguno de los pinos analizados es de la especie de esta tesis (*Pinus pinaster* Ait.), las distintas especies de pino analizadas varían sus valores entre 6,1-8,5 MPa. Sin embargo, Wheeler et al. 1998⁵⁴⁵ elevan los valores medios de resistencia a cortante para especies de pino (*Pinus sylvestris* L.) hasta los 12,7MPa; aproximándose más los valores obtenidos en los ensayos a esta publicación.

6.1.4. Resumen de las propiedades de la madera caracterizada

De los ensayos de caracterización de la madera de chopo y pino pinaster realizados en este apartado, con probetas de madera limpia de pequeñas dimensiones, se obtienen las principales propiedades mecánicas resumidas en la Tabla 48.

Tabla 48. Valores medios de las principales propiedades mecánicas de las maderas ensayadas.

	Chopo (<i>Populus x euroamericana</i> I-214)	Pino pinaster (<i>Pinus pinaster</i> Ait.)
RESISTENCIA (MPa)		
Flexión ($f_{m,medio}$)	-	-
Tracción paralela ($f_{t,0,medio}$)	71,88	71,04
Tracción perpendicular ($f_{t,90,medio}$)	-	-
Compresión paralela ($f_{t,0,medio}$)	38,29	42,50
Compresión perpendicular ($f_{t,90,medio}$)	3,92-4,15	8,18-9,07
Cortante ($f_{v,medio}$)	8,63	12,13
RIGIDEZ (MPa)		
Módulo de elasticidad longitudinal ($E_{L,medio}$)	18.849,1	18.254
Módulo de elasticidad radial ($E_{R,medio}$)	1.305,9	1.884,5
Módulo de elasticidad tangencial ($E_{T,medio}$)	1.079,1	1.492,6
Módulo de elasticidad cortante ($G_{LR,medio}$)	1.198,1	2.195,2
Módulo de elasticidad cortante ($G_{LT,medio}$)	1.750,9	7.521,8
Módulo de elasticidad cortante ($G_{RT,medio}$)	1.613,8	2.267,5
PROPIEDADES ELÁSTICAS (-)		
Poisson ν_{LR}	0,288	0,336

⁵⁴³ Kretschmann (2010). Op. cit.

⁵⁴⁴ Ibidem.

⁵⁴⁵ Wheeler, A. S.; Hutchinson, A. R. (1998). Resin repairs to timber structures. *International journal of adhesion and adhesives*, 18(1), 1-13.

Poisson ν_{LT}	0,536	0,515
Poisson ν_{RT}	0,687	0,524
Poisson ν_{TR}	0,576	0,557
Poisson ν_{RL}	0,016	0,128
Poisson ν_{TL}	0,009	0,089
DENSIDAD (kg/m³)		
Densidad (ρ_{medio})	412	515

Además de realizarse a partir de los resultados de este apartado los gráficos tensión-deformación de valores medios para madera de chopo (Fig. 147) y madera de pino pinaster (Fig. 148).

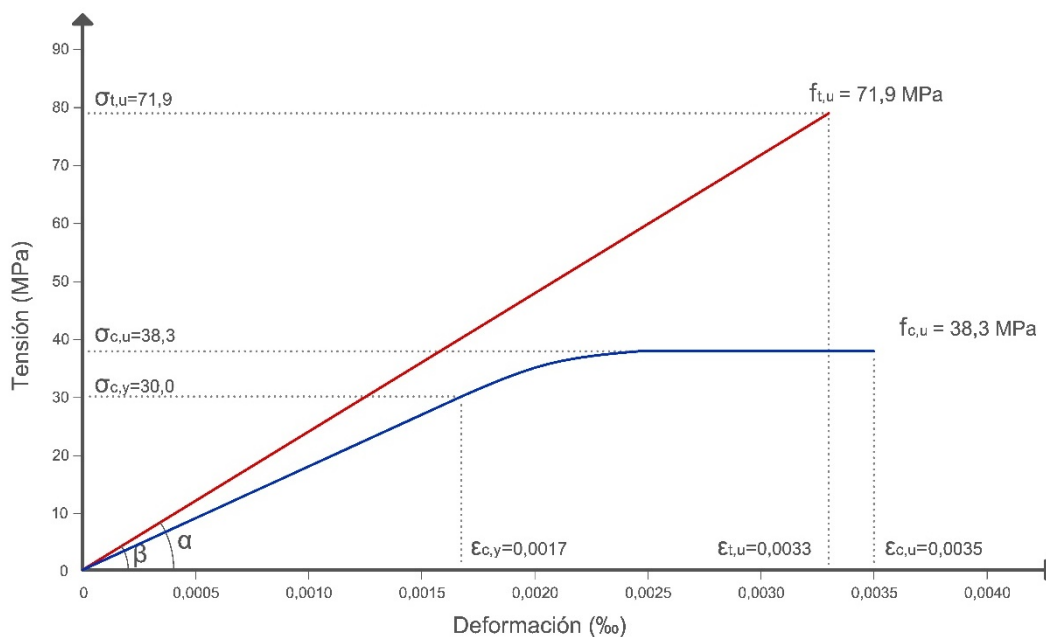


Fig. 147. Gráfico tensión deformación con valores medios obtenidos experimentalmente para la madera de chopo (*Populus x euroamericana I-214*).

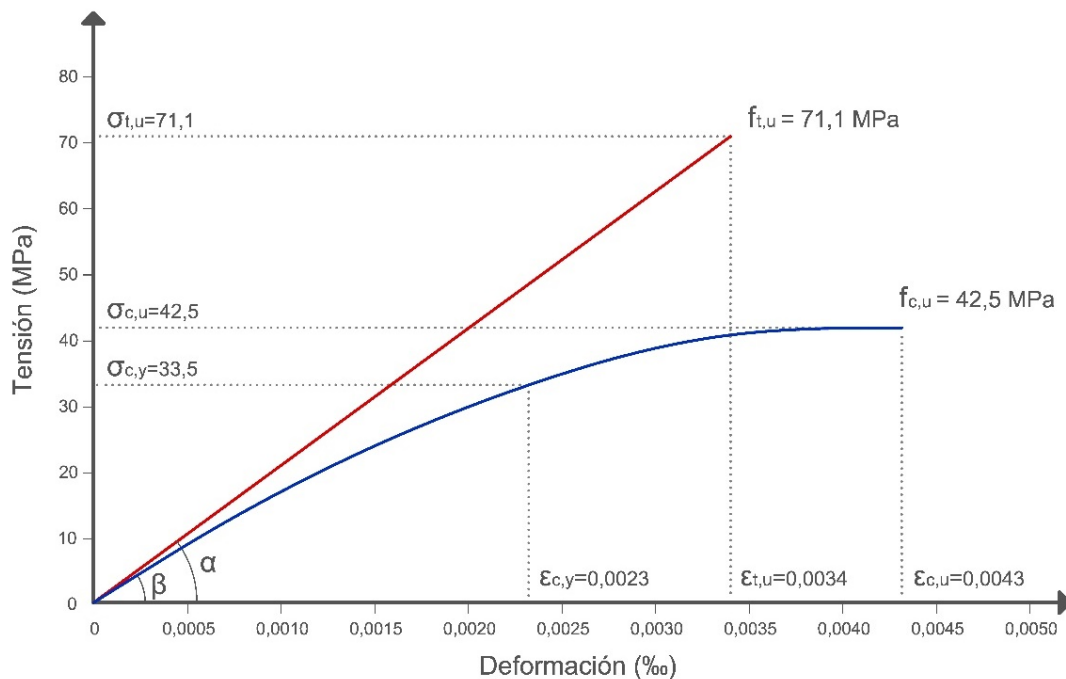


Fig. 148. Gráfico tensión deformación con valores medios obtenidos experimentalmente para la madera de pino pinaster (*Pinus pinaster Ait.*).

6.2. Caracterización previa de los materiales de refuerzo

Sobre los tejidos de refuerzo utilizados en esta tesis se han realizado una serie de pruebas para caracterizar sus propiedades físicas. El objetivo fundamental de este capítulo es determinar la sección eficaz de los tejidos de refuerzo en la dirección principal. Este dato es fundamental para poder estimar en los posteriores ensayos a tracción su tensión de rotura y módulo de elasticidad a tracción real.

Ante el tamaño micrométrico de los filamentos de los tejidos estudiados, y con el fin de garantizar la precisión y certidumbre de las medidas, los resultados se obtienen por tres procedimientos paralelos y recurrentes. Es necesario señalar que en todos los procedimientos se ha considerado la influencia de la trama respecto a la urdimbre, es decir, se ha descontado de los resultados totales el porcentaje de fibra correspondiente a la trama de soporte. En el procedimiento de medición micro-estereoscópica los hilos fueron extraídos de la probeta, separándose desde el primer momento de las fibras que constituyen la trama sustentante. En el segundo y tercer procedimiento se ha aplicado un coeficiente reductor (calculando previamente la relación trama-urdimbre) sobre el volumen total de la probeta, para descontar el volumen proporcional de trama.

6.2.1. Fibra de lino

A. Procedimiento I: Identificación del área mediante medición estereoscópica

Determinación del número de hilos por cm

Para determinar el número de hilos por centímetro se ha procedido a medir el número de hilos (conjunto de filamentos unidireccionales) que se encuentran en una anchura de 150 mm, realizando esta medición en distintos puntos sobre 5 muestras de tejido (Tabla 49).

Tabla 49. Número de hilos / cm de fibra de lino.

150x150mm	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	MEDIA
Nº hilos	177	169	175	179	173	175
Anchura (cm)	15,1	14,5	15	15,3	14,8	14,9
Nº hilos / cm	11,72	11,68	11,69	11,71	11,67	11,69

Se obtiene un resultado medio de 11,69 hilos/cm.

Determinación del diámetro medio de los filamentos

Mediante el uso de técnicas de micro-estereoscópica, se realizaron 50 medidas en cada una de las 5 micrográficas (tomas) realizadas a 50 aumentos (Fig. 149), obteniéndose los resultados que se incluyen detallados en el Anexo.

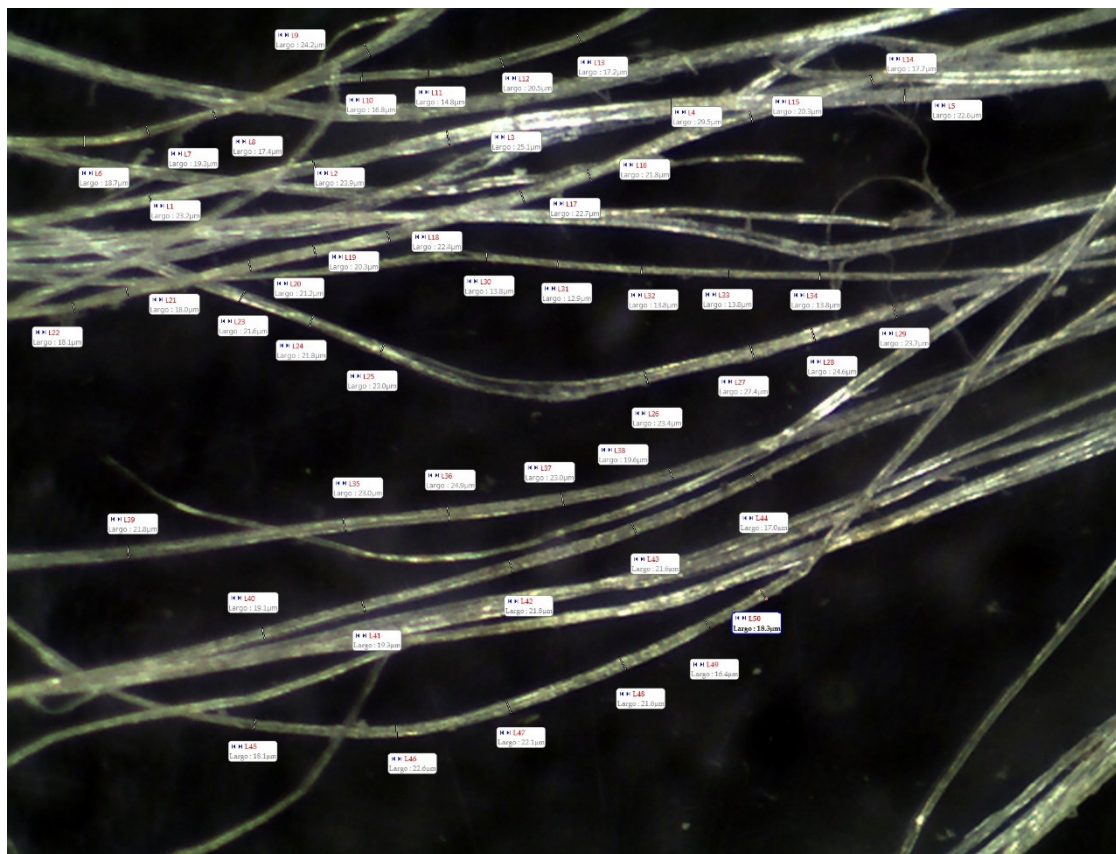


Fig. 149. Mediciones de los filamentos de fibra de vidrio de lino realizadas en la micrografía "toma 2" (50x).

Los resultados medios de las mediciones se resumen en la Tabla 50:

Tabla 50. Determinación del diámetro medio del filamento de fibra de lino.

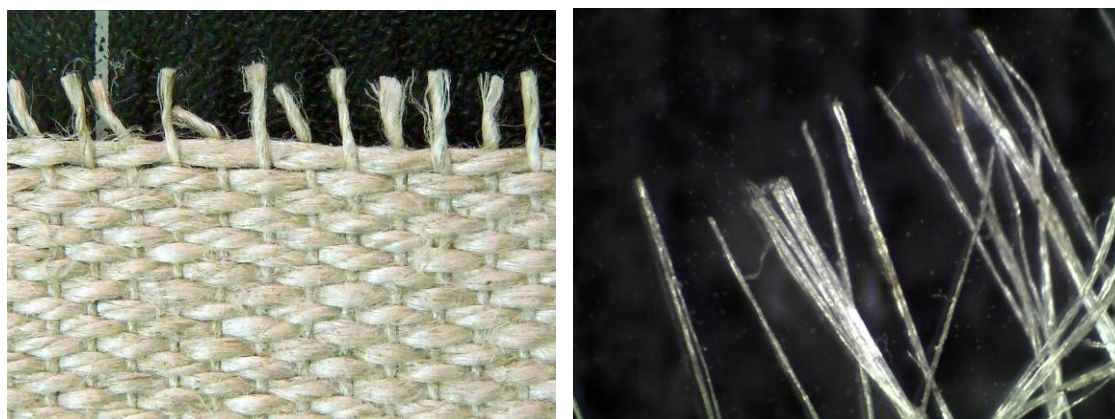
	Medición mediante estereomicroscopía (aumento x50)				
	TOMA 1	TOMA 2	TOMA 3	TOMA 4	TOMA 5
Número de medidas	50	50	50	50	50
Media (µm)	20,39	20,28	20,05	20,13	19,97
Desviación típica (µm)	3,67	4,18	2,53	3,03	3,15
COV (%)	17,98	20,64	12,62	15,08	15,78

Diámetro medio de todas las tomas 20,16 µm

Para la fibra de lino se obtiene un diámetro medio del filamento de 20,16 µm.

Determinación del número medio de filamentos por hilo de material

Para determinar el número medio de filamentos por hilo de material se ha realizado un recuento de los filamentos que pueden encontrarse en cada hilo. Con el fin de facilitar el recuento a una escala microscópica y evitar en la medida de lo posible el solapamiento de fibras, se ha dividido cada hilo en grupos (10 grupos por hilo). Cada uno de estos grupos se abren en abanico para facilitar el recuento y se contabilizar el número de fibras presente (Fig. 150).



a) Tejido estudiado. b) Imagen de la filamentos aumentada 50x.
Fig. 150. Recuento de filamentos de fibra de lino con imágenes estereomicroscópica.

Para establecer el número medio de filamentos por hilo de material, se ha procedido a contar una serie de 5 hilos de fibra lino con la ayuda del estereomicroscopio. De este proceso resulta la siguiente Tabla 51:

Tabla 51. Número medio de filamentos por hilo del tejido de fibra de lino.

Fibra de lino	HILO 1	HILO 2	HILO 3	HILO 4	HILO 5	MEDIA
N.º Filamentos	894	896	882	912	908	898

El número medio de filamentos medio por hilo fue de 898 ud. Una vez conocido este dato, así como el diámetro medio de los filamentos, de $20,16 \mu\text{m}$ (Tabla 50), podemos obtener la sección media por hilo de para el tejido de fibra de lino como:

$$A_{\text{ef.hilo}} = 898 \times \pi \times (0,02016/2)^2 = 0,286 \text{ mm}^2/\text{hilo} \quad [50]$$

En otros términos, se ha pasado esta cifra a mm^2/cm de anchura de tejido, para lo cual se ha empleado el número de hilos por cm de material, que en este caso es de 11,69 hilos/cm (Tabla 49); obteniéndose una sección eficaz de:

$$A_{\text{ef.tej}} = 0,286 \text{ mm}^2/\text{hilo} \times 11,69 \text{ hilos/cm} = 3,352 \text{ mm}^2/\text{cm} \quad [51]$$

B. Procedimiento II: Identificación del área mediante medición del volumen

Se han medido 5 muestras de fibra de dimensiones $150 \times 150 \text{ mm}$, repitiendo el proceso descrito anteriormente 3 veces en cada probeta, y realizándose la media de estas mediciones para obtener un volumen medio (Tabla 52).

Tabla 52. Obtención del área eficaz mediante medición del volumen en tejido de fibra de lino.

	Peso seco probeta (g)	Peso húmedo (g)	Agua impregnada (g)	Peso agua derramada (g)	Volumen probeta (cm^3)	Área bruta (mm^2)	Área bruta hilo (mm^2/hilo)	Densidad (g/cm^3)
Probeta 1	36,3	81,48	45,18	72,69	27,51	183,40	0,308	1,32
Probeta 2	37,1	89,33	52,23	80,32	28,09	187,27	0,315	1,32
Probeta 3	36,5	85,38	48,88	75,80	26,92	179,47	0,302	1,36
Probeta 4	38,3	86,60	48,30	77,92	29,62	197,47	0,332	1,29
Probeta 5	38,8	87,94	49,14	79,51	30,37	202,47	0,340	1,28
Media	37,40	86,15	48,75	77,25	28,50	190,01	0,320	1,31
SD	1,10	3,00	2,51	3,08	1,45	9,66	0,02	0,03
COV (%)	2,64	3,11	4,61	3,56	4,55	4,55	4,55%	2,04

Una vez determinado el área bruta equivalente de cada hilo sería necesario obtener el área real del tejido unidireccional. Para ello se deshila el tejido, y una vez eliminado el tejido secundario de trama

(MAT) se determinando el porcentaje que representa el peso de los hilos unidireccionales respecto al peso total de las muestras. El resultado porcentual se recoge en la Tabla 53.

Tabla 53. Obtención de la relación tejido unidireccional / MAT para fibra de lino.

	Muestra A	Muestra B	Muestra C	Muestra D	MEDIA
Número hilos	26	20	25	31	-
Peso medio hilos (g)	0,087	0,089	0,086	0,087	0,09
Peso total hilos (g)	2,26	1,78	2,16	2,7	2,23
Peso total muestra (g)	2,51	1,98	2,39	2,98	2,47
% peso hilos / muestra	90,04	89,90	90,38	90,60	90,23

La proporción trama-urdimbre: Urdimbre 90,23%, trama 9,77%.

Por lo tanto, el área neta de la urdimbre buscada será la resultante de aplicar al área equivalente obtenida el porcentaje de participación de la urdimbre:

$$A_{\text{ef.hilo}} = \text{Área bruta hilo} \times \text{porcentaje de urdimbre} \quad [52]$$

$$A_{\text{ef.hilo}} = 0,32 \times 90,23\% = 0,288 \text{ mm}^2/\text{hilo} \quad [53]$$

En otros términos, se ha pasado esta cifra a mm² por cm de anchura de tejido, para lo cual se ha empleado el número de hilos por cm de material, que en este caso es de 11,69 hilos/cm (Tabla 49).

$$A_{\text{ef.tej}} = 0,288 \text{ mm}^2/\text{hilo} \times 11,69 \text{ hilos/cm} = 3,366 \text{ mm}^2/\text{cm} \quad [54]$$

C. Procedimiento III. Identificación del área mediante medición del peso

Se han medido 4 muestras de fibra de dimensiones 150x 150mm, deshilando y pesando el tejido unidireccional y la trama. La densidad media del tejido de fibra de lino se obtiene de los ensayos previos realizados en procedimiento II expuestos en la Tabla 52, con una densidad media de 1,31gr/cm³.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 54:

Tabla 54. Obtención del área a través del peso para tejido de fibra lino.

	Numero hilos (ud.)	Longitud (mm)	Anchura (mm)	Peso total (g)	Peso Urdimbre (g)	Área eficaz hilo (mm ² /hilo)
Probeta 1	26	250	22	2,51	2,26	0,265
Probeta 2	20	255	17	1,98	1,78	0,266
Probeta 3	21	254	18	1,99	1,78	0,255
Probeta 4	25	252	21	2,39	2,16	0,262
Probeta 5	31	255	27	2,98	2,7	0,261
Media	25	253	21	2,37	2,14	0,262
SD	4,39	2,17	3,76	0,41	0,38	0,005
COV (%)	15,97	0,77	15,97	15,66	16,05	1,58

*Datos obtenidos para $\rho = 1,31 \text{ g/cm}^3$.

De la tabla anterior se obtiene una sección eficaz de:

$$A_{\text{ef.hilo}} = (P / (\rho * L)) * n^{\circ} \text{ hilos} \quad [55]$$

$$A_{\text{ef.hilo}} = 0,262 \text{ mm}^2/\text{hilo} \quad [56]$$

En otros términos, se ha pasado esta cifra a mm² por cm de anchura de tejido, para lo cual se ha empleado el número de hilos por cm de material, que en este caso es de 11,69 hilos/cm.

$$A_{\text{ef.tej}} = 0,262 \text{ mm}^2/\text{hilo} \times 11,69 \text{ hilos/cm} = 3,062 \text{ mm}^2/\text{cm} \quad [57]$$

6.2.2. Fibra de vidrio UNI1200

A. Procedimiento I: Identificación del área mediante medición estereoscópica

Determinación del número de hilos por cm

Para determinar el número de hilos por centímetro se ha procedido a medir el número de hilos (conjunto de filamentos unidireccionales) que se encuentran en una anchura de 150 mm, realizando esta medición en distintos puntos sobre 5 muestras de tejido (Tabla 55).

Tabla 55. Número de hilos / cm de fibra de vidrio UNI-1200

150x150mm	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	MEDIA
N.º hilos	75	72	75	75	77	74,7
Anchura (cm)	15	15	15	15	15	15,0
N.º hilos / cm	5	4,8	5	5	5,1	4,98

Se obtiene un resultado medio de 4,98 hilos/cm.

Determinación del diámetro medio de los filamentos

Mediante el uso de técnicas de micro-estereoscópica, se realizaron 50 medidas en cada una de las 5 micrografías (tomas) realizadas a 50 aumentos (Fig. 151), obteniéndose los resultados que se incluyen detallados en el Anexo.



Fig. 151. Mediciones de los filamentos de fibra de vidrio UNI-1200 realizadas en la micrografía "toma 5" (50x).

Los resultados medios de las mediciones se resumen en la Tabla 56:

Tabla 56. Determinación del diámetro medio del filamento UNI-1200

Medición mediante estereomicroscopía (aumento 50x)					
	TOMA 1	TOMA 2	TOMA 3	TOMA 4	TOMA 5
Número de medidas	50	50	50	50	50
Media (μm)	19,44	18,73	19,71	20,98	20,64
Desviación típica (μm)	2,20	1,76	1,75	2,26	2,20
COV (%)	11,31	9,38	8,87	10,79	10,67
Diámetro medio de todas las tomas 19,90 μm					

Para la fibra Fv_UNI-1200 se obtiene un diámetro medio del filamento de 19,90 μm .

Determinación del número medio de filamentos por hilo de material

Para determinar el número medio de filamentos por hilo de material se ha realizado un recuento de los filamentos que pueden encontrarse en cada hilo. Con el fin de facilitar el recuento a una escala microscópica y evitar en la medida de lo posible el solapamiento de fibras, se ha dividido cada hilo en grupos (10 grupos por hilo). Cada uno de estos grupos se abren en abanico para facilitar el recuento y se contabilizar el número de filamentos presente (Fig. 152).



a) División de cada hilo en grupos para el recuento.

b) Imagen de la filamentos aumentada 50x.

Fig. 152. Recuento de filamentos con imágenes estereomicroscópica.

Para establecer el número medio de filamentos por hilo de material, se ha procedido a contar una serie de 5 hilos de fibra de vidrio con la ayuda del estereomicroscopio. El número de filamentos contabilizado en cada hilo se muestran en la Tabla 57.

Tabla 57. Número medio de filamentos por hilo del tejido de fibra vidrio UNI 1200.

Fv UNI 1200	HILO 1	HILO 2	HILO 3	HILO 4	HILO 5	MEDIA
N.º Filamentos	3.390	3.169	3.526	2.869	2.515	3.094

El número medio de filamentos medio por hilo fue de 3.094 ud. Una vez conocido este dato, así como el diámetro medio de los filamentos, de 19,90 μm , se puede obtener la sección media por hilo para el tejido de fibra de vidrio UNI 1200 como:

$$A_{\text{ef.hilo}} = 3094 \times \pi \times (0,0199/2)^2 = 0,972 \text{ mm}^2/\text{hilo} \quad [58]$$

Conocido este dato, se ha transformado esta cifra a mm^2/cm de anchura de tejido, para lo cual se ha empleado el número de hilos por cm de material, que en este caso es de 4,98 hilos/cm (Tabla 55); obteniéndose una sección eficaz de:

$$A_{\text{ef.tej}} = 0,972 \text{ mm}^2/\text{hilo} \times 4,98 \text{ hilos/cm} = 4,84 \text{ mm}^2/\text{cm} \quad [59]$$

B. Procedimiento II: Identificación del área mediante medición del volumen

En este procedimiento se determina el área partiendo de unos volúmenes conocidos. Para el cálculo del volumen se ha introducido una muestra de fibra en un recipiente lleno de agua y se ha pesado la cantidad de agua que ha desbordado (Fig. 153), que según el principio de Arquímedes debe ser proporcional al volumen del cuerpo introducido. Si el cuerpo a medir fuese un sólido, el problema (generalmente) se reduciría a introducirlo en el recipiente con agua y medir el volumen desbordado (en nuestro tipo de ensayo); pero al ser la fibra un material textil, lleno de huecos donde el agua puede quedar embebida debe empaparse previamente la muestra. De este modo, se pesa la muestra en seco, se empapa de agua hasta saturarla, se pesa en húmedo y se introduce en un recipiente lleno de agua para medir el agua desbordada. Se pesa con precisión esta agua desbordada, se le resta el peso del agua embebida en la muestra (agua embebida = peso húmedo – peso seco) y de este modo se obtiene de un modo suficientemente preciso el volumen de la muestra.



Fig. 153. Material y equipos empleados en la obtención del volumen de los tejidos.

Para realizar este ensayo se han utilizado 5 muestras de fibra de dimensiones 150 x 150mm, repitiendo el proceso descrito anteriormente 3 veces en cada una de las muestras, y realizándose la media de estas mediciones para obtener su volumen (Tabla 58):

Tabla 58. Obtención del área eficaz mediante medición del volumen en tejido de fibra vidrio UNI 1200.

	Peso seco probeta (g)	Peso húmedo (g)	Agua impregnada (g)	Peso agua derramada (g)	Volumen probeta (cm ³)	Área bruta (mm ²)	Área bruta hilo (mm ² /hilo)	Densidad (g/cm ³)
Probeta 1	31,55	46,53	14,98	30,29	15,31	102,07	1,36	2,06
Probeta 2	34,8	51,89	17,09	27,17	10,08	67,20	0,89	3,45
Probeta 3	33,4	47,81	14,67	26,72	12,05	80,33	1,07	2,77
Probeta 4	34,46	50,19	15,73	30,74	15,01	100,07	1,33	2,29
Probeta 5	37,02	54,6	17,58	32,5	14,92	99,47	1,33	2,48
Media	34,25	50,20	16,01	29,48	13,47	89,83	1,19	2,67
SD	2,00	3,22	1,28	2,47	2,31	15,41	0,21	5,36
COV (%)	5,23	5,73	7,16	7,48	15,34	16,18	15,52	18,38

Una vez determinado el área bruta equivalente de cada hilo sería necesario obtener el área real del tejido unidireccional. Para ello se deshila el tejido, y una vez eliminado el tejido secundario de trama (MAT) se determinando el porcentaje que representa el peso de los hilos unidireccionales respecto al peso total de las muestras. El resultado porcentual se recoge en la Tabla 59:

Tabla 59. Obtención de la relación tejido unidireccional / MAT para fibra de vidrio UNI-1200.

	Muestra A	Muestra B	Muestra C	Muestra D	MEDIA
Número hilos	74	49	76	49	62
Peso medio hilos (g)	0,243	0,24	0,285	0,482	0,31
Peso total hilos (g)	17,95	11,54	22,09	22,93	18,63
Peso total muestra (g)	21,01	13,17	27,92	27,31	22,35
% peso hilos / muestra	85,44	87,62	79,12	83,96	84,03

La proporción trama-urdimbre es de: Urdimbre 84,03%, Trama 15,97%.

Por lo tanto, el área neta de la urdimbre buscada será la resultante de aplicar al área equivalente obtenida el porcentaje de participación de la urdimbre:

$$A_{ef.hilo} = \text{Área bruta hilo} \times \text{porcentaje de urdimbre} \quad [60]$$

$$A_{ef.hilo} = 1,19 \times 84,03\% = 1,01 \text{ mm}^2/\text{hilo} \quad [61]$$

En otros términos, se ha pasado esta cifra a mm² por cm de anchura de tejido, para lo cual se ha empleado el número de hilos por cm de material, que en este caso es de 4,98 hilos/cm (Tabla 55).

$$A_{ef.tej} = 1,01 \text{ mm}^2/\text{hilo} \times 4,98 \text{ hilos/cm} = 5,02 \text{ mm}^2/\text{cm} \quad [62]$$

C. Procedimiento III. Identificación del área mediante medición del peso

Este procedimiento permite determinar el área media del material partiendo del peso, las dimensiones de la muestra y la densidad. Para ello, partiendo de una densidad y longitud conocidas, se ha procedido a pesar varias probetas, después de lo cual se ha determinado la sección deseada. Se han medido 4 muestras de fibra de dimensiones 150x 150 mm, deshilando y pesando el tejido unidireccional y la trama (Fig. 154). La densidad media del tejido de fibra de vidrio UNI 1200 se obtiene de los ensayos previos realizados en procedimiento II expuestos en la Tabla 58, con una densidad media de 2,67gr/cm³.



a) Probeta FV con MAT.

b) Probeta FV con sin MAT.

Fig. 154. Deshilado y pesada de trama y urdimbre en tejido de fibra de vidrio UNI1200.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 60:

Tabla 60. Obtención del área a través del peso para tejido de fibra vidrio UNI 1200.

	Numero hilos (ud.)	Longitud (mm)	Anchura (mm)	Peso total (g)	Peso Urdimbre (g)	Área eficaz hilo (mm ² /hilo)
Probeta 1	73	102	151	21,01	17,95	0,90
Probeta 2	47	100	100	13,17	11,54	0,92
Probeta 3	74	120	155	27,92	22,09	0,93
Probeta 4	46	205	100	27,31	22,93	0,91
Probeta 5	-	-	-	-	-	-
Media	60,00	131,75	126,50	22,35	18,63	0,92

6. RESULTADOS

SD	15,60	49,65	30,64	6,87	5,20	0,01
COV (%)	22,52	32,64	20,98	26,63	24,19	1,17

*Datos obtenidos para $\rho = 2,67 \text{ g/cm}^3$.

De la tabla anterior se obtiene una sección eficaz de:

$$A_{\text{ef.hilo}} = (P / (\rho * L)) * \text{hilos} \quad [63]$$

$$A_{\text{ef.hilo}} = 0,92 \text{ mm}^2/\text{hilo} \quad [64]$$

En otros términos, se ha pasado esta cifra a mm^2 por cm de anchura de tejido, para lo cual se ha empleado el número de hilos por cm de material, que en este caso es de 4,98 hilos/cm (Tabla 55).

$$A_{\text{ef.tej}} = 0,92 \text{ mm}^2/\text{hilo} \times 4,98 \text{ hilos/cm} = 4,58 \text{ mm}^2/\text{cm} \quad [65]$$

6.2.3. Fibra de vidrio UNI 300

A. Procedimiento I: Identificación del área mediante medición estereoscópica

Determinación del número de hilos por cm

Para determinar el número de hilos por centímetro se ha procedido a medir el número de hilos (conjunto de filamentos unidireccionales) que se encuentran en una anchura de 150mm, realizando esta medición en distintos puntos sobre 5 muestras de tejido (Tabla 61).

Tabla 61. Número de hilos / cm de fibra de vidrio UNI-300.

150x150mm	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	MEDIA
Nº hilos	73	75	73	74	74	73,8
Anchura (cm)	15,1	15	14,8	15,3	15	15,0
Nº hilos / cm	4,85	5	4,9	4,85	4,92	4,90

Se obtiene un resultado medio de 4,90 hilos/cm.

Determinación del diámetro medio de los filamentos

Mediante el uso de técnicas de micro-estereoscópica, se realizaron 50 medidas en cada una de las 5 microfotografías (tomas) realizadas a 50 aumentos (Fig. 155), obteniéndose los resultados que se incluyen detallados en el Anexo.

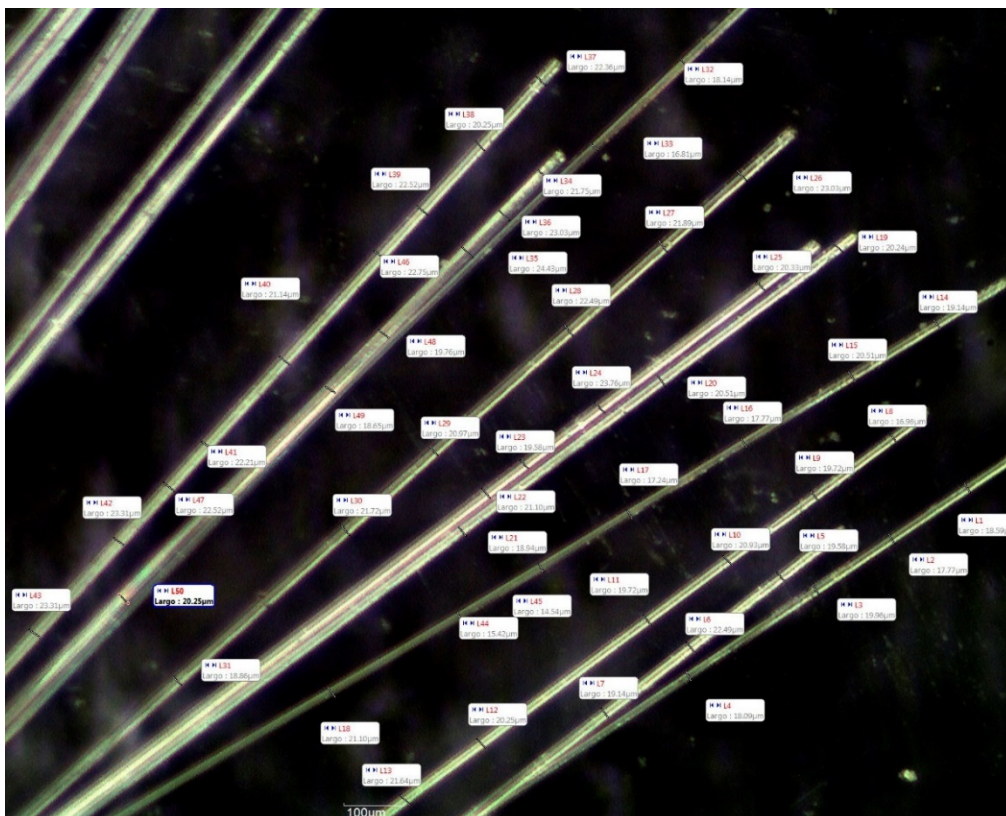


Fig. 155. Mediciones de los filamentos de fibra de vidrio UNI-300 realizadas en la micrografía "toma 5" (50x).

Los resultados medios de las mediciones se resumen en la Tabla 62:

Tabla 62. Determinación del diámetro medio del filamento UNI-300.

Medición mediante estereomicroscopía (aumento x50)					
	TOMA 1	TOMA 2	TOMA 3	TOMA 4	TOMA 5
Número de medidas	50	50	50	50	50
Media (µm)	20,09	20,73	20,71	21,02	20,34
Desviación típica (µm)	1,16	1,76	1,82	1,39	2,18
COV (%)	5,76	8,49	8,81	6,63	10,72
Diámetro medio de todas las tomas 20,58 µm					

Para la fibra Fv_UNI-300 se obtiene un diámetro medio del filamento de 20,58 µm.

Determinación del número medio de filamentos por hilo de material

Para establecer el número medio de filamentos por hilo de material, se ha procedido a contar una serie de 5 hilos de fibra de vidrio con la ayuda del estereomicroscopio. El número de filamentos contabilizado en cada hilo se muestran en la Tabla 63:

Tabla 63. Número medio de filamentos por hilo del tejido de fibra vidrio UNI 300.

Fv UNI 1200	HILO 1	HILO 2	HILO 3	HILO 4	HILO 5	MEDIA
N.º Filamentos	950	967	942	970	947	955

El número medio de filamentos medio por hilo fue de 955ud. Una vez conocido este dato, así como el diámetro medio de los filamentos, de 20,58 µm, se puede obtener la sección media por hilo de para el tejido de fibra de vidrio UNI 300 como:

$$A_{\text{ef.hilo}} = 955 \times \pi \times (0,02058/2)^2 = 0,318 \text{ mm}^2/\text{hilo} \quad [66]$$

Conocido este dato, se ha transformado esta cifra a mm^2/cm de anchura de tejido, para lo cual se ha empleado el número de hilos por cm de material, que en este caso es de 4,90 hilos/cm (Tabla 61); obteniéndose una sección eficaz de:

$$A_{\text{ef.tej}} = 0,318 \text{ mm}^2/\text{hilo} \times 4,90 \text{ hilos/cm} = 1,55 \text{ mm}^2/\text{cm} \quad [67]$$

B. Procedimiento II: Identificación del área mediante medición del volumen

Se han medido 5 muestras de fibra de dimensiones 150x150 mm, repitiendo el proceso descrito anteriormente 3 veces en cada probeta; y realizándose la media de estas mediciones para obtener un volumen medio (Tabla 64).

Tabla 64. Obtención del área eficaz mediante medición del volumen en tejido de fibra vidrio UNI 300.

	Peso seco probeta (g)	Peso húmedo (g)	Agua impregnada (g)	Peso agua derramada (g)	Volumen probeta (cm^3)	Área bruta (mm^2)	Área bruta hilo (mm^2/hilo)	Densidad (g/cm^3)
Probeta 1	28,85	41,99	13,16	27,37	14,21	94,73	0,320	2,03
Probeta 2	29,27	40,40	11,57	27,92	16,35	109,00	0,368	1,79
Probeta 3	27,05	42,57	13,74	30,44	16,7	111,33	0,376	1,62
Probeta 4	29,54	39,22	10,39	26,27	15,88	105,87	0,357	1,86
Probeta 5	27,83	40,28	11,45	27,63	16,18	107,87	0,364	1,72
Media	28,51	40,89	12,06	27,93	15,86	105,76	0,357	1,80
SD	1,04	1,36	1,36	1,54	0,97	6,47	0,022	0,15
COV (%)	3,26	2,98	10,11	4,93	5,47	5,47	5,47	7,65

Una vez determinado el área bruta equivalente de cada hilo sería necesario obtener el área real del tejido unidireccional. Se han medido 5 muestras de fibra de dimensiones 20x150 mm, para ello se deshila el tejido, y una vez eliminado el tejido secundario de trama (MAT) se determinando el porcentaje que representa el peso de los hilos unidireccionales respecto al peso total de las muestras. El resultado porcentual se recoge en la Tabla 65.

Tabla 65. Obtención de la relación tejido unidireccional / MAT para fibra de vidrio UNI-300.

	Muestra A	Muestra B	Muestra C	Muestra D	Muestra E	Media
Número hilos	10	9	9	9	7	
Peso medio hilos (g)	0,086	0,087	0,088	0,086	0,088	0,09
Peso total hilos (g)	0,86	0,78	0,80	0,77	0,62	0,76
Peso total muestra (g)	0,95	0,86	0,88	0,87	0,68	0,85
% peso hilos / muestra	90,63	90,70	90,34	88,51	90,44	90,12

La proporción trama-urdimbre: Urdimbre 90,12%, trama 9,88%.

Por lo tanto, el área neta de la urdimbre buscada será la resultante de aplicar al área equivalente obtenida el porcentaje de participación de la urdimbre:

$$A_{\text{ef.hilo}} = \text{Área bruta hilo} \times \text{porcentaje de urdimbre} \quad [68]$$

$$A_{\text{ef.hilo}} = 0,357 \times 90,12\% = 0,322 \text{ mm}^2/\text{hilo} \quad [69]$$

En otros términos, se ha pasado esta cifra a mm^2 por cm de anchura de tejido, para lo cual se ha empleado el número de hilos por cm de material, que en este caso es de 4,90 hilos/cm (Tabla 61).

$$A_{\text{ef.tej}} = 0,322 \text{ mm}^2/\text{hilo} \times 4,90 \text{ hilos/cm} = 1,576 \text{ mm}^2/\text{cm} \quad [70]$$

C. Procedimiento III. Identificación del área mediante medición del peso

Se han medido 5 muestras de fibra de dimensiones 20x150mm, deshilando y pesando el tejido unidireccional y la trama. La densidad media del tejido de fibra de vidrio UNI 1200 se obtiene de los

ensayos previos realizados en procedimiento II expuestos en la Tabla 64, con una densidad media de 1,80 gr/cm³.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 66:

Tabla 66. Obtención del área a través del peso para tejido de fibra vidrio UNI 300.

	Numero hilos (ud)	Longitud (mm)	Anchura (mm)	Peso total (g)	Peso Urdimbre (g)	Área eficaz hilo (mm ² /hilo)
Probeta 1	10	150	22	0,95	0,86	0,319
Probeta 2	9	148	20	0,86	0,78	0,325
Probeta 3	9	147	21	0,88	0,80	0,334
Probeta 4	9	150	20	0,87	0,77	0,317
Probeta 5	7	152	17	0,68	0,62	0,321
Media	8,80	149,40	20,00	0,85	0,76	0,323
SD	1,10	1,95	1,87	0,10	0,09	0,007
COV (%)	11,13	1,17	8,37	10,58	10,61	1,86

*Datos obtenidos para $\rho = 1,80 \text{ g/cm}^3$.

De la tabla anterior se obtiene una sección eficaz como:

$$A_{\text{ef.hilo}} = (P / (\rho * L)) * n^{\circ} \text{ hilos} \quad [71]$$

$$A_{\text{ef.hilo}} = 0,323 \text{ mm}^2/\text{hilo} \quad [72]$$

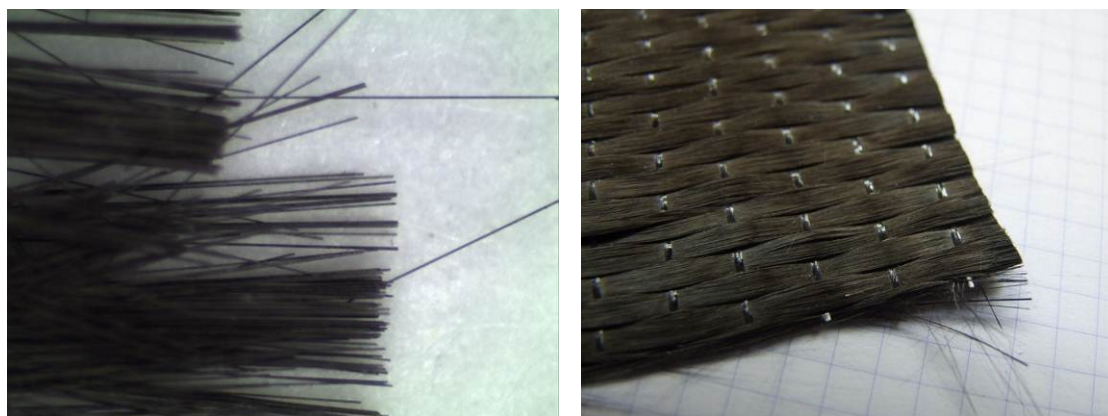
En otros términos, se ha pasado esta cifra a mm² por cm de anchura de tejido, para lo cual se ha empleado el número de hilos por cm de material, que en este caso es de 4,90 hilos/cm (Tabla 61).

$$A_{\text{ef.tej}} = 0,323 \text{ mm}^2/\text{hilo} * 4,90 \text{ hilos/cm} = 1,582 \text{ mm}^2/\text{cm} \quad [73]$$

6.2.4. Fibra de carbono UNI-230

A. Procedimiento I: Identificación del área mediante medición estereoscópica

Determinación del número de hilos por cm



a) Fibra de carbono a 50x aumentos.

b) Hilos de fibra de carbono.

Fig. 156. Tejido de fibra de carbono UNI-230.

Para determinar el número de hilos por centímetro se ha procedido a medir cuantos hilos (conjunto de filamentos unidireccionales) se encuentran en una anchura de 150 mm, realizando esta medición en distintos puntos sobre 5 muestras de tejido (Tabla 67).

Tabla 67. Número de hilos / cm de fibra de carbono UNI-230.

150x150mm	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	MEDIA
Nº hilos	41	44	43	41	41	42

6. RESULTADOS

Anchura (cm)	15	16	15,5	14,9	15	15,28
Nº hilos / cm	2,73	2,75	2,76	2,75	2,74	2,746

Se obtiene un resultado medio de 2,746 hilos/cm.

Determinación del diámetro medio de los filamentos

En el caso de la fibra de carbono, el reducido diámetro de sus filamentos no permite realizar una medición fiable y precisa con el equipo estereomicroscopio disponible. Por esta razón, se ha decidido desestimar este procedimiento para la fibra de carbono.

B. Procedimiento II: Identificación del área mediante medición del volumen

Se han medido 5 muestras de fibra de dimensiones 150x150 mm, repitiendo el proceso descrito anteriormente 3 veces en cada probeta; y realizándose la media de estas mediciones para obtener un volumen medio (Tabla 68).

Tabla 68. Obtención del área eficaz mediante medición del volumen en tejido de fibra de carbono UNI-230.

	Peso seco probeta (g)	Peso húmedo (g)	Agua impregnada (g)	Peso agua derramada (g)	Volumen probeta (cm ³)	Área bruta (mm ²)	Área bruta hilo (mm ² /hilo)	Densidad (g/cm ³)
Probeta 1	26,23	40,35	14,12	30,06	15,94	41,73	0,509	1,65
Probeta 2	29,94	39,59	13,36	28,12	14,76	38,64	0,471	1,78
Probeta 3	32,25	39,18	12,95	28,3	15,35	40,18	0,490	1,71
Probeta 4	34,60	39,22	12,99	28,92	15,93	41,70	0,509	1,65
Probeta 5	31,26	38,16	11,93	28,43	16,5	43,19	0,527	1,59
Media	30,86	39,30	13,07	28,77	15,70	41,09	0,501	1,67
SD	3,10	0,79	0,79	0,78	0,66	1,73	0,02	0,07
COV (%)	8,97	1,80	5,42	2,43	3,78	3,78	3,78	3,83

Una vez determinado el área bruta equivalente de cada hilo sería necesario obtener el área real del tejido unidireccional. Se han medido 5 muestras de fibra de dimensiones 20x150mm, para ello se deshila el tejido, y una vez eliminado el tejido secundario de trama (MAT) se determinando el porcentaje que representa el peso de los hilos unidireccionales respecto al peso total de las muestras. El resultado porcentual se recoge en la Tabla 69.

Tabla 69. Obtención de la relación tejido unidireccional / MAT para fibra de carbono UNI 230.

	Muestra A	Muestra B	Muestra C	Muestra D	MEDIA
Número hilos	14	8	9	10	-
Peso medio hilos (g)	0,219	0,220	0,217	0,220	0,22
Peso total hilos (g)	3,07	1,76	1,95	2,20	2,25
Peso total muestra (g)	3,11	1,78	1,98	2,23	2,28
% peso hilos / muestra	98,71	98,88	98,73	98,88	98,79

La proporción trama-urdimbre: Urdimbre 98,79%, trama 1,21%.

Por lo tanto, el área neta de la urdimbre buscada será la resultante de aplicar al área equivalente obtenida el porcentaje de participación de la urdimbre:

$$A_{\text{ef.hilo}} = \text{Área bruta hilo} \times \text{porcentaje de urdimbre} \quad [74]$$

$$A_{\text{ef.hilo}} = 0,501 \times 98,79\% = 0,495 \text{ mm}^2/\text{hilo} \quad [75]$$

En otros términos, se ha pasado esta cifra a mm² por cm de anchura de tejido, para lo cual se ha empleado el número de hilos por cm de material, que en este caso es de 2,746 hilos/cm (Tabla 67).

$$A_{\text{ef.tej}} = 0,495 \text{ mm}^2/\text{hilo} \times 2,746 \text{ hilos/cm} = 1,359 \text{ mm}^2/\text{cm} \quad [76]$$

C. Procedimiento III. Identificación del área mediante medición del peso

Se han medido 4 muestras de fibra de dimensiones 150x150 mm, deshilando y pesando el tejido unidireccional y la trama. La densidad media del tejido de fibra de carbono se obtiene de los ensayos previos realizados en procedimiento II expuestos en la Tabla 68, con una densidad media de 1,67gr/cm³.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 70:

Tabla 70. Obtención del área a través del peso para tejido de fibra de carbono UNI-230.

	Numero hilos (ud)	Longitud (mm)	Anchura (mm)	Peso total (g)	Peso Urdimbre (g)	Área eficaz hilo (mm ² /hilo)
Probeta 1	14	29,40	5,1	3,11	3,07	0,492
Probeta 2	8	27,75	2,9	1,78	1,76	0,493
Probeta 3	9	26,15	3,27	1,975	1,95	0,486
Probeta 4	10	25,85	3,67	2,225	2,2	0,493
Probeta 5	13	24,55	4,74	2,88	2,85	0,491
Media	10,25	26,70	3,74	2,39	2,37	0,491
SD	2,63	1,87	0,96	0,58	0,57	0,003
COV (%)	22,22%	6,26%	22,32%	21,54%	21,53%	0,56%

**Datos obtenidos para $\rho = 1,67 \text{ g/cm}^3$.*

De la tabla anterior se obtiene una sección eficaz de:

$$A_{\text{ef.hilo}} = (P/(\rho * L)) * n^{\circ} \text{ hilos} \quad [77]$$

$$A_{\text{ef.hilo}} = 0,491 \text{ mm}^2/\text{hilo} \quad [78]$$

En otros términos, se ha pasado esta cifra a mm² por cm de anchura de tejido, para lo cual se ha empleado el número de hilos por cm de material, que en este caso es de 2,746 hilos/cm (Tabla 67).

$$A_{\text{ef.tej}} = 0,491 \text{ mm}^2/\text{hilo} \times 2,746 \text{ hilos/cm} = 1,348 \text{ mm}^2/\text{cm} \quad [79]$$

6.2.5. Laminados rígidos

Los laminados se fabrican *ex proceso* para la realización de esta investigación por lo que, conocidos y caracterizados los tejidos de refuerzo, puede determinarse las propiedades del laminado como un conjunto tejido-resina.

A partir de los datos obtenidos durante los ensayos de caracterización de los tejidos (Apartado 6.2) el área eficaz de la fibra longitudinal por cada unidad de anchura del tejido tiene un valor medio de 1,587 mm²/cm para la fibra de vidrio UNI-300, y de 4,85 mm²/cm para la fibra de vidrio UNI-1200. Conocido este valor propio de cada tejido puede estimarse el área eficaz de fibra unidireccional de cada laminado de refuerzo midiendo su anchura. Comparando el área eficaz de fibra unidireccional estimada, y el área neta de cada probeta de laminado medido, puede obtenerse el porcentaje de fibra unidireccional del refuerzo. Este dato influye en la resistencia a tracción y rigidez de los laminados, puesto que la influencia y resistencia de la resina a tracción se supone nula.

Los porcentajes medios de fibra longitudinal de los distintos laminados de fibra de vidrio ensayados se resumen en la Tabla 71, recogiendo los datos de cada una de las probetas en el Anexo.

Tabla 71. Obtención del porcentaje fibra longitudinal de los laminados de fibra de vidrio ensayados.

	Laminado UNI 300 (14ud.)			Laminado UNI 1200 (22ud.)			Laminado UNI 2400 (22ud.)		
	A _{neto} (mm ²)	A _{fibra} (mm ²)	Porcentaje fibra long. (%)	A _{neto} (mm ²)	A _{fibra} (mm ²)	Porcentaje fibra long. (%)	A _{neto} (mm ²)	A _{fibra} (mm ²)	Porcentaje fibra long. (%)
Media	6,39	2,33	36,76	30,49	6,93	22,77	47,57	13,78	29,23

6. RESULTADOS

Min.	5,68	2,25	28,85	28,41	6,77	21,35	40,85	13,60	25,21
Max.	7,89	2,39	39,68	32,16	7,30	24,28	54,99	14,03	33,30
SD	0,67	0,04	3,49	1,14	0,13	0,88	4,57	0,10	2,80
COV (%)	10,03	1,66	9,15	3,64	1,85	3,75	9,33	0,73	9,32

Del mismo modo, durante los ensayos de caracterización del tejido se obtuvo la relación entre la trama (tejido unidireccional) y la urdimbre (tejido secundario) de los distintos tejidos de refuerzo utilizados (Tabla 72).

Tabla 72. Proporción trama / urdimbre de los tejidos de refuerzo (Ver Apartado 6.2).

	Tejido UNI 300	Tejido UNI 1200
TRAMA o tejido longitudinal (%)	90,12	84,03
URDIMBRE o tejido secundario (%)	9,88	15,97

Por lo que puede determinarse con precisión el volumen de resina del laminado, y obtener a partir de la relación resina/fibra la densidad real del laminado (Tabla 73).

Tabla 73. Densidad de los laminados a partir del porcentaje de volumen de fibra y resina.

	Unidades	Laminado UNI 300	Laminado UNI 1200	Laminado UNI 2400
Trama o tejido longitudinal	(%Volumen)	36,76	22,77	29,23
Urdimbre o tejido secundario	(%Volumen)	4,03	4,34	5,55
Resina	(%Volumen)	59,21	72,89	65,22
Densidad fibra	(kg/m ³)	2600	2670	2670
Densidad resina Resichim 317	(kg/m ³)	-	1200	1200
Densidad resina Epovia Optimun KRF 4436AI	(kg/m ³)	1100	-	-
Densidad laminado de refuerzo	(kg/m³)	1711,85	1598,52	1711,27

El número mínimo de probetas a ensayar normativamente (ISO-527-5:2010⁵⁴⁶) es de 5 unidades, aunque la norma recomienda un número más amplio de mediciones si se quiere obtener una mayor precisión en el valor medio. Siguiendo esta recomendación se realiza un ensayo sobre 14 probetas (GFRP UNI300) y 22 probetas (GFRP UNI1200 / GFRP UNI2400) tipo ISO 527-5/B de los dos tipos de banda de refuerzo.

Las dimensiones medias de las probetas ensayadas se exponen en la Tabla 74, recogiéndose individualmente los valores de cada probeta ensayada en el Anexo.

Tabla 74. Dimensiones medias de los distintos tipos de probetas de laminado de fibra de vidrio.

	Laminado UNI 300 (14ud.)			Laminado UNI 1200 (22ud.)			Laminado UNI 2400 (22ud.)		
	L (mm)	b (mm)	h (mm)	L (mm)	b (mm)	h (mm)	L (mm)	b (mm)	h (mm)
Media	249,24	0,44	14,67	250,17	2,13	14,33	250,22	3,34	14,24
Min.	247,30	0,40	14,20	249,20	1,99	13,98	249,30	2,91	14,05
Max.	251,00	0,55	15,05	251,80	2,27	15,09	251,80	3,84	14,49
SD	1,12	0,05	0,25	0,68	0,08	0,28	0,65	0,32	0,11
COV (%)	0,43	10,11	1,66	0,27	3,76	1,87	0,25	9,36	0,73

6.2.6. Discusión de los resultados

Los resultados finales obtenidos por los distintos procedimientos se resumen en la Tabla 75 con su área eficaz por cada hilo para los distintos tejidos.

Tabla 75. Resumen de los valores medios de los resultados obtenidos del área eficaz de hilo para los distintos tipos de tejido.

	Área eficaz de cada hilo (mm ² /hilo)			
	Procedimiento I	Procedimiento II	Procedimiento III	Adoptado*
Fibra de lino	0,286	0,288	0,262	0,288

⁵⁴⁶ Norma UNE-EN-ISO 527-5:2010 Op. cit.

Fibra de vidrio [UNI 300]	0,318	0,322	0,323	0,323
Fibra de vidrio [UNI 1200]	0,972	1,010	0,920	1,010
Fibra de carbono	-	0,495	0,491	0,495

*Se adopta el valor más conservador para la obtención de la tensión máxima del tejido.

Y en la Tabla 76 con su área eficaz por cada centímetro de anchura:

Tabla 76. Resumen de los valores medios de los resultados obtenidos del área eficaz para los distintos tipos de tejido.

	Área eficaz por cada centímetro de tejido (mm ² /cm)			
	Procedimiento I	Procedimiento II	Procedimiento III	Adoptado*
Fibra de lino	3,352	3,261	3,051	3,352
Fibra de vidrio [UNI 300]	1,557	1,587	1,577	1,587
Fibra de vidrio [UNI 1200]	4,84	5,02	4,81	5,02
Fibra de carbono	-	1,371	1,347	1,371

*Se adopta el valor más conservador para la obtención de la tensión máxima del tejido.

Como puede observarse en ambas tablas, los resultados obtenidos por los distintos procedimientos son semejantes, existiendo ligeras diferencias (<10%) debidas posiblemente a imprecisiones en la medida como consecuencia de los diminutos diámetros de los filamentos medidos. No obstante, la homogeneidad de los resultados obtenidos por procedimientos paralelos e independientes permite garantizar la validez de los mismo.

Además de los valores medios del área eficaz de los distintos tejidos, dato imprescindible para obtener la tensión de rotura y módulos de elasticidad en los posteriores ensayos a tracción de las fibras, se obtuvieron otras propiedades importantes de los tejidos que permiten caracterizarlas. En la Tabla 77 se detallan los gramajes medios de cada tejido obtenidos a partir de ensayo, en comparación con los gramajes especificados por el fabricante. La unidad de medida para el gramaje en tejidos según el sistema internacional es el TEX (masa en gramos por cada 1.000 metros de fibra). Sin embargo, en este caso donde los tejidos van a utilizarse como bandas de refuerzo, parte de ellas embebidas en resina formado matrices rígidas, es más útil expresar el gramaje unidireccional por unidad de superficie (g/m²).

Tabla 77. Determinación del gramaje (peso por unidad de superficie) de los distintos tejidos.

	Gramaje medio (g/m ²)			
	Gramaje total	Gramaje unidireccional	Gramaje trama	Gramaje declarado (ficha técnica)
Fibra de lino	491,73	443,69	48,04	UNI 300+50 trama
Fibra de vidrio [UNI 300]	349,53	315,00	34,53	UNI 300
Fibra de vidrio [UNI 1200]	1378,59	1156,40	229,75	UNI 1200+300 MAT
Fibra de carbono	230,75	227,96	2,79	UNI 230

Otras propiedades importantes de los tejidos, como su diámetro, distribución o densidad se recogen en la Tabla 78:

Tabla 78. Otras propiedades de los distintos tejidos.

	Diámetro medio (μm)	N.º Hilos (hilos/cm)	Densidad (g/cm ³)	Porcentaje de tejido unidireccional (%)
Fibra de lino	20,16	11,69	1,31	90,23
Fibra de vidrio [UNI 300]	20,58	4,90	1,80	90,12
Fibra de vidrio [UNI 1200]	19,90	4,98	2,67	84,03
Fibra de carbono	Aprox. <5*	2,74	1,67	98,79

* Los diámetros de los filamentos no han podido medirse con suficiente precisión por no alcanzar la medida mínima del equipo.

Los valores medios del diámetro de filamento para fibra de vidrio y fibra de carbono son similares a los expuestos por Cardarelli 2008⁵⁴⁷, con diámetro micrométricos menores a 20 μm para la fibra de vidrio, y de 10 μm para la fibra de carbono. Similares también, aunque ligeramente superiores, a los publicados por Alann 2006⁵⁴⁸, con diámetros de filamento de 14 μm para fibra de vidrio E, y 7 μm para fibra de carbono. En cuanto a las densidades de las fibras, los valores obtenidos mediante ensayo son similares a los publicados en el informe técnico del FIB 2007⁵⁴⁹, con densidades de 2,14 a 2,54 g/cm^3 para la fibra de vidrio, y de 1,53 a 2,02 g/cm^3 para la fibra de carbono; aunque la densidad obtenida para la fibra de vidrio UNI 300 (1,80 g/cm^3) es ligeramente baja para este tipo de tejido, e inferior a la declarada por su fabricante (2,50 g/cm^3).

La composición del tejido (n° hilos/cm y porcentaje de tejido unidireccional) no depende tanto del tipo de tejido como del propio fabricante, por lo que no puede realizarse una comparación directa con otras investigaciones. Si bien este dato es importante para posteriormente, en los refuerzos de vigas, poder determinarse el porcentaje de fibra unidireccional empleado en el refuerzo en comparación con la sección total de la viga.

6.3. Fibras naturales de refuerzo

En este apartado se muestran los resultados obtenidos de los ensayos a tracción realizados sobre varios refuerzos de origen natural.

Se seleccionan para su ensayo chapas de madera de varias especies y tejido de lino; descritos en el apartado 3.2.2 de esta tesis. Las dimensiones medias de las probetas ensayadas se exponen en la Tabla 79, recogiéndose individualmente todos los valores de cada probeta en el Anexo.

Tabla 79. Dimensiones medias de los distintos tipos de probetas de materiales naturales y orgánicos ensayadas.

#	Chapa de roble (<i>Q. alba</i>)				Chapa de roble (<i>Q. robur</i>)				Chapa de arce (<i>Acer sp.</i>)			
	L (mm)	b (mm)	h (mm)	A (mm^2)	L (mm)	b (mm)	h (mm)	A (mm^2)	L (mm)	b (mm)	h (mm)	A (mm^2)
	18				12				12			
Media	189,90	0,57	25,87	14,75	200,30	0,95	24,75	23,52	200,30	1,15	24,81	28,53
Min.	188,60	-	24,00	13,68	199,90	-	23,90	22,71	199,70	-	21,38	24,59
Max.	191,00	-	27,50	15,68	201,30	-	25,72	24,43	201,80	-	25,60	29,44
SD	0,85	-	1,04	0,60	0,38	-	0,50	0,47	0,54	-	1,14	1,31
COV (%)	0,43	-	3,90	3,90	0,18	-	1,93	1,93	0,26	-	4,40	4,40

#	Chapa de bambú (Natural)				Chapa de bambú (Tostado)				Tejido de lino (UNI300)			
	L (mm)	b (mm)	h (mm)	A (mm^2)	L (mm)	b (mm)	h (mm)	A (mm^2)	L (mm)	b (mm)	h (mm)	A _{fibra} (mm^2)
	6				6				12			
Media	199,90	0,65	25,02	16,26	199,10	0,65	24,97	16,23	199,10	0,80	19,72	6,61
Min.	199,00	-	24,60	15,99	197,80	-	24,70	16,06	197,30	-	18,80	6,30
Max.	200,50	-	25,40	16,51	201,10	-	25,20	16,38	201,00	-	20,60	6,91
SD	0,63	-	0,29	0,19	1,19	-	0,21	0,13	1,17	-	0,65	0,22
COV (%)	0,29	-	1,04	1,04	0,55	-	0,76	0,76	0,56	-	3,14	3,14

Los principales objetivos de estos ensayos son:

- Caracterizar los materiales seleccionados, determinando su resistencia a tracción paralela en rotura, y su módulo de elasticidad a tracción.
- Comparar las prestaciones mecánicas de los distintos materiales ensayados.
- Determinar su idoneidad, o no, para su empleo como refuerzos estructurales en secciones de madera.

⁵⁴⁷ Cardarelli (2008) Op. cit.

⁵⁴⁸ Alann (2006) Op. cit.

⁵⁴⁹ Fédération internationale du béton (FIB) (2007) Op. cit.

6.3.1. Resultados

De los ensayos a tracción realizados sobre las probetas de materiales naturales se obtienen los resultados que permiten caracterizar sus propiedades mecánicas (Tabla 80), fundamentalmente a partir de la tensión máxima de rotura y módulo de elasticidad, ambos a tracción.

Tabla 80. Resultados de tensión de rotura y módulo de elasticidad a tracción para los distintos materiales naturales.

Chapa de roble (<i>Quercus alba</i>)			Chapa de roble (<i>Quercus robur</i>)			Chapa de arce (<i>Acer sp.</i>)		
#	Tensión (MPa)	MOE (MPa)	#	Tensión (MPa)	MOE (MPa)	#	Tensión (MPa)	MOE (MPa)
R[QA]_01	41,92	8.139	R[QR]_01	32,98	5010	Ar_01	116,08	7109
R[QA]_02	39,65	7.975	R[QR]_02	30,87	4905	Ar_02	136,08	6799
R[QA]_03	57,48	8.659	R[QR]_03	41,77	6137	Ar_03	147,86	7499
R[QA]_04	28,96	7.794	R[QR]_04	31,34	5388	Ar_04	167,26	8008
R[QA]_05	56,53	9.015	R[QR]_05	44,02	6590	Ar_05	148,64	7909
R[QA]_06	58,98	8.952	R[QR]_06	44,90	6380	Ar_06	88,76	7236
R[QA]_07	38,29	7.492	R[QR]_07	38,79	5953	Ar_07	148,05	8241
R[QA]_08	-	-	R[QR]_08	56,75	6773	Ar_08	149,91	7949
R[QA]_09	41,53	7.323	R[QR]_09	16,56	5633	Ar_09	105,48	8382
R[QA]_10	-	-	R[QR]_10	22,79	5414	Ar_10	120,29	8507
R[QA]_11	36,85	6.937	R[QR]_11	44,29	6182	Ar_11	156,17	8636
R[QA]_12	40,76	6.771	R[QR]_12	27,03	6469	Ar_12	142,12	8089
R[QA]_13	48,94	7.574	-	-	-	-	-	-
R[QA]_14	55,27	10.494	-	-	-	-	-	-
R[QA]_15	70,05	9.630	-	-	-	-	-	-
R[QA]_16	68,92	8.305	-	-	-	-	-	-
R[QA]_17	54,72	8.227	-	-	-	-	-	-
R[QA]_18	-	-	-	-	-	-	-	-
Media	49,26	8219,13	Media	36,01	5902,69	Media	135,56	7863,62
Mínimo	28,96	6771,00	Mínimo	16,56	4905,40	Mínimo	88,76	6798,70
Máximo	70,05	10494,00	Máximo	56,75	6772,70	Máximo	167,26	8636,40
SD	12,14	1009,69	SD	11,18	623,79	SD	23,09	582,60
COV (%)	23,81	11,87	COV (%)	29,72	10,12	COV (%)	16,31	7,09
Valor-P(*)	0,6261	0,9540	Valor-P(*)	0,9876	0,9591	Valor-P(*)	0,7065	0,6646

*Comprobación estadística de normalidad de resultados según Prueba de Kolmogorov-Smirnov.

Chapa de bambú (Natural)			Chapa de bambú (Tostado)			Tejido de lino (UNI300)		
#	Tensión (MPa)	MOE (MPa)	#	Tensión (MPa)	MOE (MPa)	#	Tensión (MPa)	MOE (MPa)
Bn_01	59,60	8.979	Bt_01	13,68	4.601	Fl_01	161,10	8371
Bn_02	75,67	8.216	Bt_02	16,37	3.565	Fl_02	160,36	8307
Bn_03	52,88	8.515	Bt_03	27,32	4.327	Fl_03	161,47	6591
Bn_04	43,42	7.850	Bt_04	19,41	3.830	Fl_04	196,02	6416
Bn_05	77,96	8.359	Bt_05	20,70	4.460	Fl_05	162,71	6256
Bn_06	139,75	7.750	Bt_06	26,31	4.151	Fl_06	160,11	6109
-	-	-	-	-	-	Fl_07	158,72	7205
-	-	-	-	-	-	Fl_08	162,49	5465
-	-	-	-	-	-	Fl_09	168,20	7753
-	-	-	-	-	-	Fl_10	171,60	6042
-	-	-	-	-	-	Fl_11	179,96	4882
-	-	-	-	-	-	Fl_12	153,06	4682
Media	74,88	8278,02	Media	20,63	4155,77	Media	166,32	6506,58
Mínimo	43,42	7749,70	Mínimo	13,68	3564,80	Mínimo	153,06	4682,00
Máximo	139,75	8979,20	Máximo	27,32	4601,10	Máximo	196,02	8371,00
SD	34,43	451,81	SD	5,38	393,89	SD	11,62	1215,96
COV (%)	41,97	4,98	COV (%)	23,82	8,65	COV (%)	6,69	17,89
Valor-P(*)	0,6623	0,9975	Valor-P(*)	0,9842	0,9957	Valor-P(*)	0,2716	0,6269

*Comprobación estadística de normalidad de resultados según Prueba de Kolmogorov-Smirnov.

Los datos recogidos se someten previamente a un estudio estadístico de normalidad según la prueba de Kolmogorov-Smirnov para determinar si pueden modelarse de acuerdo con una distribución normal. En el conjunto de datos con un valor-P mayor o igual a 0,05, no puede rechazarse la idea de que los datos provienen de una distribución normal con un 95% de confianza. Tal y como se muestra en la Tabla 80, todos los datos presentan una distribución normal.

A. Módulos de elasticidad a tracción

En la Fig. 157 se muestran los resultados obtenidos para las distintas probetas ensayadas, individualmente y sus valores medios.

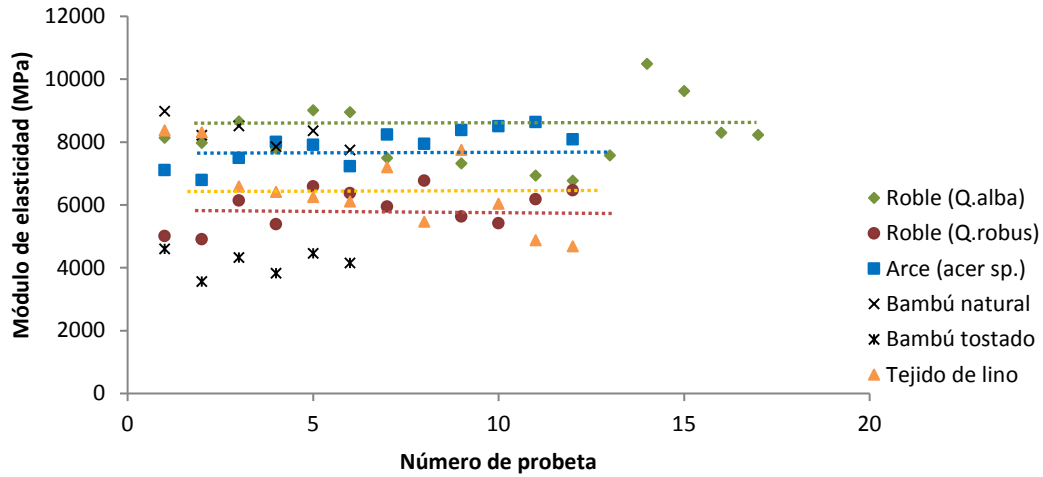


Fig. 157. Gráfico de puntos con los valores de módulo de elasticidad de las probetas de materiales naturales.

Los seis materiales ensayados (chapa de roble americano, roble europeo, arce, bambú natural, bambú tostado, y tejido de lino) presentan un comportamiento semejante, con valores de módulo de elasticidad inferiores en todos los casos a los 10.000 MPa. Sin embargo, pueden diferenciarse dos grupos de refuerzo; por un lado, las probetas de roble americano, arce y bambú natural, con valores medios de módulo de elasticidad de 8.219 MPa, 7.863 MPa, y 8.278 MPa respectivamente, que muestran los mejores comportamientos. Y por otro lado las probetas de roble europeo, tejido de lino y bambú tostado, con valores medios de 5.902 MPa, 6.506 MPa, y 4.155 MPa respectivamente, que muestran el peor comportamiento.

No obstante, como puede comprobarse en el gráfico de caja y bigotes de la Fig. 158, el comportamiento de todos los refuerzos, con estas pequeñas diferencias entre módulos de elasticidad, presentan en general un bajo rendimiento con resultados sin diferencias reseñables entre ellos.

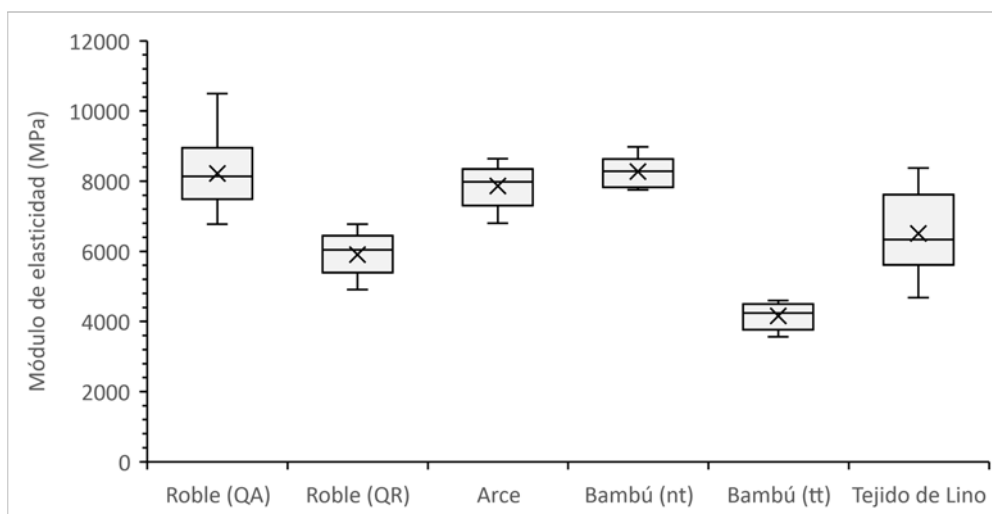


Fig. 158. Gráfico de cajas y bigotes con los valores de módulo de elasticidad para los distintos materiales naturales.

Para comparar las prestaciones de los distintos materiales naturales de refuerzo y determinar sus diferencias, se realiza una prueba estadística (Tabla 81) de múltiples rangos a partir de las medias y el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher Fig. 159.

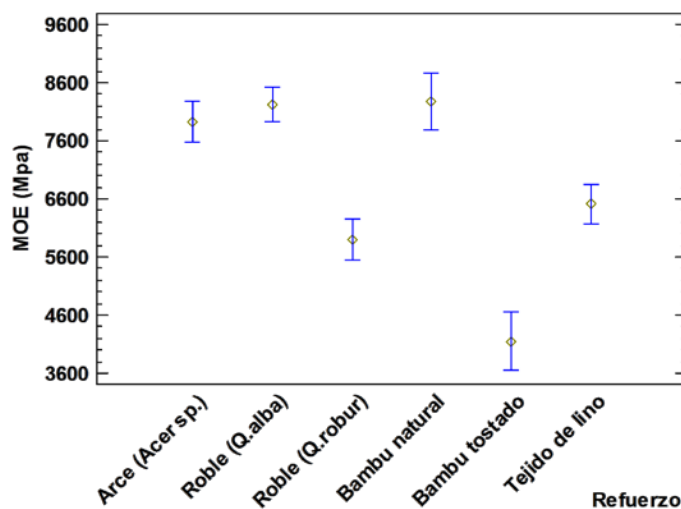


Fig. 159. Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para refuerzos naturales.

Comprobación de la homogeneidad entre grupos (Tabla 81):

Tabla 81. Estudio de homogeneidad entre grupos de refuerzos naturales.

Tipo	Refuerzos naturales		Grupos Homogéneos*		
	Casos	Media (MPa)			
Roble (Quercus alba)	18	8219,13	-	-	X
Roble (Quercus robur)	12	5902,69	-	X	-
Arce (Acer sp.)	12	7863,62	-	-	X
Bambú natural	6	8278,02	-	-	X
Bambú tostado	6	4155,77	X	-	-
Tejido de lino	12	6506,58	-	X	-

*Método: 95,0 porcentaje de Fisher LSD

De este estudio de homogeneidad puede extraerse que las probetas forman 3 grupos independientes con comportamientos estadísticamente independientes; el roble americano, arce y bambú natural forman un grupo independiente, las probetas roble europeo y el lino forman otro grupo independiente, y el bambú tostado otro.

B. Resistencia a tracción longitudinal en rotura

En la Fig. 160 se muestran los resultados de resistencia a tracción longitudinal en rotura obtenidos para las distintas probetas ensayadas.

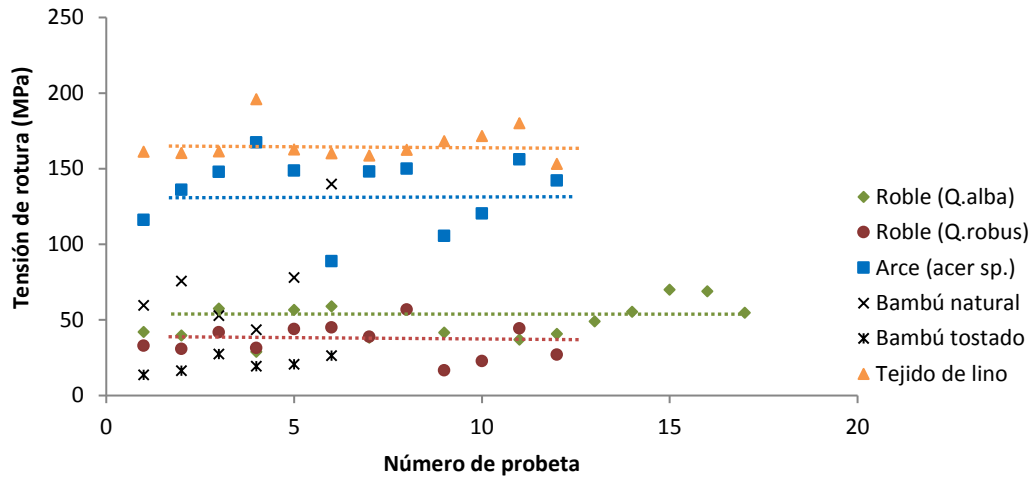


Fig. 160. Gráfico de puntos con los valores de tensión de rotura de los refuerzos naturales ensayados.

Los mayores valores son obtenidos con el refuerzo de tejido de lino, con una tensión de rotura a tracción media de 166 MPa. De los refuerzos de madera, el que mayores tensiones medias ha alcanzado es la madera de arce, con 135 MPa. El resto de los refuerzos se encuentran en un escalón de resistencia inferior con tensiones medias de 20 MPa (Bambú tostado) a 74 MPa (Bambú natural).

En el gráfico de cajas y bigotes de la Fig. 161 se comparan los valores de resistencia a tracción, pudiéndose observar claramente el comportamiento entre grupos anteriormente descrito.

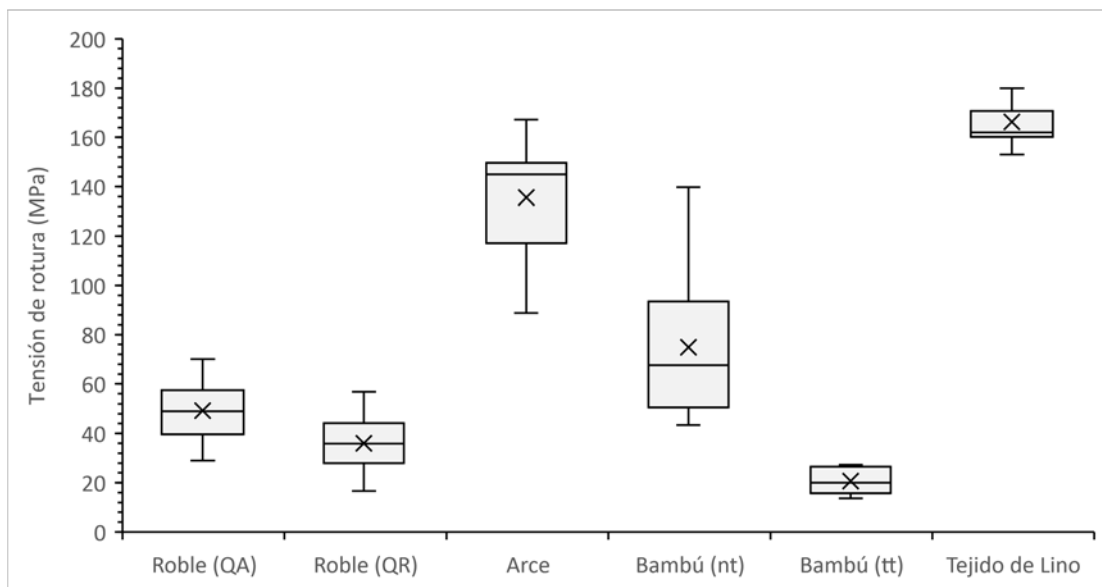


Fig. 161. Gráfico de caja y bigotes de la tensión de rotura de los refuerzos naturales ensayados.

6.3.2. Discusión de los resultados

Los resultados obtenidos muestran unos módulos de elasticidad inferiores a los 10.000 MPa en todos los refuerzos ensayados. Estos valores son sensiblemente inferiores a los publicados por Alann⁵⁵⁰ para diferentes refuerzos de fibras naturales, superiores todos ellos a los 18.000 MPa.

⁵⁵⁰ Alann (2006) Op. cit.

En todo caso, considerando los módulos de elasticidad de la madera de chopo (>8.000 MPa) y pino pinaster (>9.000 MPa), las prestaciones mecánicas de los materiales naturales ensayados son insuficientes para su uso como refuerzo estructural.

6.4. Fibras sintéticas I: tejidos

En este capítulo se caracterizan a tracción distintos tejidos de refuerzo de origen sintético con el fin de comparar sus prestaciones mecánicas. Para ello se seleccionan varios tejidos y se fabrican, miden y ensayan probetas para obtener, principalmente, su resistencia a tracción paralela y su módulo de elasticidad a tracción.

Los principales objetivos de este capítulo son:

- Desarrollar y poner a punto procedimientos eficaces para ensayar en tracción los materiales de refuerzo seleccionados para este estudio.
- Aplicarlos para conocer la resistencia a tracción y el correspondiente Módulo de Elasticidad.
- Deducir y estudiar las gráficas de tensión-deformación de los materiales.
- Elegir finalmente el más adecuado para su empleo en el refuerzo de las vigas dúo de madera de chopo y pino pinaster.

Se seleccionan para su ensayo los tejidos de fibra de vidrio unidireccional tipo UNI-300 y UNI-1200, y el tejido de fibra de carbono unidireccional tipo UNI-230; descritos en el apartado 3.2.3 de esta tesis. Las dimensiones medias de las probetas ensayadas se exponen en la Tabla 82, recogiendo individualmente todos los valores de cada probeta en el Anexo.

Tabla 82. Dimensiones medias de los distintos tipos de probetas de tejidos sintéticos ensayadas.

	Tejido Fv UNI 300				Tejido FV UNI 1200				Tejido Fc UNI 230			
	L (mm)	b (mm)	h (mm)	A _{fibra} (mm ²)	L (mm)	b (mm)	h (mm)	A _{fibra} (mm ²)	L (mm)	b (mm)	h (mm)	A _{fibra} (mm ²)
#	12				18				16			
Media	189,0	0,24	28,58	4,54	194,2	1,05	25,22	12,66	209,6	0,16	18,27	2,50
Min.	182,8	0,22	27,82	4,42	188,0	0,95	24,80	12,45	203,5	0,16	17,68	2,42
Max.	194,2	0,26	29,32	4,65	204,1	1,20	25,60	12,85	217,6	0,18	19,08	2,62
SD	2,66	0,01	0,46	0,07	6,72	0,06	0,19	0,10	4,35	0,01	0,42	0,06
COV (%)	1,35	5,65	1,53	1,53	3,37	5,12	0,74	0,74	2,01	4,77	2,24	2,24

El área real de fibra (A_{fibra}) de cada uno de los tejidos se obtiene a partir de los datos obtenidos durante los ensayos de caracterización de los tejidos (Capítulo 6.2); con un valor medio de 1,587 mm²/cm para la fibra de vidrio UNI-300, de 5,02 mm²/cm para la fibra de vidrio UNI-1200, y de 1,37 mm²/cm para la fibra de carbono UNI-230. Conocido este valor propio de cada tejido puede estimarse el área real de fibra unidireccional de cada laminado de refuerzo midiendo su anchura.

6.4.1. Resultados

De los ensayos a tracción realizados sobre las probetas de los tejidos de fibra de vidrio y fibra de carbono se obtienen los resultados que permiten caracterizar sus propiedades mecánicas (Tabla 83), fundamentalmente a partir de la tensión máxima de rotura y módulo de elasticidad, ambos a tracción.

Tabla 83. Resultados de tensión de rotura y módulo de elasticidad a tracción para los distintos tejidos ensayados.

Tejido Fv UNI-300			Tejido Fv UNI-1200			Tejido Fc UNI-230		
#	Tensión (MPa)	MOE (MPa)	#	Tensión (MPa)	MOE (MPa)	#	Tensión (MPa)	MOE (MPa)
Fv1_01	698,41	29.885	Fv2_01	599,97	12.297	Fc_01	1.633,01	146.897
Fv1_02	784,77	29.372	Fv2_02	747,40	14.913	Fc_02	1.511,16	144.334
Fv1_03	801,55	30.998	Fv2_03	624,12	13.746	Fc_03	1.875,23	157.576
Fv1_04	701,06	30.982	Fv2_04	646,02	12.935	Fc_04	1.089,13	139.800
Fv1_05	711,82	30.482	Fv2_05	588,24	9.249	Fc_05	748,92	110.595
Fv1_06	681,32	27.351	Fv2_06	842,30	13.422	Fc_06	2.033,92	154.660
Fv1_07	753,09	29.617	Fv2_07	658,17	11.265	Fc_07	1.891,64	160.767
Fv1_08	683,08	29.736	Fv2_08	742,34	12.896	Fc_08	1.565,35	160.097
Fv1_09	701,06	28.322	Fv2_09	750,78	12.709	Fc_09	710,31	110.136
Fv1_10	687,43	28.586	Fv2_10	-	-	Fc_10	688,84	123.424
Fv1_11	663,17	27.339	Fv2_11	660,60	11.402	Fc_11	1.669,03	152.563
Fv1_12	731,71	30.201	Fv2_12	757,44	11.920	Fc_12	1.544,27	161.394
-	-	-	Fv2_13	-	-	Fc_13	1.130,74	146.205
-	-	-	Fv2_14	668,24	12.294	Fc_14	1.616,79	140.752
-	-	-	Fv2_15	670,62	12.587	Fc_15	1.516,32	151.252
-	-	-	Fv2_16	677,13	12.274	Fc_16	1.974,29	164.781
-	-	-	Fv2_17	-	-	-	-	-
-	-	-	Fv2_18	813,48	12.967	-	-	-
-	-	-	Fv2_19	809,86	11.868	-	-	-
-	-	-	Fv2_20	802,32	12.051	-	-	-
-	-	-	Fv2_21	763,61	12.184	-	-	-
Media	716,54	29.405,92	Media	712,37	12.387,76	Media	1.449,94	14.5327,06
Mínimo	663,17	27.339,00	Mínimo	588,24	9.248,98	Mínimo	688,84	11.0136,00
Máximo	801,55	30.998,00	Máximo	842,30	14.912,91	Máximo	2.033,92	16.4781,00
SD	43,00	1.262,57	SD	78,12	1.165,34	SD	445,83	17.122,93
COV (%)	5,74	4,11	COV (%)	10,66	9,14	COV (%)	29,77	11,41
Valor-P(*)	0,5842	0,3192	Valor-P(*)	0,6467	0,1964	Valor-P(*)	0,3070	0,2173

*Comprobación estadística de normalidad de resultados según Prueba de Kolmogorov-Smirnov.

Los datos recogidos se someten previamente a un estudio estadístico de normalidad según la prueba de Kolmogorov-Smirnov para determinar si pueden modelarse de acuerdo con una distribución normal. En el conjunto de datos con un valor-P mayor o igual a 0,05, no puede rechazarse la idea de que los datos provienen de una distribución normal con un 95% de confianza. Tal y como se muestra en la Tabla 83, todos los datos presentan una distribución normal.

A. Módulos de elasticidad a tracción

En la Fig. 162 se muestran los resultados obtenidos para las distintas probetas ensayadas, individualmente y sus valores medios.

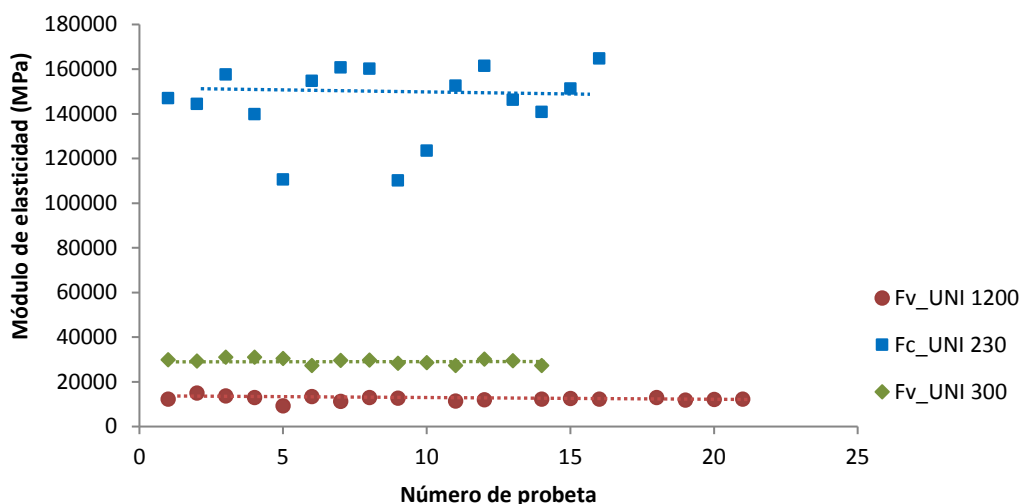


Fig. 162. Gráfico de puntos con los valores de módulo de elasticidad obtenidos para los distintos tejidos ensayados.

Los resultados obtenidos muestran una clara diferencia entre los tejidos de fibra de vidrio y de fibra de carbono. De los tejidos de fibra de vidrio ensayados, los resultados más elevados se alcanzan con el tejido UNI-300 (12 ud), con módulos de elasticidad medios a tracción de 29.405 MPa. Además, este tejido presenta una variación en los valores bajo (COV=4,11%), inferior al resto de tejidos ensayados. El tejido de fibra de vidrio UNI-1200 (18 ud) alcanza resultados bajos, con módulos de elasticidad medios a tracción de 12.387 MPa, siendo el valor más alto 14.912 MPa. Este resultado representa una pérdida del 57,8% de rigidez respecto al tejido UNI-300, pese a que ambos tejidos son del mismo tipo. Esta anomalía puede ser explicada por la composición de ambos tejidos. El tejido UNI-300 es un tejido de gramaje ligero, con una composición fundamentalmente unidireccional estando compuesta por un 90,12% de filamentos en dirección longitudinal (Tabla 78). Por el contrario, el tejido UNI-1200, de gramaje medio, incorpora en su estructura un tejido secundario tipo MAT para facilitar el fluido de la resina durante los procesos de infusión, disponiendo un 84,03% filamentos en dirección longitudinal y un 15,97% de tejido secundario (Tabla 78). Los ensayos se han realizado con probetas de tejido original, sin deshilar o retirar los tejidos secundarios, por lo que es posible que el tejido MAT haya influido negativamente. En cuanto a las probetas de fibra de carbono UNI-230 ensayadas (16 ud) alcanzan un módulo de elasticidad medio a tracción de 145.327MPa, con un valor mínimo de 110.136 MPa, y un valor máximo de 164.781 MPa. Este resultado es extremadamente alto en comparación con los módulos de elasticidad de la madera (<10.000 MPa), representado un incremento de rigidez del 394,2% respecto la fibra de vidrio UNI-300, y del 1.073,2% respecto a la fibra de vidrio UNI-1200 ensayadas.

En el gráfico de caja y bigotes de la Fig. 163 puede compararse claramente este diferenciado comportamiento entre los distintos tejidos.

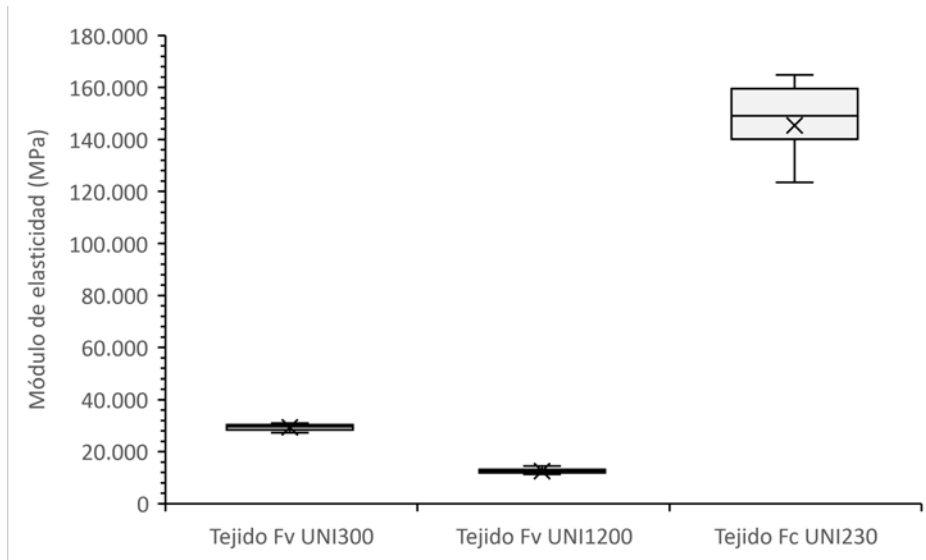


Fig. 163. Gráfico de cajas y bigotes con los valores de módulo de elasticidad para los distintos tejido ensayados.

Para comparar las prestaciones de rigidez de los distintos tejidos de refuerzo sintético y determinar sus diferencias, se realiza una prueba estadística de múltiples rangos a partir de las medias (Tabla 84) y el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher (Fig. 164).

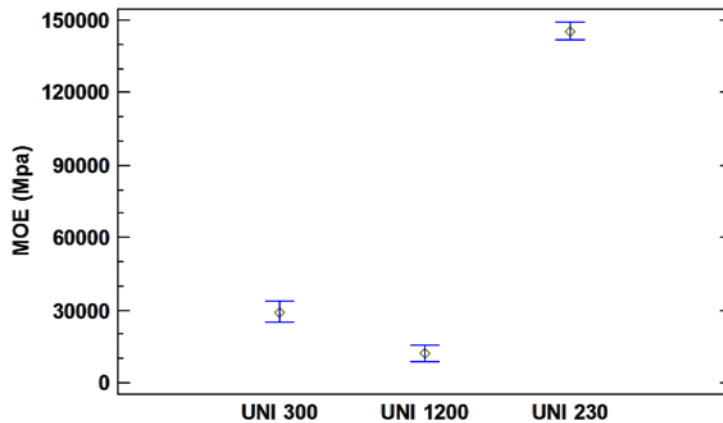


Fig. 164. Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para tejidos de refuerzo sintético.

La comprobación de la homogeneidad entre grupos (Tabla 84) muestra diferencias entre los tres tejidos sintéticos analizados.

Tabla 84. Estudio de homogeneidad entre grupos de refuerzos sintéticos.

Tipo	Tejidos de refuerzo sintético		Grupos Homogéneos*		
	Casos	Media (MPa)			
Tejido Fv UNI-300	12	29.405,92	X	-	-
Tejido Fv UNI-1200	18	12.387,76	-	X	-
Tejido Fc UNI-230	16	145.327,06	-	-	X

*Método: 95,0 porcentaje de Fisher LSD

De este estudio de homogeneidad puede extraerse que, todos los tejidos sintéticos ensayados forman grupos independientes con comportamientos estadísticamente diferenciados.

B. Resistencia a tracción longitudinal en rotura

En la Tabla 164 se muestran los resultados de resistencia a tracción longitudinal obtenidos para las distintas probetas ensayadas, individualmente y sus valores medios.

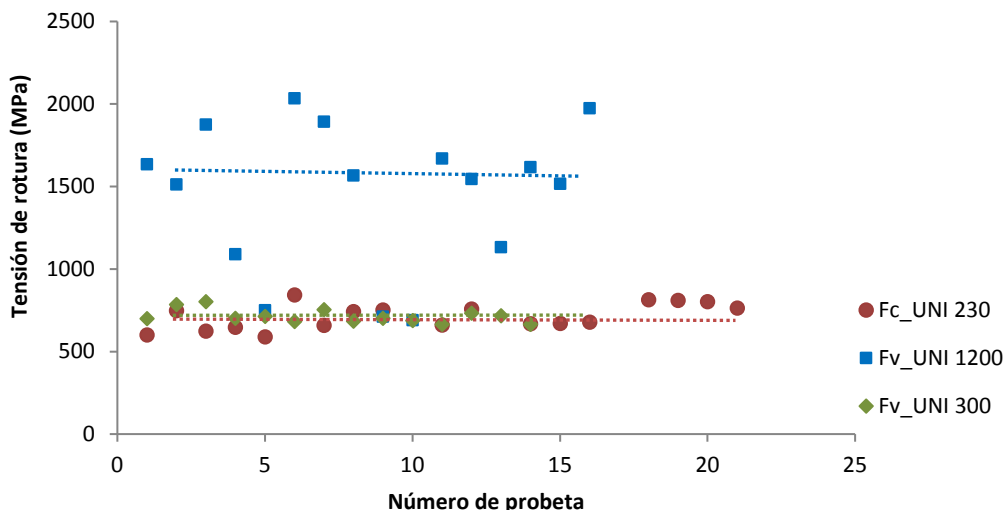


Fig. 165. Gráfico de cajas y bigotes con los valores de tensión de rotura para los distintos tejido ensayados.

Los resultados obtenidos muestran, nuevamente y como era esperable, una clara diferencia entre los tejidos de fibra de vidrio y de fibra de carbono. Los tejidos de fibra de vidrio muestran idéntico comportamiento entre ambos tipos de tejidos, UNI-300 y UNI-1200, obteniendo un valor de tensión de rotura medio de 716 y 712 MPa respectivamente. Es razonable que dos tejidos del mismo material alcancen similares tensiones de rotura; si bien el distinto gramaje produce su rotura bajo cargas muy diferentes: fuerza de rotura media de 3,25 kN para las probetas UNI-300, frente a los 9,02 kN de las probetas UNI-1200.

En cuanto al tejido de fibra de carbono UNI-230, alcanza valores de tensión de rotura medios de 1450 MPa. No obstante, lo que destaca de estos resultados es su gran variabilidad, con un coeficiente de variación del 30%, y unos valores máximos de 2033 MPa frente a unos mínimos de 688MPa. Esta variabilidad de resultados puede observarse claramente en el gráfico de caja y bigotes de la Fig. 166, donde destaca la amplitud de la caja del tejido de fibra de carbono en comparación con las probetas de fibra de vidrio.

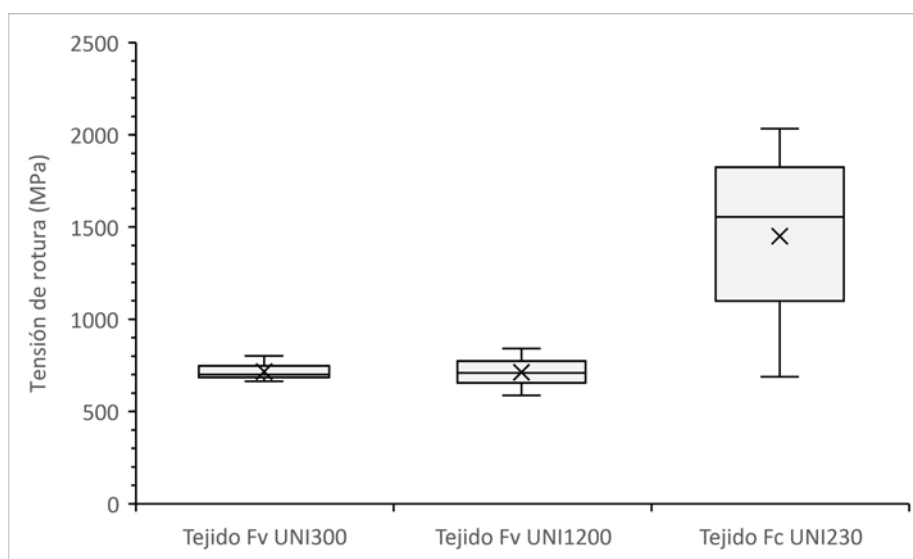


Fig. 166. Gráfico de cajas y bigotes con los valores de tensión de rotura para los distintos tejido ensayados.

6.4.2. Discusión de los resultados

Los valores de módulo de elasticidad obtenidos mediante ensayo son inferiores a los valores declarados en las fichas técnicas de los fabricantes (apartado 3.2.3). Así para el tejido de fibra de vidrio UNI-300, el fabricante declara un módulo de elasticidad de 73.000 MPa, obteniéndose únicamente mediante ensayo un módulo de 29.405 MPa, un 40% inferior. Similares resultados se han obtenido para la fibra de vidrio UNI1200, con un módulo de elasticidad declarado por el fabricante de >70.000 MPa, obteniéndose únicamente 12.387 MPa, un 18% del valor esperado. Mismo resultado ha sido obtenido con la fibra de carbono UNI-230, aunque con una menor diferencia: de los 234.000 MPa declarados se ha obtenido experimentalmente un módulo de elasticidad de 145.327 MPa, un 62% del valor declarado. Comparados con los valores publicados por otros autores^{551, 552}, la fibra de vidrio E-Glass alcanza valores >70.000 MPa, y la fibra de carbono >240.000 MPa, lo que indica igualmente lo anómalo de los datos recogidos.

Con todo ello, parece sensato afirmar que la metodología realizada no es suficientemente fiable para el ensayo de este tipo de tejidos de alto módulo elástico. El uso de tacones intermedios para garantizar la adherencia a las mordazas puede ser uno de los causantes de estas anomalías, siendo preciso en futuros ensayos el empleo de equipos de ensayo con mordazas específicamente diseñadas para este tipo de tejido, no disponibles actualmente en los laboratorios en los que se han desarrollado estos ensayos.

6.5. Fibras sintéticas II: laminados rígidos

De los resultados obtenidos en el apartado anterior, puede observarse como la fibra de vidrio presenta la mejor relación prestaciones mecánicas/precio. Por esta razón, se fabrican laminados rígidos de fibra de vidrio unidireccional embebida en matrices de resina mediante técnicas de infusión por vacío. En este capítulo se ensayan a tracción varios laminados con distintos gramajes para determinar su resistencia a tracción y su módulo de elasticidad.

Los objetivos parciales de este apartado son:

- Conocer la resistencia a tracción y el módulo de elasticidad de los laminados de refuerzo elegidos.
- Estudiar, en base a los datos obtenidos en los ensayos, las gráficas tensión-deformación; de cuya pendiente se obtendrá el módulo de elasticidad del material.
- Comparar las prestaciones de los distintos laminados de refuerzo ensayados.

6.5.1. Resultados

De los ensayos a tracción realizados sobre las probetas de laminados de fibra de vidrio se obtienen los resultados que permiten caracterizar sus propiedades mecánicas (Tabla 85), fundamentalmente a partir de la tensión máxima de rotura y módulo de elasticidad, ambos a tracción.

Tabla 85. Resultados de tensión de rotura y módulo de elasticidad a tracción para los distintos laminados ensayados.

Laminado UNI-300			Laminado UNI-1200			Laminado UNI-2400		
#	Tensión (MPa)	MOE (MPa)	#	Tensión (MPa)	MOE (MPa)	#	Tensión (MPa)	MOE (MPa)
RFv1_01	358,39	41.064	RFv2_01	-	-	RFv3_01	496,17	28.449
RFv1_02	305,48	44.472	RFv2_02	-	-	RFv3_02	594,59	30.245
RFv1_03	327,44	46.907	RFv2_03	500,50	20.214	RFv3_03	639,17	29.727

⁵⁵¹ Jacob et al. (2007) Op. cit.

⁵⁵² Fédération internationale du béton (FIB) (2007) Op. cit.

RFv1_04	197,37	40.297	RFv2_04	435,17	23.158	RFv3_04	603,05	29.604
RFv1_05	277,61	42.932	RFv2_05	519,56	22.344	RFv3_05	585,36	24.991
RFv1_06	345,49	44.914	RFv2_06	454,82	23.013	RFv3_06	555,45	25.772
RFv1_07	429,68	25.989	RFv2_07	430,71	20.558	RFv3_07	511,55	27.866
RFv1_08	343,67	43.244	RFv2_08	417,92	21.206	RFv3_08	632,29	26.854
RFv1_09	226,28	38.925	RFv2_09	436,56	21.609	RFv3_09	-	-
RFv1_10	332,31	45.604	RFv2_10	498,33	21.323	RFv3_10	-	-
RFv1_11	339,15	37.510	RFv2_11	430,13	21.410	RFv3_11	-	-
RFv1_12	385,10	41.896	RFv2_12	421,86	22.469	RFv3_12	608,79	29.169
RFv1_13	269,48	40.472	RFv2_13	426,00	19.975	RFv3_13	554,83	25.769
RFv1_14	336,28	43.228	RFv2_14	467,45	21.505	RFv3_14	542,67	25.121
-	-	-	RFv2_15	474,10	21.529	RFv3_15	588,20	26.982
-	-	-	RFv2_16	478,70	21.777	RFv3_16	527,50	22.464
-	-	-	RFv2_17	473,14	22.077	RFv3_17	519,20	23.937
-	-	-	RFv2_18	460,77	22.936	RFv3_18	555,48	25.181
-	-	-	RFv2_19	460,05	20.591	RFv3_19	628,85	27.724
-	-	-	RFv2_20	449,48	22.315	RFv3_20	-	-
-	-	-	RFv2_21	454,24	20.494	RFv3_21	568,52	24.358
-	-	-	RFv2_22	-	-	RFv3_22	619,28	28.449
Media	311,08	42.420,38	Media	457,34	21.605,42	Media	573,94	26.814,56
Mínimo	197,37	37.510,00	Mínimo	417,92	19.975,00	Mínimo	496,17	22.464,00
Máximo	385,10	46.907,00	Máximo	519,56	23.158,00	Máximo	639,17	30.245,00
SD	54,09	2.723,88	SD	28,64	956,21	SD	43,86	2.238,23
COV (%)	16,71	6,17	COV (%)	6,26	4,43	COV (%)	7,64	8,35
Valor-P(*)	0,6652	0,6918	Valor-P(*)	0,8827	0,8757	Valor-P(*)	0,9853	0,8391

*Comprobación estadística de normalidad de resultados según Prueba de Kolmogorov-Smirnov.

Los datos recogidos se someten previamente a un estudio estadístico de normalidad según la prueba de Kolmogorov-Smirnov para determinar si pueden modelarse de acuerdo con una distribución normal. En el conjunto de datos con un valor-P mayor o igual a 0,05, no puede rechazarse la idea de que los datos provienen de una distribución normal con un 95% de confianza. Tal y como se muestra en la Tabla 85, todos los datos presentan una distribución normal.

A. Módulo de elasticidad a tracción

MOE para laminados UNI-300

De las 14 probetas disponibles para la realización de los ensayos se ha eliminado la probeta RFv1.07 por obtenerse un valor con una desviación superior al 60% respecto al valor medio, siendo la única de todas las probetas que muestra una desviación tan marcada. Con los datos restantes (13 probetas válidas) se ha obtenido un módulo de elasticidad a tracción medio de 42.420 MPa. Siendo el valor máximo el registrado por la probeta RFv.03=46.907 Mpa, y el mínimo la probeta RFv.11 = 37.510 MPa; ambos valores dentro de la amplitud del 20% respecto al valor medio. Los valores de las distintas probetas presentan una buena uniformidad, con un coeficiente de variación del 6,17%. Esta homogeneidad en los valores permite reconocer un material con un comportamiento suficientemente homogéneo y predecible para su uso como material de refuerzo estructural.

MOE para laminados UNI-1200

De las 22 probetas disponibles para la realización de los ensayos se han eliminado las probetas RFv2.01, RFv2.02, y la probeta RFv2.22, por detectarse rotura en mordaza. Con los datos restantes (19 probetas válidas) se ha obtenido un Módulo de elasticidad a tracción medio de 21.605 MPa. Siendo el valor máximo el registrado por la probeta RFv2.04=23.158 MPa; y el mínimo la probeta RFv2.13=19.975 MPa; ambos valores dentro de la amplitud del 20% respecto al valor medio. Los valores de las distintas probetas se muestran una buena uniformidad, con un coeficiente de variación del 4,31%. Esta homogeneidad en los valores permite reconocer un material con un comportamiento suficientemente homogéneo y predecible para su uso como material de refuerzo estructural.

MOE para laminados UNI-2400

De las 22 probetas disponibles para la realización de los ensayos se han eliminado las probetas RFv3_09, RFv3_10, RFv3_11, y RFv3_22, por rotura de la probeta en mordaza. Con los datos obtenidos de las 18 probetas válidas restantes se ha obtenido un módulo de elasticidad a tracción medio de 26.815 MPa. Siendo el valor máximo el registrado por la probeta RFv3_02=30.245 MPa; y el mínimo la probeta RFv3_16=22.464 MPa, ambos valores dentro de la amplitud del 20% respecto al valor medio. Los valores MOE de cada probeta presentan una buena uniformidad, con un coeficiente de variación del 8,11%. Esta homogeneidad en los valores permite reconocer un material con un comportamiento suficientemente homogéneo y predecible para su uso como material de refuerzo estructural.

Los distintos valores de módulo de elasticidad se representan en la Fig. 167.

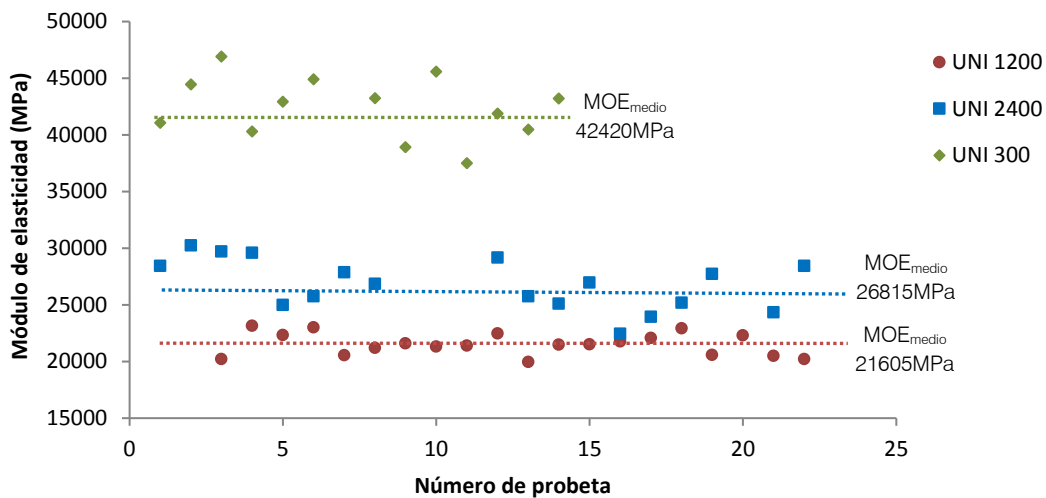


Fig. 167. Gráfico de punto con los valores de módulo de elasticidad de los laminado de fibra de vidrio ensayados.

Comparación de valores de MOE

En el gráfico de cajas y bicotes de la Fig. 168 puede compararse el comportamiento de los tres laminados de fibra de vidrio ensayados.

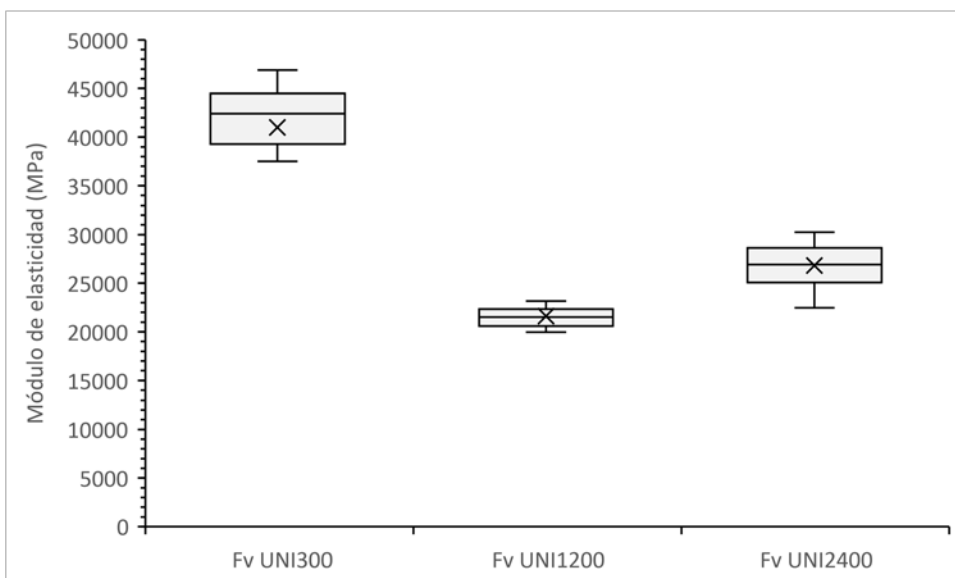


Fig. 168. Gráfico de caja y bicotes con los valores de módulo de elasticidad a tracción para los distintos laminados.

En este gráfico puede observarse que, pese a tratarse de refuerzos conformados con tejidos de fibra de vidrio, sus valores medios de módulo de elasticidad no son semejantes. Destaca la mayor rigidez de los laminados de fibra de vidrio UNI-300, con módulos de elasticidad a tracción de 42.420 MPa, en comparación con los otros los laminados de refuerzo UNI-2400 (MOE=26.815 MPa) y laminados UNI-1200 (MOE=21.605 MPa). En la Tabla 86 se comparan los incrementos de módulo de elasticidad entre los laminados ensayados.

Tabla 86. Comparación de los módulos de elasticidad entre refuerzos.

Tipo de refuerzo	Casos #	MOE medio (MPa)	Comparación (%)
Laminado GFRP UNI-300	14	42.420,38±2.723,88	+49,07
Laminado GFRP UNI-1200	19	21.605,42±956,21	-
Laminado GFRP UNI-2400	18	26.814,56±2.238,23	+19,43

*Porcentajes de mejora obtenidos respecto al laminado GFRP UNI1200

Los mayores valores en rigidez, alcanzados por el laminado de menor gramaje, se debe al proceso de fabricación, en el cual la relación fibra refuerzo/resina varía en proporción de una serie a otra por motivos de fluidez e impregnación de la fibra durante la infusión por vacío. A menor gramaje de fibra y menor longitud de los laminados de refuerzo finales, es posible obtener una mejor ratio de fibra/resina y aumentar el módulo de elasticidad del conjunto. Los porcentajes de fibra presentes en cada uno de los refuerzos se muestran en la Tabla 71, con porcentajes medios de 36,76%; 22,77%, y 29,23% para cada tipo de laminado (UNI300 a UNI2400).

En el gráfico de la Fig. 169, se representa las pendientes tensión/deformación de las diferentes probetas ensayadas en el tramo elástico del ensayo, medidas las deformaciones con el extensómetro.

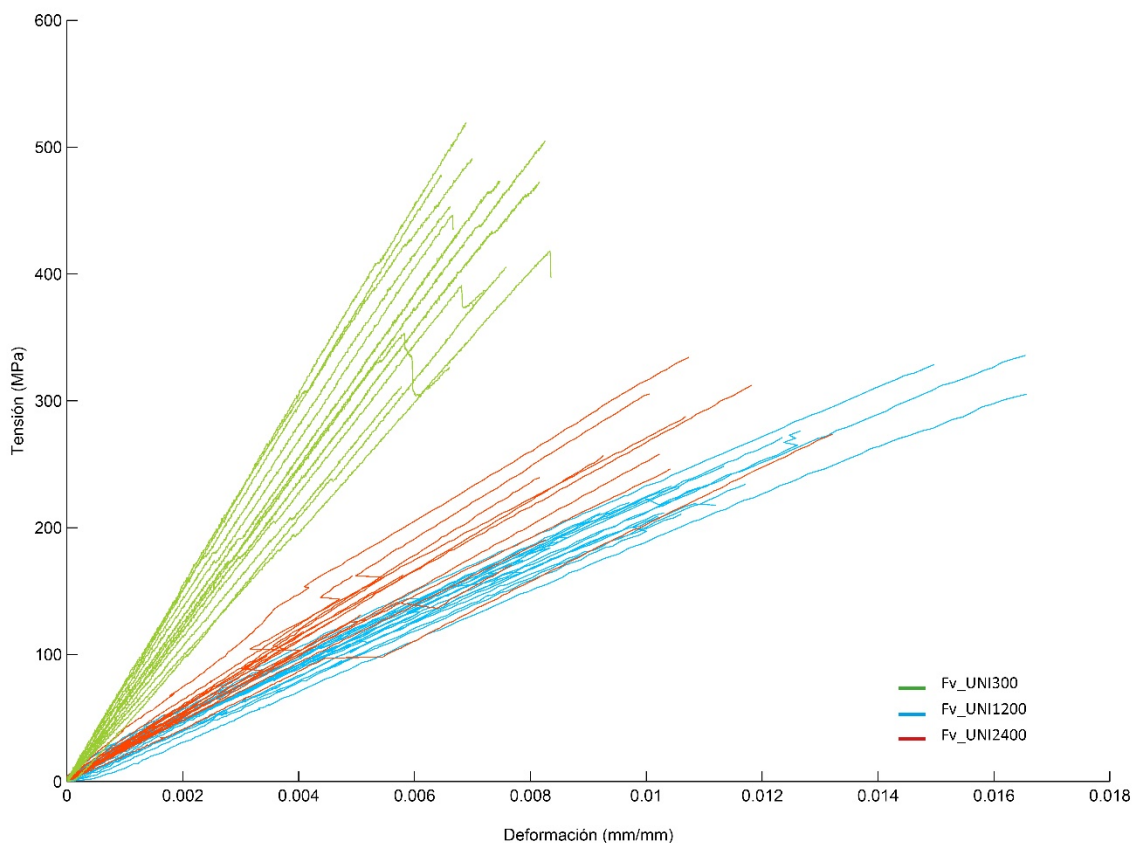


Fig. 169. Gráfico módulo de elasticidad a tracción comparativo de los laminados de fibra de vidrio.

Comparativamente los laminados de refuerzo tipo UNI-300 son más eficientes que el resto, presentado una mayor pendiente, y buen agrupamiento de rectas. Puede observarse también que el laminado UNI-2400, compuesto de dos mantas de tejido UNI1200, no presenta valores de rigidez equivalentes, mejorando su comportamiento únicamente en un 20%.

Para comparar las prestaciones de los distintos laminados de refuerzo, y determinar sus diferencias, se realiza una prueba estadística de múltiples rangos a partir de las medias y el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher (Fig. 170).

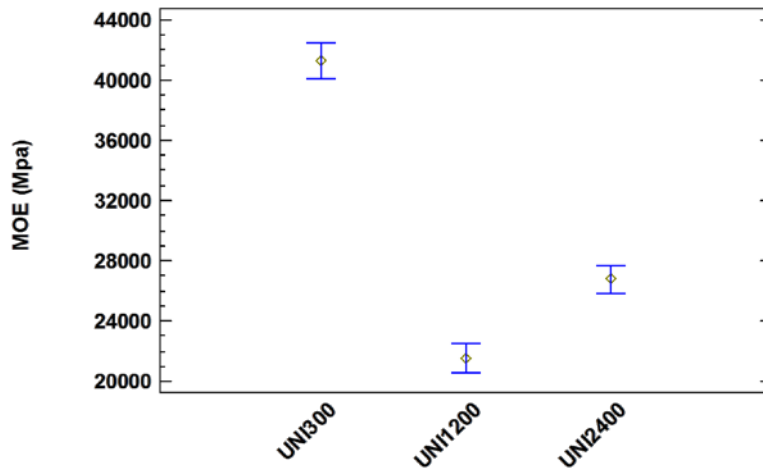


Fig. 170. Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para laminados de refuerzo de fibra de vidrio.

Comprobación de la homogeneidad entre grupo:

Tabla 87. Estudio de homogeneidad entre grupos de laminados de refuerzo de fibra de vidrio.

Tipo laminado	Casos	Media (MPa)	Grupos Homogéneos*		
UNI-300	13	42.420,38	-	-	X
UNI-1200	19	21.605,42	X	-	-
UNI-2400	18	26.814,56	-	X	-

*Método: 95,0 porcentaje de Fisher LSD

Del estudio de homogeneidad expuesto en la Fig. 170 y Tabla 87 puede extraerse que, todos los laminados forman grupos independientes con comportamientos estadísticamente diferenciados.

B. Resistencia a tracción longitudinal en rotura

Con los datos obtenidos de los ensayos a tracción con laminados tipo UNI-300 muestran una tensión de rotura media de 311 MPa. Siendo el valor máximo el registrado por la probeta RF1_04=197 MPa; y el mínimo la probeta RF1_12=385 MPa. Para los laminados tipo UNI-1200, la tensión de rotura media es significativamente superior, con un incremento de tensión de aproximadamente el 47%, alcanzado valores medios de 457MPa. Con un valor máximo el registrado por la probeta RFv2_05=519 MPa; y el mínimo la probeta RFv2_108=417 MPa. La misma tendencia se muestra en los laminados UNI-2400, con mejoras del 84% en comparación con el laminado UNI-300; y mejoras del 25% respecto al laminado UNI-1200; con valores de tensión de rotura medios de 573 MPa. Siendo el valor máximo el registrado por la probeta RFv3_03= 639 MPa, y el mínimo la probeta RFv3_01=496 MPa.

Los distintos valores de tensión de rotura se representan en la Fig. 171.

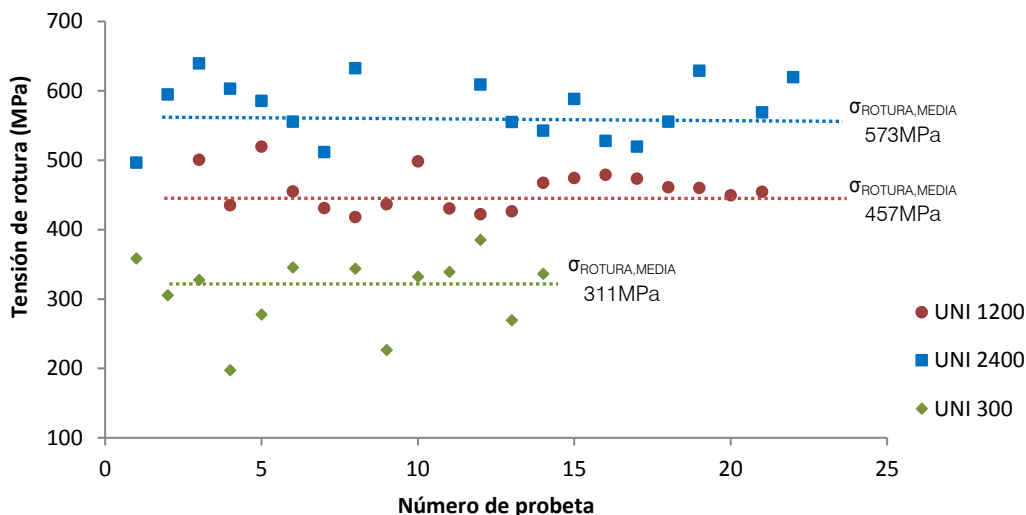


Fig. 171. Gráfico de punto con los valores de tensión de rotura de los laminado de fibra de vidrio ensayados.

Comparación de valores de tensión de rotura

En el gráfico de caja y bigotes de la Fig. 172 se comparan los valores de tensión de rotura alcanzados para el conjunto de los laminados ensayados, pudiéndose observar claramente las sensibles diferencias marcadas entre los distintos grupos.

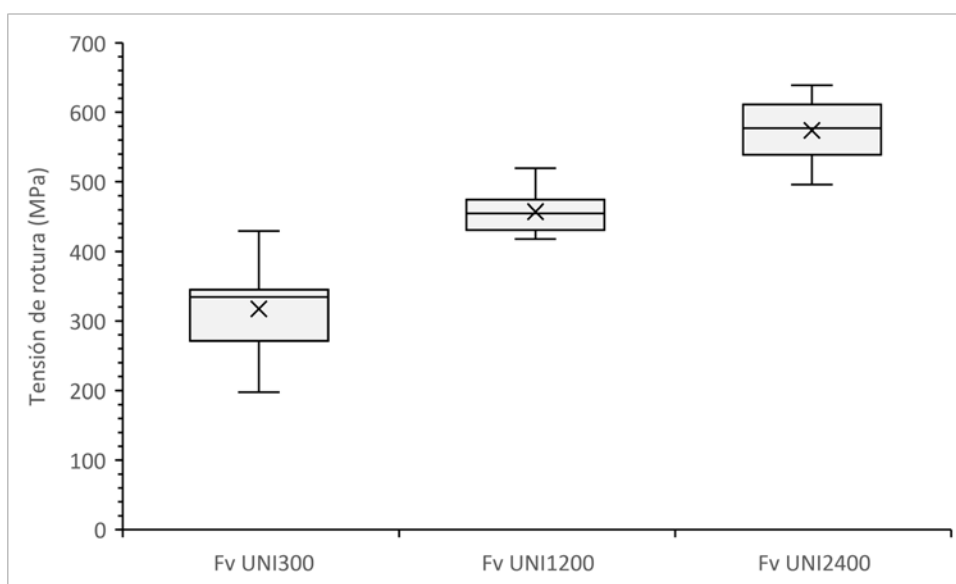


Fig. 172. Gráfico caja y bigotes de la tensión de rotura de los distintos laminados de fibra de vidrio ensayados.

Puede verse como la tensión de rotura de los laminados de refuerzo UNI-2400 es superior al resto, existiendo una marcada diferencia incluso con el refuerzo UNI-1200, pese a que en el punto anterior mostraban módulos de elasticidad relativamente próximos.

6.5.2. Discusión de los resultados

Los laminados utilizados en esta investigación han sido fabricados por infusión de vacío en empresas de Castilla y León. La tecnología utilizada ha permitido fabricar laminados con un porcentaje de fibra inferiores del 40% del volumen total. Según datos publicados en el Mil Handbook

1999⁵⁵³, la ratio de refuerzo de los laminados utilizados en esta investigación puede asemejarse a un refuerzo de calidad media, dentro de los estándares de este tipo de material, con ratios máximos del 70% para laminados de máximas prestaciones fabricados por pultrusión, y de menos del 15% para laminaciones realizadas in situ.

Sin embargo, los valores de módulo de elasticidad alcanzados son bajos en comparación con los valores máximos de laminados comerciales fabricados mediante pultrusión. De acuerdo con los datos publicados por Matthys 2013⁵⁵⁴ para laminados de fibra de vidrio tipo los valores máximos de los laminados varían de 55.000-72.000MPa, mientras que las probetas ensayadas alcanzan valores medios de 23.000-42.000 MPa, en todo caso inferiores. De acuerdo con lo publicado por Matthys 2016⁵⁵⁵, las variaciones en los módulos de elasticidad de los refuerzos FRP están fuertemente relacionadas con los condicionantes de fabricación y la ratio de fibra presente en el refuerzo. Esto explica que el refuerzo de menor gramaje ensayado (UNI300), más fácilmente impregnable y con láminas de refuerzo menores (Longitud=1200mm), alcance mejores ratios de fibra en la matriz (36,76% fibra) y por consiguiente mayores módulos de elasticidad que los laminados UNI-1200 (ratio 22,77% fibra) y el laminado UNI-2400 (ratio 29,23% fibra) con mayores gramajes totales de fibra de vidrio. No obstante, en la resistencia a tracción del laminado esta diferencia de gramaje sí que marcará una diferencia clara en las tensiones de rotura.

En cuanto a la resistencia a tracción longitudinal del refuerzo en rotura, los valores alcanzados por los laminados UNI-1200 y UNI-2400 se sitúan en torno a los 500 MPa (con ratios de fibra <25%). Estos valores son aceptables y normales en comparación con los valores publicados en el informe técnico FIB 2007⁵⁵⁶ para laminados con ratios de fibra <55%, de 1080 MPa; teniendo en cuenta la relación porcentual de fibra del refuerzo y los valores de tensión máxima.

6.6. Adhesivos estructurales

En este apartado se exponen los resultados de los ensayos realizados sobre el comportamiento de los distintos adhesivos estudiados con madera de chopo (*Populus x euroamericana* L-214) y madera de pino pinaster (*Pinus pinaster* Ait.), así como su comportamiento con los materiales de refuerzo seleccionados.

Los objetivos parciales de este apartado son:

- Estudiar el comportamiento de distintos tipos de adhesivos en colaboración con las especies de madera y materiales de refuerzo utilizado.
- Conocer la resistencia a cortante y tracción perpendicular de los adhesivos seleccionados.
- Comparar las prestaciones y precio de los distintos adhesivos ensayados.

6.6.1. Ensayos previos de adhesivos (doble cortante)

Antes de la fabricación de las vigas dúo de tamaño estructural se realizaron unos ensayos de tanteo con resina epoxi Sikadur 330 y adhesivo de poliuretano Crestomer 1152PA, y distintos tipos tejidos de refuerzo introducidos en la línea de encolado. El objetivo fundamental de estos ensayos previos

⁵⁵³ US Department of Defense (1999) Op. cit.

⁵⁵⁴ Matthys (2013) Op. cit.

⁵⁵⁵ Matthys (2016) Op. cit.

⁵⁵⁶ Fédération internationale du béton (FIB) (2007) Op. cit.

era comprobar el comportamiento de la unión, y seleccionar un adhesivo para la fabricación de las primeras vigas dúo a escala 1/25 (longitud 1200 mm).



Fig. 173. Ensayo probetas doble cortante sobre platillo, a compresión.

Los principales tipos de rotura detectados durante la realización de los ensayos (Fig. 173) se representan en la Fig. 174.

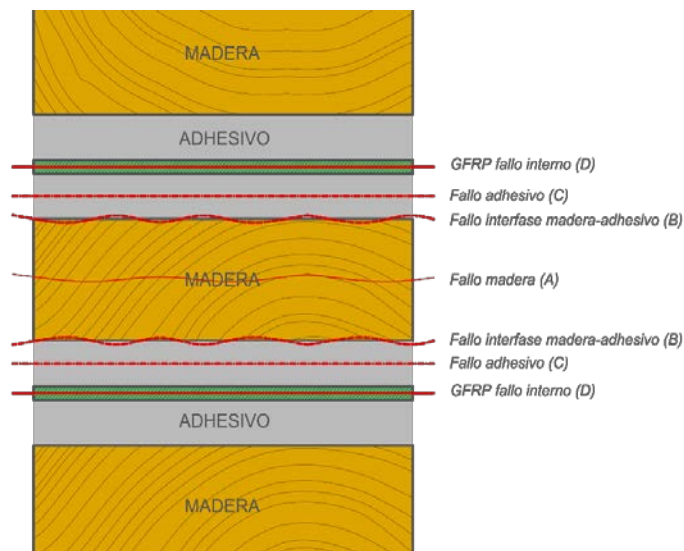
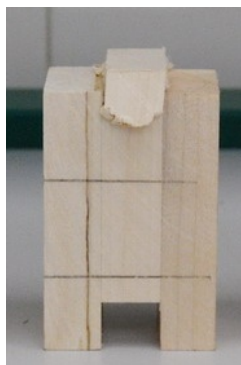
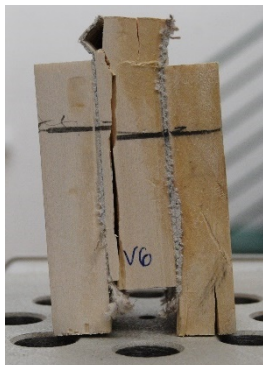


Fig. 174. Representación de los principales tipo de rotura observados en las probetas de doble cortante.

Los resultados obtenidos permitieron discernir que tejidos de refuerzo se embebían con mayor facilidad en la resina, dando líneas de encolado de calidad, y cuales generaban uniones defectuosas.



W-FRP-W Fibra vidrio
'FIDGLASS UNI 300 HT73'
con EPX Sikadur 330.



W-FRP-W Tejido Lino
'FIDFLAX UNI 300 HS50'
con epoxi Sikadur 330.



W-FRP-W Fibra Carbono
'SikaWrap-230 C/45'
con epoxi Sikadur 330.

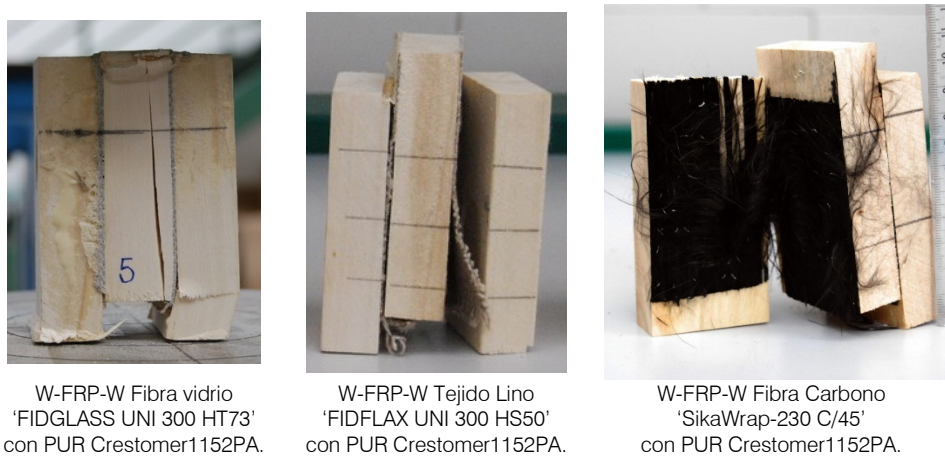


Fig. 175. Fallo principal de cada tipo de probeta.

Como se puede apreciar en la Fig. 175 las probetas de fibra de vidrio se comportaron adecuadamente con ambos adhesivos, generando un fallo con rotura en la madera (Tipo A); mientras que las probetas con lino y carbono presentaron una mala impregnación y adherencia con la cola de poliuretano, generando fallos entre el adhesivo y el refuerzo (Tipo B), e incluso deslaminándose el tejido de refuerzo (Tipo D). Estos tipos de rotura pueden interpretarse como una mala impregnación del adhesivo en el tejido. Con la resina epoxi el comportamiento del refuerzo de lino es adecuado, con fallo generalizados por madera (Tipo A), limitándose el fallo por adherencia (Tipo B) a probetas aisladas producida en rangos de tensión altos. El refuerzo de carbono también presenta un mejor comportamiento, aunque la delaminación del tejido (Tipo D) continúa presente.

6.6.2. Ensayos de cortante (laminados) sobre la línea cola

Se realiza una campaña de ensayos con distintos tipos de adhesivos; resina epoxi Sikadur 330 (EPX1), Sikadur 30 (EPX2), Mapei Paste 140 (EPX3); adhesivo de poliuretano Crestomer 1152PA (PUR 1); y adhesivo melamina Azko Nobel MUF 124772526 (MUF1), sobre madera de chopo y pino pinaster. El objetivo principal de estos ensayos es comparar las prestaciones mecánicas y comportamiento de cada adhesivo, con uniones madera, y uniones madera-GFRP UNI 1200, para seleccionar el adhesivo más idóneo en la fabricación de vigas dúo reforzadas con laminados GFRP de dimensiones estructurales.

Los principales tipos de fallo detectados durante la realización de los ensayos (Fig. 176) se dividen en cuatro tipos (A-D), representados en la Fig. 177.

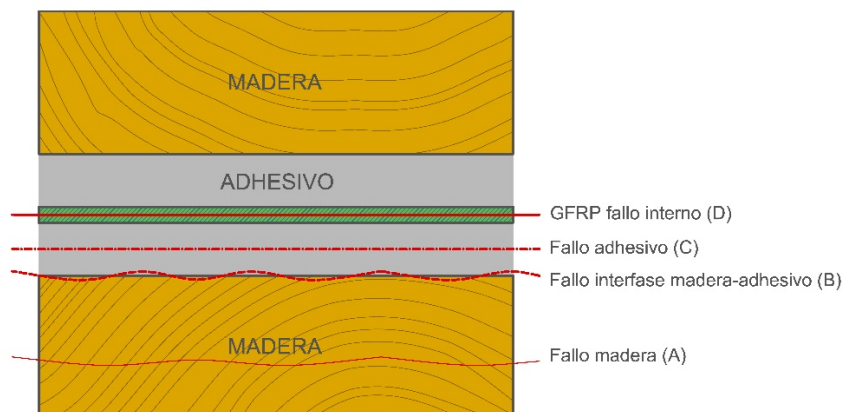


Fig. 176. Representación de los principales tipo de rotura observados en las probetas (línea de rotura en rojo).

En una unión encolada de calidad estructural, la madera es el eslabón más débil, siendo el fallo tipo A (fallo por la madera) el que representa una unión óptima. En este tipo de fallos la resistencia registrada durante el ensayo es propio de cortante de la madera utilizada, siendo la resistencia del adhesivo superior.

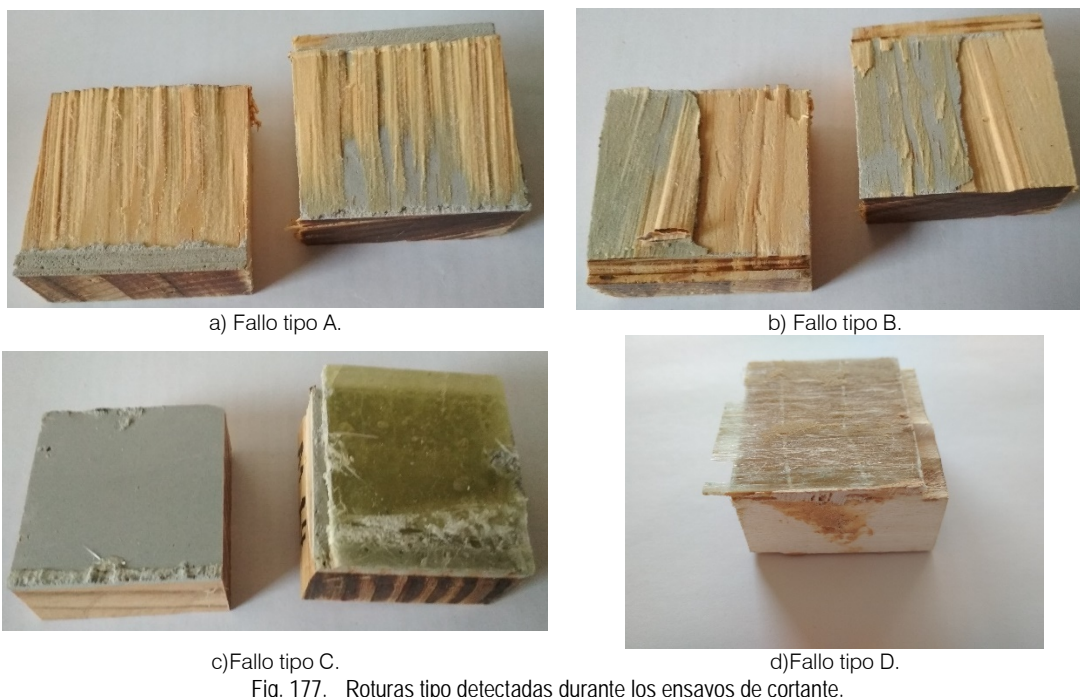


Fig. 177. Roturas tipo detectadas durante los ensayos de cortante.

A. Probetas de chopo

Los principales resultados de tensión y tipo de fallo obtenidos para los distintos lotes con madera de chopo ensayados a cortante se muestran en la Tabla 88, disponiéndose en el Anexo todos los datos por separado.

Tabla 88. Tensión de rotura y tipo de fallo de las probetas ensayadas a cortante de madera de chopo.

Tipo de unión	#	Tensión media (MPa)	Tensión mínima (MPa)	Tensión máxima (MPa)	SD (MPa)	COV (%)	Valor-P (*)	Fallo (**) (%)	Tipo de fallo
Epoxi 1 W-W (12%HEH)	15	5,34	2,46	8,66	1,72	31,04	0,9691	93,3	A
Epoxi 1 W-W (CC)	15	6,74	4,20	9,50	1,62	23,29	0,9720	80,0	A
Epoxi 1 W-FRP-W (12%HEH)	15	4,93	3,75	6,58	0,90	17,60	0,8010	46,7	B-C
Epoxi 1 W-FRP-W (CC)	15	5,58	3,60	8,78	1,53	26,57	0,8534	40,0	B
Epoxi 2 W-W (12%HEH)	15	6,32	3,28	8,83	1,69	25,85	0,9855	93,3	A
Epoxi 2 W-W (CC)	15	6,63	3,88	8,13	1,33	20,28	0,9929	73,3	A
Epoxi 2 W-FRP-W (12%HEH)	15	7,17	4,57	9,69	1,93	25,86	0,9440	73,3	D
Epoxi 2 W-FRP-W (CC)	15	6,80	4,81	8,96	1,40	19,93	0,7983	53,3	B
Epoxi 3 W-W (12%HEH)	15	8,49	4,89	9,68	1,51	16,89	0,5554	93,3	A
Epoxi 3 W-W (CC)	15	7,52	2,69	10,05	2,32	29,81	0,7289	53,3	A
Epoxi 3 W-FRP-W (12%HEH)	15	6,82	2,56	9,64	2,31	32,71	0,9571	93,3	A
Epoxi 3 W-FRP-W (CC)	15	5,96	2,09	9,31	2,22	36,01	0,9900	13,3	B-C
PUR 1 W-W (12%HEH)	10	3,95	2,12	5,80	1,14	27,36	0,9043	100	A
PUR 1 W-FRP-W (12%HEH)	10	-	-	-	-	-	-	0	B
MUF 1 W-W (12%HEH)	10	7,84	6,56	9,88	1,07	12,95	0,9396	100	A

MUF 1 W-W (CC)	10	6,26	3,75	8,55	1,87	28,66	0,3809	90	A
MUF 1 W-FRP-W (12%HEH)	10	-	-	-	-	-	-	0	B

*Comprobación estadística de normalidad de resultados según Prueba de Kolmogorov-Smirnov.

**El porcentaje de fallo de material está referenciado al tipo de fallo (A).

Los datos recogidos se someten previamente a un estudio estadístico de normalidad según la prueba de Kolmogorov-Smirnov para determinar si pueden modelarse de acuerdo con una distribución normal. En el conjunto de datos con un valor-P mayor o igual a 0,05, no puede rechazarse la idea de que los datos provienen de una distribución normal con un 95% de confianza. Tal y como se muestra en la Tabla 89, todos los datos presentan una distribución normal.

Ensayos al 12%HEH

Los resultados obtenidos de los ensayos sobre probetas estabilizadas en valores próximos al 12%HEH se muestran en la Fig. 178.

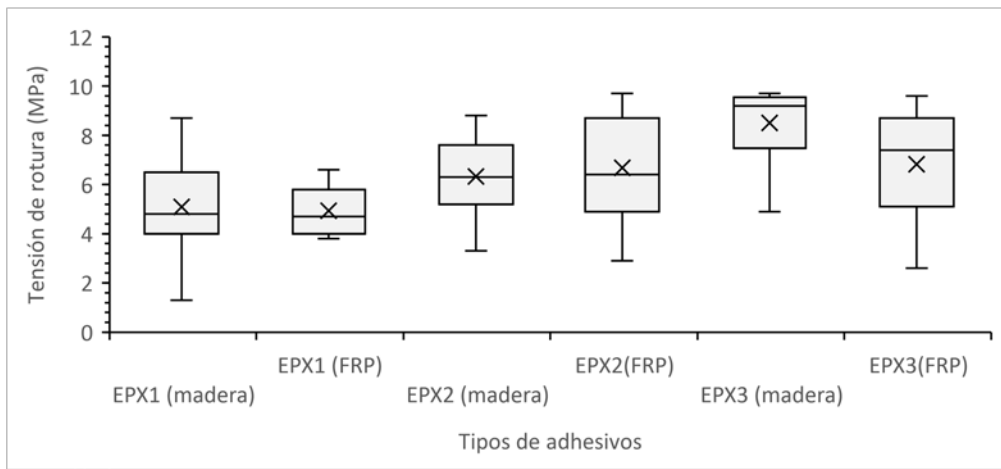
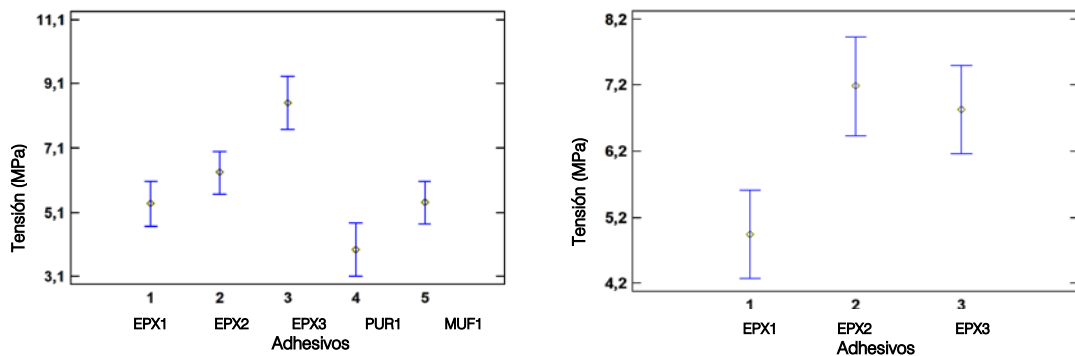


Fig. 178. Gráfico de caja y bigotes de la resistencia a cortante en probetas de chopo para cada tipo de adhesivo al 12% HEH.

Puede observarse (Tabla 89) que los adhesivos presentan, en general, una tensión de rotura semejante en uniones madera-madera. Sin embargo, en las probetas madera-FRP ensayadas, los adhesivos PUR1 y MUF1, han presentado anomalías graves, con valores de tensión especialmente bajos (tensión <0,5 MPa) y comportamiento en la rotura que mostraban una ineficaz adherencia a los laminados GFRP. Por esta razón, estos adhesivos se descartan.

Para comparar las prestaciones de los distintos adhesivos, y determinar sus diferencias, se realiza una prueba estadística de múltiples rangos a partir de las medias (Tabla 89) y el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher, diferenciando por un lado las uniones madera-madera, y por otro lado las uniones madera FRP (Fig. 179).



a) Probetas de uniones madera-madera.

b) Probetas de uniones madera-GFRP.

Fig. 179. Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para probetas de chopo al 12%HEH.

Realizándose un estudio de homogeneidad en la Tabla 89:

Tabla 89. Estudio de homogeneidad entre grupos de adhesivos para probetas de chopo al 12%HEH.

Adhesivo	Uniones madera-madera					Adhesivo	Uniones madera-GFRP			
	Casos	Media	Grupos Homogéneos*				Casos	Media	Grupos Homogéneos*	
EPX1	15	5,34	X	X	-	EPX1	15	4,93	X	-
EPX2	15	6,32	-	X	-	EPX2	15	7,17	-	X
EPX3	15	8,49	-	-	X	EPX3	15	6,82	-	X
PUR1	10	3,95	X	-	-	PUR1	-	-	-	-
MUF	10	7,84	X	X	-	MUF1	-	-	-	-

*Método: 95,0 porcentaje de Fisher LSD

A partir de estos análisis puede afirmarse que, todos los adhesivos epoxi muestran unas resistencias y comportamiento adecuado. Si bien el adhesivo EPX3 presenta un ligero incremento de resistencia con uniones encoladas madera-madera, y en uniones madera-GFRP el adhesivo EPX2 alcanza las mayores resistencias; ambos adhesivos presentan un comportamiento similar, no pudiéndose afirmar estadísticamente diferencia significativa entre ambos (Tabla 90). Además, en conjunto ambos adhesivos (EPX2, EPX3) presenta buenos coeficientes de variación (<30%), y buen comportamiento en rotura, con fallos mayoritariamente del tipo A.

Ensayos tras los ciclos de envejecimiento

Los resultados obtenidos de los ensayos sobre probetas sometidas a 6 ciclos de envejecimiento se muestran en la Fig. 180.

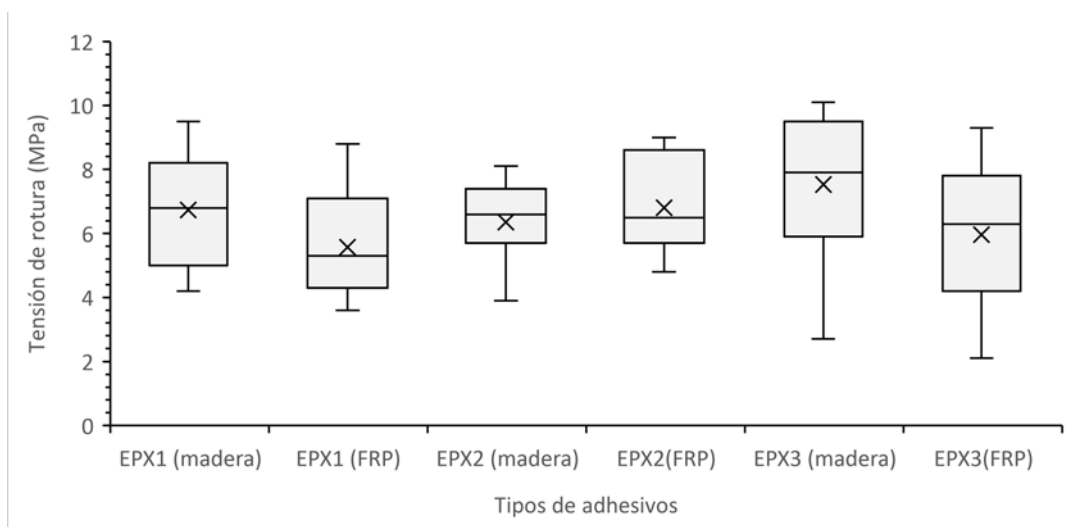
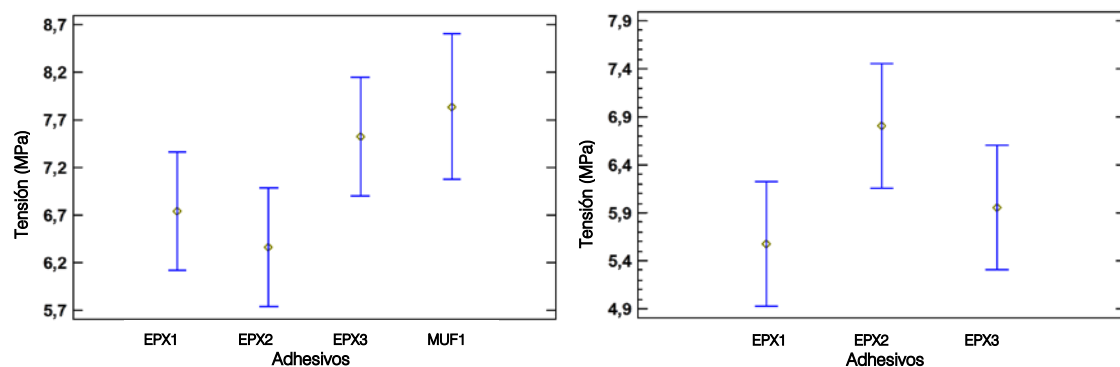


Fig. 180. Gráfico de caja y bigotes de la resistencia a cortante en probetas de chopo para cada tipo de adhesivo, tras 6 ciclos de envejecimiento.

Los distintos adhesivos ensayados muestran unas tensiones de rotura semejantes, si bien la variabilidad es superior a las probetas ensayadas sin realizar los ciclos de envejecimiento, y los valores medios inferiores. Los adhesivos MUF1 utilizados para las uniones con GFRP han presentado anomalías graves, con valores de tensión especialmente bajos (tensión <0,5 MPa) y comportamiento en la rotura que mostraban una ineficaz adherencia a los laminados GFRP. Por esta razón, estos adhesivos son descartados.

Para comparar las prestaciones de los distintos adhesivos, y determinar sus diferencias, se realiza una prueba estadística de múltiples rangos a partir de las medias y el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher, diferenciando por un lado las uniones madera-madera, y por otro lado las uniones madera FRP (Fig. 181).



a) Probetas de uniones madera-madera b) Probetas de uniones madera-GFRP
 Fig. 181. Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para probetas de chopo, tras ciclos de envejecimiento.

Realizándose un estudio de homogeneidad en la Tabla 90:

Tabla 90. Estudio de homogeneidad entre grupos de adhesivos para probetas de chopo ciclos de envejecimiento.

Adhesivo	Uniones madera-madera				Adhesivo	Uniones madera-GFRP			
	Casos	Media	Grupos Homogéneos*			Casos	Media	Grupos Homogéneos*	
EPX1	15	6,74	X	-	EPX1	15	5,58	X	-
EPX2	15	6,63	X	X	EPX2	15	6,80	X	-
EPX3	15	7,52	X	X	EPX3	15	5,96	X	-
PUR1	-	-	-	-	PUR1	-	-	-	-
MUF1	10	6,26	-	X	MUF1	-	-	-	-

*Método: 95,0 porcentaje de Fisher LSD

Del estudio de homogeneidad expuesto en la Fig. 181 y Tabla 90 puede extraerse que, todas las resinas epoxi se pueden agrupar como una sola población homogénea, presentando un comportamiento semejante, mostrando el adhesivo EPX2 las mayores resistencias en las uniones con GFRP.

B. Probetas de P. pinaster

Los principales resultados de tensión y tipo de fallo obtenidos para los distintos lotes con madera de pino pinaster ensayados a cortante se muestran en la Tabla 91, disponiéndose en el Anexo todos los datos por separado.

Tabla 91. Tensión de rotura y tipo de fallo de las probetas ensayadas a cortante de madera de pinaster.

Tipo de unión	#	Tensión media (MPa)	Tensión mínima (MPa)	Tensión máxima (MPa)	SD (MPa)	COV (%)	Valor-P (*)	Fallo (**) (%)	Tipo de fallo
Epoxi 1 W-W (12%HEH)	10	11,38	7,80	14,28	2,01	16,73	0,7398	70	A
Epoxi 1 W-FRP-W (12%HEH)	10	5,28	2,87	8,52	1,69	30,31	0,8510	0	B
Epoxi 2 W-W (12%HEH)	10	13,48	12,15	14,81	0,98	6,92	0,7865	90	A
Epoxi 2 W-FRP-W (12%HEH)	10	5,26	2,64	8,26	1,61	28,98	0,8510	10	B
Epoxi 3 W-W (12%HEH)	10	10,54	7,93	13,16	1,88	17,03	0,9571	63,6	A
Epoxi 3 W-FRP-W (12%HEH)	10	8,13	4,97	11,46	2,05	23,87	0,9996	20	B
PUR 1 W-W (12%HEH)	10	4,28	1,61	8,73	2,71	59,60	0,5587	44,4	A-B
PUR 1 W-FRP-W (12%HEH)	10	-	-	-	-	-	-	0	B

*Comprobación estadística de normalidad de resultados según Prueba de Kolmogorov-Smirnov.

**El porcentaje de fallo de material está referenciado al tipo de fallo (A).

Los datos recogidos se someten previamente a un estudio estadístico de normalidad según la prueba de Kolmogorov-Smirnov para determinar si pueden modelarse de acuerdo con una distribución normal. En el conjunto de datos con un valor-P mayor o igual a 0,05, no puede rechazarse la idea de que los datos provienen de una distribución normal con un 95% de confianza. Tal y como se muestra en la Tabla 91, todos los datos presentan una distribución normal.

Los resultados obtenidos de los ensayos a cortante sobre probetas se muestran en la Fig. 182.

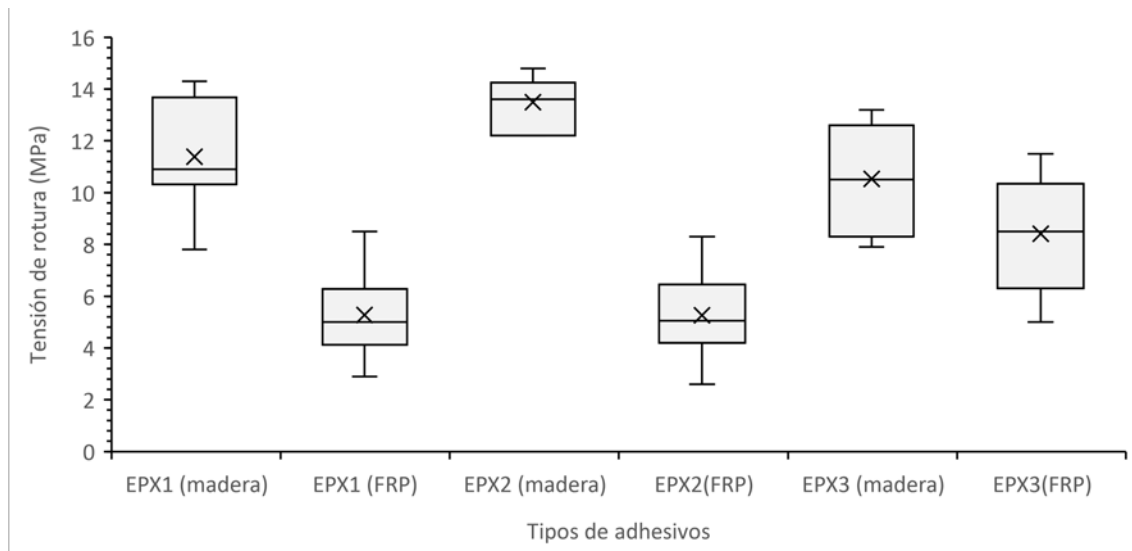
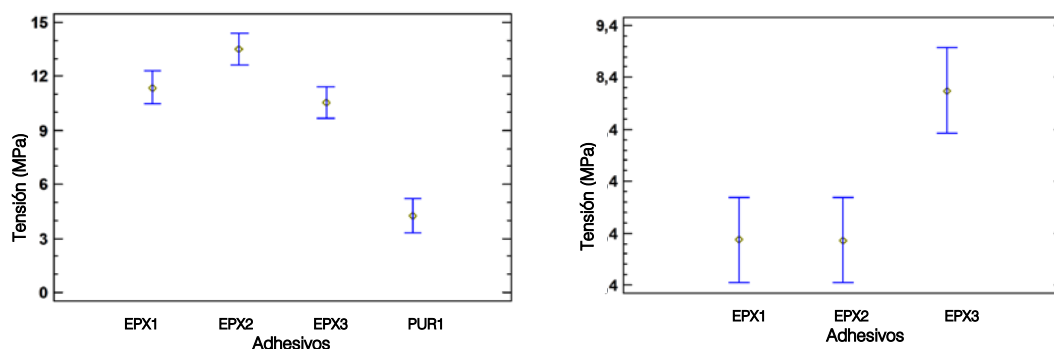


Fig. 182. Gráfico de la resistencia a cortante en probetas de pinaster para cada tipo de adhesivo (ensayo al 12% HEH).

Los valores medios de resistencia de las resinas epoxi muestran unos valores semejantes. Únicamente el adhesivo PUR1 presenta una resistencia limitada en uniones madera-madera, con roturas recurrentes por fallo de adherencia (tipo B-C). En uniones madera-GFRP se han registrado valores de tensión anómalos (<0,5 MPa), por lo que los resultados han sido rechazados. El significativo aumento en la resistencia de las uniones en comparación con las probetas de chopo se debe a que el fallo de la unión se produce por la madera (fallo tipo A), soportando el adhesivo valores de cortante aún superiores.

Para comparar las prestaciones de los distintos adhesivos, y determinar sus diferencias, se realiza una prueba estadística de múltiples rangos a partir de las medias y el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher, diferenciando por un lado las uniones madera-madera, y por otro lado las uniones madera FRP (Fig. 183).



a) Probetas de uniones madera-madera

b) Probetas de uniones madera-GFRP

Fig. 183. Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para probetas de pinaster al 12% HEH.

Realizándose un estudio de homogeneidad en la Tabla 92.

Tabla 92. Estudio de homogeneidad entre grupos de adhesivos para probetas de pinaster al 12% HEH.

Adhesivo	Uniones madera-madera				Adhesivo	Uniones madera-GFRP				
	Casos	Media	Grupos Homogéneos*			Casos	Media	Grupos Homogéneos*		
EPX1	10	11,38	-	X	-	EPX1	10	5,28	X	-
EPX2	10	13,48	-	-	X	EPX2	10	5,26	X	-
EPX3	10	10,54	-	X	-	EPX3	10	8,13	-	X
PUR1	10	4,28	X	-	-	PUR1	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

*Método: 95,0 porcentaje de Fisher LSD

Los estudios de homogeneidad muestran un comportamiento homogéneo de las resinas EPX en uniones de madera-madera y madera-GFRP. En el caso de las uniones reforzadas, las resinas EPX1 y EPX2, forman un grupo homogéneo de igual comportamiento, mientras que la resina EPX3 destaca con valores ligeramente superiores.

C. Discusión de los resultados

El comportamiento general de los adhesivos se encuadra dentro lo publicado por Serrano (2001)⁵⁵⁷, con valores de tensión superiores en las resinas epoxi, y valores de rotura de la línea de encolado (fallo tipo C) superiores a los 10 MPa. Sin embargo, sorprenden los bajos valores de tensión alcanzados por los adhesivos de poliuretano, su gran deformabilidad, y mal comportamiento con los laminados GFRP. Las investigaciones sobre el comportamiento de adhesivos estructurales con maderas de rápido crecimiento como el chopo son limitadas. No obstante, Cheng et al.⁵⁵⁸ realizan una investigación con madera de chopo (*Populus ussuriensis* Kom.) sobre 10 probetas de pequeñas dimensiones reforzadas con laminados GFRP utilizando adhesivo UPR y ensayadas a cortante. Los valores medios de resistencia a cortante de la unión encolada son de 7,88-11,93 MPa, superiores a los obtenidos en esta tesis (4,93-7,17 MPa). Sin embargo, los porcentajes de fallo por rotura de la madera (fallo tipo A) son similares, con porcentajes de fallo del 60-86% en comparación con el 73-93% de esta tesis; lo que puede indicar que las variaciones de resistencia sean consecuencia de las propias diferencias entre las especies de madera utilizadas.

En cuanto al comportamiento de los distintos tipos de adhesivos estructurales, la menor resistencia a cortante de las uniones con adhesivos de poliuretano y su fallo típico a través de la línea de encolado (fallo B-C), en comparación con las resinas epoxi, fue estudiada por Wheeler et al. (1998)⁵⁵⁹ con las especies de madera de abeto douglas (*Pseudotsuga menziesii* Mirb.) y roble (*Quercus spp.*). En el caso de las uniones madera-madera con abeto (*Abies alba* Mill.), las resistencias medias de las uniones con distintos tipos de adhesivos de poliuretano fueron de 1,93-7,10MPa, inferiores a los valores alcanzados con resinas epoxi sobre la madera, de 11,40-13,20 MPa. Esta disminución de resistencia a cortante de los adhesivos de poliuretano también se obtiene en los resultados de esta tesis; con resistencia medias a cortante en pino pinaster (*Pinus pinaster* Ait.) de 4,28 MPa para adhesivos PUR, sensiblemente inferiores a las alcanzadas por las resinas epoxi (10,54-13,48 MPa). En todo caso, los valores obtenidos en esta tesis son similares en magnitud y tipo de fallo de la unión a los presentados por Wheeler et al.⁵⁶⁰

Los valores de resistencia a cortante obtenidos para uniones madera-GFRP, en pino pinaster (5,26-8,13MPa) y chopo (4,93-7,17MPa), son semejantes a los obtenidos por Raftery et al.⁵⁶¹ con varios tipos de resinas epoxi y madera de abeto (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr). Además, en esta investigación se realizan unos ciclos de envejecimiento sobre las probetas, obteniendo una

⁵⁵⁷ Serrano (2001) Op. cit.

⁵⁵⁸ Cheng et al. (2015) Op. cit.

⁵⁵⁹ Wheeler et al. (1998). Op. cit.

⁵⁶⁰ Ibidem.

⁵⁶¹ Raftery et al. (2009). Op. cit.

disminución en resistencia ligera (10-50%), pero una amplia variación en el porcentaje de fallo del 20-85% en función del tipo de resina, resultados semejantes a los obtenidos en esta tesis.

6.6.3. Ensayos de *pull off*

Se realiza una campaña de ensayos con distintos tipos de adhesivos; resina epoxi Sikadur 330 (EPX1), Sikadur 30 (EPX2), Mapei Paste 140 (EPX3) sobre madera de chopo, con y sin refuerzo GFRP, mediante ensayos de tracción perpendicular a la línea de encolado (ensayo tipo *pull-off*).

Los principales tipos de fallo detectados durante la realización de los ensayos (Fig. 184) son los mismos que los expuestos para cortante, con cuatro tipos (A-D) de rotura, representados en la Fig. 176.

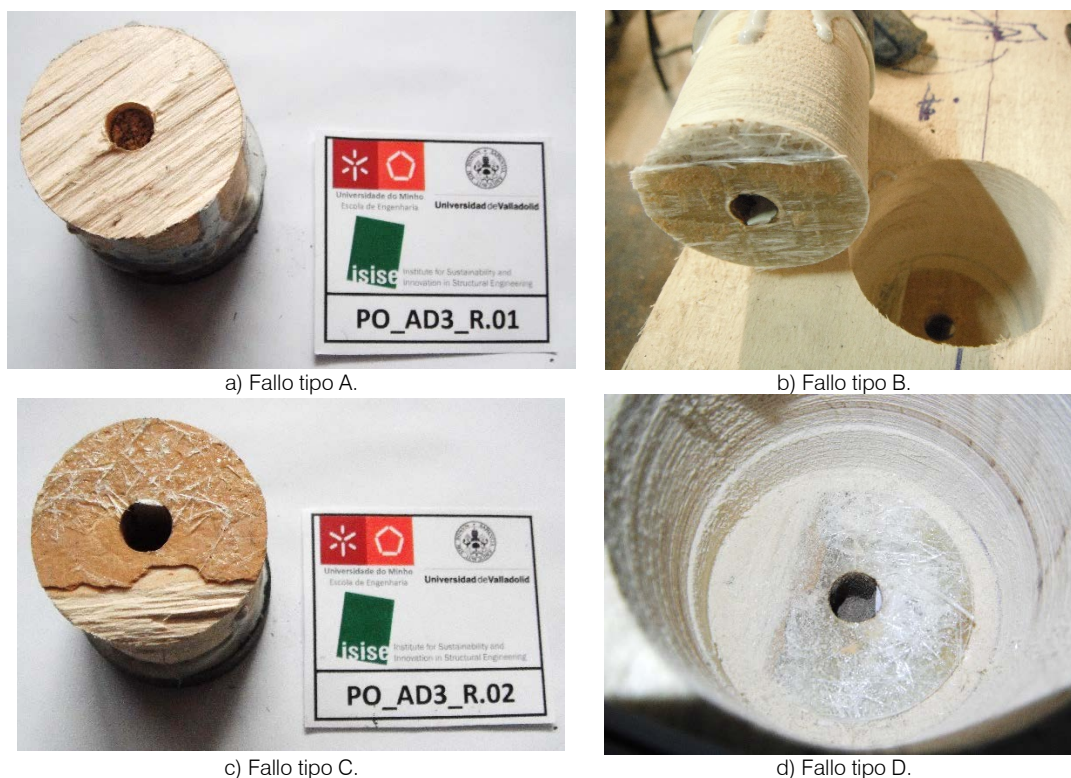


Fig. 184. Roturas tipo detectadas durante los ensayos de *pull-off*.

Los valores medios de resistencia a tracción de las uniones, y los tipos principales de fallo se recogen en la Tabla 93:

Tabla 93. Valores medios de tensión de rotura y tipo de fallo de probetas de chopo ensayadas a tracción perpendicular.

Tipo de unión	#	Tensión media (MPa)	Tensión mínima (MPa)	Tensión máxima (MPa)	SD (MPa)	COV (%)	Valor-P (*)	Fallo (**) (%)	Tipo de fallo
Epoxi 1 W-W (12%HEH)	6	2,66	1,51	3,61	0,70	23,93	0,9857	100	A
Epoxi 1 W-W (CC)	6	2,55	1,69	3,56	0,60	21,58	0,6487	16,7	B
Epoxi 1 W-FRP-W (12%HEH)	6	1,83	1,26	2,72	0,49	24,61	0,7505	100	A
Epoxi 1 W-FRP-W (CC)	6	1,84	0,93	2,95	0,82	39,77	0,9049	66,7	B
Epoxi 2 W-W (12%HEH)	6	2,69	2,05	3,12	0,39	13,40	0,9721	100	A
Epoxi 2 W-W (CC)	6	1,77	0,98	2,45	0,62	31,50	0,9184	83,3	A
Epoxi 2 W-FRP-W (12%HEH)	6	2,64	1,76	3,37	0,66	22,72	0,9615	83,3	A-D
Epoxi 2 W-FRP-W (CC)	6	1,73	1,10	2,34	0,67	33,59	0,8471	66,7	D

6. RESULTADOS

Epoxi 3 W-W (12%HEH)	6	2,71	1,05	3,53	0,85	28,74	0,9812	100	A
Epoxi 3 W-W (CC)	6	1,72	1,50	2,17	0,24	12,59	0,9131	83,3	A
Epoxi 3 W-FRP-W (12%HEH)	6	2,28	1,61	2,85	0,51	20,22	0,9197	66,7	A-D
Epoxi 3 W-FRP-W (CC)	6	2,59	2,34	3,08	0,31	11,01	0,9217	50,0	B

*Comprobación estadística de normalidad de resultados según Prueba de Kolmogorov-Smirnov.

**El porcentaje de fallo de material está referenciado al tipo de fallo (A).

En el conjunto de datos con un valor-P mayor o igual a 0,05, no puede rechazarse la idea de que los datos provienen de una distribución normal con un 95% de confianza. Tal y como se muestra en la Tabla 93, todos los datos presentan una distribución normal.

Ensayos al 12%HEH

Los resultados obtenidos de los ensayos sobre probetas estabilizadas en valores próximos al 12%HEH se muestran en la Fig. 185.

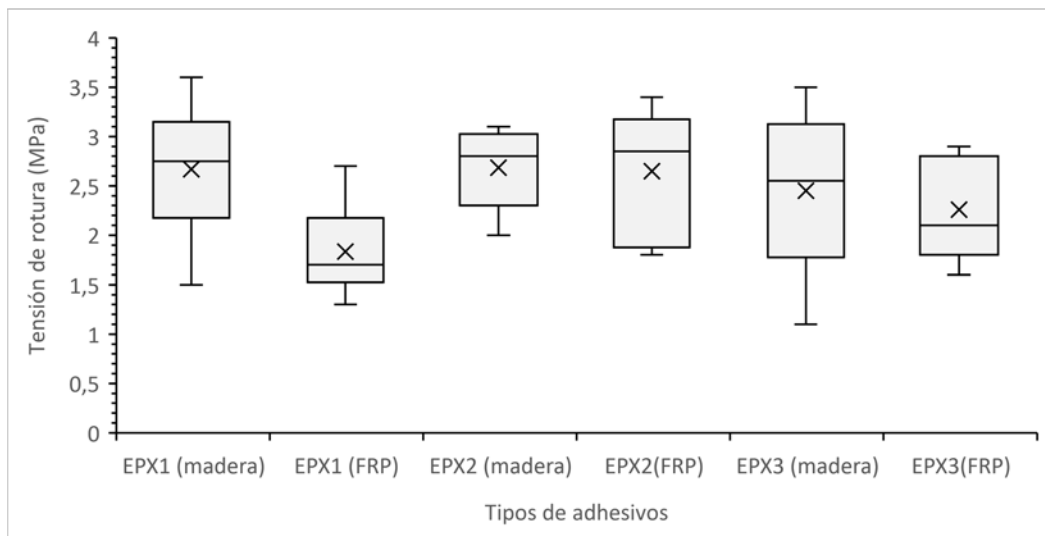
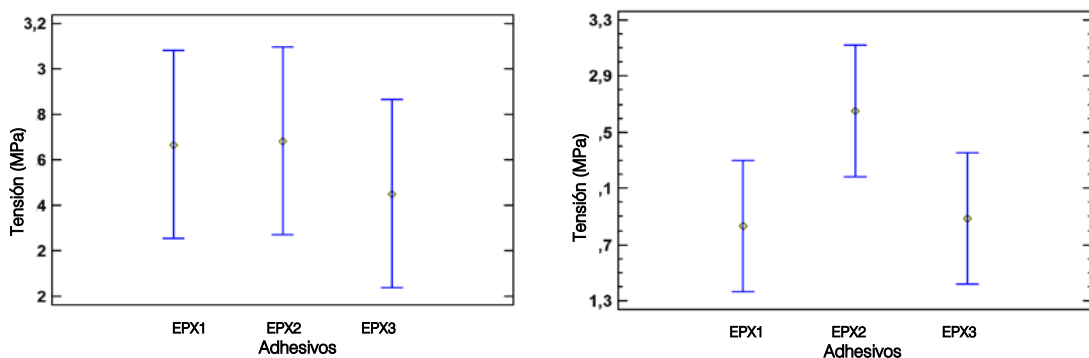


Fig. 185. Gráfico de caja y bigotes de la resistencia a tracción perpendicular (pull-off) en probetas de chocho para cada tipo de adhesivo (ensayo al 12% HEH).

Los valores medios de resistencia de las resinas epoxi muestran unos valores semejantes, presentando las resinas EPX2 (Sikadur 30) y EPX3 (Mapei Paste 140) un comportamiento idéntico, y reduciendo la resina EPX1 (Sikadur 330) su resistencia en las uniones reforzadas por fallos en la interfaz adhesivo-GFRP.

Esta similitud de comportamiento entre las resinas EPX1 y EPX 2 se confirma en los estudios estadísticos de homogeneidad de múltiples rangos a partir de las medias y el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher (Fig. 186).



a) Probetas de uniones madera-madera

b) Probetas de uniones madera-GFRP

Fig. 186. Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para probetas de chocho al 12%HEH.

Realizándose un estudio de homogeneidad en la Tabla 94, no pudiéndose determinar diferencias entre los tres adhesivos epoxi.

Tabla 94. Estudio de homogeneidad entre grupos de adhesivos para probetas pull-off de chocho al 12%HEH.

Adhesivo	Uniones madera-madera				Adhesivo	Uniones madera-GFRP			
	Casos	Media	Grupos Homogéneos*			Casos	Media	Grupos Homogéneos*	
EPX1	6	2,66	X	-	EPX1	6	1,83	X	-
EPX2	6	2,69	X	-	EPX2	6	2,64	X	-
EPX3	6	2,71	X	-	EPX3	6	2,28	X	-

*Método: 95,0 porcentaje de Fisher LSD

Ensayos tras los ciclos de envejecimiento

Los resultados obtenidos de los ensayos sobre probetas sometidas a 6 ciclos de envejecimiento se muestran en la Fig. 187.

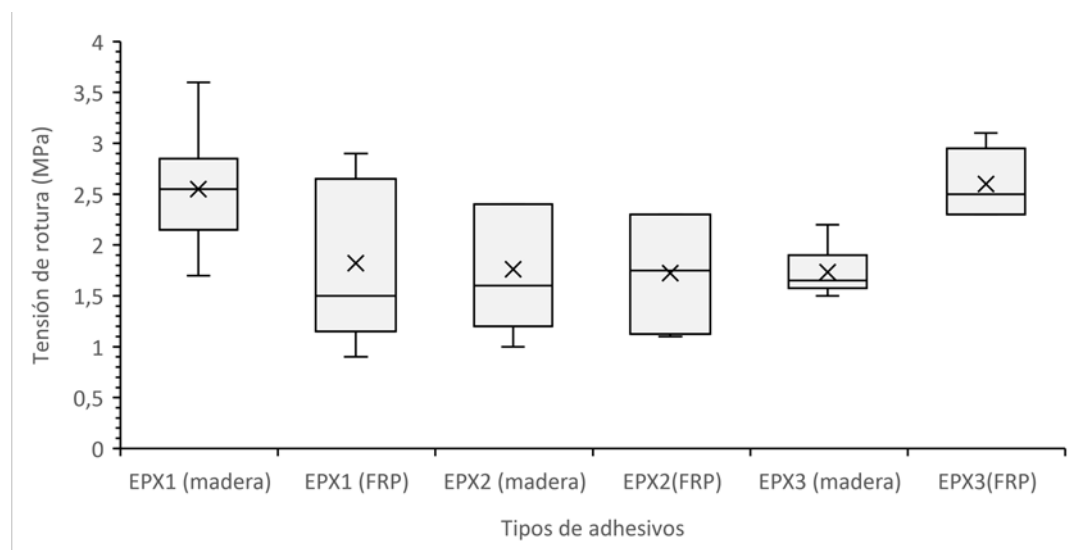
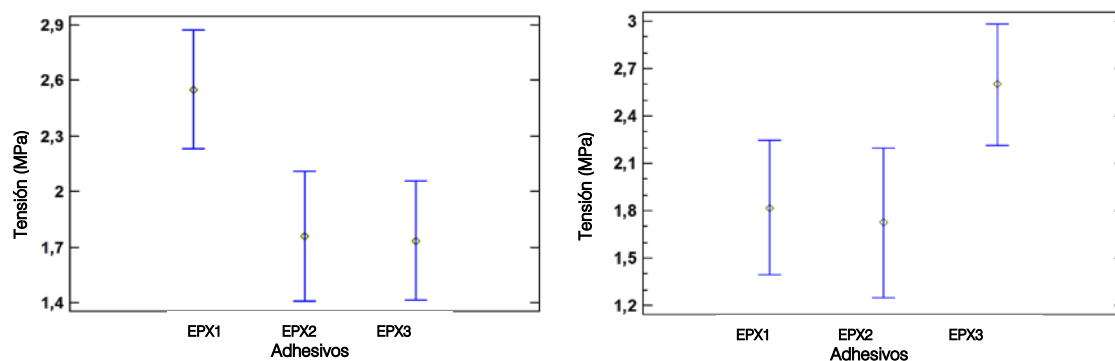


Fig. 187. Gráfico de la resistencia a tracción perpendicular (pull-off) en probetas de chocho para cada tipo de adhesivo, tras 6 ciclos de envejecimiento.

Los valores medios de las resinas se muestran dentro del mismo rango de resistencias tras someter a las probetas a 6 ciclos de envejecimiento; reduciéndose, en general las tensiones medias soportadas en comparación con las mismas probetas y adhesivos en estado seco no estresado. De todas las resinas, la EPX3 presenta el mejor comportamiento, tanto en resistencia como en variabilidad. Pese a ello, los estudios estadísticos de homogeneidad no permiten afirmar una diferencia real con los valores medios de la resina EPX1 en las piezas reforzadas (Fig. 188).



a) Probetas de uniones madera-madera b) Probetas de uniones madera-GFRP
Fig. 188. Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para probetas de chocho pull-off tras ciclos de envejecimiento.

Realizándose un estudio de homogeneidad en la Tabla 95.

Tabla 95. Estudio de homogeneidad entre grupos de adhesivos para probetas *pull-off* de chopo tras envejecimiento.

Adhesivo	Uniones madera-madera				Adhesivo	Uniones madera-GFRP			
	Casos	Media	Grupos Homogéneos*			Casos	Media	Grupos Homogéneos*	
EPX1	6	2,55	-	X	EPX1	6	1,84	X	X
EPX2	6	1,77	X	-	EPX2	6	1,73	X	-
EPX3	6	1,72	X	-	EPX3	6	2,59	-	X

*Método: 95,0 porcentaje de Fisher LSD.

Los estudios de homogeneidad muestran un similar comportamiento de las resinas EPX en uniones de madera-madera y madera-GFRP. En el caso de las uniones madera-madera, las resinas EPX2 y EPX3, forman un grupo independiente de igual comportamiento, mientras que en las uniones madera-GFRP, la resina EPX1 forma un grupo independiente junto a las otras dos resinas.

Discusión de los resultados

Los resultados obtenidos son similares a los obtenidos por Valluzzi et al.⁵⁶² sobre ensayos de *pull-off* realizados en madera de abeto, laminados rígidos de CFRP y resina epoxi. En esta investigación, los valores medios de tensión perpendicular varían de 1,44-2,05 MPa, similares a los resultados de 1,83-2,64 MPa alcanzados en esta tesis, y pese a que las especies de madera ensayadas son distintas, su comportamiento es semejante. Los tipos de fallo principales recogidos por Valluzzi son mayoritariamente rotura por madera (fallo tipo A), y en menor medida roturas por el refuerzo (fallo de rotura D). Resultados similares a los obtenidos, donde el fallo tipo A es el principal, tanto en uniones madera-madera como en reforzadas.

6.6.4. Discusión de los resultados

Adhesivo idóneo para tejidos

De los dos adhesivos ensayados, a la vista de los resultados de doble cortante, el que mejor comportamiento ha mostrado es la resina epoxi Sikadur 330. Su mayor fluidez en comparación con el adhesivo de poliuretano Crestomer 1152PA permite una mejor impregnación de los tejidos ensayados, limitando los fallos por delaminación o mala adherencia del tejido. Si bien, debe garantizarse una correcta y generosa aplicación de adhesivo para garantizar la impregnación y prestaciones finales de la unión, se selecciona la resina epoxi Sikadur 330 como la mejor opción para la fabricación de las vigas dúo de pequeña escala reforzadas con tejidos.

Adhesivo idóneo para laminados

En cuanto a la comparativa de todos los adhesivos estudiados para su empleo con los laminados rígidos de GFRP, el adhesivo EPX2 (Sikadur 30) muestra, en general, mayor resistencia a cortante en las uniones madera-GFRP, mejor comportamiento tras los ciclos de envejecimiento con mayores resistencias medias y mayores porcentajes de fallo tipo A, que el resto. Seguido del adhesivo EPX3 (Mapei Paste 140) como posible alternativa, aunque con un peor comportamiento tras los ciclos de envejecimiento. Por estas razones, puede afirmarse que el adhesivo EPX2 es el más idóneo de los estudiados para su uso en la fabricación de vigas dúo de dimensiones estructurales reforzadas con laminados GFRP. Del mismo modo, en los ensayos de *pull-off*, el adhesivo EPX2 muestra valores similares al resto de adhesivo, no presentando una caída de resistencia significativa en tras los ciclos de envejecimiento, ni fallos por adhesión (tipo B), presentes en las resinas restantes (EPX1; EPX3).

⁵⁶² Valluzzi, M. R., Garbin, E., Modena, C. (2007). Flexural strengthening of timber beams by traditional and innovative techniques. *Journal of Building Appraisal*, 3(2), pp.125-143 [DOI: 10.1057/palgrave.jba.2950071].

Por estas razones, el adhesivo más idóneo para la fabricación de vigas dúo reforzadas de tamaño estructural, con las especies de madera utilizadas y los tipos de refuerzo empleados, es el adhesivo tipo EPX2 (Sikadur 30).

6.7. Ensayos a flexión en pequeñas dimensiones [1:25]

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos en los ensayos a flexión (destruictivos) realizados sobre vigas a escala 1:25 ($L=1200$ mm) de madera de chopo reforzadas con distintos tipos de tejido de refuerzo y encoladas con resina epoxi Sikadur 330. Estos ensayos se dividen en tres series con vigas de las mismas dimensiones, pero con distintos tipos de refuerzos.

SERIE 0 (testigos)

Compuesto por un lote (Tabla 96) de vigas de madera aserrada maciza de madera de chopo [serie M.00] junto con un lote vigas dúo de madera de chopo sin refuerzo [serie DT.00] ambos lotes de dimensiones $(20+20)\times 60\times 1200$ mm.

Tabla 96. Número de vigas dúo de madera de chopo testigos [1:25].

Tipo viga	#
Testigos madera maciza [serie M.00].	79
Testigos dúo sin refuerzo [serie DT.00].	83

Esta serie engloba vigas de madera aserrada y vigas dúo con el fin de determinar la influencia del laminado sobre el comportamiento de las vigas. Los resultados de resistencia y rigidez de estas piezas se tomarán como testigos de referencia para comparar las mejoras producidas por el refuerzo de las secciones con distintos tipos de tejido.

SERIE 1 (comparación de refuerzos)

Compuesto por un lote (Tabla 97) de vigas dúo de madera de chopo de dimensiones $(20+20)\times 60\times 1200$ mm reforzadas con distintos tipos de tejidos de refuerzo.

Tabla 97. Número de vigas dúo de madera de chopo reforzadas [1:25].

Tipo viga	#
Refuerzo de lino [serie L.01].	109
Refuerzo de fibra de vidrio [serie F.01].	107
Refuerzo de fibra de carbono [serie C.01].	100

La ratio de refuerzo de la sección utilizado para cada serie de vigas se detalla en la Tabla 98.

Tabla 98. Ratio de refuerzo utilizado en cada serie de vigas dúo de chopo escala 1:25.

	Tejido de refuerzo (referencia)	Área eficaz* (mm ² /cm)	Área (mm ²)	Ratio refuerzo (%)
Refuerzo de lino [serie L.01].	FIDIA 'FIDFLAX UNI 300 HS50'	3,352	20,11	0,84
Refuerzo de fibra de vidrio [serie F.01].	FIDIA 'FIDGLASS UNI 300 HT73'	1,587	9,52	0,40
Refuerzo de fibra de carbono [serie C.01]	SIKA 'SikaWrap-230 C/45'	1,371	8,23	0,34
Madera de chopo de vigas dúo	-	-	2400	-

*Los valores de área eficaz de cada tipo de tejido son extraídos de los resultados del Apartado 6.2.

SERIE 2 (estimación mejora del refuerzo)

Compuesto por un lote (Tabla 99) de vigas dúo de tableros de fibra de densidad media de dimensiones $(20+20)\times 60\times 1200$ mm reforzadas con laminados de fibra de vidrio. Los resultados obtenidos en el ensayo de las vigas de esta serie se detallan en un capítulo adicional y específico.

Tabla 99. Número de vigas dúo de tablero de fibra [1:25].

Tipo de viga	#
Dúo DM sin refuerzo – testigos [serie DM-T.02]	21
Dúo DM refuerzo simple fibra de vidrio UNI 300 [serie DM-RS.02]	21
Dúo DM refuerzo doble fibra de vidrio UNI 600 [serie DM-RD.02]	21

Los objetivos de este capítulo son:

- Obtener los módulos de elasticidad (MOE) de las vigas dúos reforzadas con distintos materiales de refuerzo.
- Obtener los módulos de rotura (MOR) de las vigas dúos reforzadas con distintos materiales de refuerzo.
- Comparar entre sí los resultados de las vigas dúo reforzadas con los distintos tipos de refuerzo.

6.7.1. Resultados en madera de chopo [1:25]

A partir de los diferentes datos recogidos durante el ensayo a flexión de las vigas dúo se obtienen los resultados que se muestran a continuación, exponiéndose fundamentalmente los módulos de elasticidad y módulo de rotura para comparar la mejora que representa la introducción de los diferentes tejidos de refuerzo en las líneas de encolado. Los valores medios de módulo de rotura (MOR) y módulo de elasticidad (MOEG) obtenidos en los ensayos de los distintos lotes de vigas se resumen en la Tabla 100, recogiendo los valores individuales de cada viga dúo ensayada en el Anexo.

Tabla 100. Valores de MOR y MOEG para las vigas dúo de madera de chopo [1:25].

Testigos madera maciza [serie M.00.]			Testigos dúo sin refuerzo [serie DT.00.]		
#	MOR (MPa)	MOEG (MPa)	#	MOR (MPa)	MOEG (MPa)
79ud			83ud		
Media	67,20	7.745,86	Media	69,64	7.816,80
Mínimo	18,03	3.276,03	Mínimo	37,90	5.713,30
Máximo	103,05	11.820,59	Máximo	100,30	10.980,00
SD	16,82	1.579,08	SD	11,83	1.029,35
COV (%)	24,88	20,26	COV (%)	16,88	13,09
Caract.(5%)	38,69	5.466,32	Caract.(5%)	47,73	6.177,50
Valor-P(*)	0,3340	0,8324	Valor-P(*)	0,5756	0,3686

*Comprobación estadística de normalidad de resultados según Prueba de Kolmogorov-Smirnov.

Refuerzo de lino [serie L.01]			Refuerzo de fibra de vidrio [serie F.01]			Refuerzo de fibra de carbono [serie C.01]		
#	MOR (MPa)	MOEG (MPa)	#	MOR (MPa)	MOEG (MPa)	#	MOR (MPa)	MOEG (MPa)
109ud			107ud			100ud		
Media	77,03	8.916,77	Media	75,99	9.053,73	Media	75,94	9.567,69
Mínimo	44,33	5.902,39	Mínimo	42,46	5.380,21	Mínimo	50,83	6.503,22
Máximo	116,72	12.229,77	Máximo	104,81	12.089,26	Máximo	98,05	14.435,15
SD	12,26	1.336,48	SD	11,99	1.206,45	SD	10,31	1.534,34
COV (%)	15,84	14,92	COV (%)	15,70	13,26	COV (%)	13,50	15,96
Caract.(5%)	58,90	6.434,50	Caract.(5%)	57,93	6.950,90	Caract.(5%)	57,85	7.325,84
Valor-P(*)	0,9042	0,4900	Valor-P(*)	0,8318	0,5389	Valor-P(*)	0,7972	0,5126

*Comprobación estadística de normalidad de resultados según Prueba de Kolmogorov-Smirnov.

Los datos recogidos se someten previamente a un estudio estadístico de normalidad según la prueba de Kolmogorov-Smirnov para determinar si pueden modelarse de acuerdo con una distribución normal. En el conjunto de datos con un valor-P mayor o igual a 0,05, no puede rechazarse la idea de que los datos provienen de una distribución normal con un 95% de confianza. Tal y como se muestra en la Tabla 100, todos los datos presentan una distribución normal.

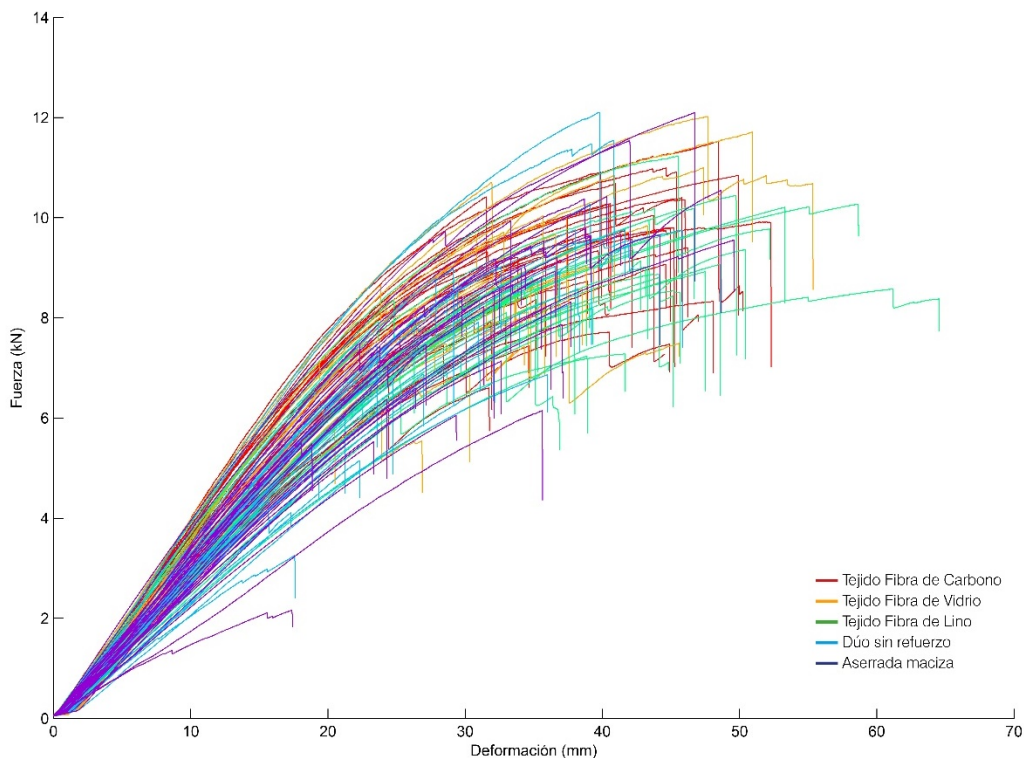


Fig. 189. Gráfico de fuerza-deformación de las vigas dúo de chopo [1:25].

En el gráfico de fuerza-deformación (Fig. 189) puede observarse la escasa variabilidad entre los distintos tipos de vigas dúo ensayadas, sobreponiéndose las curvas sin una diferenciación clara. Pese a la introducción de distintos refuerzos en las líneas de encolado, con los limitados ratios de refuerzo empleados (<1%) la variabilidad en las propiedades propia de la madera minimiza la diferenciación entre grupos.

A. Módulo de elasticidad global (MOEG)

En los ensayos destructivos realizados pueden obtenerse los módulos de elasticidad de las diferentes vigas. Los valores obtenidos individualmente para cada una de las piezas se representan conjuntamente en la Fig. 190, diferenciando las distintas tipologías de viga ensayadas.

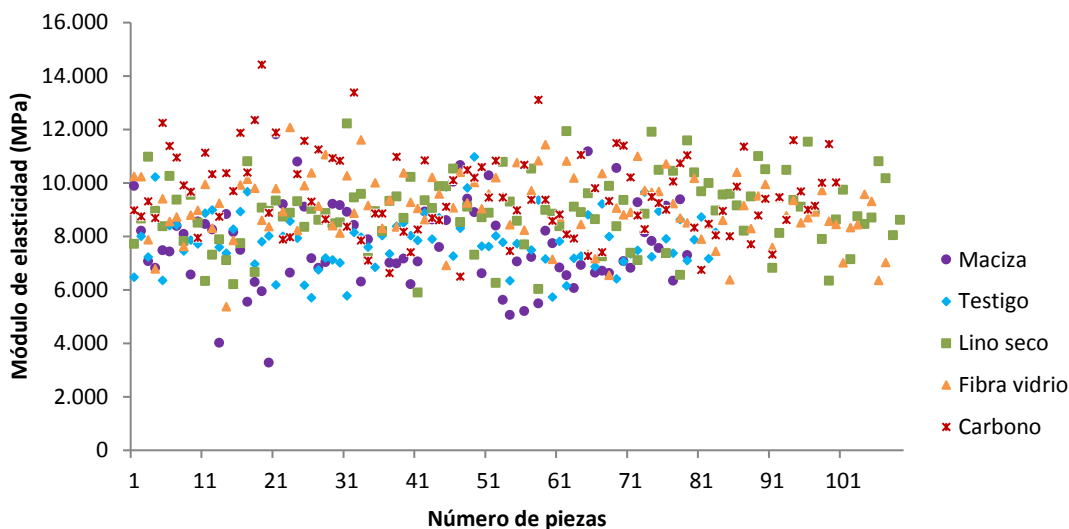


Fig. 190. Gráfico con los valores de MOEG de las distintas vigas dúo de chopo [1:25].

Puede observarse como, a diferencia de otros materiales analizados en capítulos anteriores, la variación de los resultados genera una dispersión en los datos, con coeficientes de variación > 15%, que superponen valores de varias series, con independencia de su refuerzo, y dificulta extraer conclusiones determinantes de forma individual. Para poder analizar las variaciones y extraer alguna conclusión clara, es necesario analizar los datos en grupos a partir de los valores medios de cada tipo de viga dúo ensayada como referencia. Por ello, se realiza un gráfico de caja-bigotes, donde pueden compararse de valores por grupo, con un número de piezas ensayadas en torno a 100 unidades por serie (Fig. 191).

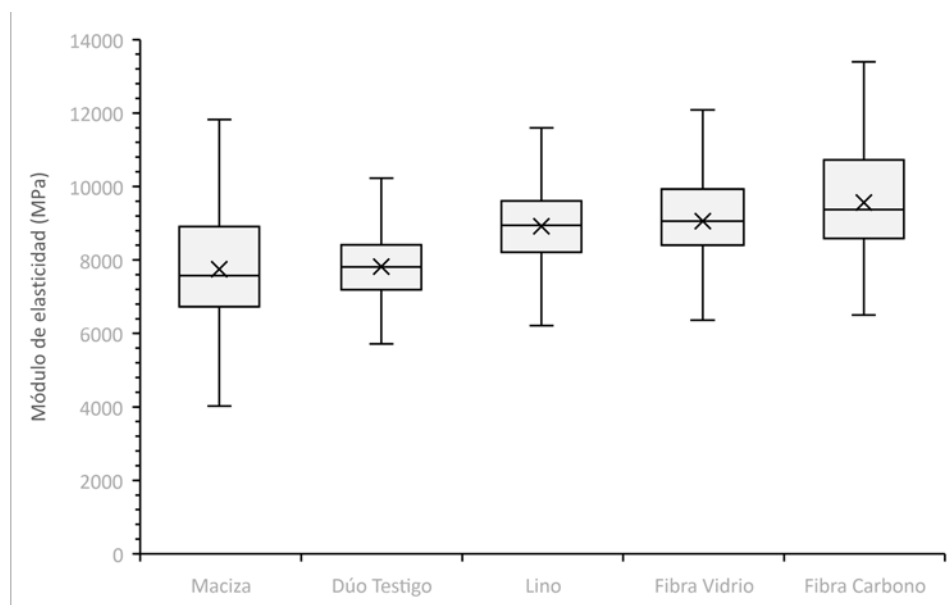


Fig. 191. Gráfico caja-bigotes de los valores de MOEg para las vigas dúo de chopo [1:25].

En este gráfico puede observarse como, a partir de los valores medios, pueden establecerse diferencias entre las piezas reforzadas y testigo, pese a que en la amplitud de la muestra los valores (bigotes del gráfico) se superpongan. Los mejores módulos de elasticidad se obtienen con las vigas dúo reforzadas con fibra de carbono, con valores medios de 9.567,69 MPa. En un escalón ligeramente inferior se muestran los valores de fibra de vidrio (9.053,73 MPa) y fibra de lino (8.916,77 MPa), y por último las piezas testigos (< 7.820 MPa).

Tabla 101. Comparación de los módulos de elasticidad de las vigas dúo de chopo [1:25].

Tipo de viga dúo	Casos #	MOEg medio (MPa)	Mejora (%)	MOEg característico (MPa)	Mejora (%)
Aserrada maciza [serie M.00.]	79	7.745,86±1.579,08	-	5.466,32	-
Dúo sin refuerzo [serie DT.00.]	83	7.816,80±1.029,35	0,91*	6.177,50	11,51*
Dúo refuerzo lino [serie L.01]	109	8.916,77±1.336,48	12,34	6.434,50	3,99
Dúo refuerzo fibra vidrio [serie F.01]	107	9.053,73±1.206,45	13,66	6.950,90	11,13
Dúo refuerzo fibra carbono [serie C.01]	100	9.567,69±1.534,34	18,30	7.325,84	15,68

*Mejora en comparación con viga testigo aserrada maciza. El resto de los porcentajes de mejora se obtienen respecto a las vigas testigo dúo sin refuerzo.

Comparando los porcentajes de mejora de las diferentes series de vigas (Tabla 101) se constata la influencia significativa de los refuerzos. La mejora que representa el refuerzo en cada familia de viga dúo, en comparación con las vigas dúo, sin reforzar es significativa obteniendo un porcentaje de mejora del 13,66% para las vigas reforzadas con fibra de vidrio y un 18,30% para la fibra de carbono, así como una mejora del 12,34% en las vigas reforzadas con lino. Respecto a la mejora introducida por la laminación de las piezas, tomando como referencia los valores medios no se observa una diferencia o mejora significativa entre las vigas testigo aserradas y dúo, con un porcentaje de mejora en los valores medios < 1%. Sin embargo, si se comparan los valores característicos (5 percentil)

de las vigas testigos se obtienen un porcentaje de mejora del 11,51% respecto a las piezas aserradas. Este dato indica que, si bien las vigas dúo no incrementan las prestaciones de las vigas, sí que permiten reducir la influencia de las singularidades de la madera en las prestaciones mecánicas, aumentando los rangos de los valores inferiores de su serie respecto a las vigas aserradas.

Para comparar las prestaciones de las distintas vigas dúo de madera de chopo escala 1:25, y determinar sus diferencias, se realiza una prueba estadística de múltiples rangos a partir de las medias y el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher (Fig. 192).

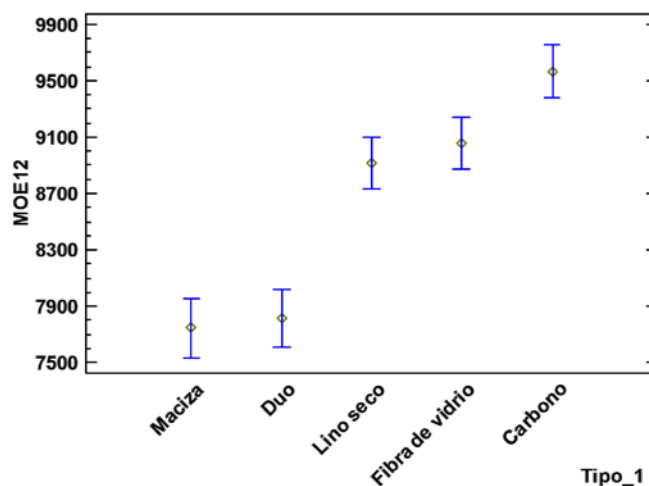


Fig. 192. Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para vigas dúo de madera de chopo [1:25].

A partir de este análisis se realiza la comprobación de la homogeneidad entre grupos para los módulos de elasticidad en la Tabla 102:

Tabla 102. Estudio de homogeneidad entre grupos de las vigas dúo de tablero de fibras.

Vigas dúo de madera de chopo escala 1:25			
Tipo refuerzo	Casos	Media (MPa)	Grupos Homogéneos*
Madera maciza	79	7.745,86	X - -
Dúo sin refuerzo	83	7.816,80	X - -
Dúo refuerzo de lino	109	8.916,77	- X -
Dúo refuerzo de fibra de vidrio	107	9.053,73	- X -
Dúo refuerzo de fibra de carbono	100	9.567,69	- - X

*Método: 95,0 porcentaje de Fisher LSD

Del estudio de homogeneidad expuesto en la Fig. 192 y Tabla 102 puede extraerse que las vigas testigo, tanto aserradas como dúo, forman un mismo grupo no existiendo diferencias estadísticas significativas. De las vigas dúo reforzadas pueden diferenciarse dos grupos; las vigas reforzadas con tejido de lino y tejido de fibra de vidrio, por un lado, y las vigas dúo reforzadas con tejido de fibra de carbono formando otro grupo.

B. Módulo de rotura (MOR)

Los valores obtenidos a partir de los ensayos destructivos a flexión para cada una de las piezas se representan conjuntamente en la Fig. 193, diferenciando las distintas tipologías de viga ensayadas.

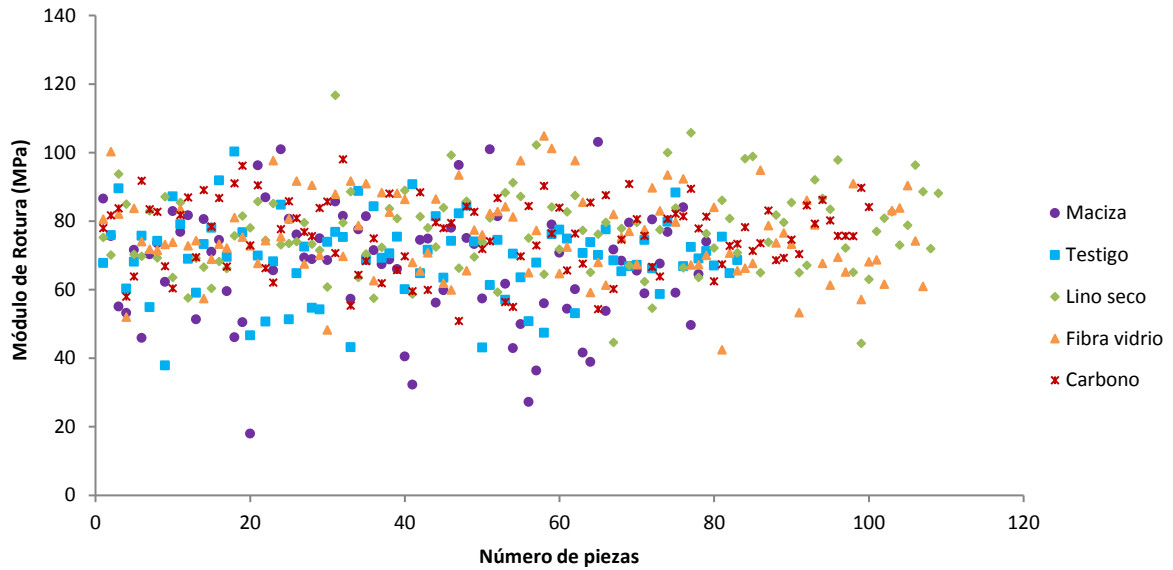


Fig. 193. Gráfico con los valores de MOR de las distintas vigas dúo de madera de chopo [1:25].

Al igual que ocurría con los valores de módulo de elasticidad, la dispersión aparente que muestra el gráfico anterior no permite extraer conclusiones determinantes a partir de los datos mostrados individualmente. Por ello, es preciso realizar, de nuevo, un análisis en conjunto de los datos trazando un gráfico de caja-bigotes donde pueden observarse los valores medios de los diferentes grupos de vigas ensayadas.

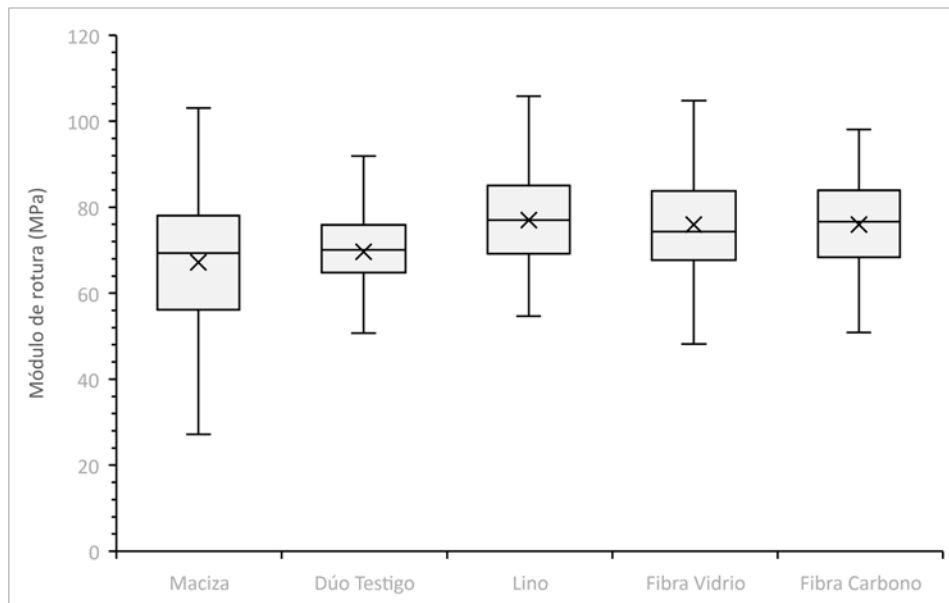


Fig. 194. Gráfico caja-bigotes de los valores de MOR para las vigas dúo de chopo [1:25].

En este gráfico (Fig. 194) puede observarse como los módulos de rotura más altos se obtienen con las vigas dúo reforzadas con valores muy semejantes, encabezada con fibra de lino (77,03 MPa), y seguidas de las vigas dúo reforzadas con fibra de vidrio (75,99 MPa) y fibra de carbono (75,94 MPa); manteniéndose las vigas testigo, tanto aserradas (67,20 MPa) como dúo (69,94 MPa), en un escalón inferior.

Tabla 103. Comparación de los valores de MOR de las vigas dúo de chopo [1:25].

Tipo de viga dúo	Casos #	MOR medio (MPa)	Mejora (%)	MOR característico (MPa)	Mejora (%)
------------------	---------	-----------------	------------	--------------------------	------------

Aserrada maciza [serie M.00.]	79	67,20±16,82	-	38,69	-
Dúo sin refuerzo [serie DT.00.]	83	69,94±11,83	3,51*	47,73	18,94*
Dúo refuerzo lino [serie L.01]	109	77,03±12,26	9,59	58,90	18,97
Dúo refuerzo fibra vidrio [serie F.01]	107	75,99±11,99	8,35	57,93	17,61
Dúo refuerzo fibra carbono [serie C.01]	100	75,94±10,31	8,29	57,85	17,50

*Mejora en comparación con viga testigo aserrada maciza. El resto de los porcentajes de mejora se obtienen respecto a las vigas testigo dúo sin refuerzo.

En cuanto a los porcentajes de mejora, en la Tabla 103 se muestran los porcentajes de mejora en valores medios y valores característicos (5ºpercentil). Los porcentajes de mejora en los valores medios se sitúan en torno al 9% para las vigas reforzadas, en comparación con el porcentaje de mejora del 3,51% entre las vigas dúo testigo y las piezas aserradas. Nuevamente, en los valores característicos se incrementa la mejora producida por la laminación de las vigas en comparación con las vigas aserradas, con una mejora del 18,94%. De los datos anteriormente expuestos puede afirmarse que las vigas reforzadas alcanzan unos mayores módulos de rotura, si bien con las ratios de refuerzo empleados (<1%) las diferencias entre los distintos refuerzos son mínimas, no pudiéndose constatar una mejora mecánica significativa de uno u otro refuerzo sobre el resto.

C. Densidad

Tras los ensayos destructivos se toman muestras de cada viga dúo ensayadas para obtener su densidad. Los valores obtenidos para cada viga dúo ensayada se muestran conjuntamente en la Fig. 195. En ella puede observarse una fuerte compacidad en los valores obtenidos, con poca dispersión entre datos.

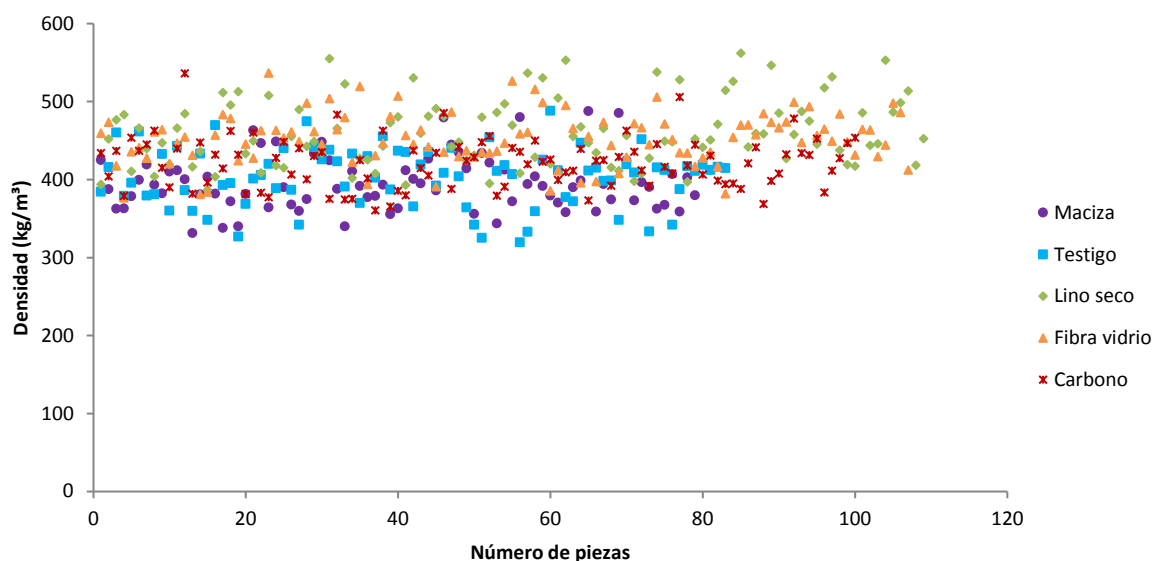


Fig. 195. Gráfica con la densidad obtenida para las vigas dúo de madera de chopo [1:25].

De los valores anteriores se analizan otros datos significativos recogidos en la Tabla 104, obteniéndose una muestra con densidades medias de 395 a 460 kg/m³, con una variación máxima entre grupos del 14,13%, dispersiones normales para una misma especie de madera.

Tabla 104. Comparación de densidades de las vigas dúo de chopo [1:25].

Tipo de viga dúo	Casos #	Densidad media (kg/m³)	COV (%)	Densidad característica (kg/m³)	Incremento* (%)
Aserrada maciza [serie M.00.]	79	395,61±34,83	8,75	343,54	-
Dúo sin refuerzo [serie DT.00.]	83	403,15±34,16	9,16	334,15	1,99
Dúo refuerzo lino [serie L.01]	109	460,37±42,90	9,27	399,51	14,13
Dúo refuerzo fibra vidrio [serie F.01]	107	451,81±32,68	7,20	391,81	12,42

Dúo refuerzo fibra carbono [serie C.01]	100	421,58±31,68	7,48	375,30	6,18
---	-----	--------------	------	--------	------

*Datos obtenidos respecto a la densidad media del grupo de vigas aserradas macizas.

6.7.2. Discusión de los resultados en madera de chopo [1:25]

El ensayo de distintos tipos de tejidos de refuerzo introducidos en la línea de encolado de vigas dúo de pequeñas dimensiones, en ratios de refuerzo ligeros inferiores al 1%, producen un incremento sensible tanto en la rigidez como en la resistencia y capacidad de carga de las piezas. Sin embargo, los resultados obtenidos muestran unos coeficientes de variabilidad amplios, entorno al 15% que, unidos a los ligeros ratios de refuerzo utilizados, minimiza las diferencias entre las distintas series de refuerzos, dispersando los valores individuales obtenidos como puede observarse en el gráfico de la Fig. 189. En un análisis más detallado de todos los resultados de cada serie en su conjunto, se obtienen diferencias entre grupos con una sensible mejoría de las piezas reforzadas. En la Tabla 105 se muestran, a modo de resumen, los principales resultados obtenidos.

Tabla 105. Resultados de módulo de elasticidad y módulo de rotura obtenidos para vigas dúo de chopo.

Tipo de viga dúo	Casos #	Ratio (%)	MOE medio (MPa)	Mejora (%)	MOR medio (MPa)	Mejora (%)
Aserrada chopo	79	-	7.745,86±1.579,08	-	67,20±16,82	-
Dúo chopo sin refuerzo	83	-	7.816,80±1.029,35	0,91*	69,94±11,83	3,51*
Dúo chopo refuerzo lino	109	0,84	8.916,77±1.336,48	12,34	77,03±12,26	9,59
Dúo chopo refuerzo fibra vidrio	107	0,40	9.053,73±1.206,45	13,66	75,99±11,99	8,35
Dúo chopo refuerzo fibra carbono	100	0,34	9.567,69±1.534,34	18,30	75,94±10,31	8,29

*Mejora en comparación con viga testigo aserrada maciza. El resto de los porcentajes de mejora se obtienen respecto a las vigas testigo dúo sin refuerzo.

Los resultados obtenidos experimentalmente se enmarcan en los rangos publicados por otros autores para los distintos tejidos de refuerzo empleados. En este sentido, Theakston (1965)⁵⁶³ fue uno de los primeros investigadores en emplear tejidos sintéticos en el refuerzo de madera, utiliza tejidos de fibra de vidrio en ratios de refuerzo del 5-10% obteniendo incrementos en resistencia de hasta el 39%. En esta misma línea Dagher et al.⁵⁶⁴ utiliza tejido de fibra de vidrio en ratios de refuerzo del 0,3-3,1% obteniendo incrementos de rigidez del 25-37%. Sin embargo, el estudio de Moulin et al.⁵⁶⁵ es mucho más representativo al utilizan madera de chopo en sus investigaciones. Utilizando vigas de pequeñas dimensiones reforzadas con tejido de fibra de vidrio con una ratio de refuerzo de 1,4% obtiene incrementos en la rigidez de las piezas entre el 10-20%, valores semejantes a los obtenidos experimentalmente en este apartado.

Durante la fabricación y ensayo de las vigas dúo se ha constatado la limitación que presenta el empleo de tejidos para su uso en gramajes elevados. Su colocación dentro de la línea de encolado, en lugar de en el exterior de las piezas como en los estudios anteriores, es lento y excesivamente dependiente de la ejecución del operario. Su uso interno obliga a garantizar no sólo una adecuada adhesión del tejido a la madera, sino que además es preciso asegurar una completa impregnación del tejido con resina para evitar el deslaminado del refuerzo durante su puesta en carga. Con gramajes superiores a los utilizados esta impregnación completa es difícilmente alcanzable mediante procesos manuales. Por ello se muestra preciso recurrir a un encapsulado de los tejidos previo a su adhesión, conformando los refuerzos industrialmente en forma de laminados o barras embebidas en resina que faciliten el proceso de encolado y garanticen su correcto comportamiento estructural en todo caso.

⁵⁶³ Theakston (1965) Op. cit.

⁵⁶⁴ Dagher et al. (1996) Op. cit.

⁵⁶⁵ Moulin et al. (1990) Op. cit.

6.7.3. Resultados en tablero de fibra DM [1:25]

En este apartado se muestran los resultados obtenidos del ensayo a flexión de vigas dúo reforzadas, de pequeña escala 1:25 ($L=1200$ mm), fabricadas con tablero de fibras y reforzadas con laminados rígidos de fibra de vidrio tipo UNI-300 y UNI-600. La utilización en estos ensayos de un material lúneo industrializado como el tablero de fibras de densidad media 'DMF FIBRALAC' permite comparar la aportación mecánica real de los distintos tipos de laminado de refuerzo. Al utilizar este tipo de material industrializado, homogéneo y de propiedades constantes y conocidas, es posible eliminar del resultado obtenido la dispersión generada por las variables propiedades de un material natural como la madera de unos especímenes a otros. De este modo, pueden compararse y estudiarse el comportamiento de los refuerzos con mayor certidumbre y precisión.

Estos ensayos se realizan sobre tres tipos de viga dúo de tablero (DM) de dimensiones nominales $40 \times 60 \times 1200$ mm; vigas dúo sin refuerzo (testigo), vigas dúo con refuerzo sencillo (300 gr/m^2) y vigas dúo con refuerzo doble (600 gr/m^2). Las ratios de refuerzo de la sección utilizados se detallan en la Tabla 106.

Tabla 106. Ratio de refuerzo utilizado en cada tipo de viga.

	Área (mm ²)	Ratio refuerzo (%)
Laminado de refuerzo UNI300	85,8	3,57
Laminado de refuerzo UNI600	111,6	4,64
Tablero DM	2400	-

Los resultados expuestos implican necesariamente un aumento en los módulos elásticos de las piezas reforzadas en comparación con los testigos sin reforzar o con porcentajes de refuerzo inferiores. Para calcular los módulos de elasticidad de las piezas a flexión se emplea la ecuación propuesta por la norma UNE-EN 408 (ecuación 2 del punto 10.3). Los valores obtenidos, tanto de MOEG como de MOR, para cada una de las vigas dúo de tablero de fibras (DM) ensayada se recogen a continuación en la Tabla 107, recogándose individualmente el resto de los valores de cada probeta ensayada en el Anexo.

Tabla 107. Valores de MOEG y MOR para las vigas dúo reforzadas de tablero de fibras (DM).

Sin refuerzo (testigos)			Refuerzo GFRP UNI300 (300gr/m ²)			Refuerzo GFRP UNI600 (600gr/m ²)		
#	MOR (MPa)	MOEG (MPa)	#	MOR (MPa)	MOEG (MPa)	#	MOR (MPa)	MOEG (MPa)
DM-T.02.01	-	-	DM-RS.02.01	41,05	5.108,90	DM-RD.02.01	48,41	5.532,30
DM-T.02.02	28,83	3.685,80	DM-RS.02.02	40,60	5.079,10	DM-RD.02.02	50,40	6.070,40
DM-T.02.03	28,46	3.667,70	DM-RS.02.03	41,21	5.070,10	DM-RD.02.03	47,80	6.103,10
DM-T.02.04	28,04	3.812,20	DM-RS.02.04	39,10	5.125,80	DM-RD.02.04	50,99	6.179,70
DM-T.02.05	27,71	3.771,60	DM-RS.02.05	41,82	5.120,60	DM-RD.02.05	50,76	6.189,90
DM-T.02.06	28,80	3.790,10	DM-RS.02.06	39,68	5.000,30	DM-RD.02.06	48,97	6.041,90
DM-T.02.07	27,78	3.818,00	DM-RS.02.07	39,89	5.129,00	DM-RD.02.07	51,92	6.205,60
DM-T.02.08	28,57	3.753,10	DM-RS.02.08	40,25	5.172,70	DM-RD.02.08	46,70	6.238,20
DM-T.02.09	26,94	3.668,00	DM-RS.02.09	40,36	5.005,00	DM-RD.02.09	42,32	5.907,20
DM-T.02.10	26,80	3.703,60	DM-RS.02.10	40,99	5.079,90	DM-RD.02.10	49,17	6.074,80
DM-T.02.11	28,26	3.716,30	DM-RS.02.11	40,82	5.137,70	DM-RD.02.11	51,68	5.966,80
DM-T.02.12	29,16	3.692,60	DM-RS.02.12	39,89	5.176,00	DM-RD.02.12	49,70	5.795,30
DM-T.02.13	27,88	3.841,70	DM-RS.02.13	40,81	4.904,90	DM-RD.02.13	51,52	6.020,70
DM-T.02.14	27,02	3.709,00	DM-RS.02.14	42,30	5.095,50	DM-RD.02.14	50,36	6.004,00
DM-T.02.15	27,49	3.795,50	DM-RS.02.15	38,03	5.005,70	DM-RD.02.15	46,68	5.934,60
DM-T.02.16	29,31	3.810,80	DM-RS.02.16	40,13	4.951,90	DM-RD.02.16	48,96	5.865,10
DM-T.02.17	26,63	3.739,40	DM-RS.02.17	39,88	4.816,40	DM-RD.02.17	51,48	5.944,30
DM-T.02.18	28,57	3.808,70	DM-RS.02.18	40,85	4.923,50	DM-RD.02.18	47,60	5.869,60
DM-T.02.19	27,76	3.665,60	DM-RS.02.19	38,62	4.761,10	DM-RD.02.19	44,66	5.737,50
DM-T.02.20	26,72	3.750,10	DM-RS.02.20	40,17	4.840,20	DM-RD.02.20	46,24	5.780,30
DM-T.02.21	27,17	3.662,40	DM-RS.02.21	36,95	4.589,60	DM-RD.02.21	48,23	5.671,40
Media	27,89	3.743,11	Media	40,12	4.999,25	Media	48,81	5.980,02
Mínimo	26,63	3.662,40	Mínimo	36,95	4.589,60	Mínimo	42,32	5.671,40

6. RESULTADOS

Máximo	29,31	3.841,70	Máximo	42,30	5.176,00	Máximo	51,92	6.238,20
SD	0,84	59,84	SD	1,25	154,83	SD	2,56	162,56
COV (%)	2,93	1,56	COV (%)	3,03	3,02	COV (%)	5,12	2,65
Caract.(5%)	26,72	3.665,44	Caract.(5%)	38,03	4.761,10	Caract.(5%)	44,66	5.671,40
Valor-P(*)	0,9761	0,8661	Valor-P(*)	0,5687	0,4411	Valor-P(*)	0,9384	0,9998

*Comprobación estadística de normalidad de resultados según Prueba de Kolmogorov-Smirnov.

Los datos recogidos se someten previamente a un estudio estadístico de normalidad según la prueba de Kolmogorov-Smirnov para determinar si pueden modelarse de acuerdo con una distribución normal. En el conjunto de datos con un valor-P mayor o igual a 0,05, no puede rechazarse la idea de que los datos provienen de una distribución normal con un 95% de confianza. Tal y como se muestra en la Tabla 107, todos los datos presentan una distribución normal.

A. Módulo de elasticidad MOE

Los módulos de elasticidad de las vigas dúo se obtienen en el tramo elástico cuya deformación ha sido medida con el extensómetro (Fuerza < 1,5 kN). En la Fig. 196 se muestran las rectas con los datos de fuerza (kN) en el eje de ordenadas, y la deformación medidos por el extensómetro en el centro del vano (mm) en el eje de abscisas. La tangente de la pendiente de las rectas representa el módulo de elasticidad de cada una de las piezas ensayadas.

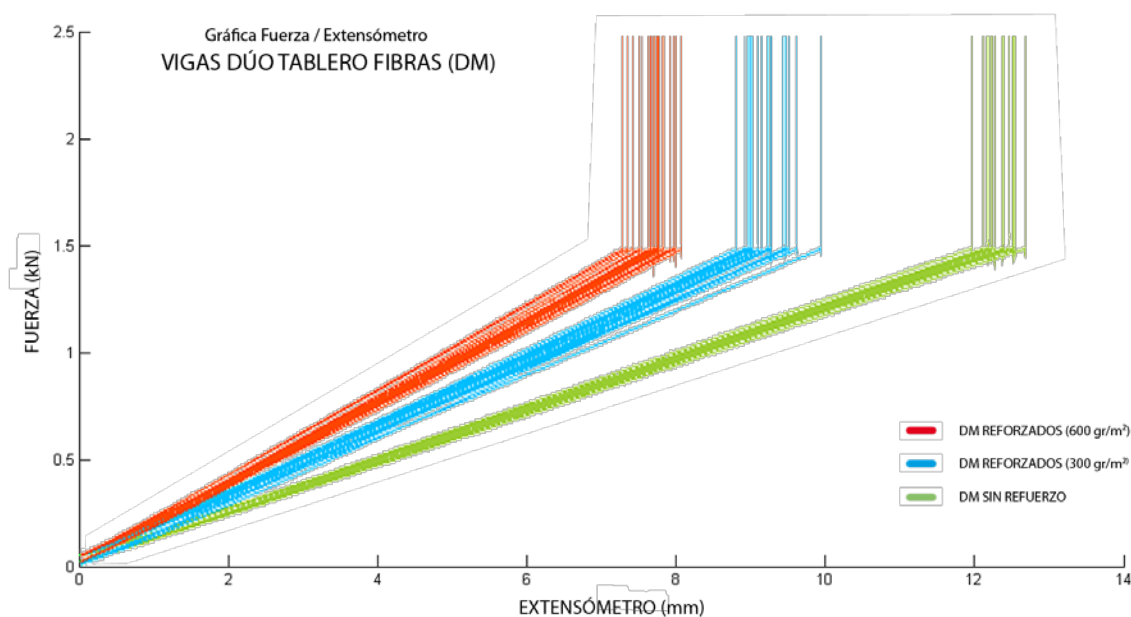


Fig. 196. Gráfica Fuerza – Extensómetro de las tres tipologías de viga dúo de tablero de fibras.

De esta representación pueden extraerse los siguientes resultados:

- 1) Si se observan los agrupamientos puede afirmarse que las vigas dúo testigo presentan un agrupamiento compacto, lo que confirma la homogeneidad en las propiedades del material (tablero DM) y con ello la eliminación de incertidumbres en la comparación de las piezas reforzadas con madera chopo (Apartado 6.7).
- 2) Los agrupamientos en las piezas reforzadas son igualmente compactos, en menor medida que los testigos, no observándose gran dispersión de los resultados. Esto confirma unas similares propiedades mecánicas entre los refuerzos de cada tipología y un correcto comportamiento de las líneas de encolado con resina epoxi Sikadur 30 utilizadas.
- 3) Comparando las pendientes de las rectas entre grupos, puede afirmarse que el aumento de gramaje en los refuerzos de fibra de vidrio aumenta las prestaciones mecánicas de las

piezas a flexión, si bien su porcentaje de mejora no se corresponde linealmente con el aumento de gramaje del refuerzo.

En la Tabla 108 se muestran la fuerza y la deformación medias de los distintos tipos de vigas dúo reforzadas medidas en el tramo elástico.

Tabla 108. Valores medios de fuerza y deformación para las distintas tipologías de viga dúo de tablero de fibras (DM).

Tipo de viga	Casos #	Fuerza tramo elástico (kN)	Deformación extensómetro (mm)	Mejora (%)
Dúo sin refuerzo [serie DM-T.02]	20	1,5	12,38±0,39	-
Dúo refuerzo GFRP UNI300 [serie DM-RS.02]	21	1,5	9,18±0,23	-34,90
Dúo refuerzo GFRP UNI600 [serie DM-RD.02]	21	1,5	7,70±0,21	-60,81

Con estos datos puede afirmarse que el refuerzo laminado de fibra de vidrio simple (UNI-300) reduce en un 35% la deformación de las vigas, y que con un refuerzo doble (UNI-600) se reduce en un 60% la deformación de las vigas.

Los valores de módulo de elasticidad individuales de cada una de las vigas se recogen en la Tabla 107 y se representan en el gráfico de puntos de la Fig. 197.

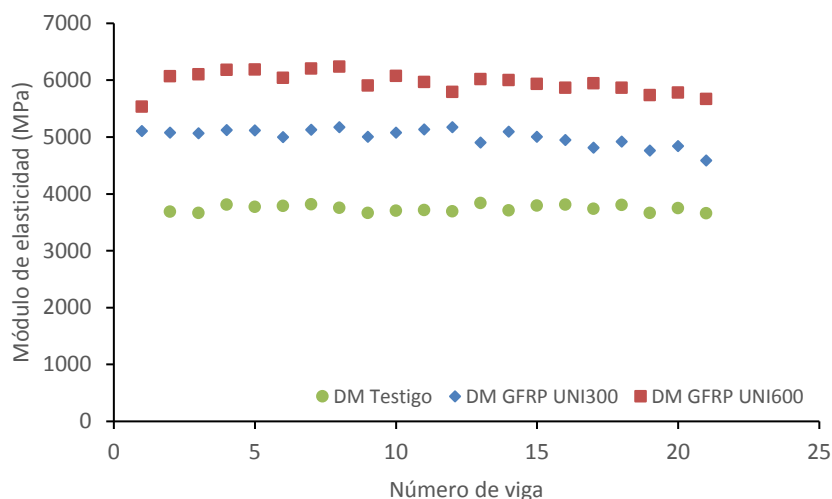


Fig. 197. Gráfico comparativo con los valores MOEg para las distintas vigas dúo de tablero (DM) ensayadas.

No obstante, la representación gráfica del conjunto de resultados anteriormente expuestos se realiza mediante un gráfico de caja y bigotes (Fig. 198). En este gráfico puede observarse fácilmente la mejora que representa el refuerzo en comparación con la viga dúo testigo, así como la mayor o menor dispersión de los valores obtenidos.

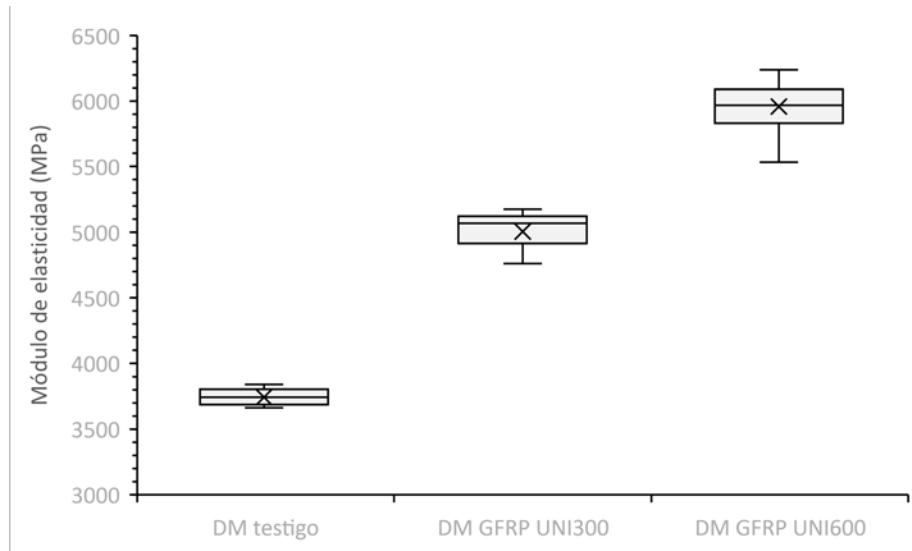


Fig. 198. Gráfico de caja y bigotes comparativo entre mód. de elasticidad de las diferentes vigas dúo de tablero de fibras (DM).

La mejora en el módulo de elasticidad debida a la incorporación de los laminados de refuerzo de fibra de vidrio (Tabla 109) se estima en el 33,55% para refuerzos sencillos (300 gr/m²), con un coeficiente de variación del 3,02%. Mientras que la mejora para refuerzos dobles (600 gr/m²) se estima en el 59,76%, con un coeficiente de variación del 2,65%.

Tabla 109. Comparación de los módulos de elasticidad de las vigas dúo DM [1:25].

Tipo de viga dúo	Casos #	MOE medio (MPa)	Mejora (%)	MOE característico (MPa)	Mejora (%)
Dúo sin refuerzo [serie DM-T.02]	20	3.743,11 ± 59,84	-	3.665,44	-
Dúo refuerzo GFRP UNI300 [serie DM-RS.02]	21	4.999,25 ± 154,83	33,55	4.761,10	29,89
Dúo refuerzo GFRP UNI600 [serie DM-RD.02]	21	5.980,02 ± 162,56	59,76	5.671,40	54,72

Comparados los porcentajes de mejora para los valores característicos (5ºpercentil), puede observarse como no existe una diferencia significativa. Este refleja la gran homogeneidad de las propiedades mecánicas de los tableros de fibras, lo que permite afirmar que las mejoras alcanzadas se deben unicamente a la mejora mecánica producida por el laminado de refuerzo.

Para comparar las prestaciones de los distintos laminados de refuerzo, y determinar sus diferencias, se realiza una prueba estadística de múltiples rangos a partir de las medias y el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher (Fig. 199).

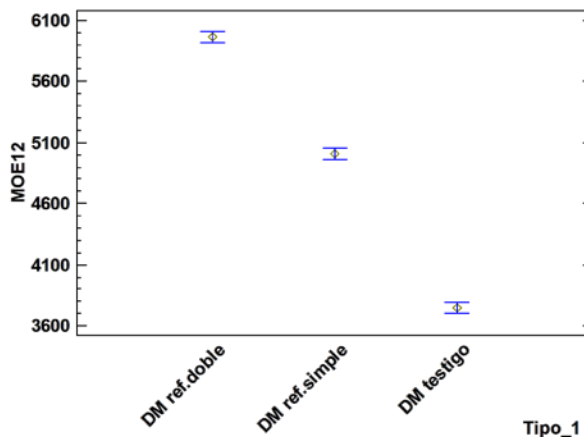


Fig. 199. Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para vigas dúo de tablero de fibras.

A partir de este análisis se realiza la comprobación de la homogeneidad entre grupos para los módulos de elasticidad (Tabla 110):

Tabla 110. Estudio de homogeneidad entre grupos de las vigas dúo de tablero de fibras.

Tipo refuerzo	Vigas dúo de tablero de fibras		
	Casos	Media (MPa)	Grupos Homogéneos*
DM testigo	20	3.743,11	X - -
DM. UNI-300	21	4.999,25	- X -
DM. UNI-600	21	5.980,02	- - X

*Método: 95,0 porcentaje de Fisher LSD

Del estudio de homogeneidad expuesto en la Fig. 199 y Tabla 110 puede extraerse que, todos los lotes de vigas reforzadas forman grupos independientes con comportamientos estadísticamente diferenciados.

B. Módulo de rotura MOR

Una vez retirado el extensómetro se continua con la carga de la viga hasta rotura, pudiendose representar con los datos de fuerza (kN) recogidos por la máquina universal y la carrera (mm) de la máquina la gráfica Fuerza-Carrera (Fig. 200).

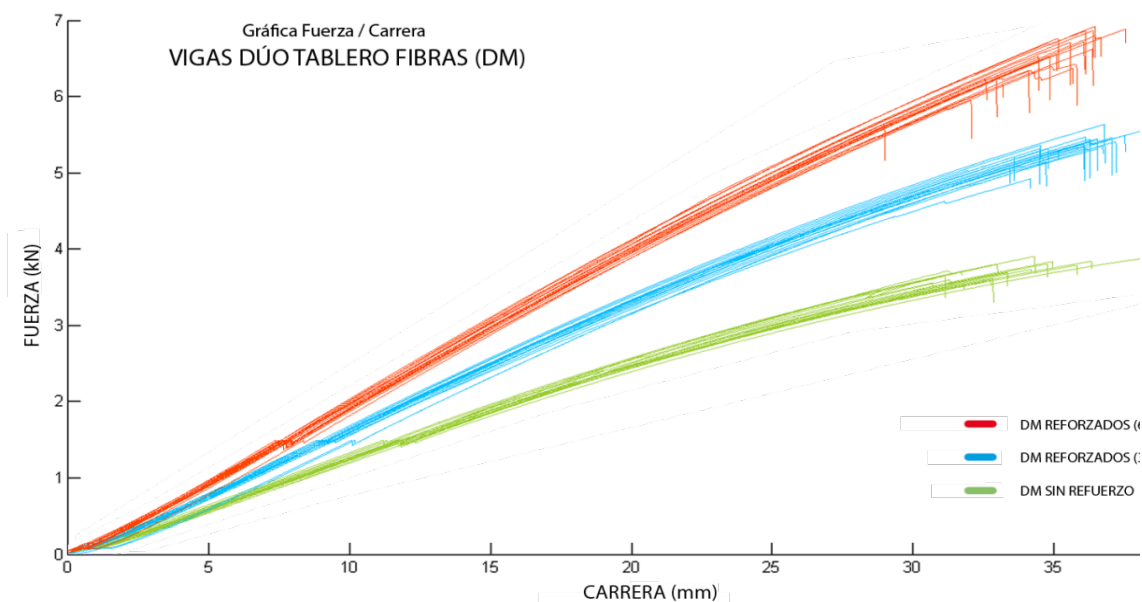


Fig. 200. Gráfica Fuerza – Carrera de las tres tipologías de viga dúo de tablero de fibras (DM) ensayadas.

De esta representación pueden extraerse los siguientes resultados:

- 1) Los distintos tipos de vigas dúo reforzadas de tablero de fibras ensayadas mantienen durante todo el proceso de carga hasta rotura un buen agrupamiento, semejante al descrito para el tramo elástico.
- 2) No se observan anomalías en las curvas, lo que indica que no se producen fallos en las líneas de encolado o en el interior del refuerzo hasta la rotura de las piezas.
- 3) La rotura de las piezas se produce a diferentes valores de carga para cada una de las tipologías, pero a similares valores de deformación con una variación inferior al 10%, por lo que puede interpretarse que el colapso de las piezas se produce por fallo o rotura del tablero DM.

Las deformaciones medias obtenidas para la fuerza de rotura de las piezas con los distintos refuerzos se representan en la Tabla 111.

Tabla 111. Valores medios de fuerza y deformación de rotura para las de viga dúo de tablero de fibras.

Tipo de viga	Casos #	Fuerza rotura (kN)	Mejora (%)	Deformación rotura (mm)	Mejora (%)
Dúo sin refuerzo [serie DM-T.02]	20	3,71±0,11	-	33,58±2,10	-
Dúo refuerzo GFRP UNI300 [serie DM-RS.02]	21	5,34±0,16	30,64	35,89±1,35	6,44
Dúo refuerzo GFRP UNI600 [serie DM-RD.02]	21	6,49±0,33	42,94	34,83±1,96	3,59

A partir de estos datos, puede afirmarse que el refuerzo no afecta significativamente a mejorar deformación de rotura; sin embargo, sí que permite aumentar la fuerza última de rotura. Se obtienen mejoras del 30,64% en la fuerza de rotura de las vigas dúo con refuerzo simple (UNI-300), y mejoras del 42,94% para las vigas dúo con refuerzo doble (UNI-600).

Los valores de módulo de rotura individuales de cada una de las vigas se recogen en la Tabla 108 y se representan en el gráfico de puntos de la Fig. 201.

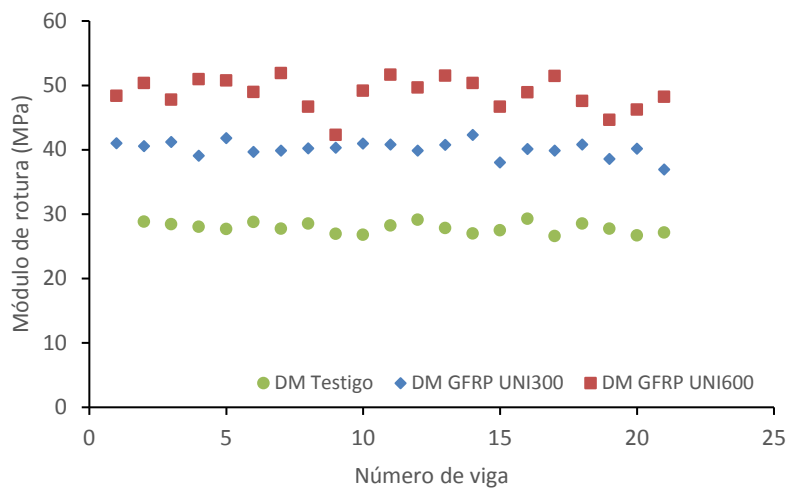


Fig. 201. Gráfico comparativo con los valores MOR para las distintas vigas dúo de tablero (DM) ensayadas.

Además, se representa gráficamente el conjunto de resultados mediante un gráfico de caja y bigotes (Fig. 202). En este gráfico puede compararse la mejora que representa cada tipo de refuerzo en comparación con la viga dúo testigo,

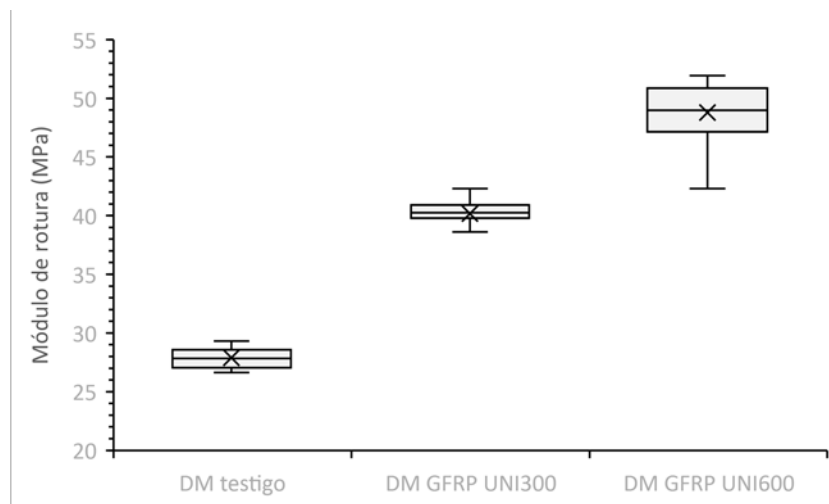


Fig. 202. Gráfico de caja y bigotes comparativo entre módulos de rotura de las diferentes vigas dúo de tablero de fibras (DM) ensayadas.

La mejora en el módulo de la rotura debida a la incorporación de los laminados de refuerzo de fibra de vidrio (Tabla 112) se estima en el 30,47% para refuerzos sencillos (300 gr/m²), con un coeficiente de variación del 3,03%. Mientras que la mejora para refuerzos dobles (600 gr/m²) se estima en el 42,85%, con un coeficiente de variación del 5,12%.

Tabla 112. Comparación de los módulos de rotura de las vigas dúo DM [1:25].

Tipo de viga dúo	Casos #	MOR medio (MPa)	Mejora (%)	MOR característico (MPa)	Mejora (%)
Dúo sin refuerzo [serie DM-T.02]	20	27,89±0,84	-	26,72	-
Dúo refuerzo GFRP UNI300 [serie DM-RS.02]	21	40,12±1,25	30,47	38,03	29,75
Dúo refuerzo GFRP UNI600 [serie DM-RD.02]	21	48,81±2,56	42,85	44,66	40,17

Puede observarse la gran similitud entre los valores medios y característicos de las vigas, como consecuencia de la alta homogeneidad de las propiedades mecánicas de los tableros de fibras.

C. Análisis de roturas

Finalizados los ensayos se realiza un análisis de los tipos de rotura producido en cada una de las piezas, deteniéndose especialmente en las piezas reforzadas (Fig. 203, Fig. 204).

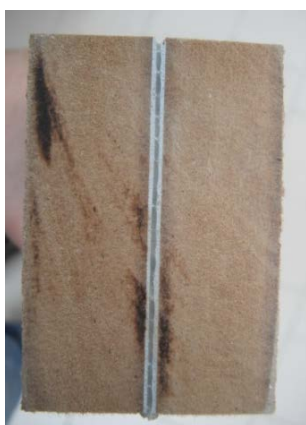


Fig. 203. Sección de una de las piezas con refuerzo sencillo (300 gr/m²).



Fig. 204. Sección de una de las piezas con refuerzo doble (600 gr/m²).

Análisis de las roturas de las piezas. Vigas dúo con refuerzo sencillo (300 gr/m²)

Las vigas con menor ratio de refuerzo muestran roturas por el colapso del tablero de fibras a tracción, no observándose roturas por la línea de encolado ni fallos de adherencia. Además, en varias piezas se observa un aplastamiento en la zona comprimida de las piezas (Fig. 205.a).



a) Vista lateral de la rotura de la zona central.



b) Vista superior de la zona central a compresión.

Fig. 205. Rotura típica de las vigas dúo con refuerzo sencillo (UNI-300).

Análisis de las roturas de las piezas. Vigas dúo con refuerzo doble (600 gr/m²)

Al igual que en las piezas con refuerzo sencillo la rotura de las piezas con mayor ratio de refuerzo se produce por el colapso del tablero. Sin embargo, a diferencia de las piezas con refuerzo sencillo, en este tipo de piezas se produce una rotura “explosiva”, separándose fragmentos de tablero en la zona central de la pieza (Fig. 206). Esta rotura es consecuencia del colapso de la zona comprimida, produciéndose una rotura por vuelco lateral de las piezas.



a) Vista axial de una rotura producida por vuelco lateral.

b) Vista superior de la zona central a compresión.

Fig. 206. Rotura tipo de las vigas dúo con refuerzo doble (UNI-600).

No obstante, en algunas piezas aisladas se han detectado roturas mixtas por delaminación del tablero de fibras, junto con un fallo o rotura de la línea de encolado (Fig. 207).



Fig. 207. Rotura anómala con fallo de la línea de encolado.

6.7.4. Discusión de los resultados en tablero de fibra DM [1:25]

Los ensayos realizados con vigas dúo de tablero de fibras de densidad media reforzadas con laminados GFRP, se realizan fundamentalmente para poder comparar el incremento real de los refuerzos. La variabilidad natural de las propiedades mecánicas de la madera dificulta la comparación de resultados en ratios ligeros de refuerzo, recurriéndose a un material industrial, homogéneo y estable, derivado de la madera como el tablero de fibras para reducir la gran variabilidad observada en los resultados de las vigas dúo escala 1:25 de chopo.

La dispersión de los resultados se reduce de forma significativa, obteniendo coeficientes de variabilidad del 1,5-5% en las vigas dúo de tablero; valores muy inferiores a los obtenidos con las vigas de madera de chopo (entorno al 15%). Esta reducción de la variabilidad permite, como se observa en la Fig. 200, diferenciar los resultados obtenidos en tres grupos de valores independientes. En la Tabla 113 se muestran, a modo de resumen, los principales resultados obtenidos.

Tabla 113. Valores medios de módulo de elasticidad y módulo de rotura obtenidos para vigas dúo de tablero de fibras.

Tipo de viga dúo	Casos #	Ratio (%)	MOE medio (MPa)	Mejora (%)	MOR medio (MPa)	Mejora (%)
Dúo DM sin refuerzo	20	-	3.743,11±59,84	-	27,89±0,84	-
Dúo DM con refuerzo GFRP UNI300	21	3,57	4.999,25±154,83	33,55	40,12±1,25	30,47
Dúo DM con refuerzo GFRP UNI600	21	4,64	5.980,02±162,56	59,76	48,81±2,56	42,85

No se han encontrado publicaciones de interés con ensayos sobre refuerzo de tableros de fibras similares a los realizados en este capítulo. No obstante, como material derivado de la madera puede asimilarse, de modo simplificado, las prestaciones mecánicas de los tableros a maderas de baja calidad. En cuyo caso, los incrementos de mejora obtenidos con la ratio de refuerzo utilizado (<5%) se pueden asemejar a las investigaciones de Johns et Lacroix⁵⁶⁶, en la cual, con refuerzos de fibra de vidrio en ratios del 10%, obtienen incrementos de resistencia última del 40%; valores semejantes a los alcanzados en esta investigación.

6.8. Ensayos a flexión en dimensiones estructurales [1:2]

Este capítulo muestra los resultados obtenidos en los ensayos destructivos a flexión realizados sobre vigas de madera chopo (*Populus x euroamericana* l-214) y pino pinaster (*Pinus pinaster* Ait.) reforzadas con laminados de fibra de vidrio GFRP de distintos gramajes (Fig. 208).



A) Acopio serie CH.T



B) Acopio serie PP.R1200.

Fig. 208. Acopio de vigas dúo [1:2] para su ensayo en el laboratorio de maderas de Palencia.

Los ensayos se realizan sobre tres series de vigas escala estructural 1:2 de cada especie de madera (Tabla 114), de dimensiones nominales (40+40)x140x2500mm, para determinar el módulo de elasticidad local (MOEG) y el módulo de rotura (MOR). Los ensayos se inician con una primera serie testigo (Serie CH.T / PP.T) compuesta por vigas de chopo y pino sin refuerzo, la cual se utiliza de referencia para comparar la mejora de los refuerzos. Se continúan con una segunda serie (Serie CH.R1200 / PP.R1200) reforzadas con un laminado GFRP-UNI 1200 (refuerzo total 1200gr/m²) de

⁵⁶⁶ Johns et al. (2000) Op. cit.

una capa. Y una tercera serie (Serie CH.R2400 / PP.R2400) reforzadas con un laminado GFRP-UNI 2400 (refuerzo total 2400gr/m²), de doble capa. Las dimensiones reales de cada una de las piezas ensayadas se detallan en el Anexo.

Tabla 114. Número de vigas dúo reforzadas [1:2].

Madera de chopo	#	Madera de pino pinaster	#
Dúo chopo sin refuerzo – testigos [serie CH.T]	29	Dúo pinaster sin refuerzo – testigos [serie PP.T]	28
Dúo chopo refuerzo GFRP-UNI1200 [serie CH.R1200]	30	Dúo pinaster refuerzo GFRP-UNI1200 [serie PP.R1200]	27
Dúo chopo refuerzo GFRP-UNI2400 [serie CH.R2400]	30	Dúo pinaster refuerzo GFRP-UNI2400 [serie PP.R2400]	30

El refuerzo empleado son laminados rígidos de fibra de vidrio, compuestos por una o varias capas de tejido unidireccional embebido en resina, colocados en la parte media inferior de la sección. Las propiedades de los refuerzos de la sección empleados se detallan en la Tabla 115. Se han utilizado ratios de refuerzo ligeros, <2% de la sección, con una repercusión económica, visual y ambiental lo más moderada posible para obtener unos resultados teóricos viables.

Tabla 115. Propiedades mecánicas del refuerzo utilizado en cada serie de vigas dúo [1:2].

	Módulo de elasticidad (MPa)	COV (%)	Tensión de rotura (MPa)	COV (%)	Ratio refuerzo (%)
Laminado de refuerzo de fibra de vidrio [GFRP UNI 1200].	21.605	4,43	457	6,26	1,07
Laminado de refuerzo de fibra de vidrio [GFRP UNI 2400].	26.814	8,35	573	7,64	1,61

*Los valores son extraídos de los resultados del Apartado 6.5.

Los objetivos de este capítulo son:

- Obtener los módulos de elasticidad (MOE) de las vigas dúos ensayados.
- Obtener los módulos de rotura (MOR) de las vigas dúos ensayados.
- Comparar los valores obtenido para cada escalón de refuerzo y obtener los porcentajes de mejora de cada serie de viga dúo reforzadas en comparación con la serie de vigas dúo testigo sin refuerzo.
- Analizar las roturas de las vigas ensayadas para comprobar la influencia del refuerzo sobre nudos y otras singularidades de la madera.

6.8.1. Resultados vigas dúo de chopo [1:2]

A partir de los diferentes datos recogidos durante el ensayo a flexión de las vigas dúo a escala 1:2 se obtienen los resultados que se muestran a continuación, exponiéndose los módulos de elasticidad (MOEG) y módulo de rotura (MOR) para comparar la mejora que representa la introducción de los laminados de refuerzo (Tabla 116). Los valores individuales de cada viga dúo ensayada se recogen en el Anexo.

Tabla 116. Valores de MOR y MOEG para las vigas dúo [1:2].

Dúo chopo sin refuerzo – testigos [serie CH.T]			Testigos dúo GFRP UNI 1200 [serie CH.R1200]			Testigos dúo GFRP UNI 2400 [serie CH.R2400.]		
#	MOR (MPa)	MOEG ₁₂ (MPa)	#	MOR (MPa)	MOEG ₁₂ (MPa)	#	MOR (MPa)	MOEG ₁₂ (MPa)
CH.T.01	39,52	7.973,20	CH.R1200.01	51,06	8.372,46	CH.R2400.01	39,62	7.809,96
CH.T.02	36,95	7.107,81	CH.R1200.02	-	-	CH.R2400.02	-	-
CH.T.03	38,60	7.685,27	CH.R1200.03	37,71	9.320,72	CH.R2400.03	41,61	9.718,84
CH.T.04	30,54	7.107,41	CH.R1200.04	52,76	9.628,94	CH.R2400.04	48,36	10.146,93
CH.T.05	22,84	7.619,50	CH.R1200.05	41,62	8.731,73	CH.R2400.05	49,80	10.401,05
CH.T.06	42,44	7.900,20	CH.R1200.06	41,74	8.638,91	CH.R2400.06	42,53	9.322,01
CH.T.07	42,29	7.531,18	CH.R1200.07	50,25	8.327,51	CH.R2400.07	58,74	9.626,89
CH.T.08	36,15	9.472,00	CH.R1200.08	39,77	8.026,27	CH.R2400.08	38,23	9.552,46
CH.T.09	21,25	7.076,13	CH.R1200.09	42,07	9.639,03	CH.R2400.09	39,92	8.255,83
CH.T.10	-	-	CH.R1200.10	50,73	8.860,26	CH.R2400.10	49,05	8.716,45

Dúo chopo sin refuerzo – testigos [serie CH.T]			Testigos dúo GFRP UNI 1200 [serie CH.R1200]			Testigos dúo GFRP UNI 2400 [serie CH.R2400.]		
#	MOR (MPa)	MOEG ₁₂ (MPa)	#	MOR (MPa)	MOEG ₁₂ (MPa)	#	MOR (MPa)	MOEG ₁₂ (MPa)
CH.T.11	42,45	8.481,76	CH.R1200.11	33,34	8.699,21	CH.R2400.11	40,51	9.206,52
CH.T.12	49,86	8.760,46	CH.R1200.12	-	-	CH.R2400.12	49,10	9.214,05
CH.T.13	23,07	7.599,55	CH.R1200.13	55,25	9.801,30	CH.R2400.13	50,06	8.322,30
CH.T.14	42,85	7.486,76	CH.R1200.14	37,60	8.150,14	CH.R2400.14	41,14	8.798,34
CH.T.15	20,89	6.927,67	CH.R1200.15	41,55	8.214,05	CH.R2400.15	42,74	10.722,36
CH.T.16	-	-	CH.R1200.16	43,82	9.222,44	CH.R2400.16	32,67	11.254,47
CH.T.17	36,19	8.077,56	CH.R1200.17	47,78	9.576,41	CH.R2400.17	40,57	9.139,99
CH.T.18	39,48	7.298,56	CH.R1200.18	41,67	9.679,44	CH.R2400.18	44,14	8.629,33
CH.T.19	49,92	7.991,84	CH.R1200.19	44,42	9.482,15	CH.R2400.19	-	-
CH.T.20	36,94	7.333,28	CH.R1200.20	41,19	8.559,80	CH.R2400.20	50,00	10.705,22
CH.T.21	32,28	7.290,55	CH.R1200.21	43,61	8.250,28	CH.R2400.21	36,79	8.216,16
CH.T.22	41,69	7.452,70	CH.R1200.22	43,93	9.622,96	CH.R2400.22	37,25	8.905,64
CH.T.23	55,48	9.308,49	CH.R1200.23	35,49	7.643,01	CH.R2400.23	-	-
CH.T.24	27,87	9.700,88	CH.R1200.24	41,78	8.648,69	CH.R2400.24	34,82	7.775,62
CH.T.25	36,72	7.387,72	CH.R1200.25	50,82	9.956,01	CH.R2400.25	27,23	8.424,01
CH.T.26	36,89	7.732,76	CH.R1200.26	-	-	CH.R2400.26	37,72	7.527,27
CH.T.27	26,41	8.532,92	CH.R1200.27	24,30	7.739,29	CH.R2400.27	38,73	9.066,94
CH.T.28	29,33	7.510,12	CH.R1200.28	51,38	9.753,11	CH.R2400.28	55,23	10.788,25
CH.T.29	33,68	7.199,23	CH.R1200.29	39,16	8.739,33	CH.R2400.29	-	-
CH.T.30	-	-	CH.R1200.30	34,73	9.526,19	CH.R2400.30	-	-
Media	36,02	7.835,02	Media	42,95	8.918,876	Media	46,01	9.209,88
Mínimo	20,89	6.532,41	Mínimo	24,30	7.643,01	Mínimo	29,37	7.527,27
Máximo	55,48	9.700,88	Máximo	55,25	9.956,01	Máximo	63,35	11.254,47
SD	8,86	751,89	SD	6,92	691,09	SD	7,77	1.022,13
COV (%)	25,51	10,18	COV (%)	15,80	7,60	COV (%)	16,54	10,87
Caract.(5%)	21,07	6.808,72	Caract.(5%)	27,92	7.681,52	Caract.(5%)	31,13	7.601,78
Valor-P(*)	0,7051	0,3238	Valor-P(*)	0,8369	0,4808	Valor-P(*)	0,7466	0,9689

*Comprobación estadística de normalidad de resultados según Prueba de Kolmogorov-Smirnov.

Los datos recogidos se someten previamente a un estudio estadístico de normalidad según la prueba de Kolmogorov-Smirnov para determinar si pueden modelarse de acuerdo con una distribución normal. En el conjunto de datos con un valor-P mayor o igual a 0,05, no puede rechazarse la idea de que los datos provienen de una distribución normal con un 95% de confianza. Tal y como se muestra en la Tabla 116, todos los datos presentan una distribución normal.

Los datos expuestos en la Tabla 116 han sido corregidos para ajustar los resultados obtenidos a una humedad de equilibrio higroscópico de referencia del 12%. Esta corrección se aplica a los módulos de elasticidad, según la norma EN 384:2016⁵⁶⁷, para muestras cuyo contenido de humedad esté comprendido entre el 8% y el 18%, utilizando la siguiente ecuación:

$$E_{0,12} = E_0(u) \cdot [1 + 0,01 \cdot (u - u_{ref})]^* \tag{80}$$

Donde,

u=es el contenido de humedad en el momento del ensayo (8% ≤ u ≤ 18%).

u_{ref}=es el contenido de humedad de referencia, en este caso u_{ref}=12% .

* Ecuación de ajuste para el módulo de elasticidad paralelo a la fibra de acuerdo con norma UNE-EN 384:2016 / pto.5.4.2.

Esta corrección penaliza los valores obtenidos con muestras cuya humedad sea inferior al 12% y aumenta los valores de las muestras con humedades superiores.

En la Fig. 209 se muestra el gráfico fuerza-deformación con todas las vigas dúo de madera de chopo ensayadas. A partir de la pendiente de la curva en su tramo elástico inicial (tramo recto) se obtienen los módulos de elasticidad de cada una de ellas, siendo mayor la rigidez de las piezas con mayor pendiente. De los puntos de rotura se obtienen los módulos de rotura.

⁵⁶⁷ Norma UNE 384:2016. Op. cit.

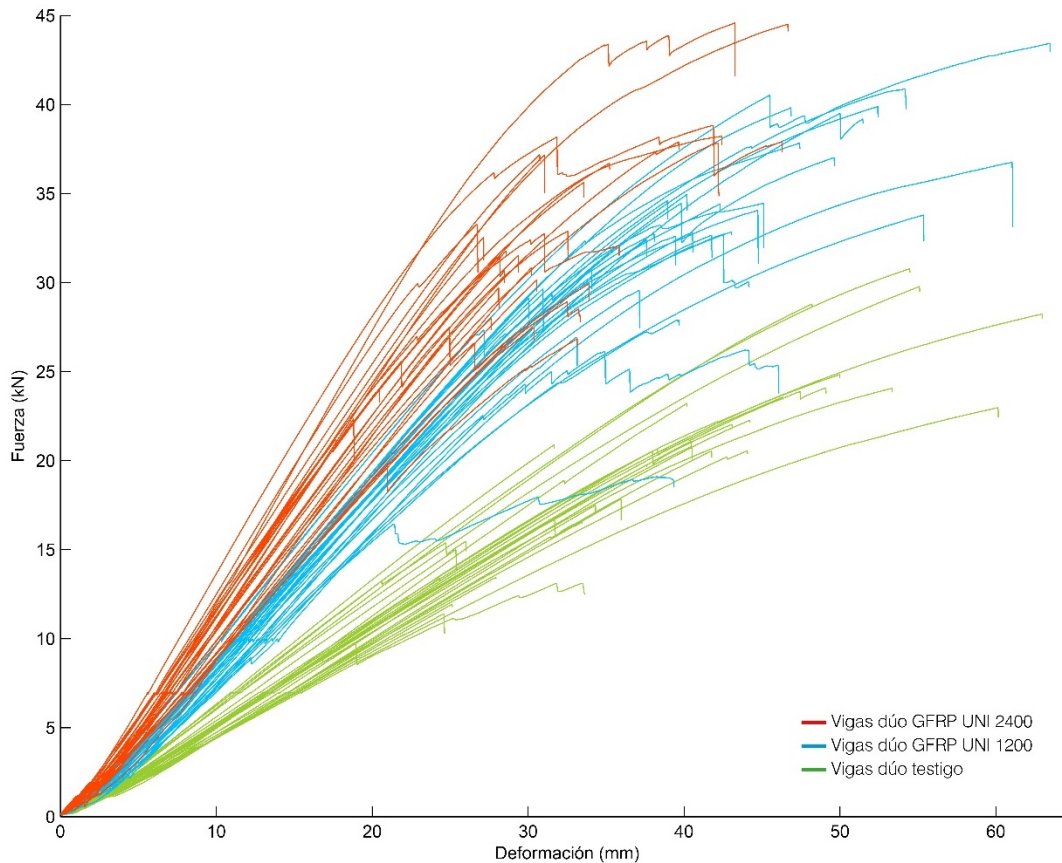


Fig. 209. Gráfica Fuerza-Deformación de las vigas dúo de chopo [1:2].

Como puede observarse, existe una diferencia significativa entre el grupo de las vigas dúo testigo (verde) y los grupos de vigas dúo reforzadas con laminados; GFRP UNI-1200 (azul) y GFRP UNI-2400 (rojo). Sin valorar en este punto los porcentajes de mejora de cada tipo de refuerzo, la diferenciación clara entre grupos de vigas permite afirmar que se ha producido un adecuado comportamiento de las vigas reforzadas, con un incremento sensible de la rigidez de las piezas.

Este incremento en rigidez de las piezas reforzadas también se ve reflejado en las prestaciones resistentes, con un incremento en los valores medios de la fuerza de rotura de las piezas ensayadas (Tabla 117).

Tabla 117. Valores medios de fuerza de rotura y flecha máxima de las vigas dúo de chopo [1:2].

Tipo viga dúo	Casos #	Fuerza de rotura (kN)	Mejora (%)	Flecha máxima (mm)	Mejora (%)
Dúo sin refuerzo [serie CH.T]	29	27,6±7,02	-	34,60±8,10	-
Dúo refuerzo GFRP UNI1200 [serie CH.R1200]	30	32,57±4,32	15,26	41,34±10,25	16,30
Dúo refuerzo GFRP UNI2400 [serie CH.R2400]	28	34,13±4,66	19,13	44,30±9,17	21,90

A. Módulo de elasticidad global (MOEG)

A partir de los ensayos destructivos a flexión realizados se obtienen los módulos de elasticidad global de las diferentes vigas dúo testigo y reforzadas. Los valores obtenidos para cada una de las vigas dúo de chopo ensayadas se representan conjuntamente en la Fig. 210. Los resultados obtenidos muestran una variabilidad moderada, con un agrupamiento de los valores de las vigas reforzadas claramente superior a los valores de las vigas testigo, salvo valores puntuales y aislados.

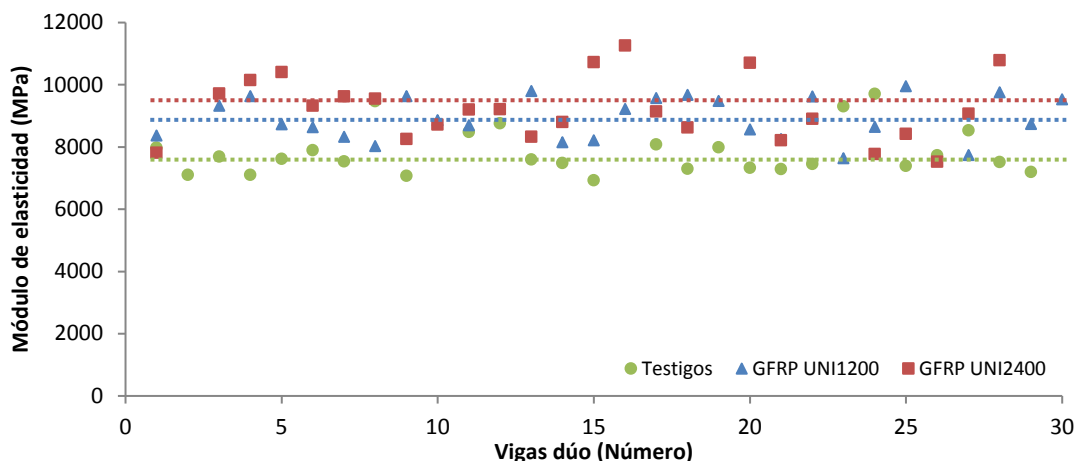


Fig. 210. Gráfico de puntos con valores de MOEG de vigas dúo de chopo.

Este comportamiento observado en los valores individuales se analiza en conjunto a partir los valores medios de cada tipo de viga dúo ensayada, realizándose un gráfico de caja-bigotes (Fig. 211). En este gráfico, formado con un número de piezas ensayadas en torno a 30 unidades por serie, pueden compararse de valores y comportamiento para cada grupo de vigas.

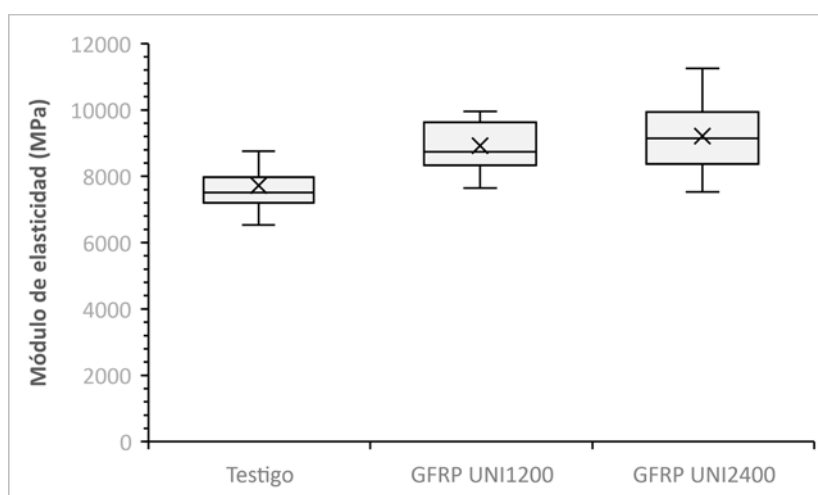


Fig. 211. Gráfico cajas-bigotes del MOEG de vigas dúo chopo [1:2].

En este gráfico puede observarse un incremento sensible del módulo de elasticidad en ambas series de vigas reforzadas, tanto en la serie GFRP UNI 1200 con valores medios de 8.918 MPa como en la serie GFRP UNI 2400 con valores medios de 9.209 MPa, respecto a las vigas dúo sin reforzar, con valores medios de 7.835 MPa. Además de un aumento del módulo de elasticidad medio de las vigas por acción directa de las propiedades mecánicas del laminado, las vigas reforzadas muestran unos valores característicos superiores, la serie GFRP UNI-1200 con valores característicos de 7.681 MPa y la serie GFRP UNI-2400 con valores característicos de 7.601MPa, en comparación con las vigas dúo sin refuerzo (6.808 MPa). En la Tabla 118 se detallan los incrementos en los módulos de elasticidad en forma de porcentajes de mejora introducidos por la incorporación de los laminados de refuerzo.

Tabla 118. Comparación de los módulos de elasticidad de las vigas dúo de chopo [1:2].

Tipo de viga dúo	Casos #	MOEG medio (MPa)	Mejora (%)	MOEG característico (MPa)	Mejora (%)
Dúo sin refuerzo [serie CH.T]	27	7.835,02±751,89	-	6.808,72	-
Dúo refuerzo GFRP UNI1200 [serie CH.R1200]	27	8.918,87±691,09	12,15	7.681,52	9,04
Dúo refuerzo GFRP UNI2400 [serie CH.R2400]	25	9.209,88±1.022,13	14,93	7.601,78	8,09

Puede observarse como, los porcentajes de mejora para ambos refuerzos son bastante semejantes, con incrementos del 12,15% y 14,93% para los refuerzos GFRP UNI-1200 y GFRP UNI-2400 respectivamente. Siendo la mejora prácticamente idéntica para los rangos bajos de las piezas, con un 9% y 8% de incremento en los valores característicos.

B. Módulo de rotura (MOR)

Los valores de módulo de rotura obtenidos para cada una de las vigas dúo de madera de chopo ensayadas se representan conjuntamente en el gráfico de la Fig. 212.

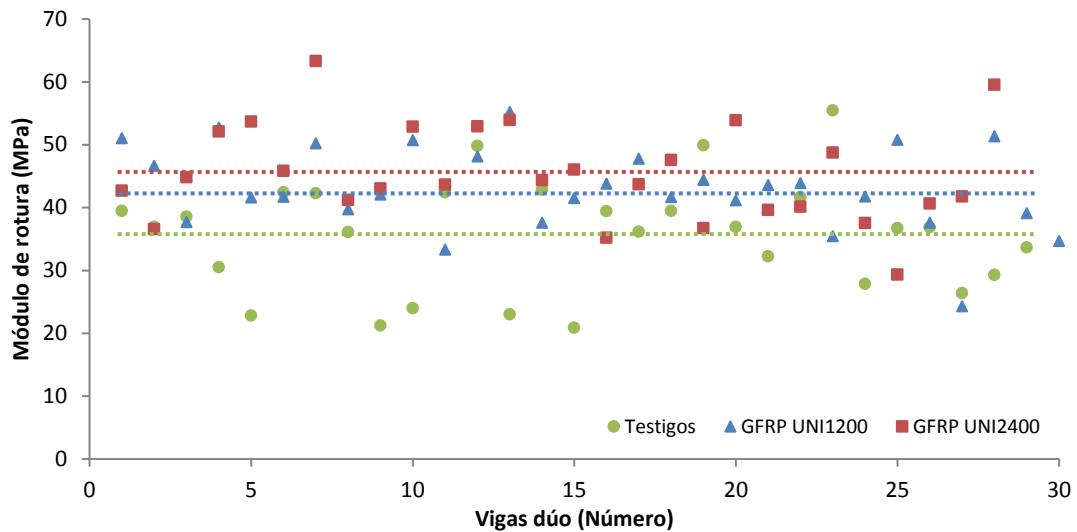


Fig. 212. Gráfico de puntos con valores de MOR de vigas dúo de chopo.

A diferencia de los resultados de módulo de elasticidad, los módulos de rotura muestran una mayor variabilidad en los resultados con una dispersión de valores que dificulta el estudio y análisis de los resultados. Únicamente se puede afirmar que los valores del rango más bajo son ocupados por las vigas dúo sin refuerzo. Para determinar el comportamiento de las vigas en su conjunto se analizan los datos en grupos, con los valores medios de cada tipo de viga dúo ensayada. En la Fig. 213 se muestra un gráfico de caja-bigotes realizados con los valores medios de las piezas ensayadas (entorno a 30 unidades por serie), donde pueden compararse los resultados entre los tres grupos; vigas testigo, reforzadas GFRP UNI-1200, y GFRP UNI-2400.

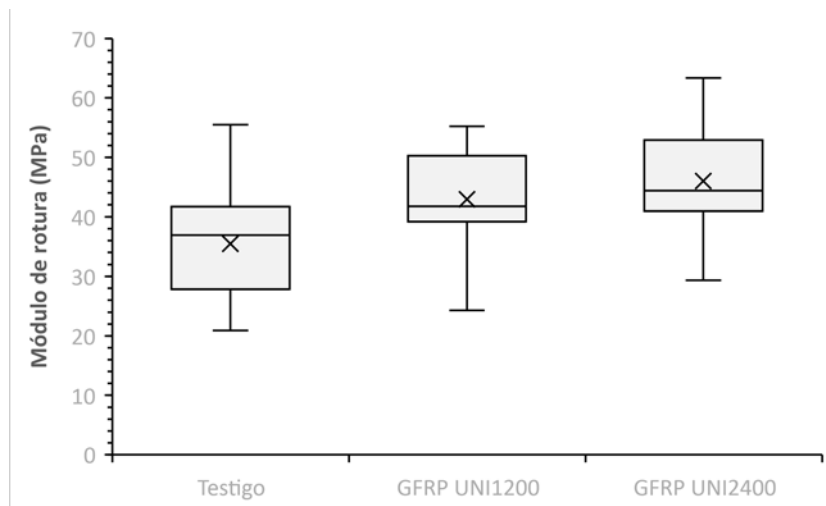


Fig. 213. Gráfico cajas-bigotes del MOR de vigas dúo chopo.

En este gráfico puede observarse un incremento significativo en los módulos de rotura medios de las vigas reforzadas, 42,95 MPa con el refuerzo GFRP UNI-1200 y 46,01 MPa con el refuerzo GFRP UNI-2400, en comparación con las vigas sin refuerzo, con 36,02 MPa. Además, estas vigas dúo reforzadas presentan una menor variabilidad de los resultados en comparación con las vigas testigo, con un COV=15,80% en las vigas dúo reforzadas con GFRP UNI-2400, un COV=16,54% en las vigas dúo reforzadas con GFRP UNI-1200, y un COV=25,51% en las vigas testigo. En la Tabla 119 se detallan estos incrementos en los módulos de rotura en forma de porcentajes de mejora introducidos por la incorporación de los laminados de refuerzo.

Tabla 119. Comparación de los módulos de rotura de las vigas dúo de chopo [1:2].

Tipo de viga dúo	Casos #	MOR medio (MPa)	Mejora (%)	MOR característico (MPa)	Mejora (%)
Dúo sin refuerzo [serie CH.T]	27	36,02±8,86	-	21,07	-
Dúo refuerzo GFRP UNI1200 [serie CH.R1200]	27	42,95±6,92	16,13	27,92	24,66
Dúo refuerzo GFRP UNI2400 [serie CH.R2400]	25	46,01±7,76	21,71	31,13	32,43

Puede observarse unos porcentajes de mejora en los valores medios del 16,13% y 21,71% para los refuerzos GFRP UNI-1200 y GFRP UNI-2400 respectivamente. No obstante, es más interesante aún el incremento que se produce en los rangos inferiores, con unos porcentajes de mejora en los valores característicos del 24,66% y 32,43%, superiores a los alcanzados en los valores medios. Lo que permite afirmar que los refuerzos introducidos no sólo aportan un incremento resistente por sus propiedades mecánicas, sino que además homogeneizan las secciones reforzadas y reducen la repercusión negativa de las singularidades de la madera.

Para comparar las prestaciones de las distintas vigas dúo de madera de chopo escala 1:2, y determinar sus diferencias, se realiza una prueba estadística de múltiples rangos a partir de las medias y el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher (Fig. 214).

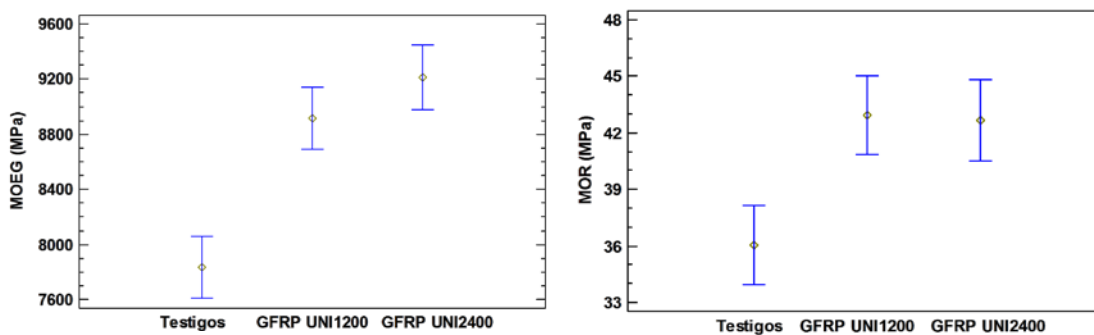


Fig. 214. Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para vigas dúo de madera de chopo [1:2].

La comprobación de la homogeneidad entre grupos para los módulos de elasticidad y módulo de rotura se exponen en la Tabla 120.

Tabla 120. Estudio de homogeneidad entre grupos de las vigas dúo de pino pinaster [1:2].

Vigas dúo de madera de chopo [1:2] (MOEG)			
Tipo refuerzo	Casos	Media (MPa)	Grupos Homogéneos*
Dúo sin refuerzo	27	7.835,02	X - -
Dúo refuerzo GFRP UNI1200	27	8.918,87	- X -
Dúo refuerzo GFRP UNI2400	25	9.209,88	- X -

Vigas dúo de madera de chopo [1:2] (MOR)			
Tipo refuerzo	Casos	Media (MPa)	Grupos Homogéneos*
Dúo sin refuerzo	27	36,02	X - -
Dúo refuerzo GFRP UNI1200	27	42,95	- X -
Dúo refuerzo GFRP UNI2400	25	46,01	- X -

*Método: 95,0 porcentaje de Fisher LSD

Del estudio de homogeneidad puede extraerse que las vigas dúo reforzadas, estadísticamente, no puede afirmarse que formen grupos independientes.

6.8.2. Resultados vigas dúo de Pino pinaster [1:2]

A partir de los diferentes datos recogidos durante el ensayo a flexión de las vigas dúo escala 1:2 se obtienen los resultados que se muestran a continuación, exponiéndose los módulos de elasticidad (MOEG) y módulo de rotura (MOR) para comparar la mejora que representa la introducción de los laminados de refuerzo (Tabla 121). Los valores individuales de cada viga dúo ensayada se recogen en el Anexo.

Tabla 121. Valores de MOR y MOEG para las vigas dúo de pino pinaster [1:2].

Dúo chopo sin refuerzo – testigos [serie PP.T]			Testigos dúo GFRP UNI 1200 [serie PP.R1200]			Testigos dúo GFRP UNI 2400 [serie PP.R2400.]		
#	MOR (MPa)	MOEG ₁₂ (MPa)	#	MOR (MPa)	MOEG ₁₂ (MPa)	#	MOR (MPa)	MOEG ₁₂ (MPa)
PP.T.01	45,39	9.209,74	PP.R1200.01	77,62	12.837,24	PP.R2400.01	40,83	7.515,19
PP.T.02	62,27	10.070,91	PP.R1200.02	57,29	10.278,72	PP.R2400.02	31,36	6.610,77
PP.T.03	47,92	12.403,64	PP.R1200.03	50,54	11.733,72	PP.R2400.03	39,62	9.879,26
PP.T.04	70,72	13.233,76	PP.R1200.04	68,38	11.994,27	PP.R2400.04	37,09	7.118,02
PP.T.05	30,75	10.969,73	PP.R1200.05	61,78	10.425,47	PP.R2400.05	60,78	11.226,73
PP.T.06	59,00	12.942,75	PP.R1200.06	54,40	11.798,83	PP.R2400.06	43,26	10.794,72
PP.T.07	29,63	9.292,46	PP.R1200.07	60,88	11.407,45	PP.R2400.07	46,27	11.193,34
PP.T.08	69,55	10.825,78	PP.R1200.08	77,27	11.123,98	PP.R2400.08	39,39	8.602,30
PP.T.09	53,84	7.472,54	PP.R1200.09	59,08	11.806,80	PP.R2400.09	37,65	7.013,79
PP.T.10	52,63	9.052,14	PP.R1200.10	59,94	10.030,82	PP.R2400.10	36,05	6.319,84
PP.T.11	54,27	9.171,17	PP.R1200.11	74,14	11.461,91	PP.R2400.11	49,55	10.391,75
PP.T.12	42,39	7.825,47	PP.R1200.12	58,44	11.530,77	PP.R2400.12	48,55	10.114,30
PP.T.13	75,63	11.829,69	PP.R1200.13	48,42	10.614,20	PP.R2400.13	50,22	9.971,95
PP.T.14	50,32	12.083,61	PP.R1200.14	78,94	12.688,76	PP.R2400.14	38,19	9.004,47
PP.T.15	88,65	13.207,90	PP.R1200.15	-	-	PP.R2400.15	-	-
PP.T.16	52,38	12.138,94	PP.R1200.16	66,23	10.362,30	PP.R2400.16	40,32	10.007,00
PP.T.17	58,92	12.440,78	PP.R1200.17	61,91	11.831,58	PP.R2400.17	42,77	8.763,05
PP.T.18	45,89	11.414,02	PP.R1200.18	72,58	12.612,73	PP.R2400.18	34,91	7.310,44
PP.T.19	40,03	8.131,48	PP.R1200.19	59,45	12.862,85	PP.R2400.19	46,85	7.667,55
PP.T.20	46,51	10.192,39	PP.R1200.20	80,73	11.856,95	PP.R2400.20	52,55	12.090,23
PP.T.21	39,22	10.762,86	PP.R1200.21	63,52	12.909,08	PP.R2400.21	34,78	7.183,11
PP.T.22	73,21	11.036,66	PP.R1200.22	54,14	10.438,78	PP.R2400.22	37,60	7.284,14
PP.T.23	66,96	9.964,61	PP.R1200.23	-	-	PP.R2400.23	32,43	9.489,48
PP.T.24	59,17	11.591,14	PP.R1200.24	86,54	12.589,29	PP.R2400.24	46,90	8.996,69
PP.T.25	35,98	10.107,84	PP.R1200.25	59,28	10.235,19	PP.R2400.25	-	-
PP.T.26	71,44	11.010,94	PP.R1200.26	54,47	11.376,83	PP.R2400.26	28,88	7.305,47
PP.T.27	55,55	9.362,87	PP.R1200.27	75,52	12.794,73	PP.R2400.27	65,76	12.099,54
PP.T.28	54,91	11.533,07	PP.R1200.28	-	-	PP.R2400.28	41,24	7.859,83
PP.T.29	-	-	PP.R1200.29	-	-	PP.R2400.29	-	-
PP.T.30	-	-	PP.R1200.30	-	-	PP.R2400.30	-	-
Media	54,75	10.688,53	Media	64,32	11.584,13	Media	42,16	8.915,88
Mínimo	29,63	7.472,54	Mínimo	48,42	10.030,82	Mínimo	28,88	6.319,84
Máximo	88,65	13.233,76	Máximo	86,54	12.909,08	Máximo	65,76	12.099,54
SD	14,17	1.599,70	SD	10,16	3.222,33	SD	8,39	2.877,67
COV (%)	25,41	14,70	COV (%)	15,51	7,99	COV (%)	19,55	19,17
Caract.(5%)	30,13	7.631,36	Caract.(5%)	49,27	10.092,13	Caract.(5%)	29,99	6.421,66
Valor-P(*)	0,9718	0,9772	Valor-P(*)	0,4568	0,7435	Valor-P(*)	0,7491	0,5956

*Comprobación estadística de normalidad de resultados según Prueba de Kolmogorov-Smirnov.

Los datos recogidos se someten previamente a un estudio estadístico de normalidad según la prueba de Kolmogorov-Smirnov para determinar si pueden modelarse de acuerdo con una distribución normal. En el conjunto de datos con un valor-P mayor o igual a 0,05, no puede rechazarse la idea de que los datos provienen de una distribución normal con un 95% de confianza. Tal y como se muestra en la Tabla 121, todos los datos presentan una distribución normal.

Los datos expuestos en la Tabla 121 han sido corregidos para ajustar los resultados obtenidos a una humedad de equilibrio higroscópico de referencia del 12%. Esta corrección se aplica a los módulos de elasticidad, según la norma EN 384:2016, para muestras cuyo contenido de humedad esté comprendido entre el 8% y el 18%, utilizando la ecuación 80 expuesta anteriormente.

En la Fig. 215 se muestra el gráfico fuerza-deformación con todas las vigas dúo de madera de pino pinaster ensayadas y cuyos valores medios se han expuesto anteriormente. A partir de la pendiente de la curva en su tramo elástico inicial (tramo recto) se obtienen los módulos de elasticidad de cada una de ellas, siendo mayor la rigidez de las piezas con mayor pendiente. De los puntos de rotura se obtienen los módulos de rotura.

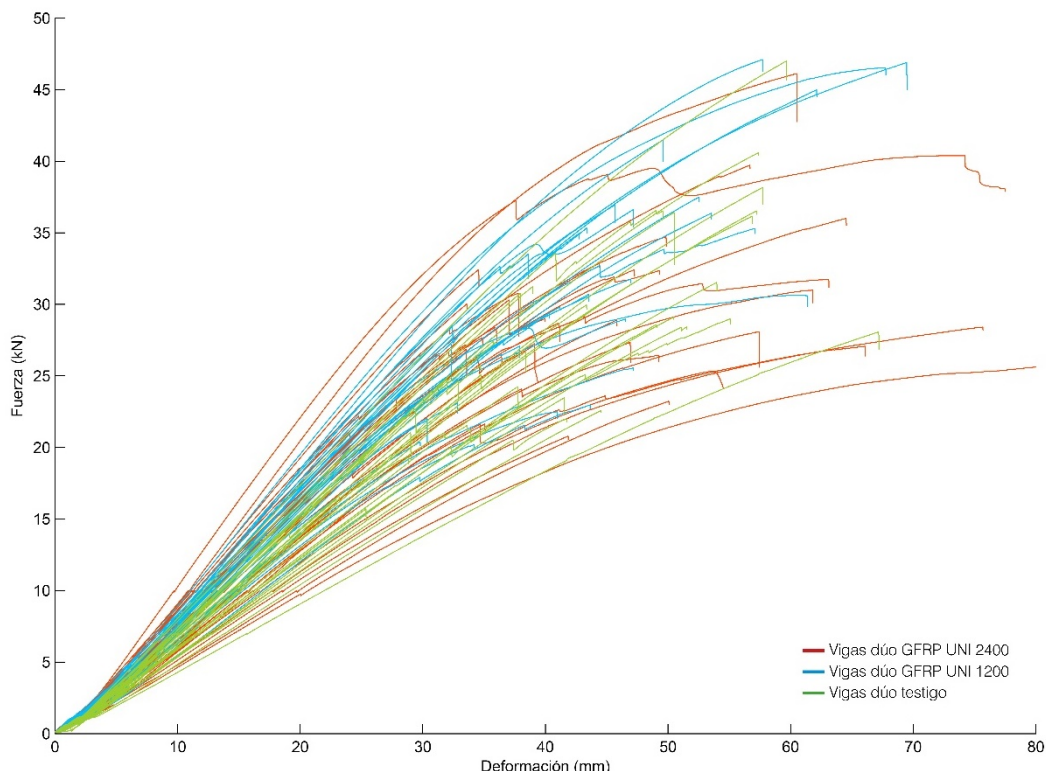


Fig. 215. Gráfica Fuerza-Deformación de las vigas dúo de pino pinaster [1:2].

Como puede observarse, no existe una clara diferenciación entre series, mostrándose únicamente una diferencia aparente entre el grupo de las vigas dúo testigo (verde) y el grupo de las vigas dúo con refuerzo GFRP UNI-1200 (azul). Por el contrario, el comportamiento del grupo de las vigas dúo con refuerzo GFRP UNI-2400 (rojo) muestra una amplia variabilidad, sin una tendencia compacta y clara. Esta dispersión de valores, sin diferencias entre piezas reforzadas o testigo, implica un comportamiento anómalo en esta serie reforzada que será necesario analizar.

Comparando los valores medios de la fuerza de rotura de las piezas ensayadas (Tabla 122) se observa este mismo comportamiento, con aumento en las prestaciones resistentes de las vigas reforzadas con GFRP UNI1200, pero sin una mejora significativa respecto a los testigos en las vigas con refuerzo GFRP UNI2400.

Tabla 122. Fuerza de rotura y flecha máxima de las vigas dúo de pino pinaster [1:2].

Tipo de viga dúo	Casos #	Fuerza de rotura (kN)	Mejora (%)	Flecha máxima (mm)	Mejora (%)
Dúo sin refuerzo [serie PP.T]	28	28,83±7,34	-	44,56±11,48	-
Dúo refuerzo GFRP UNI1200 [serie PP.R1200]	25	32,33±8,36	10,83	55,41±12,49	19,58
Dúo refuerzo GFRP UNI2400 [serie PP.R2400]	26	29,99±5,74	3,87	51,21±14,42	12,99

A. Módulo de elasticidad (MOEG)

A partir de los ensayos destructivos a flexión realizados se obtienen los módulos de elasticidad global (según EN 408) de las diferentes vigas dúo, testigo y reforzadas. Los valores obtenidos para cada una de las vigas dúo ensayadas se representan conjuntamente en la Fig. 216.

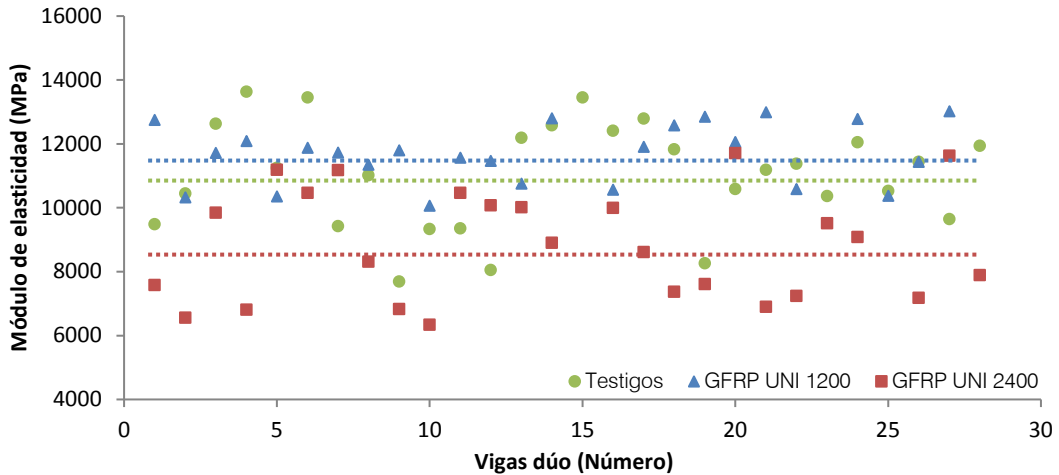


Fig. 216. Gráfico de puntos con valores de MOEG de vigas dúo de pinaster.

La variabilidad en las propiedades mecánicas propia de la madera genera una dispersión en los valores que superpone datos de distintos grupos e impide realizar un análisis determinante a partir de los datos individuales. No obstante, se puede observar los bajos valores alcanzados por las vigas dúo reforzadas con GFRP UNI2400, en comparación con el resto de vigas.

Para poder determinar el comportamiento de las vigas, es necesario analizar los datos en grupos con los valores medios de cada tipo de viga dúo ensayada. Por ello, se realiza un gráfico de caja-bigotes (Fig. 217), donde pueden compararse de valores por grupo, con un número de piezas ensayadas en torno a 30 unidades por serie.

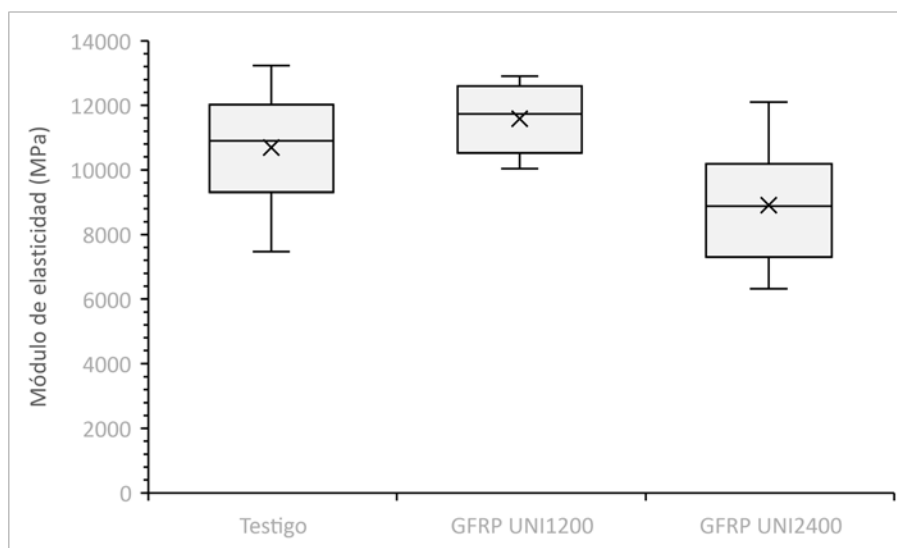


Fig. 217. Gráfico cajas-bigotes del MOEG de vigas dúo pinaster.

En este gráfico puede observarse un ligero incremento del módulo de elasticidad en las vigas dúo reforzadas con GFRP UNI 1200, con valores medios de 11.584,13 MPa, respecto a las vigas dúo testigo, con valores medios de 10.688,53 MPa. Además, estas vigas dúo reforzadas con GFRP

UNI1200 presentan una menor variabilidad de los resultados (7,99%) y un aumento de los valores mínimos ($MOEG_{min} = 10.030,82$ MPa); en comparación con las vigas testigo con un $COV = 14,70\%$ y un $MOEG_{min} = 7.472,54$ MPa. Sin embargo, las vigas dúo reforzadas con GFRP UNI 2400, de mayor gramaje, muestran unos valores inferiores a las vigas dúo testigo, con valores medios de 8.915,88 MPa, y una mayor dispersión de resultados del 19,17%. Observando el valor mínimo (6.319,84 MPa) y valor característico (6.421,66 MPa), puede asimilarse esta caída en las prestaciones a las menores propiedades de la madera de la partida 3 empleada para la fabricación de este grupo de vigas dúo, en comparación con la madera de la partida 1 y 2.

Tabla 123. Comparación de los módulos de elasticidad de las vigas dúo de pino pinaster [1:2].

Tipo de viga dúo	Casos	MOEG medio	Mejora	MOEG característico	Mejora
	#	(MPa)	(%)	(MPa)	(%)
Dúo sin refuerzo [serie PP.T]	28	10.688,53±1.599,70	-	7.631,36	-
Dúo refuerzo GFRP UNI1200 [serie PP.R1200]	25	11.584,13±3.222,33	7,73	10.092,13	24,38
Dúo refuerzo GFRP UNI2400 [serie PP.R2400]	26	8.915,88±2.877,67	-19,88	6.421,66	-18,84

Respecto a los porcentajes de mejora introducidos por la incorporación de los laminados de refuerzo (Tabla 123), es interesante observar como las mejores propiedades de rigidez de la madera de pino pinaster en comparación con la madera de chopo, limita los porcentajes de mejora en los valores medios de las piezas a un 7,73%. Sin embargo, al comparar los valores característicos se observa un porcentaje de mejora del 24,38%, elevando los valores inferiores de las vigas dúo reforzadas (valor característico medio=10.092,23 MPa), y reduciendo la variabilidad del grupo reforzado. Este aumento en los valores del rango inferior puede explicarse al homogeneizar los refuerzos las singularidades de la madera que pueden afectar a su rigidez, como nudos, desviación de fibra, etc. muy comunes en una madera de pino pinaster con, tradicionalmente, escasa gestión forestal.

B. Módulo de rotura (MOR)

Los valores de módulo de rotura obtenidos para cada una de las vigas dúo ensayadas se representan conjuntamente en el gráfico de la Fig. 218.

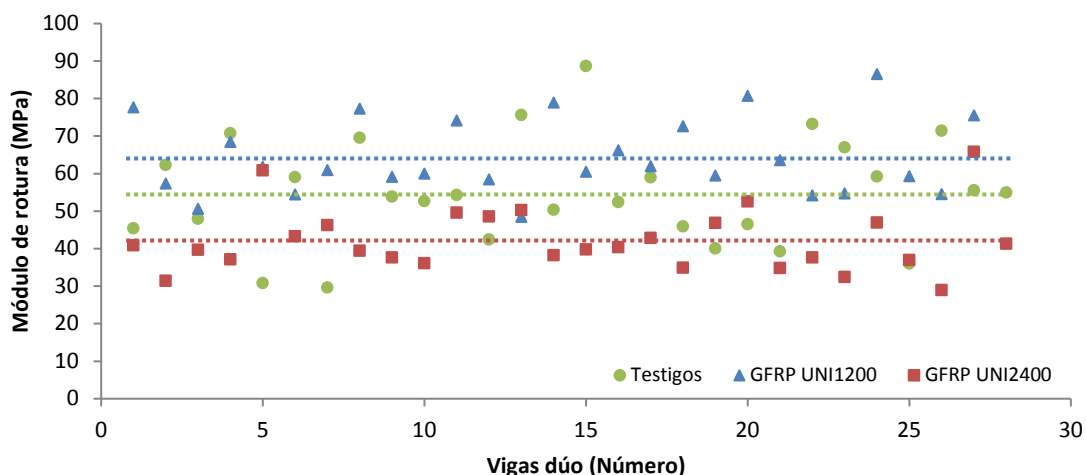


Fig. 218. Gráfico de puntos con valores de MOR de vigas dúo de pinaster.

La amplia variabilidad de los resultados muestra una dispersión en los valores que superpone datos de distintos grupos e impide realizar un análisis determinante a partir de los datos individuales. No obstante, y al igual que ocurría con los módulos de elasticidad, se puede observar como valores más bajos del gráfico son ocupados por las vigas dúo reforzadas con GFRP UNI2400. Para poder determinar el comportamiento de las vigas, es necesario analizar los datos en grupos con los

valores medios de cada tipo de viga dúo ensayada. Por ello, se realiza un gráfico de caja-bigotes (Fig. 219), donde pueden compararse de valores por grupo, con un número de piezas ensayadas entorno a 30 unidades por serie.

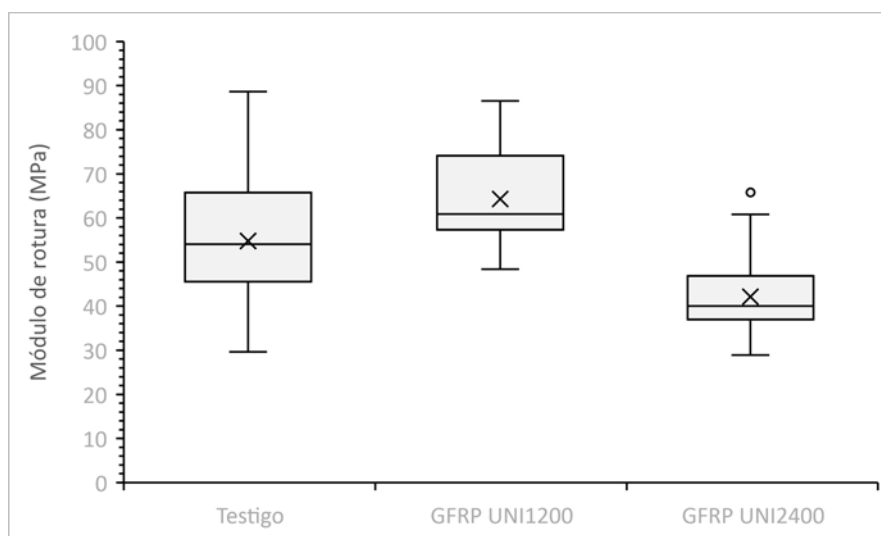


Fig. 219. Gráfico cajas-bigotes del MOR de vigas dúo pinaster [1:2].

Puede observarse en este gráfico un incremento significativo en los módulos de rotura de las vigas dúo reforzadas con GFRP UNI1200, tanto en los valores medios (64,32 MPa) como en los valores mínimos (48,42 MPa), en comparación con los módulos de rotura de las vigas dúo sin reforzar ($MOR_{medio}=54,75$ MPa; $MOR_{min}=29,63$ MPa). Además, estas vigas dúo reforzadas con GFRP UNI1200 presentan una menor variabilidad de los resultados (15,51%) en comparación con las vigas testigo, con un $COV=25,41\%$, y vigas dúo reforzadas con GFRP UNI2400, con un $COV=19,55\%$. Nuevamente, las vigas dúo reforzadas con GFRP UNI2400 muestran unas prestaciones mecánicas inferiores a las vigas dúo sin reforzar, con unos valores medios de 42,16 MPa.

Tabla 124. Comparación de los módulos de rotura de las vigas dúo de pino pinaster [1:2].

Tipo de viga dúo	Casos #	MOR medio (MPa)	Mejora (%)	MOR característico (MPa)	Mejora (%)
Dúo sin refuerzo [serie PP.T]	28	54,75±14,17	-	30,13	-
Dúo refuerzo GFRP UNI1200 [serie PP.R1200]	25	64,32±10,16	17,47	49,27	38,82
Dúo refuerzo GFRP UNI2400 [serie PP.R2400]	26	42,16±8,39	-23,00	29,99	-0,46

Como se expone en la Tabla 124, la mejora en el módulo de la rotura debida a la incorporación de los laminados de refuerzo de fibra de vidrio GFRP UNI 1200 se estima en el 17,47%; mientras que por el contrario, las vigas dúo reforzadas con GFRP UNI 2400 no muestran mejora, con porcentajes del -23,00%. Sin embargo, al comparar los valores característicos se observa un aumento en los porcentajes de mejora, de hasta el 38,82% para los refuerzos GFRP UNI1200, y del -0,46% para el refuerzo GFRP UNI 2400. Puede afirmarse que respecto a los valores característicos de los módulos de rotura no existe diferencia entre las vigas testigo y las vigas reforzadas con GFRP UNI 2400.

Para comparar las prestaciones de las distintas vigas dúo de madera de pino pinaster escala 1:2, y determinar sus diferencias, se realiza una prueba estadística de múltiples rangos a partir de las medias y el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher (Fig. 220).

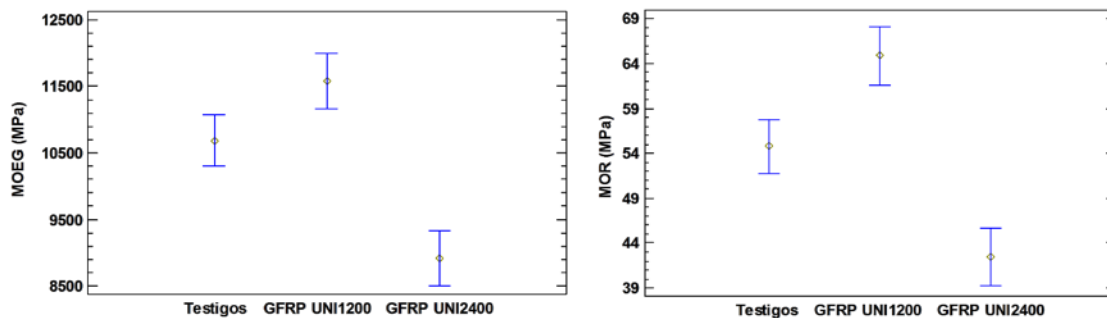


Fig. 220. Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para vigas dúo de madera de pino pinaster [1:2].

La comprobación de la homogeneidad entre grupos para los módulos de elasticidad y módulo de rotura se exponen en la Tabla 125.

Tabla 125. Estudio de homogeneidad entre grupos de las vigas dúo de pino pinaster escala 1:2.

Vigas dúo de madera de pino pinaster [1:2] (MOEG)			
Tipo refuerzo	Casos	Media (MPa)	Grupos Homogéneos*
Dúo sin refuerzo	28	10.688,53	X - -
Dúo refuerzo GFRP UNI1200	25	11.584,13	- X -
Dúo refuerzo GFRP UNI2400	26	8.915,88	- - X
Vigas dúo de madera de pino pinaster [1:2] (MOR)			
Tipo refuerzo	Casos	Media (MPa)	Grupos Homogéneos*
Dúo sin refuerzo	28	54,75	X - -
Dúo refuerzo GFRP UNI1200	25	64,32	- X -
Dúo refuerzo GFRP UNI2400	26	42,16	- - X

*Método: 95,0 porcentaje de Fisher LSD

Del estudio de homogeneidad puede extraerse que las vigas dúo reforzadas, estadísticamente, forman grupo independientes.

6.8.3. Análisis de roturas

Finalizado cada lote de ensayos se realiza un análisis del fallo de rotura producido en cada una de las piezas. En la Fig. 221 se muestran diferentes tipos de roturas producidas en varias vigas ensayadas a flexión.



Fig. 221. Diferentes tipos de rotura producidos en varias vigas dúo ensayadas a flexión.

Todos los tipos de fallos que han sido detectados durante los ensayos se simplifican en 5 tipos de fallo principales (A-E), que se muestran en la Fig. 222.



Además, se anotan las singularidades de la madera presentes en las proximidades del punto de rotura, así como otras anomalías detectadas en la línea de encolado o laminado GFRP.

A. Análisis de las roturas de vigas dúo de chopo

El análisis de las roturas producidas en las distintas vigas dúo, con o sin refuerzo, de madera de chopo ensayadas se resume en la Tabla 126.

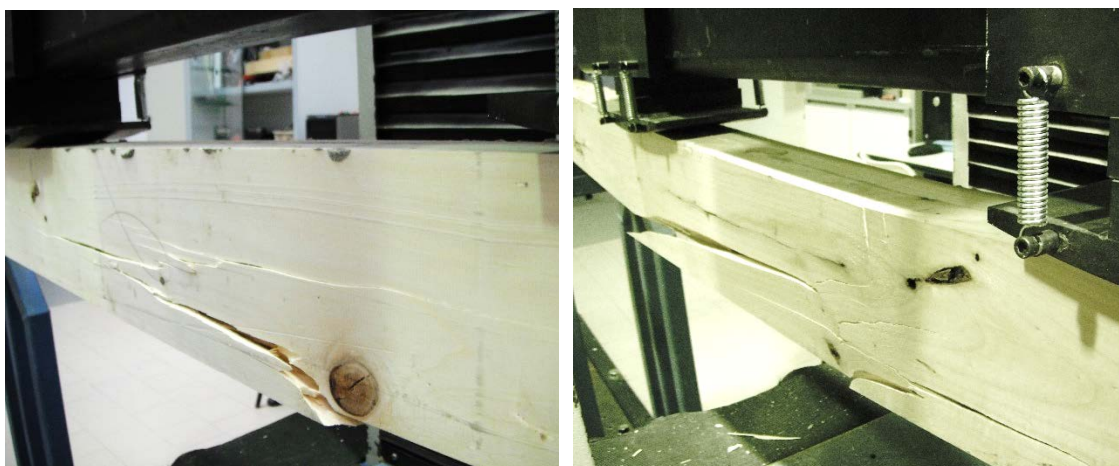
Tabla 126. Influencia de singularidades y tipos de fallo de las vigas dúo de chopo [1:2].

Viga	Desv. fibra	Nudos	Fallo Adh	Tipo fallo	Viga	Desv. fibra	Nudos	Fallo FRP	Tipo fallo	Viga	Desv. fibra	Nudos	Fallo FRP	Tipo fallo
CH.T.01				B	CH.R1200.01				B	CH.R2400.01			X	C
CH.T.02				C	CH.R1200.02				-	CH.R2400.02				-
CH.T.03				C	CH.R1200.03				C	CH.R2400.03				B
CH.T.04				C	CH.R1200.04	X			B	CH.R2400.04				B
CH.T.05				B	CH.R1200.05				C	CH.R2400.05				B
CH.T.06				B	CH.R1200.06				C	CH.R2400.06				B
CH.T.07				C	CH.R1200.07				B	CH.R2400.07				C
CH.T.08				C	CH.R1200.08				B	CH.R2400.08	X			B
CH.T.09		X		E	CH.R1200.09				B	CH.R2400.09				C
CH.T.10				-	CH.R1200.10				C	CH.R2400.10				C
CH.T.11				D	CH.R1200.11				B	CH.R2400.11				B
CH.T.12				C	CH.R1200.12				-	CH.R2400.12				B
CH.T.13				C	CH.R1200.13				C	CH.R2400.13				C
CH.T.14		X		E	CH.R1200.14				B	CH.R2400.14				B
CH.T.15				C-D	CH.R1200.15				B	CH.R2400.15				B
CH.T.16				-	CH.R1200.16				C	CH.R2400.16				B-D
CH.T.17				E	CH.R1200.17				B	CH.R2400.17	X			C
CH.T.18				C	CH.R1200.18				B	CH.R2400.18		X		B
CH.T.19				C	CH.R1200.19				B	CH.R2400.19				-
CH.T.20				C	CH.R1200.20				B	CH.R2400.20		X		C
CH.T.21				C	CH.R1200.21	X			B	CH.R2400.21				B
CH.T.22				C	CH.R1200.22				B	CH.R2400.22				C
CH.T.23				C	CH.R1200.23		X		B	CH.R2400.23				-
CH.T.24		X		B	CH.R1200.24				C	CH.R2400.24				C
CH.T.25				C	CH.R1200.25				C	CH.R2400.25				B
CH.T.26				B	CH.R1200.26				-	CH.R2400.26				C
CH.T.27				B	CH.R1200.27		X		B	CH.R2400.27				B
CH.T.28				B	CH.R1200.28				B	CH.R2400.28				B

⁵⁶⁸ De la Rosa et al. (2013) Op. cit.

CH.T.29	X	E	CH.R1200.29	C	CH.R2400.29	-
CH.T.30	-	-	CH.R1200.30	C	CH.R2400.30	-

Además de los tipos de fallo de cada viga en la Tabla 126 puede observarse como, la madera de chopo utilizada para la fabricación de las vigas era madera limpia, sin una presencia de nudos próxima a las roturas significativa. Únicamente se detectan pequeños nudos aislados (Fig. 223) que, salvo los nudos localizados en la zona de tracción más próximo al canto, no influyen de modo determinante en el fallo de la pieza.



a) Nudo de pequeñas dimensiones en la zona de tracción.

b) Nudo a compresión sin influencia en rotura.

Fig. 223. Presencia de nudos de tamaño limitado en las vigas dúo de chopo ensayadas.

B. Análisis de las roturas de vigas dúo de pino pinaster

El análisis de las roturas producidas en las distintas vigas dúo, con o sin refuerzo, de madera de pino pinaster ensayadas se resume en la Tabla 127.

Tabla 127. Influencia de singularidades y tipos de fallo de las vigas dúo de pino pinaster [1:2].

Viga	Desv. fibra	Nudos	Fallo Adh	Tipo fallo	Viga	Desv. fibra	Nudos	Fallo FRP	Tipo fallo	Viga	Desv. fibra	Nudos	Fallo FRP	Tipo fallo
PP.T.01		X		E	PP.R1200.01			X	C	PP.R2400.01				B
PP.T.02				C-D	PP.R1200.02			X	C	PP.R2400.02			X	C
PP.T.03		X		B	PP.R1200.03		X		B	PP.R2400.03				B
PP.T.04			X	C	PP.R1200.04				B	PP.R2400.04				B
PP.T.05			X	C-D	PP.R1200.05				B	PP.R2400.05		X		B
PP.T.06				B	PP.R1200.06		X		B	PP.R2400.06	X			C
PP.T.07				C	PP.R1200.07				B	PP.R2400.07				B
PP.T.08				B	PP.R1200.08			X	C	PP.R2400.08		X	X	B
PP.T.09				E	PP.R1200.09				B	PP.R2400.09				C
PP.T.10				B	PP.R1200.10		X		B	PP.R2400.10		X		B
PP.T.11				E	PP.R1200.11	X		X	C	PP.R2400.11	X	X		B
PP.T.12				B	PP.R1200.12		X		B	PP.R2400.12				C
PP.T.13	X			C	PP.R1200.13				B	PP.R2400.13				C
PP.T.14			X	E	PP.R1200.14				B	PP.R2400.14				C
PP.T.15			X	C	PP.R1200.15				-	PP.R2400.15				-
PP.T.16				D	PP.R1200.16	X			C	PP.R2400.16				C
PP.T.17				C	PP.R1200.17		X		B	PP.R2400.17		X		C
PP.T.18		X		C	PP.R1200.18				B	PP.R2400.18		X		B
PP.T.19		X	X	B	PP.R1200.19			X	C	PP.R2400.19	X			C
PP.T.20				C	PP.R1200.20				C	PP.R2400.20				B
PP.T.21				C	PP.R1200.21				B	PP.R2400.21				B
PP.T.22				C	PP.R1200.22				B	PP.R2400.22		X		B
PP.T.23			X	C-D	PP.R1200.23				-	PP.R2400.23		X		C
PP.T.24		X		B	PP.R1200.24				B	PP.R2400.24				C
PP.T.25		X		E	PP.R1200.25			X	B	PP.R2400.25				-
PP.T.26				C	PP.R1200.26				C	PP.R2400.26				B
PP.T.27				C	PP.R1200.27				C	PP.R2400.27				B
PP.T.28				C	PP.R1200.28				-	PP.R2400.28		X		C
PP.T.29				-	PP.R1200.29				-	PP.R2400.29				-
PP.T.30				-	PP.R1200.30				-	PP.R2400.30				-

A diferencia de las vigas de madera de chopo, en las vigas de pino pinaster la presencia de nudos es generalizada; con presencia de nudos de grandes dimensiones y nudos saltadizos en varias de las vigas (Fig. 224). Debido a esta presencia recurrente de nudos, varias roturas de piezas están asociadas a desviación de la fibra en las zonas de tracción.

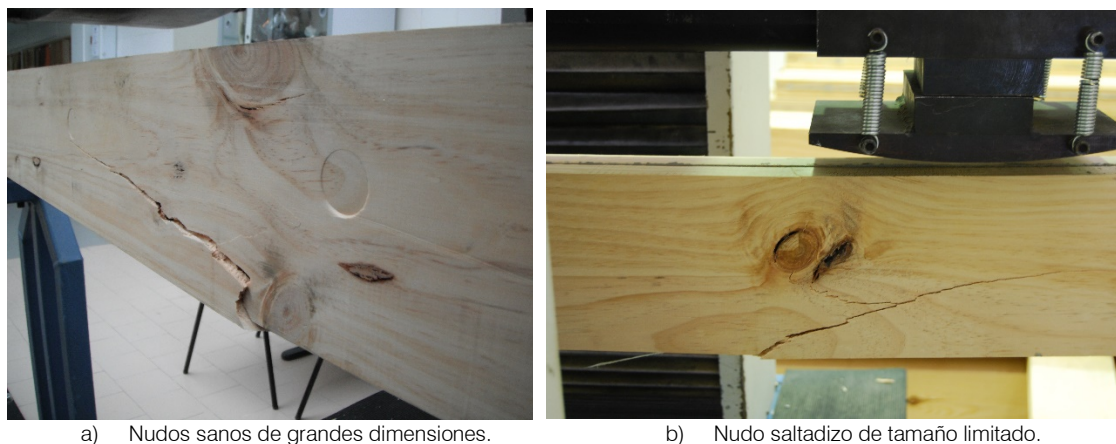


Fig. 224. Nudos presentes en las vigas de pino pinaster.

6.8.4. Discusión de los resultados

La incorporación de laminados de refuerzo GFRP en la zona traccionada de las vigas dúo, en ratios de refuerzo ligeros inferiores al 2%, produce un incremento sensible en la capacidad de carga, y un incremento significativo en la rigidez de las piezas reforzadas. Este comportamiento ha sido claro en las vigas dúo ensayadas, tanto de madera de chopo (*Populus x euroamericana* I-214) como de madera de pino pinaster (*Pinus pinaster* Ait.); a excepción de los resultados obtenidos en la serie de las vigas dúo de madera de pino pinaster reforzadas con laminados GFRP UNI2400, fabricada con tabloncillos del lote de madera “partida 3”. Por los extremadamente bajos resultados obtenidos, con módulos de elasticidad medios inferiores en un 20% a los valores de las vigas testigo, y por tener registrada de forma fehaciente la trazabilidad del lote de madera a partir del cual se fabrican, se desestima la serie al completo como anómala. Los principales resultados obtenidos, a modo de resumen, se muestran en la Tabla 128.

Tabla 128. Resultados de módulo de elasticidad y módulo de rotura obtenidos.

Tipo de viga dúo	Casos #	Ratio (%)	MOE medio (MPa)	Mejora (%)	MOR medio (MPa)	Mejora (%)
Dúo sin refuerzo [serie CH.T]	27	-	7.835,02±751,89	-	36,02±8,86	-
Dúo chopo refuerzo GFRP UNI1200	27	1,07	8.918,87±691,09	12,15	42,95±6,92	16,13
Dúo chopo refuerzo GFRP UNI2400	25	1,6	9.209,88±1.022,13	14,93	46,01±7,76	21,71
Dúo sin refuerzo [serie PP.T]	28	-	10.688,53±1.599,70	-	54,75±14,17	-
Dúo pinaster refuerzo GFRP UNI1200	25	1,07	11.584,13±3.222,33	7,73	64,32±10,16	17,47
Dúo pinaster refuerzo GFRP UNI2400	26	1,6	8.915,88±2.877,67	-19,88	42,16±8,39	-23,00

A excepción de esta anomalía, los resultados obtenidos experimentalmente se asemejan con los publicados por otros autores. Así Hernández et al.⁵⁶⁹ con laminados de refuerzo GFRP en ratios del 3% alcanza incrementos del 18% en rigidez y del 26% en resistencia última. Del mismo modo, Ribeiro et al.⁵⁷⁰ en ensayos con madera de pino pinaster reforzada con laminados GFRP en ratios de 1,2-4,2% obtienen incrementos de rigidez del 20-43% y del 25-32% en resistencia última. Resultados similares a los alcanzados por Fiorelli et Alves⁵⁷¹ con laminados de refuerzo GFRP en ratios 1-3% obtienen incrementos de rigidez del 13-42% y del 53-104% en resistencia última. Con

⁵⁶⁹ Hernandez et al. (1997) Op. cit.

⁵⁷⁰ Ribeiro et al. (2009) Op. cit.

⁵⁷¹ Fiorelli et al. (2011) Op. cit.

ratios de refuerzo muy semejantes a los empleados en este capítulo, Raftery et Harte (2011)⁵⁷² utilizando laminados de refuerzo GFRP en ratios 1,7-3% obtienen incrementos de rigidez del 10-12%, muy similares a los rangos de mejora expuestos en la Tabla 128. Con ratios de refuerzo superiores, Corradi et al.⁵⁷³ empleando laminados GFRP en ratios de refuerzo del 3-6% obtiene incrementos en resistencia última del 33-79%. En el estado del arte se citan otros estudios consultados con resultados semejantes. No obstante, debe exponerse que todos estos estudios referenciados, pese a usar laminados GFRP, utilizan configuraciones variadas de refuerzo (Fig. 23) y emplean en sus ensayos diferentes especies de madera, principalmente coníferas. Siendo escasos los estudios que emplean madera de pino pinaster, y prácticamente ninguno que emplee madera de chopo de la especie y clon estudiada en esta tesis doctoral.

6.9. Ensayos de fluencia

Los ensayos a flexión realizados en capítulos anteriores sobre vigas dúo de chopo y pino pinaster, de distintas dimensiones, permiten analizar el comportamiento de las piezas a corto plazo. Sin embargo, el objetivo final de esta tesis es poder desarrollar y fabricar vigas dúo reforzadas para uso estructural, las cuales pueden mantenerse en servicio en periodos superiores a 50 años. Por ello, es preciso realizar ensayos a flexión de una mayor duración para determinar el comportamiento y bondades de las vigas dúo reforzadas con FRP, en comparación con piezas de madera, a largo plazo.

El efecto que produce la duración de la carga sobre piezas de madera, y su variación de comportamiento como consecuencia de los procesos de fluencia han sido ampliamente investigado. Los materiales utilizados para fines estructurales suelen presentar un comportamiento elástico, de modo que se deforman durante la aplicación de una carga y recuperan su estado inicial retirada la carga, hasta una determinada tensión a partir de la cual el material presenta un comportamiento plástico, donde parte de la deformación se no se recupera. La madera, sin embargo, no sólo cumple este comportamiento elástico puro para duraciones de carga instantáneas o cortas, sino que además sufre procesos de fluencia adquiriendo deformaciones no recuperables al aplicar cargas de larga duración, pese a que la intensidad de la carga se mantenga constante e invariable a lo largo del periodo de carga (Fig. 225). Por presentar este comportamiento reológico, donde el material se ve influida su respuesta por la intensidad de la carga y por su duración, la madera se define como un material viscoelástico.

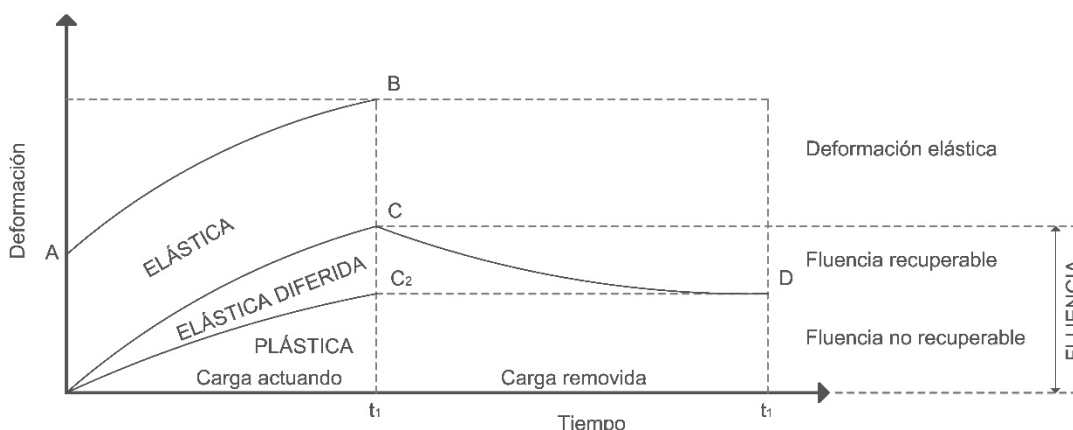


Fig. 225. Comportamiento reológico de la madera (Argüelles et al, 2000).⁵⁷⁴

⁵⁷² Raftery et al. (2011) Op. cit.

⁵⁷³ Corradi et al. (2018) Op. cit.

⁵⁷⁴ Argüelles et al. (2000). Op. cit.

Para la realización de los ensayos de fluencia debe tenerse claro que los condicionantes principales del ensayo son la duración de la carga y las condiciones ambientales (humedad de la madera). La carga aplicada sobre las piezas no influye sobre el comportamiento de la madera más que en aumentar la velocidad e intensidad del proceso de fluencia. El comportamiento de la madera bajo duraciones de carga a largo plazo ha sido investigado y es conocido, en general, con suficiente precisión. La modelización más empleada de este proceso de fluencia en madera ha sido representada por la conocida como “curva de Madison”, donde se describe la relación resistencia-duración de la carga en un periodo de 50 años. Más recientemente y fruto de las diferentes investigaciones desarrollada, se han modelizado curvas más precisas, siendo la más representativo la recogida por el Eurocódigo 5. En la Fig. 226 se muestran comparada ambas curvas.

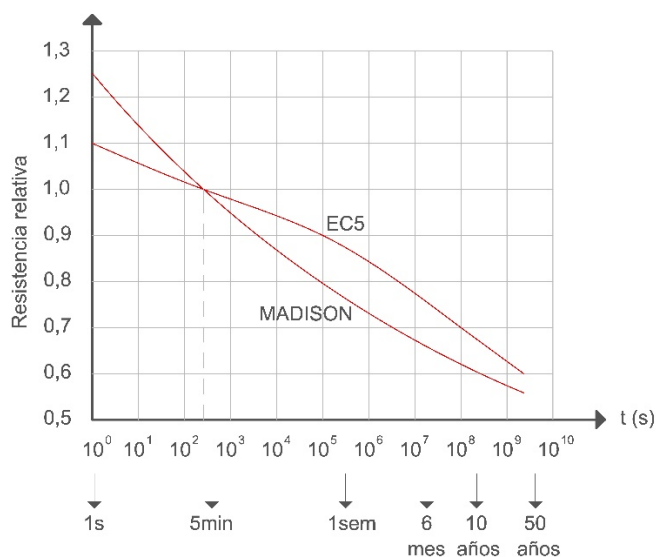


Fig. 226. Curvas de Madison y del EC 5 para representar el comportamiento reológico de la madera.⁵⁷⁵

Partiendo este comportamiento conocido, la normativa vigente de cálculo de estructuras de madera (CTE-SE-M / Eurocódigo 5) aplican coeficientes de corrección (K_{mod} , k_{det}) sobre la resistencia de la madera en función de la duración de la carga (y de la humedad), reduciendo las propiedades mecánicas de la madera al aumentar el tiempo de carga según la curva representada. Sin embargo, el comportamiento de piezas de madera de uso estructural con refuerzos FRP no ha sido tan extensamente investigado, siendo necesario analizar cada tipo de refuerzo de forma independiente. La evolución de las piezas reforzadas a largo plazo depende principalmente del comportamiento del material de refuerzo y del comportamiento la especie de madera; pero, además, influye de forma determinante la interfaz del adhesivo, y las ratios de refuerzo utilizados.

Los resultados de los ensayos de fluencia se obtienen por pares de vigas, dos vigas de chopo reforzadas con GFRP UNI 2400 junto a dos vigas de chopo testigos. La duración del ensayo bajo carga constante se prolonga durante 6 meses. En función de los resultados obtenidos tras este periodo mínimo de ensayo en lo referido a la estabilización o no de la fluencia y de la entidad de su variación, y de la mejora que representa el refuerzo, se considerará la idoneidad de ampliar los tiempos de ensayo.

Los principales objetivos de este apartado son los siguientes:

- Definir el comportamiento a largo plazo de las vigas dúo reforzadas mediante su monitorización continuada bajo un estado de cargas conocido.

⁵⁷⁵ Ibidem.

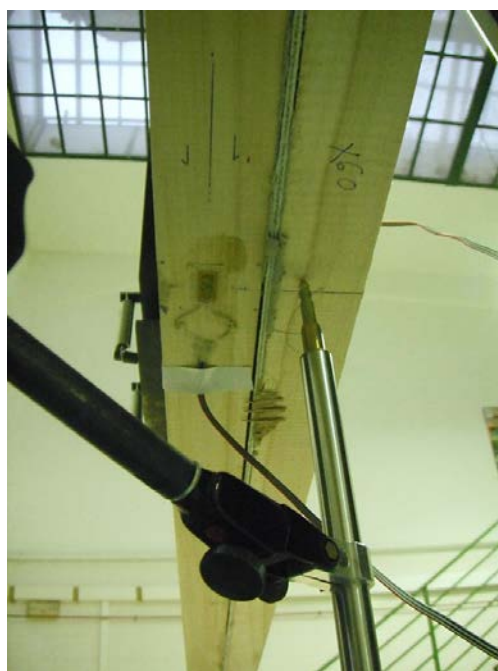
- Comparar los resultados obtenidos entre vigas dúo reforzadas y sin refuerzo para conocer la mejora (si existe) que representa la incorporación del refuerzo GFRP.
- Definir el comportamiento reológico de las vigas reforzadas, constatando si existen diferencias significativas con las vigas sin reforzar, para poder realizar modelizaciones precisas.

6.9.1. Ensayos previos

Con anterioridad a la realización del ensayo de fluencia se preparan unos ensayos de monitorización en el laboratorio de maderas de la ETS IIAA en Palencia (Fig. 227). En ellos se ensayan a flexión un lote de vigas en la máquina universal con distintas configuraciones de monitorización, distintos equipos y distintos tipos de adhesivos en las bandas extensométricas, con el objetivo de comprobar la solidez de cadena de medida.



a) Equipos de medición QuantumX y CanHead.



b) Colocación de diversos sensores.

Fig. 227. Test de monitorización desarrollado en el laboratorio de maderas de Palencia.

Conocida la fuerza y deformación medidas por la máquina universal, pueden compararse los valores obtenidos con el equipo de monitorización en prueba. Los equipos utilizados, el QuantumX-MX840B y el CanHead CB1010 se controlan sincrónicamente con el software Cadman, permitiendo utilizar distintos sensores y configuraciones de medida al mismo tiempo.

La configuración finalmente utilizada en los ensayos es una monitorización completa con extensómetros inductivos y galgas extensométricas. Las galgas se conectan a cuarto de puente de Wheastone con banda de compensación (DMS1 + K), compensando temperatura y humedad mediante una banda de compensación colocada en un testigo de madera de la misma especie y partida sin carga (Fig. 228).

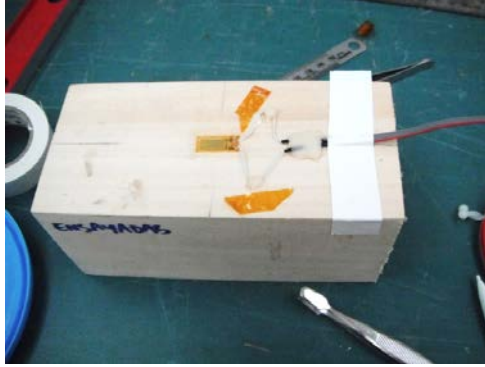


Fig. 228. Taco de madera de chopo con banda extensométrica de compensación.

Se coloca una banda extensométrica (+ banda de compensación) en el centro de la pieza en la cara de tracción y compresión. Además de un extensómetro LVDT la cara inferior en el centro del vano. Los resultados de fuerza de rotura, flecha máxima y deformaciones (a compresión y tracción) obtenidos para las piezas ensayadas se muestran en la Tabla 129.

Tabla 129. Resultados obtenidos de los ensayos previos con bandas extensométricas.

Viga dúo reforzada	Fuerza (kN)	LVDT (mm)	SG Comp. (inicial) ($\mu\text{m}/\text{m}$)	SG Comp. (final) ($\mu\text{m}/\text{m}$)	SG Tracción (inicial) ($\mu\text{m}/\text{m}$)	SG Tracción (final) ($\mu\text{m}/\text{m}$)
CH.R2400.24 (b25c)	28,01	37,30	-0,7057	-3848,7	0,2073	3935,3
CH.R2400.25 (b24c)	22,34	25,42	1,259	-3470,2	0,6939	2611,8
CH.R2400.27 (b27c)	32,54	36,66	-1,795	-4929,9	-2,566	4153,8

A partir de las deformaciones registradas a tracción y compresión, y suponiendo un comportamiento elástico de las piezas, puede determinarse de un modo experimental la profundidad de la fibra neutra (f_n) de la sección, así como su evolución a lo largo del ensayo. En la Fig. 229 se representa la posición de la fibra neutra de las tres piezas ensayadas.

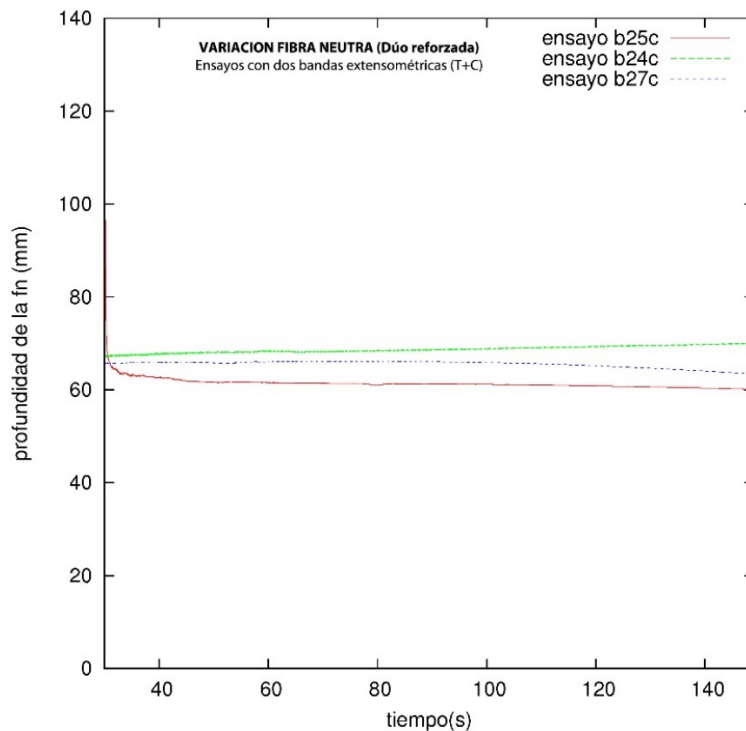


Fig. 229. Determinación de la línea neutra a partir de las deformaciones medidas con las bandas extensométricas.

6.9.2. Resultados de los ensayos de fluencia

A. Datos de la monitorización ambiental

Los ensayos fueron realizados bajo condiciones ambientales de laboratorio relativamente constantes. No obstante, ante la limitación de controlar de modo estricto las condiciones ambientales de temperatura ($20 \pm 2^\circ\text{C}$) y humedad ($65 \pm 5\%$ HR) durante toda la duración del ensayo de fluencia, se realiza una monitorización de las condiciones ambientales del laboratorio (temperatura y humedad del aire) con la colocación de tres sondas termo-higrométricas modelo Testo 635. Los resultados de esta monitorización en continuo se muestran en la Fig. 230.

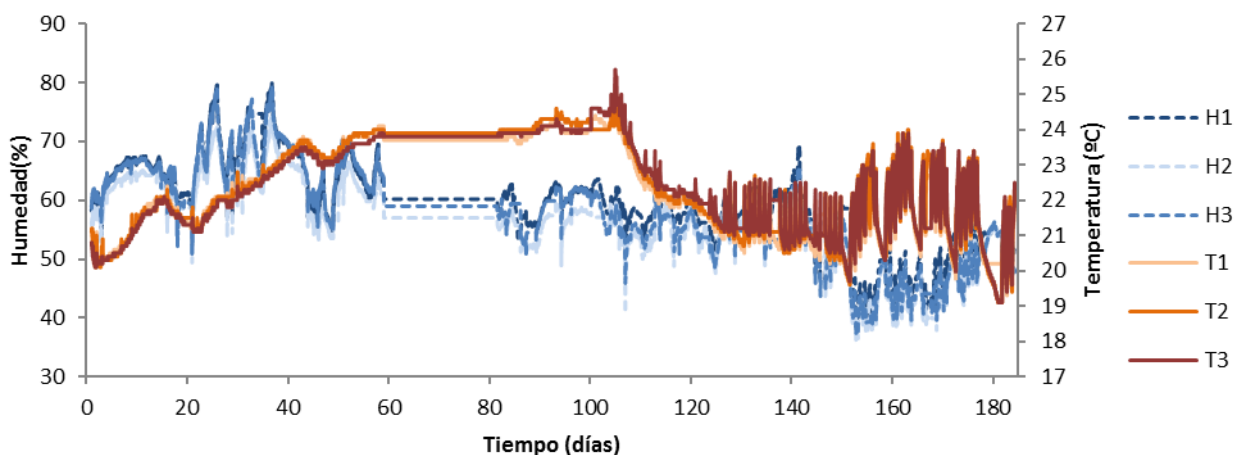


Fig. 230. Gráfico de humedad ambiental durante el transcurso del ensayo.

Conocidos los valores de temperatura y humedad ambiental puede determinarse, a partir del ábaco de equilibrio higroscópico desarrollado por Kollman⁵⁷⁶, el valor teórico de la humedad de equilibrio higroscópico de la madera (%). En la Fig. 231 se muestran los valores de equilibrio higroscópico teóricos, con un valor medio a lo largo de las 26 semanas de ensayo de 10,43%.

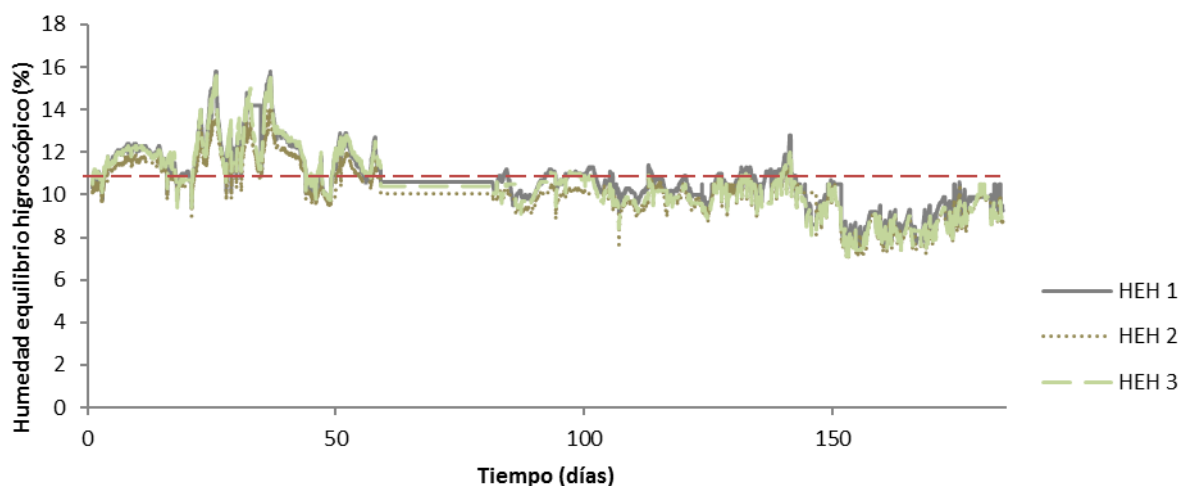


Fig. 231. Gráfico de humedad de equilibrio higroscópico teórico en la madera a partir de los datos de temperatura y humedad recogidos por las sondas termohigrométricas.

Además, durante la duración del ensayo se realiza una medición semanal de la humedad de equilibrio higroscópico de la madera por el método de la resistencia eléctrica (UNE-EN 13183-

⁵⁷⁶ Kollmann (1959) Op. cit.

2:2002)⁵⁷⁷ utilizando un xilohigrómetro de resistencia de laboratorio. Los valores registrados se muestran en la Tabla 130, obteniéndose un valor medio de humedad de equilibrio del 10,96%.

Tabla 130. Valores de humedad de equilibrio higroscópico de las vigas dúo medido con xilohigrómetro.

Chopo	V1 (%)		V2 (%)		VR1 (%)		VR2 (%)	
Inicial	8,7	9,2	9,1	11,4	9,9	10,7	9,7	10,7
Semana 1	9,5	10,4	8,8	11,5	10,0	10,9	9,8	11,3
Semana 2	9,5	11,3	8,9	11,4	8,7	12,2	10,0	8,4
Semana 3	9,1	11,1	8,9	11,2	8,5	12,8	10,4	8,2
Semana 4	9,7	10,9	9,1	10,6	8,8	13,1	10,7	8,8
Semana 5	10,5	10,8	10,4	11,9	9,5	13,0	10,9	9,3
Semana 6	11,6	12,2	11,3	12,1	10,6	12,9	10,4	13,1
Semana 7	11,3	11,7	10,5	12,2	9,5	12,4	12,5	9,5
Semana 8	11,1	11,5	10,6	11,8	10,1	11,9	11,8	10,2
Semana 9	10,8	11,1	10,8	11,5	10,6	11,2	11,6	10,8
Semana 10	10,7	10,9	10,9	11,2	10,9	11,0	11,3	10,9
Semana 11	10,6	10,8	11,1	11,0	10,9	11,3	11,6	11,1
Semana 12	10,5	10,8	10,8	10,9	11,2	11,5	11,1	11,0
Semana 13	10,8	11,0	10,8	10,8	11,3	11,4	10,8	10,9
Semana 14	10,8	11,1	10,9	11,2	10,9	11,2	10,9	10,9
Semana 15	10,9	10,8	10,7	10,7	10,8	10,9	11,1	10,7
Semana 16	11,0	10,9	10,4	10,5	10,8	10,8	10,9	10,6
Semana 17	10,8	10,7	10,6	10,5	10,5	11,2	10,7	10,4
Semana 18	10,7	10,5	10,3	10,4	10,7	10,9	10,8	10,6
Semana 19	10,5	10,3	9,8	10,1	10,5	10,8	10,8	10,7
Semana 20	10,7	10,3	10,0	9,7	10,5	10,7	10,9	10,8
Semana 21	10,6	10,4	10,2	10,2	10,3	10,9	10,7	10,6
Semana 22	10,4	10,0	10,6	10,3	10,4	10,9	11,0	10,5
Semana 23	10,6	10,2	10,5	10,4	10,6	10,7	10,9	10,7
Semana 24	10,8	10,5	10,4	10,4	10,5	10,8	10,7	10,8
Semana 25	10,7	10,5	10,4	10,6	10,7	10,9	10,8	10,9
Semana 26	10,5	10,3	10,4	10,5	10,6	10,7	10,6	10,8

B. Resultado de la deformación

Las deformaciones sufridas por las vigas dúo de chopo, reforzadas y testigo, pueden diferenciarse entre las medidas instantáneas, medidas durante su puesta en carga, de las deformaciones reológicas, bajo carga estable y constante, acumuladas a lo largo de los 186 días de ensayo. El comportamiento de las vigas durante el proceso de carga se muestra en la Tabla 131, para vigas testigos, y Tabla 132 para las vigas reforzadas.

Tabla 131. Deformaciones medidas durante la de puesta en carga de las vigas dúo testigo.

Etapa*	Tiempo (min.)	Carga (kN)	LVDT V1 (mm)	Inc. (%)	LVDT V2 (mm)	Inc. (%)	SG V1 ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Inc. (%)	SG VR ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Inc. (%)
0	-	0	0	-	0	-	0	-	0	-
0-1	45	4	2,352	-	2,005	-	209,4	-	233,3	-
1-2	15	4	2,389	-	2,115	-	213,5	-	236,8	-
2-3	20	6	3,506	-	3,051	-	314,7	-	354,4	-
3-4	20	4	2,650	-	2,383	-	231,3	-	261,4	-
4-5	45	8	4,571	-	4,180	-	412,2	-	476,4	-
5-6	2h 30	8	4,673	-	4,305	-	419,5	-	488,8	-
6-7	20	10	5,600	-	5,227	-	509,4	-	599,8	-

*Ver apartado 4.1.7, ensayo de fluencia.

Tabla 132. Deformaciones medidas durante la de puesta en carga de las vigas dúo reforzadas.

Etapa*	Tiempo (min.)	Carga (kN)	LVDT V1 (mm)	Inc. (%)	LVDT V2 (mm)	Inc. (%)	SG V1 ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Inc. (%)	SG VR ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Inc. (%)
0	-	0	0	-	0	-	0	-	0	-
0-1	45	4	1,829	-	1,851	-	170,1	-	215,3	-
1-2	15	4	1,865	-	1,910	-	174,2	-	219,4	-
2-3	20	6	2,793	-	2,867	-	262,1	-	327,2	-
3-4	20	4	2,046	-	2,110	-	196,7	-	243,1	-
4-5	45	8	3,800	-	3,799	-	356,6	-	430,7	-

⁵⁷⁷ Norma UNE-EN 13183-2:2002. Op. cit.

5-6	2h 30	8	3,915	-	3,875	-	365,8	-	439,6	-
6-7	20	10	4,838	-	4,709	-	452,0	-	532,3	-

*Ver apartado 4.1.7, ensayo de fluencia.

El protocolo de carga, los tiempos de estabilización bajo carga constante y los porcentajes de carga aplicados en cada escalón se recogen con detalle en la Tabla 37. Las deformaciones medidas con los extensómetros LVDT se representan en la Fig. 232:

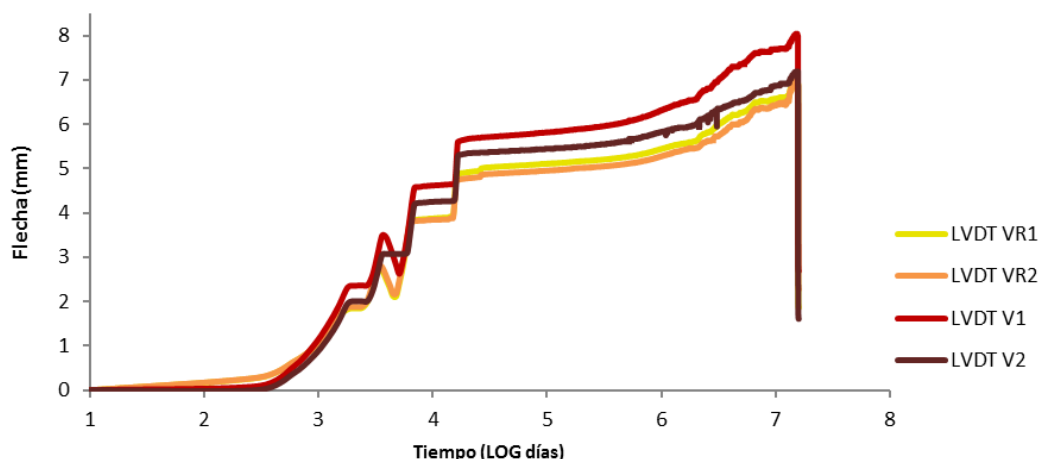


Fig. 232. Gráfica flecha-tiempo de los LVDT, en escala logarítmica.

Puede observarse el mejor comportamiento de las vigas reforzadas, con una flecha inicial a la finalización de la puesta en carga de 4,838 y 4,709 mm; un 11,82% inferiores a las registradas en las vigas testigo, con 5,600 y 5,227 mm.

Los incrementos de flecha medidos a la finalización del tiempo de ensayo se recogen, de forma resumida, en la Tabla 133, mostrándose las lecturas y evolución semana a semana en el Anexo.

Tabla 133. Resultados de incremento flecha por efecto de la fluencia recogidos con los LVDT en las vigas de chopo.

Pieza	Carga total (kN)	Duración (días)	Flecha inicial (mm)	Flecha final (mm)	Inc. (%)	Flecha residual (mm)	Recuperación (%)
V1 (testigo)	10	186	5,600	7,987	29,9	2,695	3,45
V2 (testigo)	10	186	5,227	7,189	27,3	1,615	5,20
VR1 (GFRP UNI2400)	10	186	4,838	6,885	29,7	1,886	3,13
VR2 (GFRP UNI2400)	10	186	4,709	6,867	31,4	2,297	2,70

Los datos medidos con los extensómetros LVDT permiten apreciar el aumento de deformación a lo largo del ensayo sin incremento de carga (fluencia). Los porcentajes de variación registrados se sitúan en el 30,5% de incremento de la flecha para las piezas sin refuerzo; y en el 28,6% para las piezas reforzadas. En la Fig. 233 se muestran gráficamente los valores de flecha recogidos a lo largo del ensayo. Se pueden observar unas curvas asintóticas, con las pendientes de las curvas de las piezas sin refuerzo y las piezas reforzadas sensiblemente paralelas y de crecimiento continuado, representando un comportamiento reológico semejante, sin una mejora sensible de las piezas reforzadas sobre las testigos. En el momento de concluir el ensayo la fluencia de la madera se mantiene aún activa. Tras la retirada de la carga, y completado el tiempo de recuperación (24h) las vigas muestran una deformación residual adquirida de 2,695 y 1,615 mm en las vigas testigo, y de 1,886 y 2,297 mm en las vigas reforzadas, recuperándose en las primeras 24 horas en torno a un 3% de la flecha.

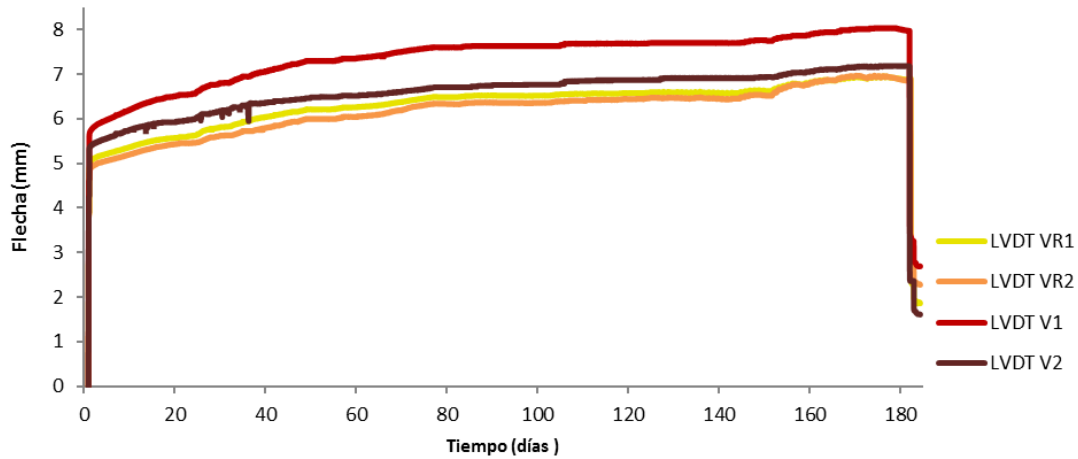


Fig. 233. Gráfica flecha-tiempo de los LVDTs.

Respecto a la deformación ($\mu\text{m}/\text{m}$) medida con las bandas extensométricas, en la Tabla 134 se resumen los resultados obtenidos, recogiendo los datos completos en el Anexo. Los datos obtenidos permiten apreciar el aumento de deformación a lo largo del ensayo sin incremento de carga (fluencia). Los porcentajes de variación registrados se sitúan en torno al 16,3% de incremento de la deformación para las piezas sin refuerzo; y en el 19,1% para las piezas reforzadas. No obstante, se detecta una caída en los registros de la banda extensométrica de la viga testigo V2; probablemente por una anomalía producida por la banda de compensación.

Tabla 134. Resultados de la deformación por fluencia recogidos por las bandas extensométricas en las vigas de chopo.

Pieza	Carga total (kN)	Duración (días)	Deform. inicial ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Deform. final ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Inc. (%)	Deform. residual ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Recuperación (%)
V1 (testigo)	10	186	509,4	608,6	16,3	33,67	21
V2 (testigo)			599,8	455,1	-32	-195	-1,9
VR1 (GFRP UNI2400)			452,0	594,7	24	84,44	8,9
VR2 (GFRP UNI2400)			532,3	620,6	14,2	61,15	9,17

La representación gráfica de los valores de deformación obtenidos por las bandas extensométricas se muestra en la Fig. 234. Pueden observarse comportamientos similares frente a la fluencia entre las diferentes vigas. El trazado irregular de la curva testifica la gran precisión de las bandas extensométricas y su sensibilidad a la influencia de los factores ambientales en la medida, pese a utilizarse bandas de compensación, existiendo un cierto paralelismo entre las variaciones de las condiciones ambientales recogidas en la Fig. 230 y las fluctuaciones en las deformaciones.

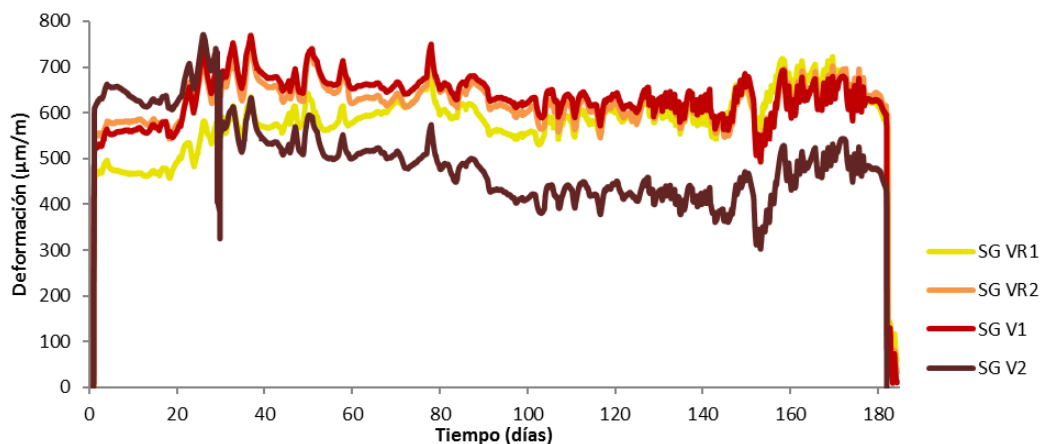


Fig. 234. Gráfico deformación-tiempo de las bandas extensométricas.

6.9.3. Discusión de los resultados

Los resultados muestran que, al menos con los bajos ratios de refuerzo utilizado (<2%), el refuerzo GFRP empleado no produce ninguna mejora sensible ante los fenómenos de fluencia, siendo análogo el comportamiento a largo plazo de las vigas dúo de chopo sin refuerzo y reforzadas. Respecto a la deformación residual presente en las vigas tras el ensayo de fluencia, si bien es cierto que las vigas reforzadas reducen la flecha total registrada, no se aprecia mejora en la recuperación parcial de la deformación adquirida tras la descarga de las vigas en comparación con las vigas dúo testigo. El sistema de medida se presenta robusto para mediciones a largo plazo, especialmente los extensómetros inductivos LVDT no presentaron ningún tipo de alteración ante las ligeras variaciones de temperatura y humedad ambiental. Las bandas extensométricas se presentan como un sistema de extrema precisión, pero frágil; siendo recomendable para futuros ensayos a largo plazo el uso de una instrumentación redundante, al menos por pares, que permita solventar los posibles fallos o anomalías que puedan surgir en bandas puntuales.

Respecto a los resultados obtenidos, Davids et al.⁵⁷⁸ realizan una campaña de ensayos de larga duración (2 años) con vigas laminadas de dimensión estructural, cargadas a tercios, reforzadas con laminados GFRP en ratios del 1,06 y 3,3%. Los resultados muestran como, si bien las vigas reforzadas reducen la flecha respecto a las piezas sin reforzar, su comportamiento es semejante a las vigas sin refuerzo, no mostrando los refuerzos mejoría significativa en los procesos de fluencia. Sin embargo, Tingley et al.⁵⁷⁹ en una investigación sobre vigas de madera laminada reforzada con laminados de CFRP, sí que afirma una mejora en el comportamiento a fluencia de las piezas reforzadas en comparación con las piezas sin reforzar. Además, realiza la monitorización de la deformación de las piezas largo plazo con bandas extensométricas, colocadas en ambiente exterior, y donde se muestran variaciones en las medidas debidas a las propias variaciones de temperatura y humedad ambientales. Por tanto, y como se ha reflejado en esta tesis, los refuerzos basados en fibra de vidrio no presentan un mejor comportamiento frente a los procesos de fluencia, al menos en ratios de refuerzo ligero, que otros tipos de refuerzo FRP, como el carbono, pueden incrementar.

⁵⁷⁸ Davids et al. (2000). Op. cit.

⁵⁷⁹ Tingley et al. (1996). Op. cit.

7. ESTUDIO COMPARADO DE RESULTADOS

7.1. Materiales de refuerzo

En una fase inicial de la investigación se estudiaron y ensayaron distintos tipos de materiales, naturales y sintéticos, potencialmente interesantes para su empleo como refuerzos en las vigas dúo. Pero para alcanzar el objetivo marcado de fabricar un producto final comercialmente viable era preciso seleccionar un material de refuerzo con buenas prestaciones mecánicas a un precio no excesivamente elevado. Por ello, los resultados de propiedades mecánicas, obtenidos en los apartados 6.3 a 6.5, se representan junto a los costes comerciales de cada tipo de material de refuerzo, obtenidos de la compra de materiales para la realización de la investigación, en la Fig. 235.

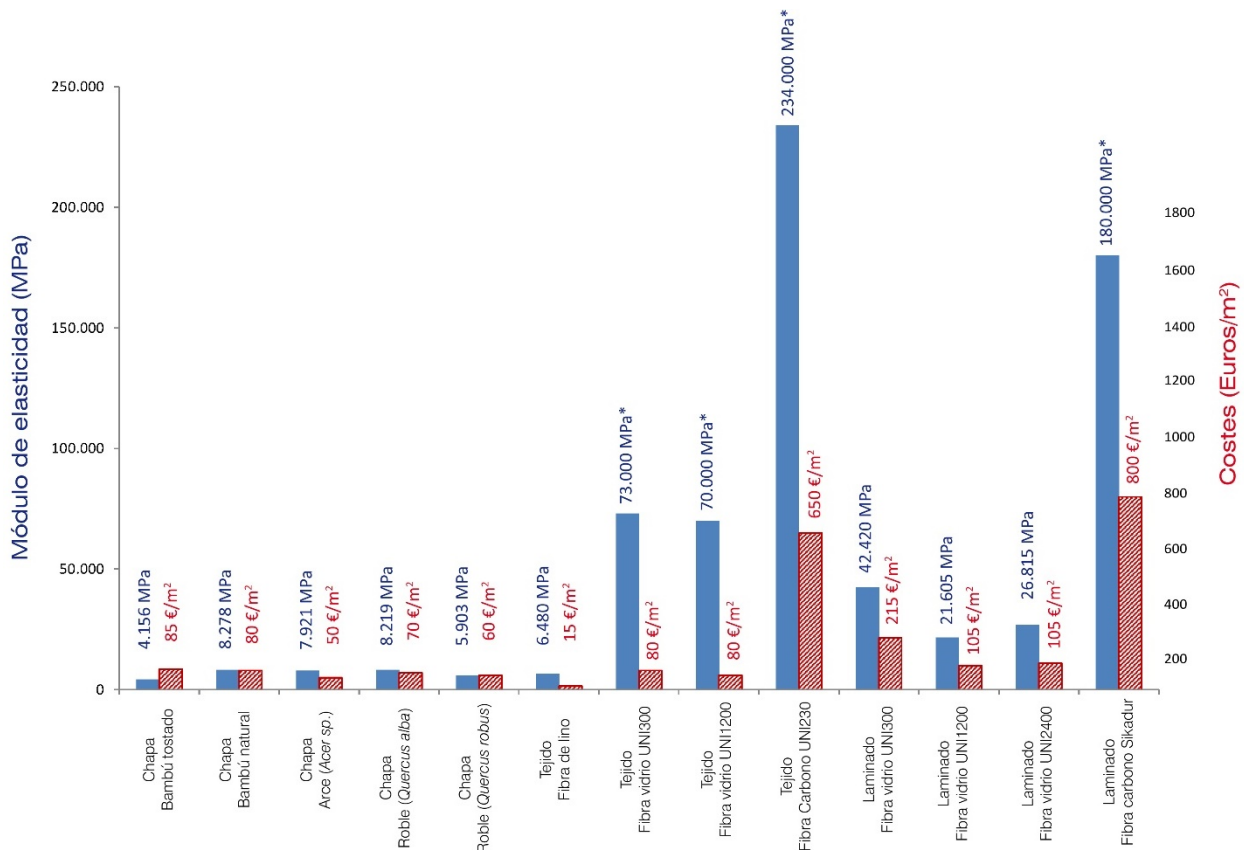


Fig. 235. Comparación de módulo de elasticidad y costes para todos los refuerzos ensayados.

Como puede observarse en la gráfica anterior (Fig. 235), hay una marcada diferencia entre los materiales de origen natural y los materiales sintéticos. Los materiales de origen natural analizados presentan todos ellos un bajo módulo de elasticidad, próximos e incluso inferiores a los valores propios de la madera a reforzar (MOE chopo=7.835 MPa; MOE pinaster=10.688 MPa), siendo descartados para su uso en fases posteriores de esta investigación.

Por su parte, los materiales sintéticos presentaron todos ellos un alto módulo de elasticidad, muy superior al de la madera a reforzar. De entre todos los materiales sintéticos destacan por sus

prestaciones mecánicas los basados en fibras de carbono, pero por su elevado coste también fueron descartados. Finalmente, por su adecuada relación entre prestaciones mecánicas y costes, las fibras de vidrio se mostraron, a priori, como la mejor alternativa.

Sin embargo, como se observa durante la fabricación y ensayo de las vigas dúo de pequeña escala, el uso de tejidos dificulta la fabricación y en gramajes elevados no puede garantizarse la completa y correcta impregnación de las fibras con una aplicación manual del adhesivo. Por estas razones fueron descartados los tejidos, y se fabricaron laminados rígidos de fibra de vidrio (GFRP) para su uso final en el refuerzo de las vigas dúo de dimensiones estructurales, adaptando el gramaje de los laminados a las necesidades de cada sección.

7.2. Adhesivos

En otra de las fases iniciales de esta investigación (apartado 6.6) se estudiaron y ensayaron distintos tipos de adhesivos de uso estructural y específicos para madera, obteniendo su comportamiento y prestaciones en colaboración con las especies y tipos de refuerzos utilizados. Para poder seleccionar el adhesivo más idóneo, en la Fig. 236 (chopo) y Fig. 237 (p. pinaster) se representan conjuntamente las propiedades mecánicas y costes de cada tipo de adhesivo analizado.

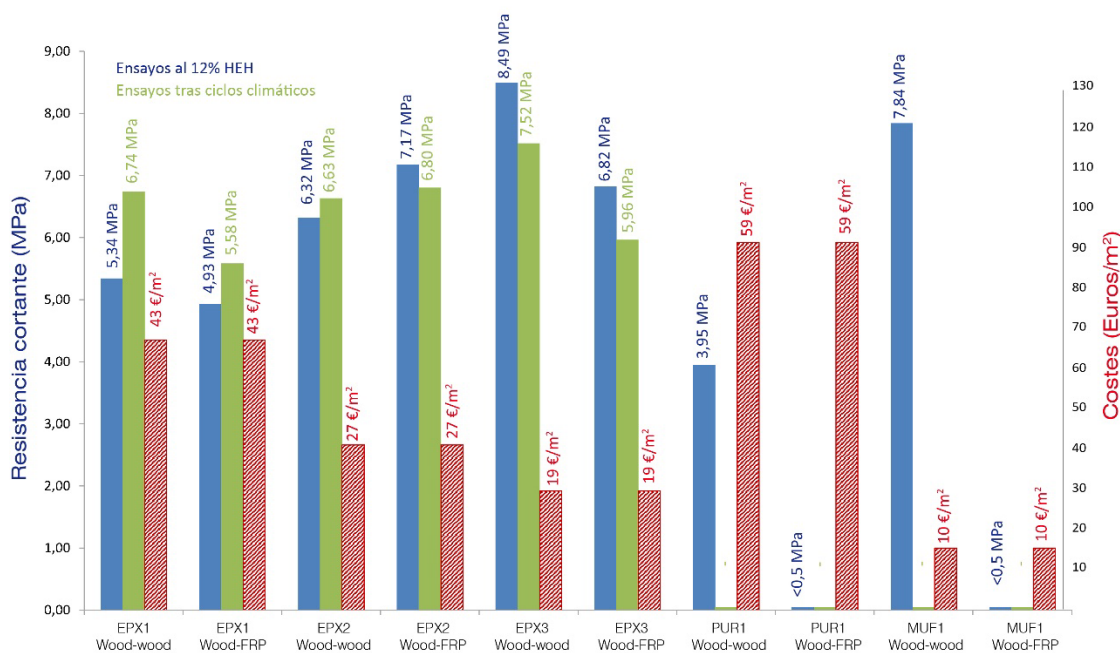


Fig. 236. Comparación de la resistencia a cortante y costes de los adhesivos para madera de chopo.

Como se puede observar (Fig. 236), el comportamiento de los adhesivos de poliuretano (PUR1) y melamina urea formol (MUF1) en probetas sin estresar climáticamente (12%HEH) con laminados GFRP mostraron prestaciones mecánicas muy bajas, no permitiendo su uso en aplicaciones estructurales, por lo que fueron rechazados. El resto de los adhesivos epoxi analizados presentaron prestaciones mecánicas similares, si bien el adhesivo EPX1 fue rechazado para su empleo con laminados rígidos por su elevado precio. Entre los adhesivos EPX2 y EPX3 no se apreciaron diferencias significativas en su comportamiento, en condiciones estables ni tras los ciclos climáticos, ni en precio. Si bien el adhesivo EPX2 presentó unos valores resistentes más homogéneos entre los distintos tipos de probetas ensayadas.

Del mismo modo, en la Fig. 237 se presentan las propiedades mecánicas y costes de todos los adhesivos analizados con madera de pino pinaster.

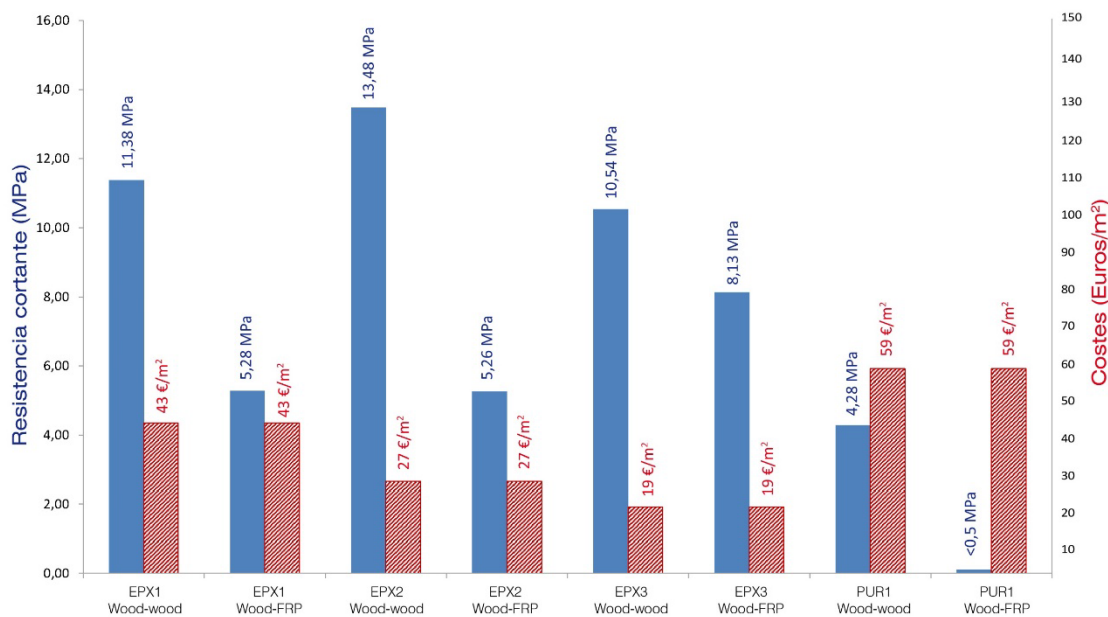


Fig. 237. Comparación de la resistencia a cortante y costes de los adhesivos para madera de pino pinaster.

Los resultados obtenidos mantienen la misma línea que los alcanzados con madera de chopo, con unas prestaciones similares entre todos los adhesivos epoxi y un mal comportamiento del adhesivo de poliuretano (PUR1) en las probetas con GFRP; si bien los valores alcanzados en las probetas madera-madera alcanzaron valores resistentes superiores al producirse el fallo por la rotura de madera.

Entre los adhesivos EPX2 y EPX3 no se encontraron diferencias importantes en comportamiento en ninguna de las dos especies o precio, por lo que finalmente se seleccionó el adhesivo EPX2, adhesivo Sikadur-30, para la fabricación de las vigas dúo laminadas de dimensiones estructurales por mantenerse una colaboración con la empresa fabricante Sika.

7.3. Vigas reforzadas

7.3.1. Rigidez

Los valores de módulo de elasticidad obtenidos experimentalmente en las vigas dúo de escala estructural fueron ligeramente superiores a los teóricamente esperables debidos a influencia de los laminados de refuerzo utilizados (Tabla 135), a excepción de los datos anómalos de las vigas dúo reforzadas de pino pinaster con GFRP 2400.

Tabla 135. Comparación de los valores de módulo de elasticidad teóricos y experimentales en vigas dúo estructurales.

	MOE teórico (MPa)	Incremento (%)	MOE experimental (MPa)	Incremento (%)
Dúo chopo testigo	7.835	-	7.835	-
Dúo chopo reforzada GFRP UNI 1200	8.115	3,57	8.918	12,15
Dúo chopo reforzada GFRP UNI 2400	8.393	6,13	9.209	14,73
Dúo pinaster testigo	10.689	-	10.689	-
Dúo pinaster reforzada GFRP UNI 1200	11.048	3,37	11.584	7,73
Dúo pinaster reforzada GFRP UNI 2400	11.310	5,82	8.915	-19,88*

* Valores anómalos del lote de madera de pino pinaster de la "partida 3".

Este incremento en los módulos de elasticidad puede explicarse a partir de los resultados obtenidos en los ensayos con vigas dúo escala 1:25. En el apartado 6.7, se ensayan vigas dúo de madera de chopo con distintos tipos de refuerzo, tomándose como testigos piezas de madera aserrada y dúos sin refuerzo. En la comparativa entre los resultados de las vigas testigo aserrada y dúo sin refuerzo, se puede observar como la simple homogeneización de la sección debido al laminado de las vigas reduce significativamente la influencia de las singularidades propias de la madera, incrementándose los módulos de elasticidad en un 11,51% en los valores característicos (Tabla 101). Por tanto, puede afirmarse que la mecanización y laminado en vigas dúo, por sí solo, permite mejorar el comportamiento de las piezas incrementando su rigidez. Además, para comprobar la repercusión real de los laminados de refuerzo sin la influencia de la variabilidad propia de la madera, se opta por realizar un lote de vigas sustituyendo la madera por un material industrializados derivado de la madera, como son los tableros de fibra de densidad media, con un comportamiento de menores prestaciones mecánicas, pero de gran homogeneidad. Los resultados obtenidos en estos ensayos (apartado 6.7.3) muestran una clara y significativa diferenciación entre los grupos ensayados, con unos coeficientes de variabilidad y dispersión reducidos. En este caso, los resultados experimentales y los resultados teóricos son muy semejantes, como puede observarse en la Tabla 136.

Tabla 136. Comparación de los valores de módulo de elasticidad teóricos y experimentales en vigas dúo de DM (1:25)

	MOE teórico (MPa)	Incremento (%)	MOE experimental (MPa)	Incremento (%)
Dúo chopo testigo	3.743	-	3.743	-
Dúo chopo reforzada GFRP UNI 300	5.015	34,00	4.999	33,55
Dúo chopo reforzada GFRP UNI 600	6.018	65,16	5.980	59,76

Con todo ello, puede concluirse que la introducción de laminados de refuerzo en la línea de encolado permite aumentar las prestaciones mecánicas de las vigas no sólo por el incremento mecánico directo que producen, sino por homogeneizar el conjunto de la sección limitando la influencia de las singularidades de la madera en las piezas.

A partir de los valores de módulo de elasticidad expuestos anteriormente se comparan las deformaciones, teóricas y experimentales, de las vigas dúo escala estructural ensayadas.

A. Vigas dúo reforzadas de madera de chopo

Los valores de flecha de las vigas dúo de chopo obtenidos para la fuerza en tramos elástico (7kN), y fuerza de rotura se exponen en la Tabla 137 y se representan gráficamente de la Fig. 238.

Tabla 137. Comparación de resultados de flecha en las vigas dúo de chopo.

Dúo chopo (1:2)	Fuerza (kN)	Análítico $\delta_{y,ana}$ (mm)	Experimental $\delta_{y,exp}$ (mm)	Δ Exp.- Analítico (%)
Testigo	7,00	13,28	13,05	1,80
Reforzada GFRP UNI 1200	7,00	8,70	7,63	14,07
Reforzada GFRP UNI 2400	7,00	8,22	8,08	1,73
Testigo	20,45	38,81	40,05	3,10
Reforzada GFRP UNI 1200	33,48	41,61	42,05	1,05
Reforzada GFRP UNI 2400	33,12	38,91	43,94	11,46

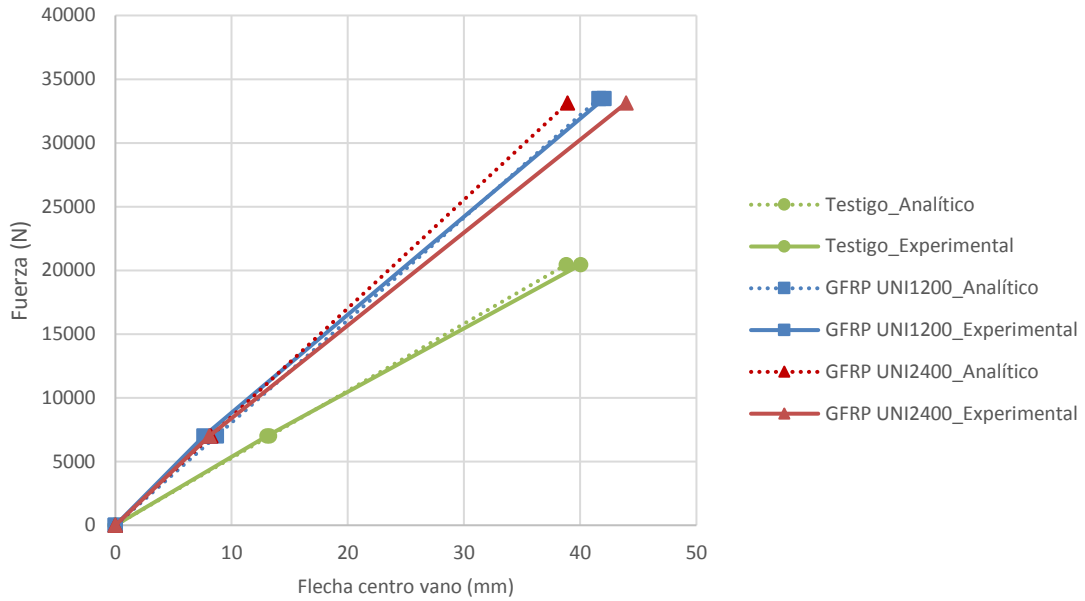


Fig. 238. Representación gráfica de las flechas teórica y analítica para vigas dúo de chopo.

B. Vigas dúo reforzadas de madera de pino pinaster

Los valores de flecha de las vigas dúo de pino pinaster obtenidos para la fuerza en tramos elástico (7kN), y fuerza de rotura se exponen en la Tabla 138 y se representan gráficamente de la Fig. 239.

Tabla 138. Comparación de resultados de flecha en las vigas dúo de pino pinaster.

Dúo pino pinaster (1:2)	Fuerza (kN)	Análítico δy_{ana} (mm)	Experimental δy_{exp} (mm)	Δ Exp. - Analítico (%)
Testigo	7,00	10,10	10,45	3,42
Reforzada GFRP UNI 1200	7,00	10,23	10,33	0,95
Reforzada GFRP UNI 2400	7,00	7,89	9,12	3,56
Testigo	28,83	41,59	44,55	6,65
Reforzada GFRP UNI 1200	33,18	48,48	55,43	12,53
Reforzada GFRP UNI 2400	30,20	34,03	48,91	30,42

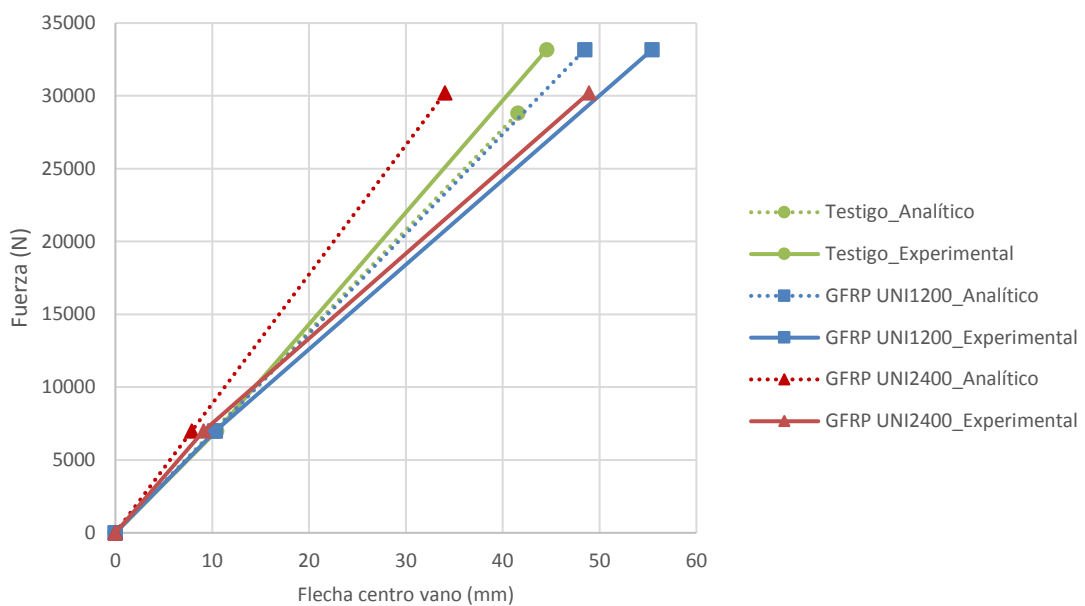


Fig. 239. Representación gráfica de las flechas teórica y analítica para vigas dúo de pino pinaster.

C. Vigas dúo reforzadas de tablero de fibras DM (1:25)

Si se comparan los resultados obtenidos para las vigas dúo de madera anteriores con los resultados obtenidos para las vigas dúo de tablero de fibra expuestos en la Tabla 139 y representados en la Fig. 240, puede observarse la influencia de la variabilidad natural de la madera en los resultados.

Tabla 139. Comparación de resultados de flecha en las vigas dúo de tablero DM (1:25).

Dúo DM (1:25)	Fuerza (N)	Análítico δy_{ana} (mm)	Experimental δy_{exp} (mm)	Análítico / Exp (%)
Testigo	1.500	12,44	12,38	0,51
Reforzada GFRP UNI 300	1.500	9,29	9,18	1,15
Reforzada GFRP UNI 600	1.500	7,53	7,70	2,16
Testigo	3.710,00	30,78	33,58	8,35
Reforzada GFRP UNI 300	5.355,00	33,15	35,89	7,61
Reforzada GFRP UNI 600	6.505,00	32,67	34,83	6,20

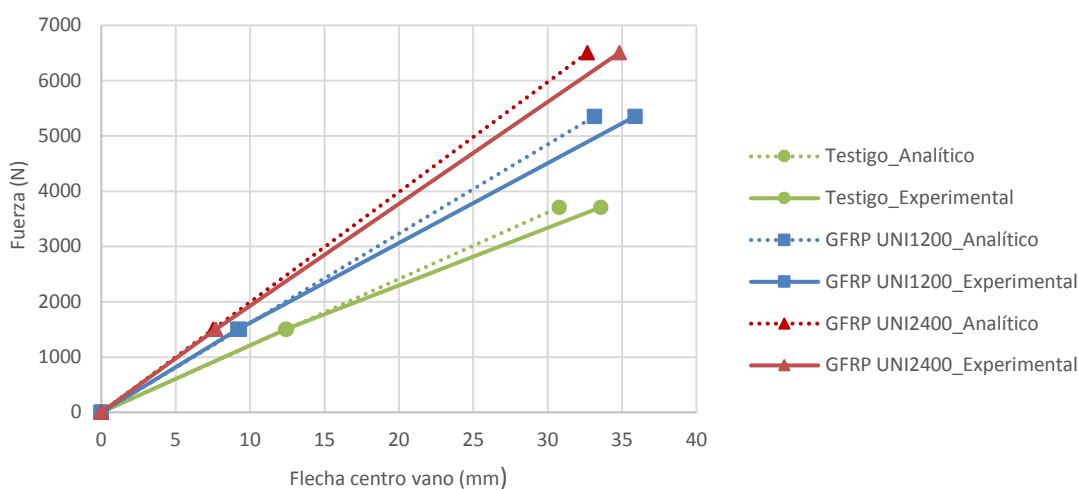
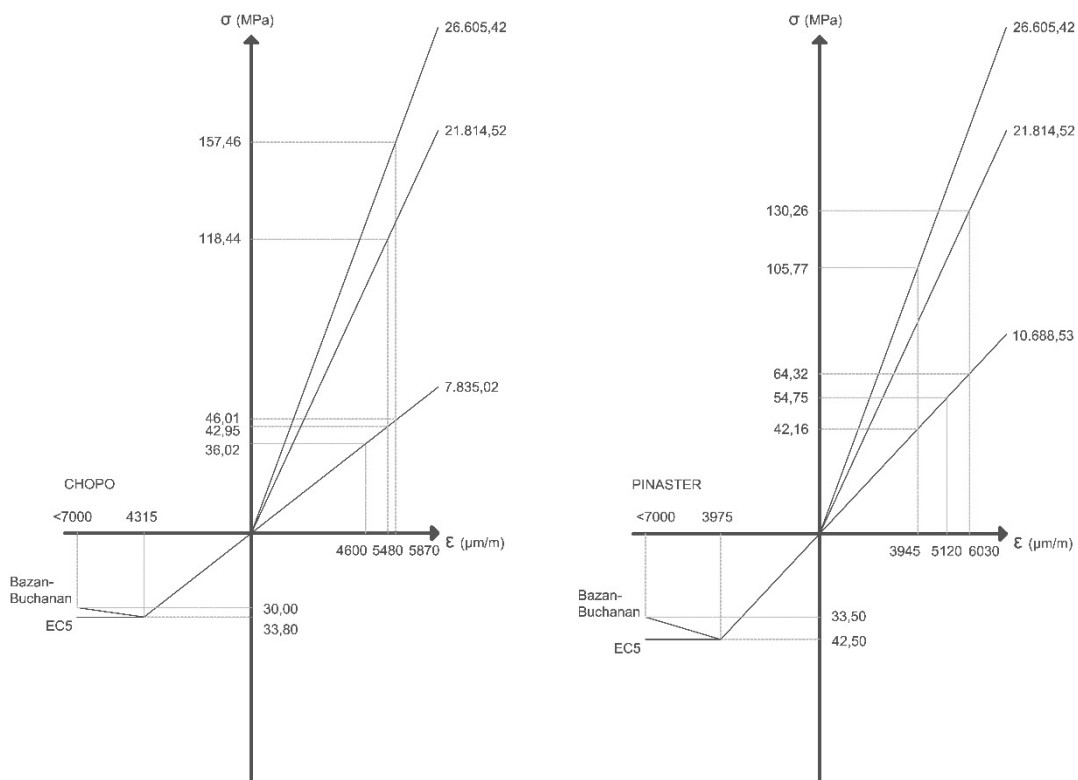


Fig. 240. Representación gráfica de las flechas teórica y analítica para vigas dúo de tablero de fibras DM (1:25).

7.3.2. Resistencia

Obtenidos experimentalmente los valores medios de MOR en los ensayos con vigas dúo de pino pinaster y chopo de dimensiones estructurales (apartado 6.8), y los valores de módulo de elasticidad de los laminados de refuerzo GFRP UNI1200 y GFRP UNI 2400 (apartado 6.5), se representa el modelo tensión deformación de las vigas dúo reforzadas ensayadas (Fig. 241).

7. ESTUDIO COMPARADO DE RESULTADOS



a) Modelo tensión deformación de las vigas dúo de chopo. b) Modelo tensión deformación de las vigas dúo de pino pinaster

Fig. 241. Representación gráfica del modelo tensión-deformación de las vigas dúo ensayadas.

Obtenidos experimentalmente los parámetros necesarios para el cálculo analítico, tales como tensiones y deformaciones a compresión y tracción (en límite elástico y último) (apartado 6.1) de la madera de chopo y pino pinaster, y los parámetros de tensión y deformación de los laminados de refuerzo GFRP UNI1200 y GFRP UNI 2400 (apartado 6.5), se obtienen para los modelos de análisis definidos en el apartado 5.1, los valores de MOR teórico de la Tabla 140.

Tabla 140. Comparación de los valores de módulo de elasticidad teóricos y experimentales en vigas dúo estructurales.

Tipo de viga	Modelo teórico	MOR teórico (MPa)	MOR experimental (MPa)	Variación (%)
Dúo chopo testigo	Elástico	22,29		38,12
	EC5	25,10	36,02	30,32
	Bazán-Buchanan	25,12		30,26
Dúo chopo reforzada GFRP UNI 1200	Elástico	22,46 (+0,76%)		47,71
	EC5	25,64 (+2,15%)	42,95 (+19,23%)	40,30
	Bazán-Buchanan	25,65 (+2,11%)		40,28
Dúo chopo reforzada GFRP UNI 2400	Elástico	22,49 (+0,90%)		51,12
	EC5	26,01 (+3,63%)	46,01 (+27,73%)	43,47
	Bazán-Buchanan	26,02 (+3,58%)		43,45
Dúo pinaster testigo	Elástico	39,17		28,46
	EC5	41,05	54,75	25,02
	Bazán-Buchanan	40,88		25,33
Dúo pinaster reforzada GFRP UNI 1200	Elástico	39,53 (+0,92%)		38,54
	EC5	41,93 (+2,14%)	64,32 (+17,47%)	34,81
	Bazán-Buchanan	41,76 (+2,15%)		35,07
Dúo pinaster reforzada GFRP UNI 2400	Elástico	39,61 (+1,12%)		6,05
	EC5	42,57 (+3,70%)	42,16 (-22,99*%)	-0,97
	Bazán-Buchanan	42,39 (+3,69%)		-0,55

*Valores anómalos del lote de madera de pino pinaster de la "partida 3".

Como puede observarse, existe una variación significativa entre los valores de MOR teóricos, calculados partiendo de parámetros obtenidos de probetas de pequeñas dimensiones, y los valores de MOR experimentales, tanto en piezas sin refuerzo como reforzadas, de tamaño

estructural. Produciéndose, además, un incremento significativo en los valores de MOR experimentales al introducir los laminados de refuerzo por la homogenización de la sección y la reducción de la repercusión de las singularidades de la madera sobre la resistencia final de las piezas.

7.3.3. Propiedades mecánicas propuestas

Las vigas dúo reforzadas con GFRP tienen la ventaja de presentar módulos de elasticidad superiores, lo que se traduce en una mayor rigidez a flexión y menores deformaciones de los elementos bajo idénticas situaciones de luces y cargas. Ciertamente se observa una mejora en la resistencia final de las vigas dúo reforzadas (MOR), pero su incremento es menor y no es considerado. Además, las vigas dúo reforzadas presentan una menor variabilidad en sus propiedades al homogeneizar el refuerzo GFRP la sección, siendo menor la influencia de singularidades sobre el comportamiento final de la viga en su conjunto. Esta uniformidad permite obtener un material con mejor comportamiento, más predecible y seguro.

Partiendo de los resultados obtenidos en la fase experimental se proponen unos valores resistentes para las vigas dúo reforzadas.

A. Madera de chopo

En la Tabla 141 se exponen los valores resistentes propuestos para las vigas dúo reforzadas de madera de chopo en comparación con madera aserrada de la misma especie.

Tabla 141. Valores resistentes propuestos para vigas de madera de chopo

		Viga aserrada (CH2)*	Viga aserrada (CH1)*	Viga dúo reforzada (GFRP UNI 2400)
Resistencia (característica) (N/mm²)				
Flexión	$f_{m,g,k}$	18	22	22 (28**)
Tracción paralela	$f_{t,0,g,k}$	8,00	10,00	10,00
Tracción perpendicular	$f_{t,90,g,k}$	0,40	0,40	0,40
Compresión paralela	$f_{c,0,g,k}$	16,00	17,00	17,00
Compresión perpendicular	$f_{c,90,g,k}$	2,00	2,20	2,20
Cortante	$f_{v,g,k}$	3,00	3,20	3,20
Rigidez (kN/mm²)				
Módulo elasticidad paralelo medio	$E_{0,g,mean}$	6,5	8	9,2
Módulo elasticidad paralelo 5%	$E_{0,g,k}$	4,70	5,4	7,6
Módulo elasticidad perpendicular med.	$E_{90,g,mean}$	0,23	0,27	0,27
Módulo elasticidad perpendicular 5%	$E_{90,g,k}$		-	-
Módulo cortante medio	$G_{g,mean}$	0,44	0,50	0,50
Módulo cortante característico	G_k	0,29	0,34	0,34
Densidad (kg/m³)				
Densidad característica	$\rho_{g,k}$	290	310	340
Densidad media	$\rho_{g,mean}$	350	370	410

* Clase resistente propuesta por Casado et al. (2012)⁵⁸⁰.

**Experimentalmente se obtienen valores característicos de 28 MPa.

B. Madera de pino pinaster

En la Tabla 142 se exponen los valores resistentes propuestos para las vigas dúo reforzadas de madera de pino pinaster en comparación con madera aserrada de la misma especie.

⁵⁸⁰ Casado et al. (2012). Op. cit.

Tabla 142. Valores resistentes propuestos para vigas de madera de pino pinaster.

		Viga aserrada (C18)*	Viga aserrada (C24)*	Viga dúo reforzada (GFRP UNI 1200)
Resistencia (característica) (N/mm²)				
Flexión	$f_{m,g,k}$	18,00	24,00	24 (30**)
Tracción paralela	$f_{t,0,g,k}$	11,00	14,00	11,00
Tracción perpendicular	$f_{t,90,g,k}$	0,40	0,40	0,40
Compresión paralela	$f_{c,0,g,k}$	18,00	21,00	18,00
Compresión perpendicular	$f_{c,90,g,k}$	2,20	2,50	2,20
Cortante	$f_{v,g,k}$	3,40	4,00	3,40
Rigidez (kN/mm²)				
Módulo elasticidad paralelo medio	$E_{0,g,mean}$	9,00	11,00	11,5
Módulo elasticidad paralelo 5%	$E_{0,g,k}$	6,00	7,40	10
Módulo elasticidad perpendicular med.	$E_{90,g,mean}$	0,30	0,37	0,30
Módulo elasticidad perpendicular 5%	$E_{90,g,k}$			
Módulo cortante medio	$G_{g,mean}$	0,56	0,69	0,56
Módulo cortante característico	G_k	0,38	0,46	0,38
Densidad (kg/m³)				
Densidad característica	$\rho_{g,k}$	320	350	350
Densidad media	$\rho_{g,mean}$	380	420	420

*Clase resistente según UNE-338:2016⁵⁸¹.

**Experimentalmente se obtienen valores característicos de 30 MPa.

Los valores experimentales de resistencia a flexión de las vigas dúo reforzadas son, en ambos casos, superiores a los propuestos. No obstante, se toma el valor de la madera como referencia puesto que la principal limitación de las maderas estudiadas es su bajo módulo de elasticidad. Si se tomase en consideración para el cálculo en ELU los valores de resistencia $f_{m,g,k}$ reales (entre paréntesis), sería preciso estudiar en detalle el comportamiento a fuego de cada sección para garantizar el tiempo de resistencia mínima exigida para cada tipo de uso (CTE-DB-SI⁵⁸²).

⁵⁸¹ Norma UNE-EN 338:2016. Op. cit.

⁵⁸² CTE-DB-SI (2009) Código técnico de la edificación. Documento básico. Seguridad en caso de incendio.

8. ESTUDIO ECONÓMICO

8.1. Costes de fabricación de las vigas dúo

Uno de los objetivos principales de la tesis doctoral es el de fabricar un producto industrializado, capaz de competir en prestaciones mecánicas y precio con sistemas estructurales de madera alternativos. De este modo, se plantea, mediante un proceso de industrialización sencillo, aportar a especies de madera con propiedades mecánicas limitadas y bajo valor económico, ampliamente extendidas en España y en la región Castilla y León, una mayor competencia estructural de alto valor añadido; potenciando, de este modo, el sector forestal en el entorno rural.

Lógicamente, el alcance de este objetivo se fundamenta en dos factores: por un lado, diseñar, fabricar y caracterizar experimentalmente que es posible mejorar de modo significativo las propiedades de la madera mediante la adición de refuerzos FRP. Y, por otro, alcanzar estas mejoras con precios de material (madera, FRP, ...) y fabricación suficientemente competitivos para entrar en mercado. El primer punto, obtener una mejora mecánica significativa, se ha desarrollado y demostrado en los capítulos precedentes de esta tesis. El segundo punto, hacerlo económicamente viable, va a desarrollarse a continuación.

Debe entenderse que el estudio de costes de fabricación que se expone en este capítulo se basa en la comparación de costes sobre un proceso de fabricación inicialmente experimental y artesanal, condicionado por el carácter investigador y no comercial de esta fase. Los refuerzos GFRP empleados han sido fabricados de modo experimental y *ex proceso* por pequeñas empresas locales, para la realización de los ensayos en series limitadas. La maquinaria utilizada, los tiempos de trabajo, incluso los adhesivos utilizados pueden, y deben, optimizarse si se considera viable lanzar el producto al mercado.

Los precios de los diferentes materiales y la mano de obra considerados en este trabajo para la fabricación de las vigas dúo se exponen en la Tabla 143:

Tabla 143. Precios de materiales y mano de obra.

precios del material		
Madera de pino Pinaster (calidad rechazo)	270,00	€/m ³
Madera de chopo	230,00	€/m ³
Resina Sikadur-30	17,20	€/kg
Refuerzo GFRP UNI 1200	5,20	€/m
Refuerzo GFRP UNI 2400	6,40	€/m
precios de la mano de obra		
Oficial carpintero	15,00	€/h

Estos precios de materiales son obtenidos de los costes reales de la compra de las distintas partidas para la fabricación de las vigas dúo durante la investigación. La madera fue comprada en el aserradero Maderas Juez S.L (Cervera de Pisuerga - Palencia), y los refuerzo GFRP fueron fabricados, bajo pedido y en una producción limitada, por la empresa vallisoletana INDEMAT (Villavaquerín – Valladolid). La resina epoxi fue suministrada por la empresa SIKA, sin coste; no

obstante, para el estudio de costes se toma de referencia el precio de mercado del producto, sin descuentos por volumen de compra, declarada en su catálogo comercial. El precio de la mano de obra se obtiene, del mismo modo, a partir de los costes reales facturados por el taller de carpintería por los trabajos de fabricación de las piezas.

8.1.1. Vigas dúo de pino pinaster

Conocidos los precios de todos los materiales, en las Tabla 144 a Tabla 146 se muestra el coste de las vigas dúo reforzadas fabricadas con madera de pino pinaster:

Tabla 144. Costes de fabricación de vigas dúo testigo de madera de pino pinaster (2500x140x80 mm).

	Cantidad		Precio		Coste	
Madera de pino pinaster	0,028	(m ³)	270,00	(€/m ³)	7,56	(€)
Resina epoxi Sikadur-30	0,3	(m ²)	17,20	(€/kg)	12,90	(€)
<i>Rendimiento resina</i>	2,5	(Kg/m ²)				
Tiempo utilizado en cada viga	0,33	(h)	15,00	(€/h)	5,00	(€)
<i>Regruessado</i>	5	(min.)				
<i>Cajeado</i>	0	(min.)				
<i>Pegado/prensado</i>	10	(min.)				
<i>Limpieza/acabado</i>	5	(min.)				
					25,46	(€/ud)
					10,18	(€/m)
					TOTAL 909,28	(€/m³)

Tabla 145. Coste de fabricación de vigas dúo reforzadas GFRP 1200 de madera de pino pinaster (2500x140x80 mm).

	Cantidad		Precio		Coste	
Madera de pino pinaster	0,028	(m ³)	270,00	(€/m ³)	7,56	(€)
Refuerzo GFRP UNI 1200 (60x2500mm)	2,5	(m)	5,20	(€/m)	13,00	(€)
Resina epoxi Sikadur-30	0,3	(m ²)	17,20	(€/kg)	12,90	(€)
<i>Rendimiento resina</i>	2,5	(Kg/m ²)				
Tiempo utilizado en cada viga	0,42	(h)	15,00	(€/h)	6,30	(€)
<i>Regruessado</i>	5	(min.)				
<i>Cajeado</i>	5	(min.)				
<i>Pegado/prensado</i>	10	(min.)				
<i>Limpieza/acabado</i>	5	(min.)				
					39,76	(€/ud)
					15,90	(€/m)
					TOTAL 1.420,00	(€/m³)

Tabla 146. Coste de fabricación de vigas dúo reforzadas GFRP 2400 de madera de pino pinaster (2500x140x80 mm).

	Cantidad		Precio		Coste	
Madera de pino pinaster	0,028	(m ³)	270,00	(€/m ³)	7,56	(€)
Refuerzo GFRP UNI 2400 (60x2500mm)	2,5	(m)	6,40	(€/m)	16,00	(€)
Resina epoxi Sikadur-30	0,3	(m ²)	17,20	(€/kg)	12,90	(€)
<i>Rendimiento resina</i>	2,5	(Kg/m ²)				
Tiempo utilizado en cada viga	0,42	(h)	15,00	(€/h)	6,30	(€)
<i>Regruessado</i>	5	(min.)				
<i>Cajeado</i>	5	(min.)				
<i>Pegado/prensado</i>	10	(min.)				
<i>Limpieza/acabado</i>	5	(min.)				
					42,76	(€/ud)
					17,10	(€/m)
					TOTAL 1.527,14	(€/m³)

8.1.2. Vigas dúo de chopo

Conocidos los precios de todos los materiales, en las Tabla 147 a Tabla 149 se obtiene el coste de las vigas dúo reforzadas fabricadas con madera de chopo:

Tabla 147. Costes de fabricación de vigas dúo testigo de madera de chopo (2500x140x80 mm).

	Cantidad		Precio		Coste	
Madera chopo	0,028	(m ³)	230,00	(€/m ³)	6,44	(€)
Resina epoxi Sikadur-30	0,3	(m ²)	17,20	(€/kg)	12,90	(€)
<i>Rendimiento resina</i>	2,5	(Kg/m ²)				
Tiempo utilizado en cada viga	0,33	(h)	15,00	(€/h)	5,00	(€)
<i>Regruessado</i>	5	(min.)				
<i>Cajeado</i>	0	(min.)				
<i>Pegado/prensado</i>	10	(min.)				
<i>Limpieza/acabado</i>	5	(min.)				
					24,34	(€/ud)
					9,74	(€/m)
					TOTAL 869,28	(€/m³)

Tabla 148. Coste de fabricación de vigas dúo reforzadas GFRP 1200 de madera de chopo (2500x140x80 mm).

	Cantidad		Precio		Coste	
Madera chopo	0,028	(m ³)	230,00	(€/m ³)	6,44	(€)
Refuerzo GFRP UNI 1200 (60x2500mm)	2,5	(m)	5,20	(€/m)	13,00	(€)
Resina epoxi Sikadur-30	0,3	(m ²)	17,20	(€/kg)	12,90	(€)
<i>Rendimiento resina</i>	2,5	(Kg/m ²)				
Tiempo utilizado en cada viga	0,42	(h)	15,00	(€/h)	6,30	(€)
<i>Regruessado</i>	5	(min.)				
<i>Cajeado</i>	5	(min.)				
<i>Pegado/prensado</i>	10	(min.)				
<i>Limpieza/acabado</i>	5	(min.)				
					38,64	(€/ud)
					15,45	(€/m)
					TOTAL 1.380,00	(€/m³)

Tabla 149. Coste de fabricación de vigas dúo reforzadas GFRP 2400 de madera de chopo (2500x140x80 mm).

	Cantidad		Precio		Coste	
Madera chopo	0,028	(m ³)	230,00	(€/m ³)	6,44	(€)
Refuerzo GFRP UNI 2400 (60x2500mm)	2,5	(m)	6,40	(€/m)	16,00	(€)
Resina epoxi Sikadur-30	0,3	(m ²)	17,20	(€/kg)	12,90	(€)
<i>Rendimiento resina</i>	2,5	(Kg/m ²)				
Tiempo utilizado en cada viga	0,42	(h)	15,00	(€/h)	6,30	(€)
<i>Regruessado</i>	5	(min.)				
<i>Cajeado</i>	5	(min.)				
<i>Pegado/prensado</i>	10	(min.)				
<i>Limpieza/acabado</i>	5	(min.)				
					41,64	(€/ud)
					16,65	(€/m)
					TOTAL 1.487,14	(€/m³)

8.2. Comparación propiedades mecánicas/precio con otros productos

Para poder comparar la relación de propiedades mecánicas con precio de fabricación de las vigas dúo reforzadas frente a otros productos comerciales de madera estructural (madera aserrada, vigas dúo, madera laminada, ...) se plantea calcular tres sistemas constructivos diferenciados, con piezas a flexión, a compresión y a tracción. En concreto, se analiza una viga de un forjado convencional,

un pie derecho y el tirante de una cercha. Todos ellos con unas cargas conocidas y resueltos con diferentes productos de madera industrializada, de modo que puedan compararse objetivamente los diversos productos y su coste (Tabla 150).

Tabla 150. Productos de madera seleccionados para comparas prestaciones mecánicas/precio.

	Tipo de madera	Clase resistente	Precio/m ³
A)	Viga dúo de chopo reforzada con GFRP UNI 2400	Tabla 142	1.487,14 ^I (805 ^{II})
B)	Viga dúo de pino pinaster reforzada con GFRP UNI 1200	Tabla 143	1.420,00 ^I (945 ^{II})
C)	Viga aserrada chopo	CH2 ⁵⁸³	230,00 ^{III}
D)	Viga dúo chopo	Tabla 142	869,28 ^I (575 ^{II})
E)	Viga aserrada de conífera	C24 ⁵⁸⁴	535,00 ^{IV}
F)	Viga aserrada de frondosa	D18 ⁵⁸⁵	682,00 ^V
G)	Viga laminada de conífera	GL24h	899,67 ^{IV}
H)	Viga laminada de castaño "Grupo Sierolam"	GL30h ⁵⁸⁶	1.712,00 ^{VI}
I)	Viga laminada de roble "Grupo Gamiz"	GL32h ⁵⁸⁷	1.800,00 ^{VII}
J)	Viga laminada eucalipto "Grupo Villapol"	GL40h ⁵⁸⁸	1.556,60 ^{VIII}

^I Precio obtenido de la fabricación artesanal de vigas dúo para la investigación de esta tesis doctoral.

^{II} Precio estimado para la fabricación industrializadas de las vigas dúo, reforzadas y sin refuerzo.

^{III} Precio consultado en Maderas Juez S.L (Cervera de Pisuerga - Palencia).

^{IV} Precio consultado en la base de precios Guadalajara 2017.

^V Precio consultado en Maderas Siero (Siero – Asturias).

^{VI} Precio consultado en Maderas Sierlam (Siero – Asturias).

^{VII} Precio consultado en Maderas Gámiz (Vitoria – Álava).

^{VIII} Precio consultado en Maderas Villapol (Lugo – Galicia).

Analizando el incremento de precio que presenta la madera laminada respecto al de la madera aserrada de la misma especie, puede obtenerse el porcentaje de la variación de precio atribuible a la transformación. En las vigas dúo (tanto reforzadas como sin refuerzo), prácticamente doblan los porcentajes de variación obtenidos en el resto de las maderas laminadas (Tabla 151).

Tabla 151. Comparación entre precios de maderas aserradas y laminadas.

Tipo		Precio madera aserrada (€/m ³)	Precio Madera laminada (€/m ³)	Incremento de aserrada a laminada (%)
INDUSTRIAL	Conífera	400,00	899,67	225
	Castaño	682,00	1.712,00	251
	Roble	677,00	1.800,00	266
	Eucalipto	500,00	1.556,60	259
EXPERIMENTAL	Dúo Chopo	230	869,28	378
	Dúo chopo reforzada GFRP UNI 2400	230	1.487,14	647
	Dúo pinaster reforzada GFRP UNI 1200	270	1.420,00	526

A partir de los porcentajes de incremento entre el precio de madera aserrada y madera laminada atribuibles a los costes de producción industrial (Tabla 151) puede hacerse una estimación, aproximada, del rango de precios esperados para las vigas dúo reforzadas fabricadas en serie. Considerando la repercusión del coste de los laminados de refuerzo, y comparando con el resto de los productos analizados, la industrialización podría suponer una reducción del incremento porcentual de la fabricación experimental (378-526%) hasta un porcentaje aproximado del orden del 250%. Si se le añade el coste del laminado de refuerzo, el incremento de coste respecto de la madera base podría estimarse en un 350% aproximadamente. Los precios así obtenidos serían:

⁵⁸³ Casado et al. (2012). Op. cit.

⁵⁸⁴ Norma UNE 338:2016 Madera estructural. Clases resistentes.

⁵⁸⁵ Ibidem.

⁵⁸⁶ MPA Stuttgart University (2013) Certificado de Conformidad CE N°0672-CPD-I 14.21.57 según ETA-13/0646 para la empresa Sierolam S.A (Asturias).

⁵⁸⁷ Österreichisches Institut für Bautechnik (ÖIB) (2013) Certificado de Conformidad CE N°0672-CPD-I 14.21.58 según ETA-13/0642 para la empresa Gámiz S.A (Álava)

⁵⁸⁸ <https://www.villapol.com> [Consultada 10/01/2019]

Tabla 152. Precios de producción industrial de los dúos reforzados y sin reforzar.

Tipo	Precio Madera aserrada (€/m ³)	Incremento de producción ind. (%)	Precio final (%)
Dúo Chopo	230	250%	575,00
Dúo chopo reforzada GFRP UNI 2400	230	350%	805,00
Dúo pinaster reforzada GFRP UNI 1200	270	350%	945,00

El cálculo de la estructura se realiza por estados limites, según plantea el CTE, tomando como propiedades mecánicas de las vigas dúo reforzadas con GFRP las propuestas en el apartado 7.3.

8.2.1. Estudio de piezas a flexión

Se plantea un forjado tipo de madera, a modo de ejemplo de comparación, para uso de vivienda, con viguetas de madera de longitud 2,50 m. separadas cada 400 mm, tablero inferior/superior de contrachapado de 22 mm, aislamiento acústico intermedio de lana de roca de 100 mm y tablero acústico superior de fibra de madera de 10 mm. Como pavimento se coloca una tarima flotante de madera de 10 mm. En la Fig. 242 se muestra el esquema de forjado propuesto.

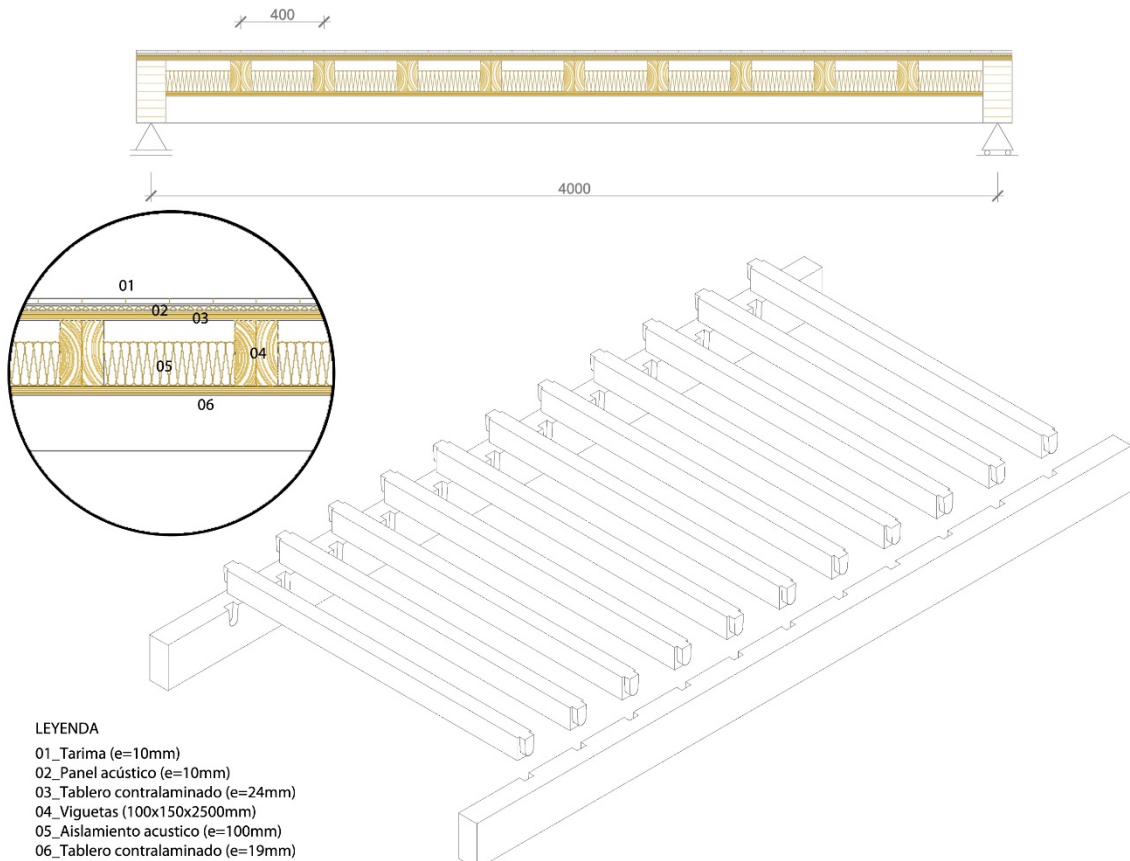


Fig. 242. Esquema del forjado tipo propuesto para comparar las distintas maderas industrializadas a compresión.

Las acciones a las que se ve sometido el forjado tipo se definen en la Tabla 153.

Tabla 153. Evaluación de cargas del forjado propuesto.

Referencias	Cálculos	Valor
ACCIONES VALORES CARACTERÍSTICOS		
CTE-DB-M Madera C18 $\rho_{media}=380 \text{ kg/m}^3$	G_k Carga permanente (duración permanente) $G_k = G_{k1} + G_{k2}$	$G_k = [] \text{ kN/m}$
Garnica plywood Tablero contrachapado $\rho_{media}=420 \text{ kg/m}^3$	G_{k1} (Peso propio) <i>NOTA: Calcular para cada tipología de madera industrializada</i>	$G_{k1} = [] \text{ kN/m}$
Rockwool Lana de roca $\rho_{media}=50 \text{ kg/m}^3$	G_{k2} (cargas muertas) Tablero contrachapado (19 mm) = $0,019 \cdot 2,5 \cdot 4,20 = 0,20 \text{ kN/m}$ Viguetas C18 = $(3,80 \cdot 0,1 \cdot 0,15 \cdot 2,5)/0,5 = 0,285 \text{ kN/m}$ Aislamiento LR (100 mm) = $0,1 \cdot 2,5 \cdot 0,8 \cdot 0,50 = 0,1 \text{ kN/m}$	
Gutex Panel acústico madera $\rho_{media}=150 \text{ kg/m}^3$	Tablero contrachapado (24 mm) = $0,024 \cdot 2,5 \cdot 4,20 = 0,25 \text{ kN/m}$ Panel acústico (10 mm) = $0,01 \cdot 2,5 \cdot 1,50 = 0,0375 \text{ kN/m}$ Tarima madera (10 mm) = $2,5 \cdot 1 \cdot 0,1 = 0,25 \text{ kN/m}$ Partición ligera = $2,5 \cdot 1 \cdot 0,5 = 1,25 \text{ kN/m}$	
IMA Tarima madera $\rho_{media}=10 \text{ kg/m}^2$	$G_{k2} = 0,2 + 0,315 + 0,1 + 0,25 + 0,0375 + 0,25 + 1,25 = 2,15 \text{ kN/m}$	$G_{k2} = 2,15 \text{ kN/m}$
CTE-DB-AE Anejo C Partición ligera $\rho_{media}=50 \text{ kg/m}^2$	Q_{k1}. Sobrecarga uso uniforme (duración media) Uso vivienda (Cat. A1) $Q_{k1} = 2 \cdot 2,5 = 5 \text{ kN/m}$	$Q_{k1} = 5 \text{ kN/m}$
Q_{k1} = sobrecarga de uso repartida	Q_{k2}. Sobrecarga uso puntual (duración corta) Uso vivienda (Cat. A1) $Q_{k2} = 2 \text{ kN}$	$Q_{k2} = 2 \text{ kN}$
CTE-DB-AE Tabla 3.1 Cat.A1 (vivienda) $q = 2 \text{ kN/m}^2$		
Q_{k2} = sobrecarga de uso puntual		
CTE-DB-AE Tabla 3.1 Cat.A1 (vivienda) $Q = 2 \text{ kN}$		

Se estudia la combinación de cargas más penalizante para las acciones propuestas, según el CTE-DB-SE para ELU (Ec.81) y ELS (Ec.82).

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad [81]$$

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad [82]$$

Los coeficientes de seguridad tomados son:

CTE-DB-SE Tabla 4.1: Permanentes $\gamma=1,35$; Variables $\gamma=1,50$ CTE-DB-SE Tabla 4.2: $\psi_0=0,7$

Tabla 154. Combinaciones de carga.

Combinación	Carga permanente [G _k]	Sobrecarga de Uso Uniforme [Q _{k1}]	Sobrecarga Uso Puntual [Q _{k2}]	Duración
1	1.35			Permanente
2	1.35	1.5		Media
3	1.35		1.5	Corta

El cálculo del forjado se realiza con distintos productos de madera, sometidos a las mismas solicitaciones y todos ellos con una sección 160x240 mm y una luz de 4000 mm, con el fin de poder comparar las alternativas de mercado (propiedades mecánicas/precio) con las vigas dúo de chopo reforzadas con GFRP investigadas en esta tesis doctoral.

A. Relación propiedades mecánicas/precio con igual sección

En la Tabla 155 se comparan los valores resistentes y los costes obtenidos para cada una de las secciones. Todos los productos de madera presentan la misma sección fija, por lo que puede compararse fácilmente las prestaciones mecánicas de cada producto bajo la condición de cargas propuesta.

Tabla 155. Resumen de los valores resistentes y costes obtenidos para el forjado propuesto (flexión).

	ELU [flexión] (MPa)	ELU [cortante] (MPa)	ELS [uint] L/400 (mm)	ELS [uconf] L/350 (mm)	ELS [utot] L/300 (mm)	Ind. Agot. (%)	Precio m ³ (€/m ³)	Precio pieza (€/ud)
Chopo dúo reforzada GFRP UNI 2400	15,43 (89 %)	2,05 (60%)	13,27 (133%)	10,44 (91%)	7,54 (56%)	133	805,00	123,65
Pinaster dúo reforzada GFRP UNI 1200	18,93 (82 %)	2,17 (56%)	10,62 (106%)	8,35 (73%)	6,04 (45%)	106	945,00	145,15
Chopo aserrada	13,54 (101%)	1,96 (62%)	22,04 (220%)	17,37 (152%)	12,46 (93%)	220	230,00	35,32
Chopo dúo	15,43 (89 %)	2,05 (60%)	15,43 (154%)	12,16 (106%)	8,72 (65%)	154	575,00	88,32
Aserrada conífera	14,77 (93%)	2,46 (50%)	11,03 (110%)	8,67 (76%)	6,27 (47%)	110	535,00	82,18
Aserrada Castaño	11,07 (125%)	2,09 (59%)	12,84 (128%)	10,04 (88%)	7,45 (56%)	128	682,00	104,75
Laminada Conífera	16,83 (82 %)	2,24 (55%)	10,61 (106%)	8,34 (73%)	6,03 (45%)	106	899,67	138,19
Laminada Castaño (Sierolam)	21,04 (66%)	3,2 (39%)	9,37 (94%)	7,34 (64%)	5,42 (41%)	94	1.712,00	263,00
Laminada Roble (Gamiz)	22,44 (62 %)	2,56 (49%)	10,59 (106%)	8,25 (72%)	6,25 (47%)	106	1.800,00	276,48
Laminada Eucalipto (Villapol)	28,05 (50 %)	2,56 (49%)	6,83 (68%)	5,30 (46%)	4,08 (31%)	68	1.556,60	239,09

Dimensiones: 160x240x4000mm (0,1536 m³)Cargas: G_{k1}=pp ; G_{k2}= 1kN/m² ; Q_{k1}= 2kN/m² ; Q_{k2}=2kN

Para ver más claramente la relación propiedades mecánicas / precio de las secciones, se ordenan los resultados en función de las propiedades mecánicas; colocando el primer lugar la sección con menor índice de agotamiento y en último lugar la sección con mayor índice de agotamiento (Tabla 156).

Tabla 156. Resultados a flexión ordenados por propiedades mecánicas (de menor a mayor índice de agotamiento).

	Clase resistente	ELS (%)	ELU (%)	Precio m ³ (€/m ³)	Precio pieza (€/ud)
Viga Laminada Eucalipto (Villapol)	GL40h	68	50	1.556,60	239,09
Viga laminada castaño (Sierolam)	GL30h	94	66	1.712,00	263,00
Viga laminada de roble (Gamiz)	GL32h	106	62	1.800,00	276,48
Viga dúo pinaster reforzada GFRP UNI 1200	Tabla 142	106	82	945,00	145,15
Viga laminada de conífera	GL24h	106	82	899,67	138,19

Viga aserrada conífera	C24	110	93	535,00	82,18
Viga aserrada castaño	D18	128	125	682,00	104,75
Viga dúo chopo reforzada GFRP UNI 2400	Tabla 143	133	89	805,00	123,65
Viga dúo chopo	Tabla 142	154	89	575,00	88,32
Viga aserrada chopo	CH2	220	101	230,00	35,32

De este modo puede observarse como tanto la viga dúo de madera de chopo reforzada, como la viga dúo de pinaster reforzada, se encuentran compitiendo en propiedades y precio con las vigas laminadas de madera de frondosa. Sin embargo, las secciones de madera de chopo sin reforzar, tanto en madera aserrada como en dúo, se ven relegadas a los últimos puestos de la tabla penalizadas en los Estados Limite de Servicio por su bajo módulo elástico.

B. Relación propiedades mecánicas/precio con sección mínima

En el punto anterior se comparan las prestaciones mecánicas y precio para una sección de 160x240x4000mm común a todos los productos de madera estudiados. Como se observa en la Tabla 155, bajo la condición de cargas propuesta varios de los productos de madera agotan las propiedades mecánicas de la sección propuesta, lo que las invalida como solución de aplicación real. En este punto se propone calcular la sección mínima que cumpla las condiciones de carga, otorgando a cada producto la sección mínima necesaria, de modo que se puedan comparar los precios reales de cada producto (Tabla 157).

Tabla 157. Resumen de los valores resistentes y costes obtenidos para el forjado propuesto con secciones variables.

	Sección Min. (mm)	ELU [flexión] (MPa)	ELU [cortante] (MPa)	ELS [uint] L/400 (mm)	ELS [uconf] L/350 (mm)	ELS [utot] L/300 (mm)	Ind. Agot. (%)	Precio m³ (€/m³)	Precio pieza (€/ud)
Chopo dúo ref. GFRP UNI 2400	180x260	15,31 (68%)	2,05 (49%)	9,41 (94%)	7,38 (65%)	5,41 (41%)	94	805,00	150,69
Pinaster dúo ref. GFRP UNI 1200	160x260	18,78 (71%)	2,45 (52%)	8,46 (85%)	6,64 (58%)	4,83 (36%)	85	945,00	157,25
Chopo aserrada	200x300	13,53 (52%)	1,97(40%)	9,28 (93%)	7,25 (63%)	5,39 (41%)	93	230,00	55,20
Chopo dúo	180x280	15,19 (59 %)	2,05 (46%)	8,74 (88%)	6,94 (61%)	5,07 (28%)	88	575,00	115,92
Aserrada conífera	160x250	14,71 (86%)	2,46 (48%)	9,80 (98%)	7,71 (67%)	5,59 (42%)	98	535,00	85,60
Aserrada Castaño	160x270	11,07 (99%)	2,09 (53%)	9,17 (92%)	7,15 (63%)	5,37 (40%)	99	682,00	117,85
Laminada Conífera	160x260	16,69 (70 %)	2,24 (50%)	8,44 (84%)	6,63 (58%)	4,82 (36%)	84	899,67	149,70
Lam. Castaño (Sierolam)	160x240	21,04 (66%)	3,2 (39%)	9,37 (94%)	7,34 (64%)	5,42 (41%)	94	1.712,00	262,9
Lam. Roble (Gamiz)	160x260	22,26 (53 %)	2,56 (45%)	8,42 (84%)	6,55 (57%)	5,01 (38%)	84	1.800,00	299,52
Lam. Eucalipto (Villapol)	160x220	28,16 (59 %)	2,56 (53%)	8,74 (87%)	6,80 (60%)	5,18 (39%)	87	1.556,60	219,17

Dimensiones: sección variable en cada viga, longitud 4000 mm.

Cargas: $G_{k1}=pp$; $G_{k2}= 1kN/m^2$; $Q_{k1}= 2kN/m^2$; $Q_{k2}=2kN$

Considerando estas secciones como las menores posibles para soportar las condiciones de carga propuestas, se ordenan de menor a mayor precio para poder comparar los resultados desde el punto de vista económico (Tabla 158).

Tabla 158. Resultados a flexión ordenados por precio (de menor a mayor).

	Clase resistente	Sección min. (%)	Precio m³ (€/m³)	Precio pieza (€/ud)
Viga aserrada chopo	CH2	200x300	230,00	55,20
Viga aserrada conífera	C24	160x250	535,00	85,60
Viga dúo chopo	Tabla 142	180x280	575,00	115,92
Viga aserrada castaño	D18	160x270	682,00	117,85
Viga laminada de conífera	GL24h	160x260	899,67	149,70

Viga dúo chopo reforzada GFRP UNI 2400	Tabla 142	180x260	805,00	150,69
Viga dúo pinaster reforzada GFRP UNI 1200	Tabla 143	160x260	945,00	157,25
Viga laminada Eucalipto (Villapol)	GL40h	160x220	1.556,60	219,17
Viga laminada Castaño (Sierolam)	GL30h	160x240	1.712,00	262,90
Viga laminada de Roble (Gamiz)	GL32h	160x260	1.800,00	299,52

La comparación entre productos representada en la Fig. 243 muestra como los costes de las vigas dúo reforzadas con GFRP se sitúan en rangos similares a otros productos de madera industrializada, con unas prestaciones mecánicas ligeramente inferiores.

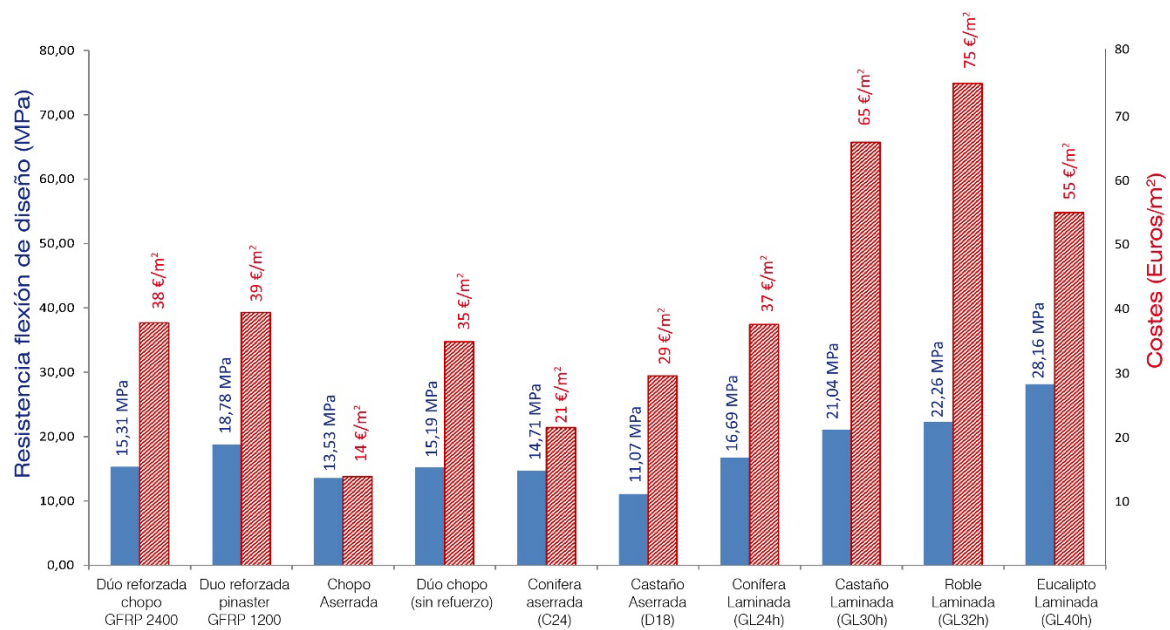


Fig. 243. Comparación entre resistencia a flexión y costes de los distintos productos analizados.

8.2.2. Estudio de piezas a compresión (pilares)

Se propone un pilar de sección cuadrada para soportar el forjado anteriormente resuelto, con una luz de forjado de 4m, mostrándose en la Fig. 244 el esquema propuesto.

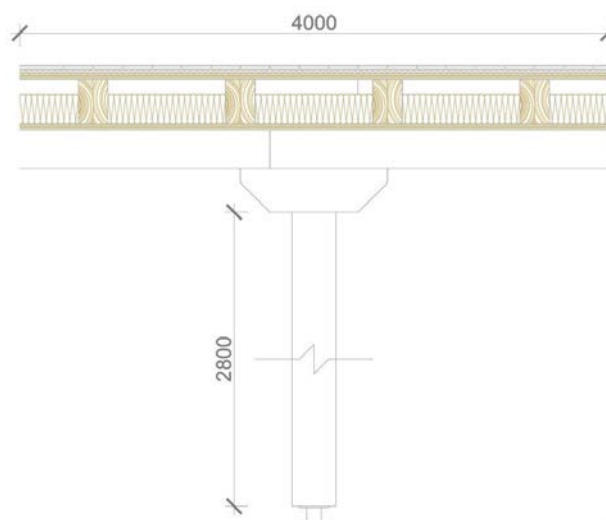


Fig. 244. Esquema del pilar tipo propuesto para comparar las distintas maderas industrializadas a compresión.

Las acciones a las que se ve sometido el pilar se definen a partir del análisis de cargas de la Tabla 153, y las combinaciones de carga posibles a partir del estudio de la Tabla 154, sometiéndose a una carga máxima (Q_d) en la combinación más desfavorable de 42 kN.

A. Relación propiedades mecánicas/precio con sección propuesta

Para comparar las prestaciones mecánicas de los distintos productos de madera bajo acciones de compresión, se propone un pilar de sección 120x120x2800mm común a todos los tipos de madera analizados. Agrupando los cálculos realizados en el apartado anterior se comparan los resultados obtenidos para cada una de las secciones. Los valores resistentes y los costes se muestran en la Tabla 159:

Tabla 159. Resumen de los valores resistentes y costes obtenidos para el pilar propuesto (compresión).

	ELU [compresión] (MPa)	Ind. Agot. (%)	Precio m ³ (€/m ³)	Precio pieza (€/ud)	
Chopo dúo reforzada GFRP UNI 2400	4,98 (58 %)	3,59 (81 %)	81	805,00	32,20
Pinaster dúo reforzada GFRP UNI 1200	6,93 (42%)	4,83 (60 %)	60	945,00	37,80
Chopo aserrada	3,20 (92%)	92	230,00	9,20	
Chopo dúo	3,59 (82 %)	82	575,00	23,00	
Aserrada conífera	4,26 (68 %)	68	535,00	21,40	
Aserrada Castaño	4,39 (66 %)	66	682,00	27,28	
Laminada Conífera	6,22 (47%)	47	899,67	35,98	
Laminada Castaño (Sierolam)	6,19 (47 %)	47	1.712,00	68,48	
Laminada Roble (Gamiz)	5,96 (49 %)	49	1.800,00	72,00	
Laminada Eucalipto (Villapol)	8,24 (35 %)	35	1.556,60	62,26	

Dimensiones: 120x120x2800 mm (0,040 m³)

Cargas: $Q_{Nd}=42kN$

Para ver más claramente la relación propiedades mecánicas / precio de las secciones, se ordenan los resultados en función de las propiedades mecánicas; colocando el primer lugar la sección con menor índice de agotamiento y en último lugar la sección con mayor índice de agotamiento (Tabla 160).

Tabla 160. Resultados a compresión ordenados por propiedades mecánicas (de menor a mayor índice agotamiento).

	Clase resistente	ELU (%)	Precio m ³ (€/m ³)	Precio pieza (€/ud)
Viga Laminada Eucalipto (Villapol)	GL40h	35	1556,60	62,26
Viga laminada de conífera	GL24h	47	899,67	35,98
Viga laminada castaño (Sierolam)	GL30h	47	1712,00	68,48
Viga laminada de roble (Gamiz)	GL32h	49	1800,00	72,00
Viga aserrada castaño	D18	66	682,00	27,28
Viga aserrada conífera	C24	68	535,00	21,40
Viga dúo pinaster reforzada GFRP UNI 1200	Tabla 143	60	945,00	37,80
Viga dúo chopo reforzada GFRP UNI 2400	Tabla 142	81	805,00	32,20
Viga dúo chopo	Tabla 142	82	575,00	23,00
Viga aserrada chopo	CH2	92	230,00	9,20

B. Relación propiedades mecánicas/precio con sección mínima

En este punto se propone calcular la sección mínima que cumpla las condiciones de carga, otorgando a cada producto la sección mínima necesaria, de modo que se puedan comparar los precios reales de cada producto (Tabla 161).

Tabla 161. Resumen de los valores resistentes y costes obtenidos para el pilar propuesto con secciones variables.

	Sección (mm)	ELU [compresión] (MPa)	Ind. Agot. (%)	Precio m ³ (€/m ³)	Precio pieza (€/ud)	
Chopo dúo reforzada GFRP UNI 2400	100x120	3,67 (96 %)	3,20 (92 %)	96	805,00	27,05
Pinaster dúo reforzada GFRP UNI 1200	100x110	5,21 (73 %)	4,13 (92 %)	92	945,00	29,10
Chopo aserrada	120x120	3,20 (92%)	92	230,00	9,20	
Chopo dúo	120x120	3,59 (82 %)	82	575,00	23,18	
Aserrada conífera	110x110	3,68 (94 %)	94	535,00	18,12	
Aserrada Castaño	110x110	3,80 (90 %)	90	682,00	23,10	
Laminada Conífera	100x100	4,49 (94 %)	94	899,67	25,19	
Laminada Castaño (Sierolam)	100x100	4,32 (96 %)	96	1.712,00	47,94	
Laminada Roble (Gamiz)	100x100	4,30 (98 %)	98	1.800,00	50,40	
Laminada Eucalipto (Villapol)	90x90	5,11 (99 %)	99	1.556,60	35,30	

Dimensiones: sección variable en cada viga, longitud 2800mm.

Cargas: $Q_{Nd}=42kN$

Considerando estas secciones como las menores posibles para soportar las condiciones de carga propuestas, se ordenan de menor a mayor precio para poder comparar con claridad los resultados (Tabla 162).

Tabla 162. Resultados a compresión ordenados por precio (de menor a mayor).

	Clase resistente	Sección min. (%)	Precio m ³ (€/m ³)	Precio pieza (€/ud)
Viga aserrada chopo	CH2	120x120	230,00	9,20
Viga aserrada conífera	C24	110x110	535,00	18,12
Viga aserrada castaño	D18	110x110	682,00	23,10
Viga dúo chopo	Tabla 142	120x120	575,00	23,18
Viga laminada de conífera	GL24h	100x100	899,67	25,19
Viga dúo chopo reforzada GFRP UNI 2400	Tabla 142	100x120	805,00	27,05
Viga dúo pinaster reforzada GFRP UNI 1200	Tabla 143	100x120	945,00	29,10
Viga Laminada Eucalipto (Villapol)	GL40h	90x90	1.566,60	35,30
Viga laminada castaño (Sierolam)	GL30h	100x100	1.712,00	47,94
Viga laminada de roble (Gamiz)	GL32h	100x100	1.800,00	50,40

La comparación entre productos representada en la Fig. 245 muestra como los costes de las vigas dúo reforzadas con GFRP y sus prestaciones mecánicas a compresión se sitúan en rangos similares a otros productos de madera industrializada.

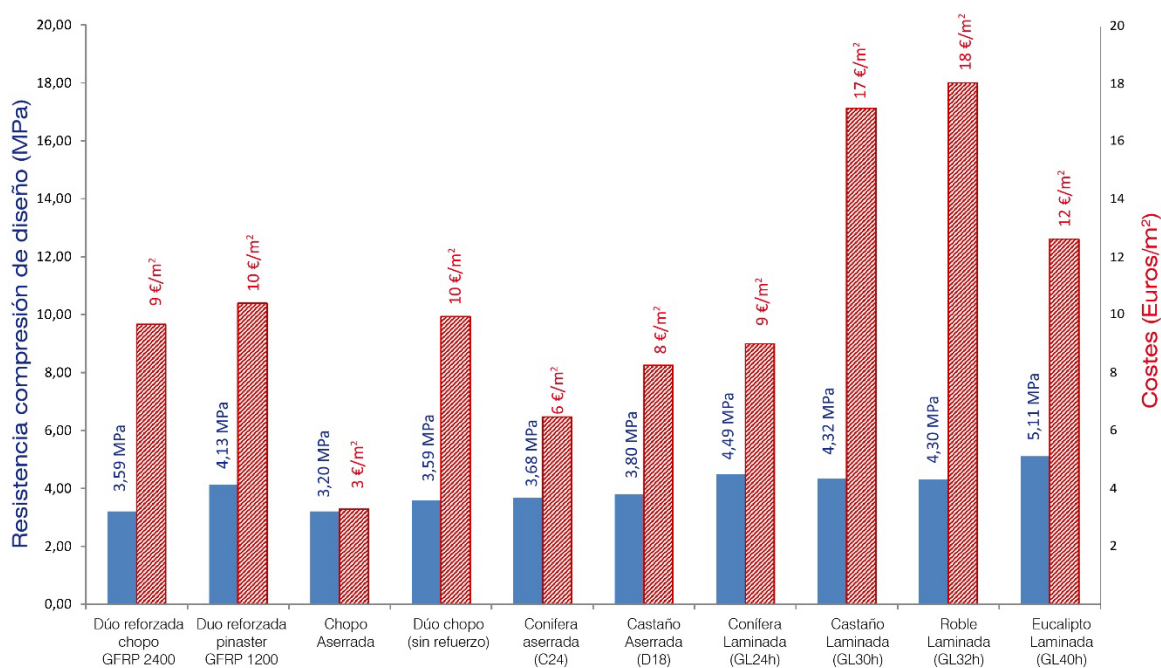


Fig. 245. Comparación entre resistencia a compresión y costes de los distintos productos analizados.

8.2.3. Estudio de piezas a tracción [tirantes]

Se propone una cercha española de luz 8 m y altura 2 m, para formar la cubierta de la propuesta. Las dimensiones generales de la cercha se exponen en la Fig. 246.

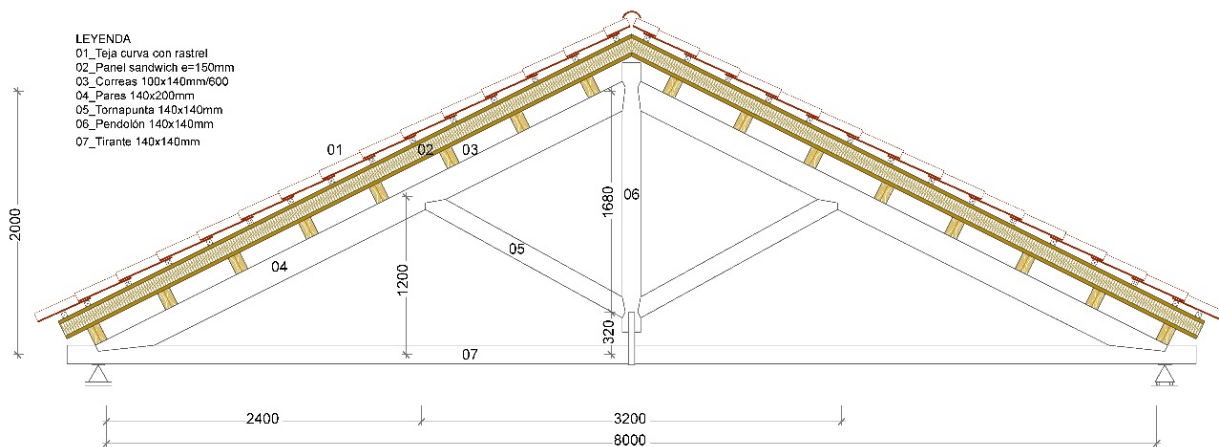


Fig. 246. Cercha española propuesta para comparar las distintas maderas industrializadas a tracción.

El análisis de cargas se detalla en la Tabla 163:

Tabla 163. Valoración de cargas de la cercha de cubierta propuesta.

Referencias	Cálculos	Valor
ACCIONES VALORES CARACTERÍSTICOS		
CTE-DB-M Madera C24 $\rho = 4,20 \text{ kN/m}^3$	G_k. Carga permanente (duración permanente) $G_k = G_{k1} + G_{k2}$	$G_k = [] \text{ kN/m}$
Panel sándwich $e = 150 \text{ mm}$ $\rho = 0.25 \text{ kN/m}^2$	G_{k1} (Peso propio) <i>NOTA: Calcular para cada tipología</i>	$G_{k1} = [] \text{ kN/m}$
CTE-DB-AE Anejo C Teja curva $\rho = 0.40 \text{ kN/m}^2$	G_{k2} (cargas permanentes) Correas C24 (100x140) = $0.014 \cdot 4.20 / 0.6 = 0.11 \text{ kN/m}^2$ Panel sándwich ($e = 150$) = 0.25 kN/m^2 Cubrición teja con rastrel = 0.45 kN/m^2	$G_{k2} = 2,43 \text{ kN/m}$
Q_{k1} = sobrecarga de uso repartida	$G_{k2} = 3 \cdot (0.11 + 0.25 + 0,45) = 2,43 \text{ kN/m}$	$Q_{k1} = 0.72 \text{ kN/m}$
CTE-DB-AE Tabla 3.1 Cat.G (Cubierta no accesible. Sólo mantenimiento) $q = 0 - 1 \text{ kN/m}^2$	Q_{k1}. Sobrecarga uso uniforme (Q_{k1}) (duración media) Uso cubierta no accesible (Cat. G) interpolar entre: Cubiertas $< 20^\circ = 1 \text{ kN/m}^2$ Cubiertas $> 40^\circ = 0 \text{ kN/m}^2$ Para una pendiente de $26,6^\circ = 0.27 \text{ kN/m}^2$ $Q_{k1} = 3 \cdot 0.27 \cdot \cos(26,6^\circ) = 0.72 \text{ kN/m}$	
Q_{k1} = sobrecarga de uso puntual	Q_{k2}. Sobrecarga uso puntual (Q_{k2}) (duración corta) Uso cubierta no accesible (Cat. G) $Q_{k2} = 2 \text{ kN}$	$Q_{k2} = 2 \text{ kN}$

CTE-DB-AE

Tabla 3.1

Cat.A1

(vivienda)

Q=2 kN

q_n Sobrecarga nieve (q_n)

(duración corta)

q_n=μ * s_k; μ=1; s_k= 0.6 kN/m²q_n=3*(1*0.6)*cos (26.6)= 1.61 kN/mq_n=1.61 kN/m**q_e Sobrecarga viento (q_e)**

(duración corta)

q_e=q_b*C_e*C_p

Viento 1 (Presión) -> Zona F/G= 1.29 kN/m

Zona H= 0.78 kN/m

Viento 2 (succión lateral) -> Zona F/G= -1.86 kN/m

Zona H= -0.49 kN/m

Zona J= -1.35 kN/m

Zona I= -0.88 kN/m

Viento 3 (succión frontal) -> Zona H= -1.66 kN/m

Se estudia la combinación de cargas pésima para las acciones propuestas, según el CTE-DB-SE para ELU (Ec.81) y ELS (Ec.82). Los esfuerzos que soporta el tirante con la combinación de cargas pésima, que es de N_d=43,63 kN a tracción. No obstante, debe considerarse la flexión producida en el tirante por efecto de su peso propio, considerando que el tirante está colgado del pendolón. De este modo, los cálculos se realizan a flexo-tracción de acuerdo con la siguiente ecuación (Ec.83).

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad [83]$$

A. Relación propiedades mecánicas/precio con la misma sección

Para comparar las prestaciones mecánicas de los distintos productos de madera bajo acciones de tracción, se propone un tirante de sección 140x140x8000mm común a todos los tipos de madera analizados. Agrupando los cálculos realizados en el apartado anterior se comparan los resultados obtenidos para cada una de las secciones. Los valores resistentes y los costes se muestran en la Tabla 164.

Tabla 164. Resumen de los valores resistentes y costes obtenidos para el tirante propuesto (tracción).

	ELU [tracción] (MPa)	ELU [flexión] (MPa)	ELS [u _{apa}] L/300 (mm)	Ind. Agot. (%)	Precio m ³ (€/m ³)	Precio pieza (€/ud)
Chopo dúo reforzada GFRP UNI 2400	4,8 (46 %)	10,71 (4%)	1,48 (11%)	50	805,00	126,22
Pinaster dúo reforzada GFRP UNI 1200	6,46 (34%)	11,68 (4%)	1,17 (9%)	38	945,00	148,17
Chopo aserrada	4,16 (48%)	7,48 (6%)	2,26 (17%)	54	230,00	36,06
Chopo dúo	4,80 (46 %)	10,71 (4%)	1,74 (13%)	50	575,00	90,16
Aserrada conífera	6,46 (34%)	11,23 (4%)	1,27 (10%)	38	535,00	83,88
Aserrada Castaño	5,07 (44%)	8,42 (8%)	1,99 (15%)	52	682,00	106,94
Laminada Conífera	9,22 (24 %)	11,68 (4%)	1,21 (9%)	28	899,67	141,07
Laminada Castaño (Sierolam)	9,60 (23%)	14,60 (4%)	1,38 (10%)	27	1.712,00	268,44
Laminada Roble (Gamiz)	8,64 (26 %)	15,57 (5%)	2,01 (15%)	31	1.800,00	282,24
Laminada Eucalipto (Villapol)	11,52 (19 %)	19,46 (5%)	1,45 (11%)	24	1.556,60	244,07

Dimensiones: 140x140x8000mm (0,1568 m³)Cargas tracción: G_n=43,63 kN + Cargas flexión: peso propio

Para ver comparar la relación propiedades mecánicas / precio de la sección propuesta (140x140mm), se ordenan los resultados en función de las propiedades mecánicas; colocando el primer lugar la sección con menor índice de agotamiento y en último lugar la sección con mayor índice de agotamiento (Tabla 165).

Tabla 165. Resultados a tracción ordenados por propiedades mecánicas (de menor a mayor índice de agotamiento).

	Clase resistente	ELS (%)	ELU (%)	Precio m ³ (€/m ³)	Precio pieza (€/ud)
Viga Laminada Eucalipto (Villapol)	GL40h	11	24	1556,60	244,07
Viga laminada castaño (Sierolam)	GL30h	10	27	1712,00	268,44
Viga laminada de conífera	GL24h	9	28	899,67	141,07
Viga laminada de roble (Gamiz)	GL32h	15	31	1800,00	282,24
Viga dúo pinaster reforzada GFRP UNI 1200	Tabla 143	9	38	945,00	148,17
Viga aserrada conífera	C24	10	38	535,00	83,88
Viga dúo chopo reforzada GFRP UNI 2400	Tabla 142	11	50	805,00	126,22
Viga dúo chopo	Tabla 142	13	50	575,00	90,16
Viga aserrada castaño	D18	15	52	682,00	106,94
Viga aserrada chopo	CH2	17	52	230,00	36,06

B. Relación propiedades mecánicas/precio con sección mínima

En este punto se propone calcular la sección mínima que cumpla las condiciones de carga, otorgando a cada producto la sección necesaria, de modo que se puedan comparar los precios reales de cada producto (Tabla 166).

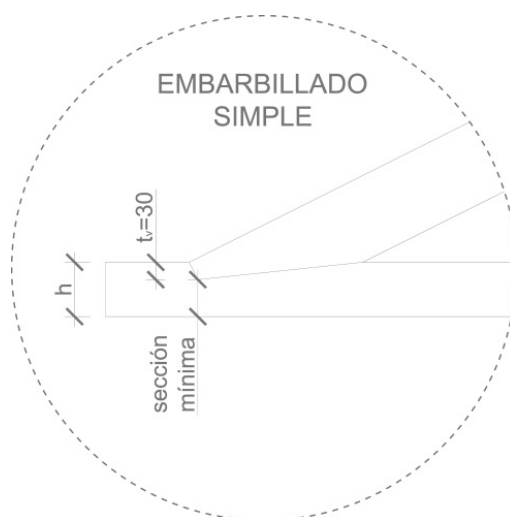
Tabla 166. Resumen de los valores resistentes y costes obtenidos para el tirante propuesto con secciones variables.

	Sección Min. (mm)	ELU [tracción] (MPa)	ELU [flexión] (MPa)	ELS [U _{apa}] L/300 (mm)	Ind. Agot. (%)	Precio m ³ (€/m ³)	Precio pieza (€/ud)
Chopo dúo reforzada GFRP UNI 2400	140x80	4,8 (81%)	11,97 (6%)	4,48 (34%)	86	805,00	72,12
Pinaster dúo reforzada GFRP UNI 1200	140x60	6,46 (80%)	13,83 (8%)	6,30 (47%)	88	945,00	63,50
Chopo aserrada	140x80	4,61 (84%)	8,38 (9%)	6,68 (52%)	93	230,00	20,60
Chopo dúo	140x80	4,80 (81%)	11,97 (7%)	5,26 (39%)	88	575,00	51,52
Aserrada conífera	140x60	6,46 (80%)	13,30 (9%)	6,81 (51%)	89	535,00	35,95
Aserrada Castaño	140x80	5,07 (76%)	9,42 (12%)	6,03 (45%)	88	682,00	61,11
Laminada Conífera	140x50	9,22 (68%)	14,35 (10%)	9,37 (70%)	78	899,67	50,38
Laminada Castaño (Sierolam)	140x50	9,60 (65%)	17,93 (10%)	10,66 (80%)	80	1.712,00	95,87
Laminada Roble (Gamiz)	140x60	8,64 (60%)	18,44 (10%)	10,76 (81%)	81	1.800,00	120,96
Laminada Eucalipto (Villapol)	140x50	11,52 (54%)	19,46 (11%)	11,12 (83%)	83	1.556,60	87,17

Dimensiones: 140 x variable x 8000 mm

Cargas tracción: G_n=43,63 kN + Cargas flexión: peso propio.

Las secciones mínimas expuestas en la tabla anterior (Tabla 166) no consideran la reducción de sección debida al ensamble del par y el tirante. Si consideramos el ensamble entre ambas piezas mediante un embarbillado simple, la profundidad de la barbilla deberá ser $t_v \leq h/4$ para $\beta \leq 50^\circ$ (DIN 1052 // CTE DB SE M), que para la sección inicial de referencia (140x140 mm) supone una profundidad de la barbilla (t_v) menor a 35 mm.

Fig. 247. Profundidad mínima del ensamble entre par y tirante por embarbillado simple (CTE⁵⁸⁹).

Considerando este cajeadado en el tirante para el ensamble por embarbillado simple (Fig. 247), a las secciones mínimas calculadas previamente debe aumentarse su canto (h) en 30 mm ($t_v \leq 35$ mm). Estas secciones reales se ordenan de menor a mayor precio para poder comparar con claridad los resultados (Tabla 167).

Tabla 167. Resultados a tracción ordenados por precio (de menor a mayor).

	Clase resistente	Sección min. (mm)	Sección real (mm)	Precio m ³ (€/m ³)	Precio pieza (€/ud)
Viga aserrada chopo	CH2	140x80	140x110	230,00	28,33
Viga aserrada conífera	C24	140x60	140x90	535,00	53,93
Viga dúo chopo	Tabla 142	140x80	140x110	575,00	70,83
Viga laminada de conífera	GL24h	140x50	140x80	899,67	80,61
Viga aserrada castaño	D18	140x80	140x110	682,00	84,02
Viga dúo pinaster ref. GFRP UNI 1200	Tabla 143	140x60	140x90	945,00	95,25
Viga dúo chopo ref. GFRP UNI 2400	Tabla 142	140x80	140x110	805,00	99,17
Viga Laminada Eucalipto (Villapol)	GL40h	140x50	140x80	1.556,60	139,47
Viga laminada castaño (Sierolam)	GL30h	140x50	140x80	1.712,00	153,39
Viga laminada de roble (Gamiz)	GL32h	140x60	140x90	1.800,00	181,44

La comparación entre productos representada en la Fig. 248 muestra como los costes de las vigas dúo reforzadas con GFRP son similares a otros productos de madera industrializada, mientras que su resistencia a tracción pura es sensiblemente inferior, no presentando mejora respecto a piezas de madera aserrada de la misma especie.

⁵⁸⁹ CTE-DB-SE-M (2009) Op.cit.

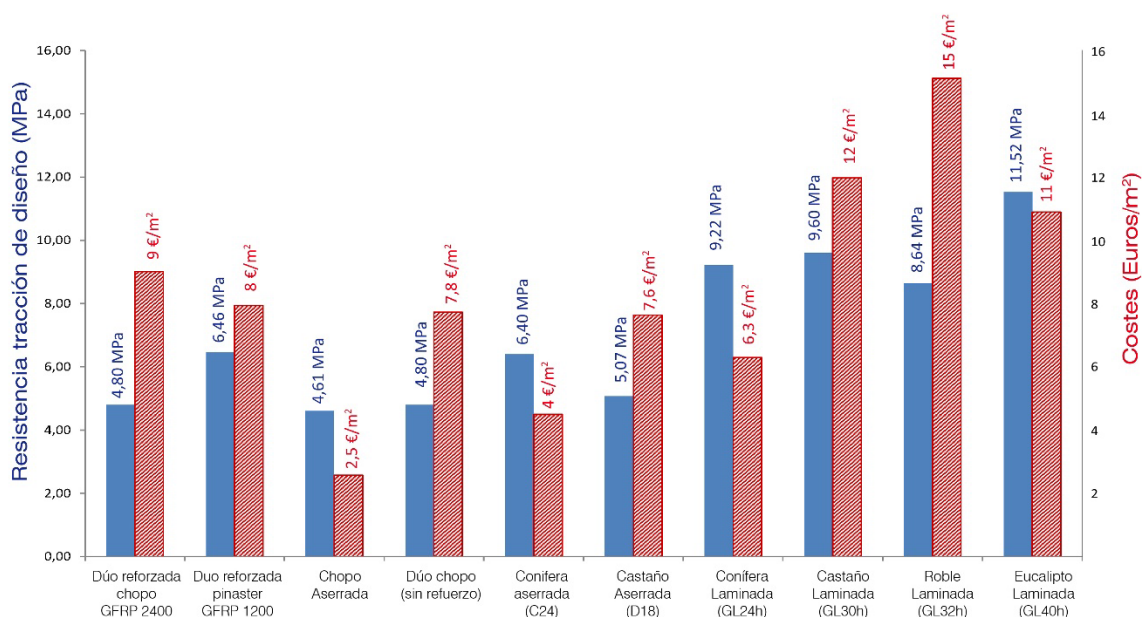


Fig. 248. Comparación entre resistencia a tracción y costes de los distintos productos analizados.

8.3. Discusión del estudio de costes

La comparación realizada entre las vigas dúo de chopo reforzado (GFRP) con productos de madera estructural de semejantes características disponibles en el mercado permite valorar de un modo objetivo varias condiciones. Por un lado, bajo la misma hipótesis de carga e idéntica escuadría, comparar las propiedades mecánicas de las vigas dúo reforzadas en relación con otros productos, valorando su idoneidad como material estructural para cada uno de los sistemas estructurales propuestos (viga, pilar y tirante). Por otro lado, partiendo de la misma hipótesis de carga inicial, optimizar la escuadría en cada producto para obtener la sección mínima que cumpla con esa situación de carga. Con esta sección mínima se realiza una valoración económica de cada producto de madera estructural para cada solución constructiva, valorándose la viabilidad económica del producto en su desarrollo industrial.

8.3.1. Comparación propiedades mecánicas

La comparación de las vigas dúo reforzadas (GFRP) con otros productos de madera estructural semejantes bajo las condiciones de misma sección y misma hipótesis de cargas permite obtener un resultado claro: las dúo reforzadas presentan su mayor potencialidad en elementos a flexión, donde compiten en propiedades mecánicas con otro sistemas laminados de calidad reconocida como los laminados de frondosa de una clase resistente superior (Tabla 156).

En otros sistemas constructivos propuestos, como piezas a compresión (pilares) o tracción (tirantes), la introducción de los refuerzos GFRP en el dúo no presentan una mejoría reseñable en las propiedades mecánicas de las piezas. Pudiéndose comparar los resultados finales a piezas de chopo aserrado o dúo de chopo sin reforzar, pero con un coste económico superior. En comparación con otros productos de madera estructural, los resultados de las vigas dúo reforzadas se asemejan a piezas de madera aserrada, alejándose de las propiedades presentadas por otras maderas laminadas (Tabla 160, Tabla 165).

8.3.2. Comparación de costes

Partiendo en cada caso de la misma hipótesis de cargas que en el punto anterior se calcula la sección mínima necesaria para cada producto de madera estructural y se estima su coste de acuerdo con los precios de mercado actuales, obtenidos de los catálogos comerciales de las casas comerciales suministradoras.

Los resultados obtenidos de esta comparación reflejan como en los sistemas constructivos analizados las maderas laminadas, en general, presentan soluciones más caras pese a su menor sección en comparación a las maderas aserradas de la misma especie. Esto indica que, en general, parece más ventajoso económicamente aumentar la sección de las piezas de madera aserrada que recurrir a productos industrializados de mayor calidad, mayores propiedades mecánicas y mayor precio. Obviamente la elección de maderas laminadas ofrece otras ventajas añadidas a las propiedades mecánicas (estabilidad dimensional, disponibilidad de mayores longitudes, controles de calidad añadidos, ...) no valoradas en el análisis puramente económico realizado. En cuanto a las vigas dúo reforzadas, su coste es semejante, al de otras maderas laminadas.

9. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

9.1. Conclusiones

En este apartado se presentan las conclusiones obtenidas a lo largo de la realización de la investigación.

9.1.1. Conclusiones generales

A. Obtención de un producto industrializado competitivo en prestaciones y precio a partir del uso de maderas de rápido crecimiento y bajas prestaciones estructurales

El uso de refuerzos GFRP en madera laminada (dúos) optimiza la utilización de los recursos madereros, al permitir emplear en la fabricación del producto estructural maderas de propiedades resistentes inferiores a las utilizadas convencionalmente, sin que ello implique una merma en las propiedades y calidad del producto final.

Las especies de madera utilizadas en esta investigación, chopo (*Populus x euroamericana* I-214) y pino pinaster (*Pinus pinaster* Ait.) en calidad de rechazo, presentan unos módulos de elasticidad bajos en comparación con otras especies de madera de uso estructural habitual, lo que limita su empleo en la práctica. La fabricación de un producto industrializado, con un proceso de producción muy sencillo, permite, como se ha demostrado experimentalmente, aumentar las propiedades mecánicas, especialmente el módulo de elasticidad, hasta unos niveles comparables a otras maderas de uso comercial (Tabla 168).

Tabla 168. Resumen de las propiedades mecánicas de las vigas dúo reforzadas.

		Viga dúo reforzada de chopo (GFRP UNI 2400)	Viga dúo reforzada de pino pinaster (GFRP UNI 1200)
Resistencia (característica) (N/mm²)			
Flexión	$f_{m,g,k}$	22 (28*)	24 (30**)
Rigidez (kN/mm²)			
Módulo elasticidad paralelo medio	$E_{0,g,mean}$	9,2	11,5
Módulo de elasticidad paralelo 5%	$E_{0,g,k}$	7,6	10
Densidad (kg/m³)			
Densidad característica	$\rho_{g,k}$	340	350
Densidad media	$\rho_{g,mean}$	410	420

*Experimentalmente se obtienen valores característicos de 28 MPa.

**Experimentalmente se obtienen valores característicos de 30 MPa.

Respecto al precio final de producto, se han estudiado los costes reales de fabricación para la investigación, y estimado los costes de un producto industrializado (apartado 8.1), encontrándose que las vigas dúo de pino pinaster reforzadas con GFRP UNI1200 podrían ascender a unos 945 €/m³, y las vigas dúo de chopo reforzadas con GFRP UNI2400 a unos 805 €/m³.

Estos costes de fabricación industrializada son superiores a los de maderas aserradas de uso estructural, pero se mantienen en costes similares a otros productos de madera industrializada (madera laminada), por lo que pueden considerarse comercialmente viables.

De los resultados obtenidos en esta tesis doctoral se puede afirmar que es viable desarrollar vigas industrializadas de uso estructural competitivas en prestaciones y precio, a partir de maderas de rápido crecimiento y bajas prestaciones mecánicas, o a partir de maderas de rechazo de baja calidad.

9.1.2. Conclusiones específicas

A. Comportamiento de los materiales de refuerzo utilizados en la investigación

En esta investigación se han seleccionado, estudiado y ensayado distintos tipos de materiales de refuerzo, naturales y sintéticos, comparando además los costes de cada uno de ellos con sus prestaciones mecánicas. A este respecto, puede concluirse que los materiales de refuerzo naturales analizados presentan unos módulos de elasticidad insuficientes para su uso como materiales de refuerzo de las especies de madera de chopo (*Populus x euroamericana* I-214) y pino pinaster (*Pinus pinaster* Ait.), utilizadas para el desarrollo de las vigas dúo.

Por su parte, todos los materiales de refuerzo sintéticos analizados presentan unos módulos de elasticidad significativamente altos, compatibles con el refuerzo de vigas de madera, destacando entre todos los materiales por sus excelentes prestaciones mecánicas los derivados de la fibra de carbono. Sin embargo, los materiales con la mejor relación entre prestaciones mecánicas y precio son los derivados de la fibra de vidrio (Tabla 169).

Tabla 169. Relación de prestaciones mecánicas/precio de los refuerzos sintéticos analizados.

Tipo de refuerzo	Tejido			Laminado rígido			
	FC UNI230	FV UNI300	FV UNI1200	CFRP UNI230	GFRP UNI300	GFRP UNI1200	GFRP UNI2400
Relación MPa/€	360	912	875	225	197	205	255

Entre todos los refuerzos derivados de la fibra de vidrio analizados, destacan los laminados GFRP por su idoneidad para introducirse dentro de la línea de encolado durante la fabricación de las vigas dúo de un modo sencillo y garantizando, en todo caso, el correcto posicionamiento y calidad del refuerzo.

B. Comportamiento de los adhesivos estructurales seleccionados en colaboración con las especies de madera y materiales de refuerzo utilizados en la investigación

Durante la realización de esta investigación se seleccionaron, estudiaron y ensayaron varios tipos de adhesivos estructurales, de uso específico para madera, de distintas marcas comerciales.

Si bien todos los adhesivos analizados presentan un buen comportamiento en uniones madera-madera, con las especies de madera utilizadas, chopo (*Populus x euroamericana* I-214) y pino pinaster (*Pinus pinaster* Ait.), el comportamiento de los adhesivos de poliuretano y adhesivos melamina urea formol resultan incompatibles con los laminados GFRP para su uso estructural, por las bajas prestaciones mecánicas de la unión y el tipo de fallo observado.

Respecto a los adhesivos epoxi analizados, todos presentaron un buen comportamiento en todo tipo de uniones, incluso tras someterlas a varios ciclos climáticos. En general, las prestaciones

mecánicas de los adhesivos epoxi ensayados pueden considerarse similares, destacando para su uso con laminados GFRP los adhesivos Sikadur 30 y Mapei Mapewood paste 140, por su buena relación prestaciones mecánicas/precio, permitiendo ambos adhesivos, además, unas líneas de encolado gruesas.

Durante la fabricación de las vigas dúo se ha podido observar que, si bien las resinas epoxi no requieren en principio unas condiciones ambientales controladas para su correcto curado, es muy recomendable mantener la resina epoxi a temperatura constante y controlada durante su manipulación, permitiendo adecuar los tiempos de trabajo a los tiempos de reacción química de la resina.

C. Influencia del refuerzo en la mejora de prestaciones de las vigas dúo

El refuerzo en la zona traccionada de las vigas dúo con los laminados GFRP en ratios bajos (1,07% y 1,6%) ha mejorado la rigidez media de las vigas dúo de chopo en un 12,1% y 14,7%, respectivamente, y de las vigas dúo de pino pinaster en un 7,7%.

Estos incrementos de rigidez, obtenidos experimentalmente, son superiores a los estimados teóricamente en un 3,5% y 6,1% para las vigas de chopo, y en un 3,3% para las de pinaster. Este incremento de rigidez puede atribuirse a la homogeneización de su comportamiento como consecuencia del proceso de laminado y la colocación del refuerzo, y de la reducción de la influencia de los nudos, fendas u otras singularidades de la madera.

Respecto a la mejora de la resistencia a rotura, la introducción de los refuerzos GFRP en las líneas de encolado ha mejorado la resistencia media de las vigas dúo de chopo en un 19,2% y 27,7%, y de las vigas dúo de pino pinaster en un 17,4%.

D. Influencia del refuerzo en el comportamiento a fluencia de las vigas dúo

El comportamiento a largo plazo (fluencia) de las vigas dúo reforzadas con laminados GFRP en bajos ratios de refuerzo (menor al 2%), no produce ninguna mejora sensible ante los fenómenos de fluencia, siendo análogo el comportamiento a largo plazo de la madera sin reforzar y reforzada.

E. Comparación con otros productos de madera industrializada comercial

En comparación con otros productos de madera industrializada de uso estructural, las vigas dúo reforzadas desarrolladas en esta investigación presentan unas ratios de prestaciones mecánicas/precio comparables a otros productos de madera laminada comercializados. Las vigas dúo reforzadas son competitivas especialmente en elementos a flexión, donde alcanzan propiedades mecánicas de otros sistemas laminados de calidad reconocida, como los laminados de frondosa de una clase resistente superior. En su empleo para otros tipos de esfuerzos principales, como compresión (pilares) o tracción (tirantes), el refuerzo laminados utilizado no aporta una mejoría determinante en las propiedades mecánicas de las piezas.

9.2. Conclusions

In this section the conclusions obtained during the course of the investigation are presented.

9.2.1. General conclusions

A. Obtaining a competitive industrialized product in both benefits and price from the use of fast growth wood and low structural benefits.

The use of GFRP reinforcements in laminated timber beams (duos) optimizes the utilization of wood resources, allowing their use in the manufacture of structural laminated timber (duo) with timber of resistant properties lower than those conventionally used, without implying a reduction in the properties and quality of the final product.

The wood species used in this research, poplar (*Populus x euroamericana* I-214) and maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.), of rejection level quality, have lower modulus of elasticity than other wood species in quality and structural use, which limits its structural application. The manufacture of an industrialized product, through the most simple industrial process as possible, has been experimentally demonstrated to increase its mechanical properties (Table 170), especially the moduli of elasticity, up to levels comparable to other timbers of commercial use.

Tabla 170. Summary of the mechanical properties of the reinforced duo girders.

		Reinforcements laminated timber poplar (GFRP UNI 2400)	Reinforcements laminated timber maritime pine (GFRP UNI 1200)
Resistance (characteristic) (N/mm²)			
Flexion	$f_{m,g,k}$	22 (28*)	24 (30**)
Stiffness (kN/mm²)			
Elastic modulus parallel medium	$E_{0,g,mean}$	9,2	11,5
Elastic modulus parallel 5%	$E_{0,g,k}$	7,6	10
Density (kg/m³)			
Density (characteristic)	$\rho_{g,k}$	340	350
Density medium	$\rho_{g,mean}$	410	420

* Experimentally, characteristic values of 28 MPa are obtained.

** Experimentally, characteristic values of 30 MPa are obtained.

Regarding the final price of the product, real manufacturing costs used in the research have been studied, and final industrial prices have been rated (section 8.1). Final prices of maritime pine duo reinforced with GFRP UNI1200 amounted to 945 €/ m³, and poplar duo beams reinforced with GFRP UNI2400 to 805 €/ m³. These manufacturing costs are higher than those of sawn timber for structural use, but they are maintained at prices comparable to other industrialized wood products (laminated wood), so they can be considered commercially viable.

The results obtained in this doctoral thesis demonstrate that it is feasible to develop industrialized duo beams of structural use that are competitive in terms of performance and price, from fast-growing woods with low mechanical performance, or from rejection level quality timber.

9.2.2. Specific conclusions**A. Behavior of the reinforcement materials used in the research**

In this research, different types of natural and synthetic reinforcement materials are selected, studied and tested. The cost of each of them are also compared with their mechanical performance. It can be concluded that the natural reinforcement materials analyzed in this doctoral thesis have insufficient elasticity modules for their use as reinforcement materials for wood species, poplar (*Populus x euroamericana* I-214) and maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.), used for the development of duo timber beams.

On the other hand, all the synthetic reinforcement materials analyzed have significantly high modulus of elasticity, compatible with the reinforcement of wooden beams, with carbon fibers being of particular note for their excellent mechanical performance. However, the materials with the best relationship between mechanical performance and price are those derived from fiberglass (Table 171).

Tabla 171. List of mechanical benefits / price of synthetic reinforcers analyzed.

Type of reinforcement	Tissue			Laminates			
	FC UNI230	FV UNI300	FV UNI1200	CFRP UNI230	GFRP UNI300	GFRP UNI1200	GFRP UNI2400
Relationship MPa/€	360	912	875	225	197	205	255

Among all the reinforcements derived from the fiberglass analyzed, GFRP laminates stand out for their suitability for being introduced inside glue-line during the manufacture of the duo beams in a simple way and guaranteeing, in any case, the correct positioning and quality of the reinforcement.

B. Behavior of selected structural adhesives in collaboration with wood species and reinforcement materials used in the research

During the course of this investigation, several types of structural adhesives of specific use for timber of different commercial brands are selected, studied and tested. Although all the adhesives analyzed showed good behavior in wood-wood joints with the wood species used, poplar (*Populus x euroamericana* I-214) and maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.), the behavior of polyurethane adhesives and melamine-urea-formol adhesives tested with GFRP laminates is incompatible with its use for structural applications due to the low mechanical performance of the joint and the type of failure observed. Regarding the analyzed epoxy adhesives, they perform well in all types of joints, even after subjecting them to several climatic cycles. In general, the mechanical performance of all the epoxy adhesives tested is similar, with Sikadur 30 and Mapei Mapewood 140 adhesives standing out for their use with GFRP laminates, due to their mechanical / price ratio, with both adhesives allowing in addition, thick glue-lines.

In the manufacture of the duo beams it has been observed that, although epoxy resins do not require controlled environmental conditions during their correct setting, it is necessary to maintain the epoxy resin under a constant and controlled temperature during its application to allow it to synchronize the work time with the chemical reaction times of the resin.

C. Influence of reinforcement on the performance improvement of duo beams.

The reinforcement in the tension area of the duo beams with the GFRP laminates at low reinforcement ratios (1.07% and 1.6%) has improved the average rigidity of the poplar duo beams by 12.1% and 14.7%, and maritime pine duo beams by 7.7%, respectively. These increments of rigidity obtained experimentally are superior to those estimated theoretically by the direct influence

of the mechanical contribution of the GFRP reinforcement, with a theoretical improvement of the poplar duo beams by 3.5% and 6.1%, and pine pinaster duo beams by 3.3%. This increase in the stiffness of the reinforced duo beams is due to the homogenization of the beams, because of the lamination process and the placement of the reinforcement, which reduce the impact of knots, fences or other wood singularities.

Regarding the improvement to the breaking point, the introduction of GFRP reinforcements in the glue lines has improved the average strength of the poplar duo beams by 19.2% and 27.7%, and the maritime pine duo beams by 17.4%, respectively.

D. Influence of reinforcement on the flow behavior of duo beams

The long-term behavior (creep) of timber duo beam reinforced with GFRP at low reinforcement ratios (less than 2%), does not produce any significant improvement in creep. And the long-term behavior of the timber is similar between unreinforced and reinforced duo beams.

E. Comparison with other commercial industrialized wood products

In comparison with other industrialized timber products for structural use, the reinforced duo beams developed in this research have similar mechanical / price ratios to other laminated timber products. Reinforced duo beams are competitive especially in bending elements, where they achieve mechanical properties similar to other laminated systems of recognized quality such as hardwood laminates of a superior resistant class. In its use for other types of load-bearing supports, such as compression (pillars) or tension (tie rods), the GFRP reinforcement used does not provide a decisive improvement in the mechanical properties of the specimens, although its price is significantly higher.

9.3. Líneas futuras

La investigación desarrollada en esta tesis doctoral se orienta hacia el desarrollo de un producto industrializado de vigas dúo reforzadas que permita el uso de maderas de rápido crecimiento y bajas prestaciones mecánicas, y permita asimismo optimizar el uso de maderas de rechazo. Esta tesis doctoral ha alcanzado los objetivos marcados en su inicio para su desarrollo; sin embargo, finalizada la investigación aún quedan algunos puntos por profundizar en futuras líneas de investigación.

Estudio del comportamiento del refuerzo y el producto reforzado en caso de incendio

(i) Analizar el comportamiento del refuerzo y el adhesivo a temperaturas altas. (ii) Analizar la capacidad de la madera como protector y aislante térmico del refuerzo y el adhesivo.

Desarrollar el proceso industrial para su comercialización

(i) Desarrollar y mejorar del proceso industrial de fabricación de las vigas dúo reforzadas, orientado hacia un uso eficiente y rentable en pequeña industrial locales próximas a las masas forestales en explotación. (ii) Selección de los adhesivos orientada hacia la estandarización e industrialización de los procesos de encolado. (iii) Optimización del proceso de fabricación orientado hacia el ahorro energético y reducción de residuos contaminantes.

Profundizar en el diseño

(i) Estandarización de soluciones comerciales de vigas dúo / vigas trío, y desarrollo de un prontuario con sus características y propiedades mecánicas. (ii) Desarrollo y establecimiento de un sistema constructivo basado en secciones dúo reforzadas, profundizando en el diseño, análisis y desarrollo de uniones industrializadas entre elementos reforzados.

Desarrollar el análisis de ciclo de vida

Fijado el proceso industrial y estandarizadas las potenciales soluciones comerciales, desarrollo del análisis de ciclo de vida del producto para su introducción en el mercado reglado de construcción sostenible.

Caracterizar otras especies potenciales

Aprovechamiento de bosques autóctonos con bajos rendimientos económicos mediante el estudio y caracterización de otras especies potenciales para su uso estructural como vigas reforzadas.

Perfeccionamiento de nuevos materiales de refuerzo

(i) Perfeccionamiento de las técnicas de fabricación de los laminados de refuerzo que permitan optimizar sus prestaciones mecánicas. (ii) Estudio de nuevos materiales de refuerzo con mayores incrementos de resistencia y rigidez. (iii) Estudio de nuevos materiales de refuerzo con menor impacto ambiental y menor consumo de energía para su fabricación.

9.4. Publicaciones y comunicaciones originadas por esta Tesis Doctoral

Durante la realización de esta Tesis Doctoral se ha divulgado los resultados obtenidos a través de su publicación en revistas científicas o comunicación en congresos, restando aún parte de los resultados por divulgar.

9.4.1. Publicación en revistas de alto impacto internacional

Basterra, L.A.; Balmori, J.A.; Morillas, L.; Acuña, L.; Casado, M (2017) Internal reinforcement of laminated duo beams of low-grade timber with GFRP sheets. *Construction and Building Materials* 154, pp. 914-920. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2017.08.007

Índice de impacto 3,485 (Q1)
Base de indexación JCR

9.4.2. Publicación en libros

Basterra, L.A.; Acuña, L.; Casado, M.; López, G.; Morillas, L.; Balmori, J.A. (2016) FRP reinforcement and production of duo laminated timber beams. *Next Generation Design Guidelines for Composites in Construction – State of the Art*. Publisher: COST Action TU1207, Editor: Maurizio Guadagnini, pp. 346-351. DOI:10.15131/shef.data.5028089

9.4.3. Comunicaciones en congresos

Díez, R.; Balmori, J.A (2015) Resultado del análisis de fibras de refuerzo para vigas de chopo. *III Reunión científica Iberoamericana sobre madera estructural del género populus*. Valladolid. Pp.1-14. <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/13550>

Basterra, L.A.; Acuña, L.; Balmori, J.A.; López, G.; Hermoso, E.; Ramón, G.; Casado, M (2016) Diseño y Caracterización de vigas dúo reforzadas. *I Jornada Lignomad 2016*. Barcelona.

Balmori, J.A.; Acuña, L.; Basterra, Luis-Alfonso; Casado, M. (2016) Tecnologías y estructuras de la madera: Vigas Dúo. *IV Jornada Palencia Campus Verde*. Palencia

Balmori, J.A.; Morillas, L.; Acuña, L.; Basterra, L.A. (2017) Comportamiento a fluencia de vigas dúo y vigas dúo reforzadas (GFRP) de *Populus x euroamericana* I-214, ante bajos niveles de carga. *Congreso CLEM+CIMAD 2017 (II Congreso Latinoamericano de Estructuras de Madera + II Congreso Ibero-Latinoamericano de la Madera en la Construcción)*. Junin (Argentina).

Balmori, J.A.; Basterra, L.A.; Acuña, L.; Casado, M.; Morillas, L.; López, G. (2017) Vigas dúo de madera chopo y pinaster reforzadas con FRP. *7º Congreso Forestal Español. Plasencia (España)*.

Balmori, J.A.; Morillas, L.; López, G.; Acuña, L.; Casado, M.; Basterra, L.A. (2017) Ensayos a fluencia de vigas dúo y vigas dúo reforzadas (GFRP) de *Populus x euroamericana* I-214. *X Congreso LIGNOMAD 17. Barcelona (España)*.

Balmori, J.A.; Basterra, L.A. (2017) Fabricación y refuerzo de vigas laminadas dúo con FRP. / *Congreso Internacional de doctorandos en arquitectura. Sevilla (España)*.

Basterra, L.A.; Acuña, L.; Morillas, L.M.; Balmori, J.A.; López G.; Díez, R.; Hermoso, E.; Ramón, G.; Casado, M. (2018) Vigas dúo de madera de *Populus* reforzadas. *II Simposio del Chopo*. Valladolid (España).

9.4.4. Divulgación local

Comunicación en I Jornada de Doctorado en Arquitectura. Universidad de Valladolid. 24 noviembre de 2018.

Comunicación en IV International Conference IMFAHE – International Innovation camp “Fostering Innovation Through International Collaborations”. Universidad de Valladolid, 2 Julio de 2018.

10. BIBLIOGRAFÍA

10.1. Libros, revistas y comunicaciones

- Acuña, L.; Casado, M.; Lázaro, M.; Diaz, R.; Relea, E.; Fernández, G.; Herráez, F.; Basterra, A.; Llorente, A.; Renedo, F.; Ramon, G.; López, G.; Peñalba, M.A.; Millán A.; De la Fuente, R.; Fernández, S.; Broque, A.; Reinoso, E.M.; Vecilla, D. (2009) Caracterización estructural de *P. pinaster* Ait. De 3 regiones de procedencia de Castilla y León. *5º Congreso Forestal Español*.
- Acuña, L.; Basterra, L.A.; Casado, M. (2005) Caracterización estructural de madera aserrada mediante ensayos no destructivos. Particularización del uso de ultrasonidos para pino *pinaster* Ait. Proyecto AGL 2002-03386 del Plan nacional de I+D+I 2002-2003.
- Acuña, L.; Casado, M.; Renedo, F.; Llorente, A.; Caso, E.; Basterra, A.; Barranco, I.; Ramon, G.; López, G. (2004) Evaluación resistente no destructiva de madera de *Pinus pinaster* Ait. De las regiones de procedencia "Gredos" y "Bureba-sierra de Oña". *I Jornadas de Investigación en Construcción Universidad de Valladolid*.
- Acuña, L. (2014) *Anatomía y fisiología de la madera*. Apuntes académicos del Máster en Ingeniería de la Madera Estructural (Curso 2014/2015), Módulo 2 : La madera estructural como material. Universidad de Santiago de Compostela.
- Ahvenainen, J; García Barbero, M. (2007) Uso estructural de vigas DÚO y TRÍO. Vigas de madera compuestas por dos o tres piezas: una alternativa ideal para estructuras ligeras de alta exigencia estética. *Informes de la Construcción*. Vol. 59 (506), pp. 117-121.
- Aira, J.R.; Arriaga, F.; Íñiguez, G. (2014) Determination of the elastic constants of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) Wood by means of compression tests. *Biosystems engineering*, 126, pp12-22. [DOI:10.1016/j.biosystemseng.2014.07.008].
- Alann, A. (2006) *Fibers for strengthening of timber structures*. Technical report, Lulea University of Technology. 121pp.
- Alcalde, C.; García-Amorena, I.; Gómez, F.; Maldonado, J.; Morla, C.; Postigo, J.M.; Rubiales, J.M.; Sánchez, L.J. (2004) Nuevos datos de carbones y maderas fósiles de *Pinus pinaster* Aiton en el holoceno de la Península Ibérica. *Investigaciones Agrarias: Sistemas de recursos Forestales*, Fuera de serie, pp. 152-163.
- Alia, R.; Martín, S.; De Miguel, J.; Galera, R.M.; Agúndez, D.; Gordo, J.; Salvador, L.; Catalán, Gabriel; Gil, L.A. (1996) *Las regiones de procedencia de Pinus pinaster Ait*. Dirección General de Conservación de la Naturaleza, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- Andor, K.; Lengyel, A.; Polgár, R.; Fodor, T.; Karácsonyi, Z. (2015) Experimental and statistical analysis of spruce timber beams reinforced with CFRP fabric. *Construction and Building Materials*, 99, pp.200-207. [DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.09.026]
- Argüelles, R.; Arriaga, F.; Martínez, J. J. (2000). *Estructuras de madera. Diseño y cálculo*. Asociación de Investigación Técnica de la Industria de la Madera y del Corcho (AITIM).

- Arriaga, F.; Íñiguez, G.; Esteban, M.; Bobadilla, I. (2007). Madera aserrada de gran escuadría para uso estructural y sus particularidades. *Informes de la Construcción*, 59 (506): 29-41. [DOI: 10.3989/ic.2007.v59.i506.505]
- Astley, R.J.; Stol, K.A.; Harrington, J. J. (1998). Modelling the elastic properties of softwood. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 56(1), pp. 43-50. [DOI:10.1007/s001070050].
- Avent, R.; Issa, C.A. (1984) Effect of fire on epoxy-repaired timber. *Journal of structural engineering*, 110(12), pp. 2858-2875. [DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1984)110:12(2858)]
- Avradamis, S.; Mansfield, S. (2005). On some physical properties of six aspen clones. *Holzforschung* vol.59, pp. 54-58. [DOI:10.1515/HF.2005.009].
- AA.VV. (2001) *GIROD – Glued-in Rods for timber structures*. SMT4-CT97-2199 :1999-2001.
- AA.VV. (2004) *Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati*. CNR-DT 200/2004. Consiglio Nazionale delle Ricerche.
- AA.VV. (2006) *Anuario de estadística forestal. Technical Report*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- AA.VV. (2006) *Manual de gestión para masas procedentes de repoblación de Pinus pinaster Ait., Pinus sylvestris L. y Pinus nigra en Castilla y León*. Junta de Castilla y León.
- AA.VV. (2007) *Tercer Inventario Forestal Nacional 1997-2007 (INF3)*. Ministerio de Agricultura del Gobierno de España.
- AA.VV. (2008) *Poplar, willows and people's wellbeing*. International Poplar Commission (FAO). 23^o Session, Beijing, China.
- AA.VV. (2009) *CTE-DB-SE-M. Código técnico de la edificación*. Ministerio de Fomento. Gobierno de España.
- AA.VV. (2010). *Agenda para la Población de Castilla y León 2010-2020*. Junta de Castilla y León. Valladolid.
- AA.VV. (2012) *Actividades relativas al cultivo y la utilización del Álamo y del Sauce*. Comisión Internacional del Álamo (FAO). 24^o Reunión, Dehradun, India.
- AA.VV. (2012) Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo relativa a la eficiencia energética.
- AA.VV. (2014) *Programa de Movilización de Recursos Forestales de Castilla y León 2014-2022*. Junta de Castilla y León.
- AA.VV. (2014). *Programa de desarrollo rural de Castilla y León 2014-2020 [Spain - Rural Development Program]*.
- AA.VV. (2015) *Anuario de estadística forestal*. Ministerio de Agricultura del Gobierno de España.
- AA.VV. (2015) *Strain gauges. Absolute precision from HBM* Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM).
- AA.VV. (2016) *Actividades relativas al cultivo y la utilización del álamo y del sauce periodo 2012-2015*. Comisión Nacional del chopo España. 25^o Reunión de Berlín.
- AA.VV. (2017) *Encuesta sobre superficies y rendimientos de cultivos (ESYRCE)*. Ministerio de Agricultura del Gobierno de España.

- AA.VV. (2018) *España en cifras 2018*. Instituto Nacional de Estadística (INE). Madrid
- Bakis, C.E.; Bank, L.C.; Brown, V.L.; Cosenza, E.; Davalos, J.L.; Lesko, J.J.; Machida, A.; Rizkalla, S.H.; Triantafillou, T.C. (2002) Fiber-Reinforced polymer composites for construction - State of the art review, *J. Compos. Constr.* 6(2) [DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:2(73)]
- Balatinecz, J.J.; Kretschmann, D.; Leclercq, A. (2001). Achievements in the utilization of poplar wood-guideposts for the future. *The forestry chronicle* 77(2), pp. 265-270. [DOI: 10.5558/tfc77265-2].
- Baño, V.; Argüelles-Bustillo, R.; Regueira, R.; Guaita, M. (2012). Determinación de la curva tensión-deformación en madera de "Pinus sylvestris L." para la simulación numérica de vigas de madera libre de defectos. *Materiales de Construcción* Vol.62 (306) [DOI: 10.3989/mc.2012.64110].
- Barbero, E.; Davalos, J.; Muniapalle, U. (1994). Bond strength of FRP-wood interface. *Journal of reinforced plastics and composites*, 13(9), pp.835-854. [DOI: 10.1177/073168449401300905].
- Barbero, M.; Bonin, G.; Loisel, R.; Quézel, P. (1990). Changes and disturbances of forest ecosystems caused by human activities in the western part of the Mediterranean basin. *Vegetatio* 87.
- Basterra, L.A. (2009) *Construcción de estructuras de madera*. Universidad de Valladolid y COACyLE. Valladolid.
- Basterra, L.A.; Acuña, L.; Casado, M.; López, G.; Bueno, A. (2012) Strength testing of Poplar duo beams, *Populus x euramericana* (Dode) Guinier cv. I-214, with fiber reinforcement. *Construction and Building Materials* 36, pp. 90–96. [DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.05.001].
- Basterra, L.A.; Acuña, L.; Casado, M.; López, G.; Morillas, L.; Balmori, J.A. (2016) FRP reinforcement and production of duo laminated timber beams. *Next Generation Design Guidelines for Composites in Construction [COST Action TU1207]*.
- Basterra, L.A.; Balmori, J.A.; Casado, M. (2017) La armadura de cubierta de la nave central de la Iglesia del Convento de San Francisco en Medina de Rioseco (Valladolid). *Actas del X Congreso Nacional y IIº Congreso Internacional Hispanoamericano de Historia de la Construcción*. Donostia-San Sebastián. Vol. 1.
- Basterra, L.A.; Balmori, J.A. (2018) *Maderas (I). Madera Laminada Encolada (MLE)*. Manuales y Textos Universitarios, Arquitectura, 207. Ediciones Universidad de Valladolid.
- Beaudoin, M.; Hernández R.E.; Kuobaa, A.; Poliquin, J. (1992). Interclonal, intraconal and within-tree variation in wood density of poplar hybrid clones. *Wood and fiber science* 24(2).
- Bengtsson, C.; Johansson, C.J. (2002) *Final Report: GIROD–Glued in Rods for timber structures*. SMT4-CT97-2199. Swedish National Testing and Research Institute, Borås, Sweden.
- Bendtsen, B.; Senft, J. (1986). Mechanical and anatomical properties in individual growth rings of plantation-grown Eastern cottonwood and loblolly pine. *Wood and fiber science* 18(1).
- Bermúdez, J.; Maldonado, M. (1970) Informe sobre técnicas, restauraciones y daños sufridos por los techos pintados de la sala de los reyes en el Palacio de los Leones de la Alhambra.
- Bjurhager, I.; Berglund, L.; Bardage, S.; Sundberg, B. (2008). Mechanical characterization of juvenile European aspen (*Populus tremula*) and hybrid aspen (*Populus tremula x populus tremuloides*) using full-field strain measurements. *Journal of Wood science* 54. pp. 349-355. [DOI:10.1007/s10086-008-0960-x]

- Blankenhorn, P.; Bowersox, T.; Strauss, C.; Stimely, G.; DiCola, M. (1988). Effects of management strategy and site on selected properties of first rotation Populus hybrid NE-3 8 8. *Wood and fiber science* 20(1), pp. 74-81.
- Borri, A.; Corradi, M.; Grazini, A. (2005) A method for flexural reinforcement of old wood beams with cfrp materials. *Composites Part B: Engineering*, 36(2) [DOI: 10.1016/j.compositesb.2004.04.013].
- Brazier, J.D. (1977) The effect of forest practices on quality of harvested crop. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, Volume 50, Issue 1, pp 49–66. [DOI: 10.1093/forestry/50.1.49].
- Brunetti, M.; Christovasilis, I.; Micheloni, M.; Nocetti, M. (2019) Production feasibility and performance of carbon fiber reinforced glulam beams manufactured with polyurethane adhesive. *Composites Part B: Engineering*, 156 [DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.08.075].
- Brunner, A.M. (2010) Reproductive Development in Populus. *Genetics and Genomics of Populus*. Ed. Springer, New York. pp.155-170.
- Brunner, M.; Schnueriger, M. (2005) Timber beams strengthened by attaching prestressed carbon FRP laminates with a gradient anchoring device. *Proceedings of the International Symposium on Bond Behavior of FRP in Structures*.
- Buchanan, A. H. (1984). *Strength model and design methods for bending and axial load interaction in timber members*. The university of British Columbia (PhD Thesis).
- Buchanan, A. H. (1990) Bending strength of lumber. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*. 116(5): 1213-1229. [DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1990)116:5(1213)].
- Bucur, V., Archer, R. R. (1984). Elastic constants for wood by an ultrasonic method. *Wood Science and Technology*, 18(4) [DOI: 10.1007/BF00353361].
- Bulleit, W.M. (1983) Reinforcement of wood materials: a review. *Wood and Fiber Science*, 16(3).
- Caballero, P.; Delgado, J.M.; Gómez, J.M.; González, Y.; González-Posada, E.; Niño, V.; Rueda, J.D.; Vega, C. (2009). *Perspectivas del envejecimiento activo en Castilla y León*. Consejo Económico y Social de Castilla y León. Valladolid.
- Carballo, J.; Hermoso, E.; Fernández-Golfín, J.I. (2009) Mechanical properties of structural maritime pine sawn timber from Galicia (Pinus pinaster Ait. ssp. atlántica). *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 18(2) [DOI: 10.5424/fs/2009182-01058].
- Cardarelli, F. (2008) *Materials Handbook*. Springer, London.
- Carmassi, M.; Montagna, G.; Mucci, L.; Aliverti, M.; Lupi, I.; Ciampi, M. (1994) *Il restauro del Teatro Verdi di Pisa*. Pacini, Pisa.
- Casado, M. (IP) Informe final (2008-10) del proyecto de "Clasificación por métodos no destructivos y pseudo no destructivos de madera estructural de Populus" (Ref. VA047A08).
- Casado, M.; Acuña, L.; Basterra, L.A.; Vecilla, D. (2012) Grading of structural timber of Populus × euramericana clone I-214. *Holzforschung*, Vol. 65 [DOI: 10.1515/hf-2011-0153].
- Casado, M.; Acuña, L.; Relea, E.; Basterra, L.A.; Ramón, G.; López, G. (2009). Structural timber classification of Populus x Euroamericano I-214. *V Congreso Nacional y II Congreso Ibérico Agroingeniería*. Lugo. España.

- Casado, M.; Acuña, L.; Vecilla, D.; Relea, E.; Basterra, L.A.; Ramón-Cueto, G.; López, G. (2010) The influence of size in predicting the elastic modulus of *Populus x euramericana* timber using vibration techniques. *Structures and architecture* [DOI: 10.121/b10428-282].
- Casado, M.; Basterra, L.A.; Acuña, L.; Vecilla, D.; Relea, E.; López, G. (2011) Ultrasonidos y parámetros de clasificación visual para la caracterización de madera estructural de *Populus x euroamericana* I-214. *Actas del 1º Congreso Ibero-Latino Americano da Madeira na Construção CIMAD*, vol.11. Coimbra (Portugal).
- Casado, M.; García, M.; Acuña, L. (2001). Caracterización físico-mecánica del *Pinus pinaster* Ait. procedencia Sierra de Oña (Burgos), influencia del factor rectitud. *Congresos Forestales*.
- Castro, C.; Fragnelli, G. (2006) New technologies and alternatives uses for poplar wood. *Boletín del CIDEU* (2).
- Castro, G.; Miegge, D. (1999) Caratteristiche fisiche e idoneità alla sfogliatura di alcuni cloni di pioppo. *SHERWOOD - Foreste ed Alberi Oggi* 5: 41-50.
- Castro, G.; Paganini, F. (2003) Mixed glued laminated timber f poplar and Eucalyptus grandes clones. *Holz als Roh und Werkstoff*, 61 (4). pp.291-298. [DOI: 10.1007/s00107-003-0393-6]
- Castro, G.; Zanuttini, R. (2004) Multilaminar wood: Manufacturing process and main physical-mechanical properties. *Forest products journal* 54 (2), pp.61-68.
- Catalá, G.; Gil, P.; Galera, R.; Martín, S.; Agúndez, D.; Alía, R. (1991) *Regiones de procedencia de Pinus sylvestris L. y Pinus nigra ssp. Salzmanii (Dunal) Franco*. ICONA, Madrid, pp.31.
- Ceballos, L.; Ruíz de la Torre, J. (1979) *Árboles y arbustos de la España Peninsular*. ETS. Ingenieros Montes, Madrid. 512 pp.
- Cengel, Y. A. (2004) *Transferencia de calor*. Ed. McGraw-Hill-Interamericana.
- Civitarese, V.; Faugno, S.; Picchio, R.; Assirelli, A.; Sperandio, G.; Saulino, L.; Crimaldi, M.; Sannino, M. (2018) Production of selected short-rotation wood crop species and quality of obtained biomass. *European Journal of Forest Research* 137, pp 541–552. [Doi: 10.1007/s10342-018-1122-3]
- Cizmar, D.; Damjanovic, D.; Pavkovic, K.; Rajoit, V. (2014). Ductility analysis of laminated timber beams of small section height. *Journal Gradevinar*, Vol.55(5), pp. 395–406. [DOI: 10.14256/JCE.874.2013].
- Cheng, F.; Hu, Y.; Li, L. (2015) Interfacial Properties of Glass Fiber/Unsaturated Polyester Resin/Poplar Wood Composites Prepared with the Prepreg/Press Process. *Fibers and Polymers*, Vol.16 (4), pp.911-917. [DOI: 10.1007/s12221-015-0911-2].
- Clute, W.N. (1943) Meaning of plant names XCII: willows and poplars. *American Botanist* 49(3), pp 78–84.
- Coalao, D.; Nervo, G. (2011) Poplar wood production in Europe on account of market criticalities and agricultural, forestry and energy policy. *Tercer Congreso Internacional de Salicáceas en Argentina*.
- Corradi, M.; Borri, A.; Castori, G.; Speranzini, E. (2016) Fully Reversible Reinforcement of Softwood Beams with Unbonded Composite Plates. *Composite Structures* 149 [DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.04.014].
- Corradi, M.; Righetti, L.; Borri, A. (2015) Bond Strength of Composite CFRP Reinforcing Bars in Timber. *Materials* 8(7) [DOI: 10.3390/ma8074034].

- Corradi, M.; Thuc, P.; Poologanathan, K.; Osofero, A. (2018) Flexural behavior of hardwood and softwood beams with mechanically connected GFRP plates. *Composite Structures* 206, pp.610–620. [DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.08.056].
- Cortizo, S.; Monteverde, M.S.; Abbiati, N. (2017) Caracterización de la madera de cinco clones de *Populus Deltoides* seleccionados dentro del programa de mejora de INTA. *II Congreso CLEM+CIMAD*, Buenos Aires, Argentina.
- Council, C. W. (1999). Life cycle analysis for residential buildings. *Wood the Renewable Resource Bulletin*, (5).
- Cruz, H.; Custodio, J. (2006) Thermal performance of epoxy adhesives in timber structural repair. *9th world conference on timber engineering*, Portland, USA.
- Cruz, O; Espinar, P.E.; Soler, J.M. (1987) *Real aserrió mecánico de los montes de Valsain*. ICONA – Ministerio de Agricultura, pesca y alimentación. Madrid.
- Cuevas, D. H. (2002) Propiedades mecánicas de *Populus x euroamericana* (Dode) Guinier creciendo en Valdivia, Chile. *Bosque (Valdivia)* 23(2): 93-98. [DOI: 10.4067/S0717-92002002000200010].
- Custodio, J.; Broughton, J.; Cruz, H. (2009) A review of factors influencing the durability of structural bonded timber joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 29, pp.173-185. [DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2008.03.002].
- Dagher, H.J.; Kimball, T.E.; Shaler, S.M.; Abdel-Magid, B. (1996) Effect of FRP Reinforcement on Low Grade Eastern Hemlock Glulam. *National Conference of Wood Transp. Struct.*, General Technical Report No. FPL-GTR-96, Madison, WI:USA. pp. 207–214.
- D'Ambrosi, A.; Focacci, F.; Luciano, R. (2014) Experimental investigation on flexural behavior of timber beams repaired with CFRP plates. *Composite Structures* 108, pp. 720-728. [DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.10.005].
- Davis, G. (1997) The performance of adhesive systems for structural timbers. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 17, pp.247-255. [DOI: 10.1016/S0143-7496(97)00010-9].
- Davids, W. G.; Dagher, H. J.; Breton, J. M. (2000). Modeling creep deformations of FRP-reinforced glulam beams. *Wood and fiber science*, 32(4), pp. 426-441.
- DeBell, D.S.; Singleton, R.; Harrington, C.A.; Gartner, B.L. (2002) Wood density and fiber length in young *Populus* stems: Relation to clone, age, growth rate, and pruning. *Wood Fiber Science*, 34, pp.529–539.
- De Jesús, A.; Pinto, J.; Morais, J. (2012) Analysis of solid wood beams strengthened with CFRP laminates of distinct lengths. *Construction and Building Materials* 35, pp. 817-828. [DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.124].
- De la Mata, R.; Merlo, E.; Zas, R. (2006). Seed and cone traits in a polycrossing hybrids populations of maritime pine. Indicators of hybridization viability. *International meeting on population genetics and genomics of forest trees: from gene function to evolutionary dynamics and conservation*. Madrid.
- De la Rosa, P.; Cobo, A.; González, M. (2013) Bending reinforcement of timber beams with composite carbon fiber and basalt fiber materials. *Composites Part B: Engineering*, 55, pp.528-536. [DOI: 10.1016/j.compositesb.2013.07.016].
- De la Rosa, P.; Cobo, A.; González, M. (2016) Analysis of the flexural stiffness of timber beams reinforced with carbon and basalt composite materials. *Composites Part B: Engineering*, 86, pp.152-159. [DOI: 10.1016/j.compositesb.2015.10.003].

- Di Maria, V.; D'Andria, L.; Muciaccia, G.; Ianakiev, A. (2017) Influence of elevated temperature on glued-in steel rods for timber elements. *Construction and Building Materials*, 147, pp. 457-465. [DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.038].
- Díaz-Fernández, P.; Jiménez, P.; Martín, S.; De Tuero, M.; Gil, L. (1995) *Regiones de procedencia de Quercus robur L., Quercus petraea (Mall) Liebl y Quercus humilis Miller*. ICONA, Madrid, pp. 86.
- Enríquez, A.; Iglesias, S. (2012) El chopo híbrido (*Populus x canadensis* Moench.), una especie ignorada. *Foresta* 56, pp 28-37.
- Esteves, B.; Nunes, L.; Pereira, H. (2011) Properties of furfurylated wood (*Pinus pinaster*). *European Journal of Wood Products*, 69(4), pp 521–525. [DOI: 10.1007/s00107-010-0480-4]
- Fanlo, F.J. (1961) *El chopo*. Horas divulgadoras del Ministerio de Agricultura. Nº11-61H.
- Farmer, R.E.; Wilcox J.R. (1966). Specific gravity variation in a lower Mississippi valley cottonwood population. *Tappi* 49(5), pp.210-211.
- Fédération internationale du béton-FIB (2007) *FRP reinforcement in RC structures*. Technical report. Bulletin 40. Switzerland. pp.151.
- Fernández, A.; Hernanz, G. (2004) *El chopo (Populus sp.) Manual de gestión forestal sostenible*. Consejería de Fomento y Medio Ambiente, Junta de Castilla y León. Valladolid. pp. 54.
- Fernández-Golfín, J.I.; Diez-Barra, M.R. (1996) Growth rate as a predictor of density and mechanical quality of sawn timber from fast growing species. *Holz als Roh und Werkstoff* 54(3), pp.171-174. [DOI: 10.1007/s001070050161].
- Fernández-Golfín, J.I.; Diez-Barra, M.R.; Gutiérrez, O. (1998) Caracterización mecánica de la madera aserrada de uso estructural, clasificada visualmente de acuerdo con la norma UNE 56544. *Materiales de Construcción*, Vol. 48(252), pp. 45-59.
- Fernández-Golfín, J.I.; Gutiérrez, A.; Baonza, M.V.; Diez-Barra, M.R. (1995) Características físico-mecánicas de las maderas de especies de crecimiento rápido de procedencia española. *Investigación agraria. Sistemas y recursos forestales*, vol.4(2). Pp. 251-261.
- Fernando, D.; Frangi, A.; Kobel, P. (2016) Behavior of basalt fiber reinforced polymer strengthened timber laminates under tensile loading. *Engineering structures*, 117, pp. 437-456. [DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.03.009].
- Fiorelli, J., Alves Dias, A. (2003). Analysis of the Strength and Stiffness of Timber Beams Reinforced with Carbon Fiber and Glass Fiber. *Material Researches* 6 (2), pp. 193-202. [DOI: 10.1590/S1516-14392003000200014].
- Fiorelli, J.; Alves Dias, A. (2011) Glulam beams reinforced with FRP externally bonded: theoretical and experimental evaluation. *Materials and Structures* 44(8), pp. 1431–1440. [DOI: 10.1617/s11527-011-9708-y].
- Forest Products Laboratory (2010). *Wood handbook; Wood as an engineering material*. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. pp. 508.
- Gabriel, W.J. (1956). Preliminary report on clonal differences in the wood and phloem of *Populus deltoides* and *P. trichocarpa*. *Proc of 3rd Northeastern Forest Tree Improvement Conference*, Ithaca, New York, pp. 33–34.

- García, I. (2018) Consumo de chopo por la industria en España: evolución y necesidades futuras. // *Simposio del chopo*, Valladolid, pp. 231-233.
- García-Iruela, A.; Esteban, L.; De Palacios, P.; García-Fernández, F.; De Miguel, A.; Vázquez, E.; Simón, C. (2016) Resinous Wood of *Pinus pinaster* Ait.; Physio-mechanical properties. *BioResources* 11(2), pp. 5230-5241.
- García, L.; Gindeo, A.; Peraza, C.; De Palacios, P. (2003) *La madera y su anatomía: anomalías y defectos*. Fundación Conde del Valle de Salazar, Madrid. pp.327.
- Gentile, C., Svecova, D., Rizkalla, S.H. (2002) Timber beams strengthened with GFRP bars: development and applications. *Journal of Composites for Construction* 6 (1), pp.11-20. [DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:1(11)]
- Gemert, D.V.; Bosch, M.V. (1987) Structural restoration of wooden beams by means of epoxy resin. *Materials and Structures* 20(3), pp.165-170. [DOI: 10.1007/BF02472732]
- Geyer, W.A.; DeWyke, J.; Walawender, W.P. (2000) Biomass and gasification properties of young *Populus* clones. *Wood and fiber science*, 32(3), pp. 375-384.
- Gil, L. (2008) El bosque que nos ha llegado: La extinción local de los bosques de *Pinus* y *Quercus* en España. *Proforest*, 1, pp. 48-62.
- Gil, L.; López, R.; García-Mateos A.; González-Doncel, I. (2009) Seed provenance and fire-related reproductive traits of *Pinus pinaster* in central Spain. *International Journal of Wildland Fire*, 18, pp. 1003-1009. [DOI: 10.1071/WF08101].
- Gómez-Mendoza, J. (1992) *Ciencia y política de los montes españoles (1948-1936)*. ICONA, Madrid.
- Goncalves, R.; Trinca, A.; Pellegrino, D. (2010) Comparison of elastic constants of wood determined by ultrasonic wave propagation and static compression testing. *Wood and Fiber Science*, 43 (1), pp. 64-75.
- Gordon, J.C. (2001) Poplar: Trees of the people, trees of the future. *Forestry Chronicle* 77 (2), pp. 217-219. [DOI: 10.5558/tfc77217-2]
- Guillaument, A.; Manavella, R.; Acuña, L.; Piter, J. (2016) Influencia de las dimensiones de la sección transversal sobre la resistencia a flexión en madera aserrada de *Populus deltoides* cultivado en Argentina. *Maderas, ciencia y tecnología* 18(4), 587-598. [DOI: 10.4067/S0718-221X2016005000051].
- Guitard, D. (1987). *Mécanique du matériau bois et composites*. Toulouse: Cépadués-Éditions.
- Gustafsson PJ, Serrano E. (2001) *Glued-in rods for timber structures—development of a calculation model*. Report TVSM-3056. Lund University, Division of Structural Mechanics, Lund.
- Gutiérrez, A.; Baonza, M.V. (2001) Propiedades físicas de la madera de diferentes clones de chopo. *Actas del Iº Simposio del chopo (Zamora)*. pp. 461-468.
- Harte, A, Dietsch, P. (ed) (2015) *Reinforcement of Timber Structures. A state-of-the-art report*, Shaker Verlag, Aachen. pp. 235.
- Headlee, W.; Zalesny, R.; Hall, R.; Bauer, E.; Bender, B.; Birr, B.; Miller, R.; Randall, J.; Wiese, A. (2013) Specific Gravity of Hybrid Poplars in the North-Central Region, USA: Within-Tree Variability and Site × Genotype Effects. *Forests*, vol. 4, pp.251-29. [DOI:10.3390/f4020251].
- Heilman, P.E. (1999) Planted forests: poplars. *New Forests* 17, pp. 89–93. [DOI: 10.1007/978-94-017-2689-4_7].

- Henry, A. (1914). The artificial production of vigorous trees. *Journal of the Department of Agriculture and Technical Institute, Irish Free State* 15: 34-52.
- Hermoso, E. (2001) *Caracterización mecánica de la madera estructural de Pinus sylvestris L.* PhD tesis. Universidad Politécnica de Madrid.
- Hernandez, R., Davalos, J.F. Sonti, S., Kim, Y., Moody, R.C. (1997) *Strength and Stiffness of Reinforced Yellow-Poplar Glued-Laminated Beams.* Research Paper FPL–RP–554. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI: U.S. pp. 30.
- Hernández, R.E.; Koubaa, A.; Beaudoin, M.; Fortin, Y. (1998) Selected mechanical properties of fast-growing poplar hybrid clones. *Wood and fiber science*, 30(2), pp. 138-147.
- Holzenkämpfer, P. (1997). *Ingenieurmodelle des verbunds geklebter bewehrung für betonbauteile* (No. 473). Ed. Wilhelm Ernst & Sohn. Germany.
- Huda, A.; Koubaa, A.; Cloutier, A.; Hernández, R.; Fortin, Y. (2014) Variation of the physical and mechanical properties of hybrid poplar clones. *BioResources* 9(1), pp. 1456-1471.
- Ištok, I.; Sedlar, T.; Bogoslav, S.; Sinković, T.; Perković, T. (2016). Physical Properties of Wood in Poplar Clones 'I-214' and 'S1-8'. *Drvna industrija*. 67. 163-170. [DOI: 10.5552/drind.2016.1604].
- Ivkovich, M. (1995). *Genetic variation of wood properties in balsam poplar (Populus balsamifera L.)*. MSc Thesis, Faculty of Forestry, Lakehead University. Pp.120.
- Jacob, J.; Garzon, L. (2007) Flexural strengthening of glued laminated timber beams with Steel and carbon fiber reinforced polymers. Master's Thesis, Chalmers University of Technology.
- Jasieńko, J., Nowak, T. (2007) Strengthening of Bent Timber Beams in Historical Objects. *From Material to Structure - Mechanical Behavior and Failures of the Timber Structures. ICOMOS IWC – XVI. International Symposium.* Florence, Venice and Vicenza.
- Jiang, X.; Kolstein, H.; Bijlaard, F.; & Qiang, X. (2014). Effects of hygrothermal aging on glass-fiber reinforced polymer laminates and adhesive of FRP composite bridge: Moisture diffusion characteristics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 57, pp. 49-58. [DOI: 10.1016/j.compositesa.2013.11.002].
- Johansson, G.; Kliger, R.; Perstorper, M. (1994) Quality of structural timber-product specification system required by end-users. *Holz als Roh und Werkstoff*, 52 (1). pp.42-48. [DOI: 10.1007/BF02615017]
- Johns, K.C.; Lacroix, S. (2000) Composite reinforcement of timber in bending. *Canadian Journal of Civil Engineering*; 27 (5) pp.899–906. [DOI: 10.1139/l00-017].
- Johnson, L.P. (1942) Studies on the relation of growth rate to wood quality in populus hybrids. *Canadian Journal of Research* 20, Section C, pp.28-40.
- Johnsson, H.; Blanksvard, T.; Carolin, A. (2006) Glulam members strengthened by carbon fiber reinforcement. *Materials and Structures* 40(1), pp.47-56. [DOI: 10.1617/s11527-006-9119-7]
- Junta de Castilla y León (2002). *Plan Forestal de Castilla y León. T08 Empleo, Seguridad y Salud.* Consejería de Fomento y Medio Ambiente, Valladolid. pp. 99.
- Junta de Castilla y León (2014). *Crecimientos de madera y biomasa forestal en Castilla y León. Resultados.* Consejería de Fomento y Medio Ambiente, Valladolid. pp. 48.

- Junta de Castilla y León (2014): *Programa de movilización de los recursos forestales en Castilla y León*. Consejería de Fomento y Medio Ambiente, Valladolid, pp. 68.
- Kellogg, R.M.; Swan, E.P. (1986) Physical properties of black cottonwood and balsam poplar. *Canadian Journal of Forestry Resources* 16, pp.491-496.
- Kemmsies, M. (1999) *Comparison of pull-out strengths of 12 adhesives for glued-in rods for timber structures*. SP Swedish National Testing and Research Institute. Building Technology. SP Report 1999:20, pp. 30.
- Kennedy, E. (1995). *Strength and related properties of woods grown in Canada*. Department of Forestry of Canada, N°1104.
- Klasnja, B.; Kopitovic, S.; Orlovic, S. (2001). Variability of some wood properties of eastern cottonwood (*Populus deltoides* Bartr.) clones. *Wood Science Technology* 37, pp.331-337. [DOI: 10.1007/s00226-003-0179-3].
- Kliger, R.; Haghani, R.; Brunner, M.; Harte, A.; Schober, K.U. (2016) Wood-based beams strengthened with FRP laminates: improved performance with pre-stressed systems. *European Journal of Wood and Wood Products*, 74(3), pp. 319-330. [DOI: 10.1007/s00107-015-0970-5].
- Kollmann, F. (1959) *Tecnología de la madera y sus aplicaciones*, Tomo primero. Ministerio de Agricultura. IFIE.
- Kord, B.; Kialashaki, A. (2010) The within-tree variation in wood density and shrinkage, and their relationship in *Populus euramericana*. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 34, pp 121-126. [DOI :10.3906/tar-0903-14].
- Koubaa, A. (2006) L'innovation et le développement de nouveaux produits de bois: Défis à relever et opportunités à saisir. *74^{ème} Congrès de l'Association francophone pour le savoir (ACFAS)*.
- Kretschmann, D.E. (2010). *Wood handbook; Wood as an engineering material*. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 508 pp.
- Kretschmann, D.E.; Isebrands, J.G.; Stanosz,G.; Dramm, J.; Olstad, A.; Cole,D.; Samsel,J. (1999) *Structural lumber properties of hybrid poplar*. Res. Pap. FPL–RP–573. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. Pp.8.
- Kroll, R.; Ritter, D.; Gertjejansen, R.; Au, K. (1992) Anatomical and physical properties of balsam poplar (*Populus balsamifera* L.) in Minnesota. *Wood and Fiber Science*, 24 (19), pp. 13-24.
- Lartigau, J.; Coureau, J.; Morel, S.; Galimard, P.; Maurin, E. (2015) Effect of temperature on the mechanical performance of glued-in rods in timber structures. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 57 pp. 79-84. [DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2014.10.006]
- Lau, D.; Qiu, Q.; Zhou, A.; Chow, C. L. (2016). Long term performance and fire safety aspect of FRP composites used in building structures. *Construction and building materials*,126, pp. 573-585. [DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.031].
- Lawson, B.; Rudder, D. (1996) Building materials, energy and the environment: Towards ecologically sustainable development. Royal Australian Institute of Architects. Makuna, Australia. Pp. 135.
- Lindyberg, R.F. (2000) *ReLAM: A nonlinear stochastic model for the analysis of reinforced glulam beams in bending*. Ph.D. Dissertation, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Maine, Orono, ME.

- López, G. (2013) *Guía de los árboles y arbustos de la península ibérica y baleares*. Ediciones mundo-prensa. Madrid. pp. 894.
- Lorenzis, L.; Scialpi, V.; Tegola, A. (2005) Analytical and experimental study on bonded-in CFRP bars in glulam timber. *Composites Part B: Engineering* 36, pp. 279-289. [DOI: 10.1016/j.compositesb.2004.11.005].
- Luggin W. F. (2000) *Die Applikation vorgespannter CFK-Lamellen auf Brettschichtholzträger*. Dissertation, Universität für Bodenkultur, Vienna, Austria.
- Madrigal, A. (1998) Problemática de la ordenación de masas artificiales en España. *Cuadernos de la S.E.C.F.* 6 (febrero), pp. 13-20.
- Majano-Majano, A.; Fernández-Cabo, J.L.; Hoheisel, S.; Klein, M. (2012) A test method for characterizing clear Wood using a single specimen. *Experimental mechanics* 52, pp 1079-1096. [DOI 10.1007/s11340-011-9560-6].
- Markwardt, L.J.; Wilson, T.R.C. (1935). *Strength and related properties of woods grown in the United States*. U.S. Dep. Agr. Tech. Bull. 479.
- Mascia, T.N.; Rocco, F.A. (2006) "Remarks on orthotropic elastic models applied to wood" *Materials Research*, vol 9 (3), pp 301-310. [DOI: 10.1590/S1516-14392006000300010]
- Matthys, S. (2013) *FRP material characteristics. The international Handbook of FRP composites in civil engineering*. ED. Manoochehr Zoghi, CRC Press, pp. 706.
- Matthys, S. (2016) M11 *Introduction, materials and industrial perspective*. Presentation from FRP training course "Reinforcing and strengthening of structures with FRP reinforcement". University of Gent, 25-29 January.
- Matyas, C.; Peszlen, I. (1997). Effect of age on selected wood quality traits of poplar clones. *Silvae Genetica* 46. pp. 2-8.
- Micelli, F.; Scialpi, V.; Tegola, A. (2005) Flexural Reinforcement of Glulam Timber Beams and Joints with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Rods. *Journal of composites for construction*, 9(4), pp.337-347. [DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2005)9:4(337)].
- Ministerio de Medio Ambiente (2007). *Tercer Inventario Forestal Nacional*. Publicaciones del Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- Moe, J. (1961) *The mechanism of failure of wood in bending*. Publication International Association for Bridge and Structural Engineering 21, pp.178.
- Morales-Molino, C.; Postigo-Mijarra, J.M.; Morla, C.; García-Antón, M. (2012) Long-term persistence of Mediterranean pine forests in the Duero Basin (central Spain) during the Holocene: The case of *Pinus pinaster* Ait. *The Holocene*, 22(5), pp.561-570. [DOI: 10.1177/0959683611427339].
- Morlier, P. (1994) *Creep in timber Structures*. RILEM, London. pp. 145.
- Motlagh, Y.B.; Gholipour, Y.; Ebrahimi, G.; Hosseinalibeygi, M. (2008) Experimental and Analytical Investigations on Flexural Strengthening of Old Wood Members in Historical Building with GFRP. *Journal of Applied Sciences* Vol 8(2), pp.3887-3894. [DOI: 10.3923/jas.2008.3887.3894].
- Moulin, J.M.; Pluvillage, G.; Jodin, P. (1990) FGRG: Fiberglass reinforced glulam-A new composite. *Wood Sci. Technol.* 24. pp.289-294. [DOI: 10.1007/BF01153561].
- Müller, C. (2000) *Holzleimbau. Laminated Timber Construction*. Birkhäuser, Bremen.

- Nadir, Y.; Nagarajan, P.; Ameen, M.; Arif, M. (2016) Flexural Stiffness and Strength Enhancement of Horizontally Glued Laminated Wood Beams with GFRP and CFRP Composite Sheets. *Construction and Building Materials* 112, pp. 547–55. [DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.133].
- Newlin, J. A.; Wilson, T. R. C. (1919). The relation of the shrinkage and strength properties of wood to its specific gravity (Vol. 676). US Department of Agriculture.
- Niemiec, S.S.; Ahrens, Glenn R.; Willits, Susan y Hibbs, David E. (1995) Hardwoods of the pacific northwest. Research Contribution 8. *Forest Research Laboratory Oregon State University*.
- Nussbaum, R. M. (1995). The critical time limit to avoid natural inactivation of spruce surfaces (*Picea abies*) intended for painting or gluing. *European Journal of Wood and Wood Products*, 53(6), pp. 384-384. [DOI: 10.1007/BF03034905].
- Nussbaum, R. M. (1999). "Natural surface inactivation of Scots pine and Norway spruce evaluated by contact angle measurements". *European Journal of Wood and Wood Products* 57(6), pp. 419-424. [DOI: 10.1007/s001070050].
- Nwokoye, D. N. (1972) *An Investigation into an Ultimate Beam Theory for Rectangular Timber Beams – Solid and laminated*. Timber Research and Development Association (TRADA).
- Olivares, M.; Galán, C.; Roz, J. (2003) Los composites: características y aplicaciones en la edificación. *Informes de la construcción*, Vol.54(484), pp 45-62.
- Olson, J.; Jourdain, C.; Rousseau, R. (1985). Selection for cellulose content, specific gravity, and volume in Young *Populus deltoides* clones. *Canadian Journal of Forestry Recourses* 15, pp. 393-396. [DOI: 10.1139/x85-063]
- Ortiz J.; Martínez, J.J. (1991) Características mecánicas de la madera de pino gallego, obtenidas a partir de ensayos con piezas de tamaño estructural. *Revista AITIM*, 150, pp. 95-101.
- Padró, A.; Alonso, N. (2003) *Actividades Relativas al Cultivo y la Utilización del Álamo y del Sauce*. Comisión Nacional del Chopo en España. Secciones 2000-2003. Comisión Internacional del Álamo (FAO), 22º Reunión, Santiago, Chile.
- Parvez, A. (2004) *The reinforcement of timber for structural applications and repair*. PhD thesis, Dept Mech Eng. University of Bath.
- Parvez, A.; Ansell, M.; Smedley, D. (2009). Mechanical repair of timber beams fractured in flexure using bonded-in reinforcements. *Composites Part B: Engineering*, 40, pp. 95-106 [DOI: 10.1016/j.compositesb.2008.11.010].
- Perlas, J.; Fiori, L.; Castrillo, P.; Baño, V.; Zerpa, J. P. (2014). Comparación de métodos de cálculo de solicitaciones de madera libre de defectos. *XXXV Jornadas Sudamericanas de ingeniería estructural*. Montevideo (Uruguay).
- Pereira, J. L., Xavier, J., Morais, J. (2003). Estudo por elementos finitos dum novo método para a determinação das propriedades mecânicas da madeira de *Pinus Pinaster AIT*. nas direções perpendiculares ao grão. *Livro de actas do VII Congresso Nacional de Mecânica Aplicada e Computacional* (Vol. 2).
- Pizzi, A.; Mittal, K.L. (2003) *Handbook of adhesive technology*. 2nd ed. CRC Press LLC. pp. 999.
- Plevris, N.; Triantafyllou, T.C. (1992) FRP-Reinforced wood as structural material. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 4(3), pp. 300-317. [DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(1992)4:3(300)].

- Plevris, N.; Triantafillou, T. C. (1995). Creep behavior of FRP-reinforced wood members. *Journal of Structural Engineering*, 121(2), pp. 174-186. [DOI:10.1061/(ASCE)07339445(1995)121:2(174)].
- Pliura, A.; Zhang, S.Y.; MacKay, J.; Bousquet, J. (2007) Genotypic variation in wood density and growth traits of poplar hybrids at four clonal trials. *Forest Ecology and Management* 238, pp 92–106. [DOI:10.1016/j.foreco.2006.09.082].
- Pot, D.; Chantre, G.; Rozenberg, P.; Rodrigues, J.C.; Jones, G.L.; Pereira, H.; Hannrup, B.; Cahalan, C.M.; Plomion, C. (2002) Genetic control of pulp and timber properties in maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). *Annals of Forest Science* 59 (5-6), pp. 563-575. [DOI: 10.1051/forest:2002042].
- Prades, C.; Montero, A.; Rubio, J. (2001) Características físico-mecánicas de la madera de *Pinus pinaster*. Ait, procedente de los montes del marquesado (provincia de Granada) 3^{er} Congreso forestal español. Granada. España.
- Radford. D.W., Van Goethem, D., Gutkowski, R.M., Peterson, M.L. (2002) Composite repair of timber structures. *Construction and Building Materials*, 16, pp. 417- 425. [DOI: 10.1016/S0950-0618(02)00044-2].
- Raftery, G. M.; Harte, A. M.; Rodd, P. D. (2009). Bonding of FRP materials to wood using thin epoxy glue lines. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29(5), pp. 580-588. [DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2009.01.004].
- Raftery, G.M.; Harte, A.M. (2011) Low-grade glued laminated timber reinforced with FRP plate. *Composites Part B: Engineering*, 42, pp 724–735. [DOI: 10.1016/j.compositesb.2011.01.029].
- Raftery, G.; Whelan, C. (2014) Low-grade glued laminated timber beams reinforced using improved arrangements of bonded-in GFRP rods. *Construction and Building Materials*, 52, pp.209-220. [DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.044].
- Raftery, G.M.; Kelly, F. (2015) Basalt FRP rods for reinforcement and repair of timber. *Composites Part B: Engineering*, 70, pp.9-19. [DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.10.036].
- Ranta-Maunus, A. (1991). Collection of creep data of timber. Proceedings of the International Council for Building Research Studies and Documentation. Working Commission W 18A-Timber Structures CIB-W18A/24-9-2. Oxford, United Kingdom.
- Regueira, R. (2013) *Aplicación de métodos numéricos al análisis de estructuras de madera en situación de incendio*. Tesis doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- Ribeiro, A.; De Jesús, A.; Lima, A.; Lousada, J. (2009) Study of strengthening solutions for glued-laminated wood beams of pine wood maritime. *Construction and Building Materials* 23, pp 2738–2745. [DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.02.042].
- Richarson, J.G.; Richarson, J. (2014) *Poplar and willows: Trees for society and environment*. The Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), pp. 699.
- Riemenschenider, D.E.; Stelzer, H.E.; Foster, G.S. (1996) *Quantitative genetics of poplars and poplar hybrids*. Biology of *Populus* and its implications for management and conservation, Chapter 7. National Research Council of Canada, Ontario. pp. 539.
- Riesco, C.; Díaz, J. (2007) Características físicas de la madera de pino procedente de raleos en el noroeste de España. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 9(3), pp. 233-244. [DOI: 10.4067/S0718-221X2007000300004].

- Ritcher, K. (2007) Gluing technologies and properties of GLT. *Grazer Timber Engineering Seminar 1. GRAHSE'07 Influencing factors on the mechanical properties of glued laminated timber*. Graz University of Technology. 26 March. pp. 113.
- Roberts, A. F. (1971) Problems Associated with the Theoretical Analysis of the Burning of Wood. *16th International Symposium on Combustion*, vol13(1), pp. 893-903. [DOI: 10.1016/S0082-0784(71)80090-5].
- Rodríguez, R.J.; Serrada, R.; Lucas, J.A.; Alejano, R.; Del Río, M.; Torres, E.; Cantero, A. (2008) Selvicultura de Pinus pinaster Ait. subsp. mesogeensis Fieschi & Gaussen. *Compendio de Selvicultura Ampliada en España*. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, Madrid (España). pp. 399-430.
- Rol, R. (1933) Les races françaises de Pin maritime. *Revue des Eaux et Forêts*, 71. pp. 19-23.
- Rowlands, R. E.; Van Deweghe, R. P.; Laufenberg, T. L.; Krueger, G. P. (1986). Fiber-reinforced wood composites. *Wood and fiber science*, 18(1), pp.39-57.
- Rueda, J.; García, J.L.; Villar, C. (2011). *Elección de clones idóneos para la populicultura en la cuenca del Duero*. Junta de Castilla y León.
- Rueda, J.; García-Caballero, J.L.; Cuevas, Y.; García-Jiménez, C.; Villar C. (2017) *Cultivo de chopos en Castilla y León*. Consejería de Fomento y Medio Ambiente, Junta de Castilla y León. Valladolid. pp. 111.
- Rueda, J.; Padró, A.; Grau, J.M.; Sixto, H.; Villar, C.; García, J.L.; Martínez, F.; Prada, M.A.; Garavilla, V.; Lucas, A.; Hidalgo, E.; Aguilar, S.; Villamediana, J.A.; Bellera, C. (2016) *Clones de chopos del Catálogo Nacional de Materiales de Base*. Consejería de Fomento y Medio Ambiente. Junta de Castilla y León. pp. 36-37.
- Sanz, F.; Latour, S.; Neves, M.; Bastet, E. (2006) *Aplicaciones industriales de la madera de pino pinaster*. Centro de Innovación y Servicios Tecnológicos de la Madera de Galicia (CIS Madera), pp. 256.
- Schniewind, A.P.; Barrett, J. D. (1972). Wood as a linear orthotropic viscoelastic material. *Wood Science and Technology*, 6(1), pp.43-57. [DOI: 10.1007/BF00351807].
- Schober, K.U.; Harte, A.M.; Kloger, R.; Jockwer, R.; Xu, Q.; Chen, J.F. (2015) FRP reinforcement of timber structures. *Construction and Building Materials*, 97, pp.106-118. [DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.020].
- Schober, K.U.; Rautenstrauch, K. (2005) Experimental investigations on flexural strengthening of timber structures with CFRP. *Proceedings of the International Symposium on Bond Behavior of FRP in Structures (BBFS 2005)*.
- Schober, K.U.; Harte, A.M.; Kloger, R.; Jockwer, R.; Xu, Q.; Chen, J.F. (2015) FRP reinforcement of timber structures. *Construction and Building Materials*, 97, pp.106-118. [DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.020].
- Semen, E.; Kuo, M.; Su, YC.; Hall, R.; Stokke, D. (2001) *Physical properties of kraft pulp from four-year-old aspen hybrids and crosses*. *Wood and fiber science*, 33 (1), pp. 140-147.
- Serrada, R. (2000). *Apuntes de repoblaciones forestales*. Fundación Conde del Valle de Salazar, Universidad Politécnica de Madrid.
- Serrano, E. (2001) Glued-in rods for timber structures - An experimental study of softening behavior. *Materials and Structures* 34(4), pp. 228-234 [DOI: 10.1007/BF02480593].

- Serrano, E. (2017) Adhesive Joints –Theory (and use of innovative joints). *Timber Engineering, PhD-course 2017*. Training material. Lund University, Division of Structural Mechanics, Lund.
- Shafizadeh, F. (1982). Introduction to pyrolysis of biomass. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 3(4), pp. 283-305. [DOI: 10.1016/0165-2370(82)80017-X].
- Shahverdi, M.; Tarmian, A.; Dashti, H.; Ebrahimi, G.; Tajvidi, M. (2012) Mechanical properties of poplar wood (*Populus alba*) dried by three drying schedules. *BioResources* 7(1), pp. 1092-1099.
- Silva, C.; Branco, J.; Ringhofer, A.; Lourenco, P.; Schickhofer, G. (2016) The influences of moisture content variation, number and width of gaps on the withdrawal resistance of self-tapping screws inserted in cross laminated timber. *Construction and Building Materials* 125, pp. 1205–1215. [DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.008].
- Sixto, H.; Cañellas, I.; Arendonk, J.; Ciria, P.; Camps, F.; Sánchez, M.; Sánchez-González, M. (2015). Growth potential of different species and genotypes for biomass production in short rotation in Mediterranean environments. *Forest Ecology and management* 354, pp.291-299. [DOI: 10.1016/j.foreco.2015.05.038].
- Solís, A. (2003) Planteamientos sobre la regeneración en pinares de repoblación que alcanzan la edad de turno. *Cuaderno de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 15, pp. 49-57.
- Steiger, R. (2012). In Brettschichtholz eingeklebte Gewindestangen: Stand des Wissens zu einer leistungsfähigen Verbindungstechnik. *Proceedings of the 18. Internationales Holzbauforum*, Garmisch, Deutschland.
- Steiger, R.; Serrano, E.; Stepinac, M.; Rajcic, V.; O'Neil, C.; McPolin, D.; Widmann, R. (2015) Strengthening of timber structures with glued-in rods. *Construction and Building Materials* 97, pp. 90-105 [DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.097]
- Stoecklin, I.; Meier, U. (2003) Strengthening of concrete structures with prestressed and gradually anchored CFRP strips. *Fibre-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures*, Vol.2, pp. 1321-1330. [DOI: 10.1142/9789812704863_0127]
- Stout, A.B.; Schreiner E. J. (1933) Results of a project in hybridizing poplars. *Journal of Heredity*. Volume 24, Issue 6, 1, pp. 217–229.
- Stumes, P. (1975) Testing the efficiency of Wood epoxy reinforcement systems. *Bulletin of the Association for Preservation Technology*, Vol. 7(3), pp. 2-35.
- Tharakan, P.J.; Volk, T.A.; Abrahamson L.P.; White, E.H. (2003) Energy feedstock characteristics of willow and hybrid poplar clones at harvest age. *Biomass and Bioenergy* 25, pp. 571 – 580. [Doi: 10.1016/S0961-9534(03)00054-0].
- Theakston, F.H. (1965) A Feasibility Study for Strengthening Timber Beams with Fiberglass. *Canadian Agricultural Engineering* January. Pp. 17–19.
- Thelandersson, S.; Larsen, H. J. (2003) *Timber engineering*. Ed. John Wiley & Sons. pp. 429.
- Timoshenko, S. (1953) *History of strength of materials*. Ed. McGraw-Hill, New York.
- Timoshenko, S. (1984) *Resistencia de materiales*. Ed. Espasa-Calpe. Madrid.
- Tingley, D.A. (1996) *The Stress-Strain Relationships in Wood and Fiber-Reinforced Plastic Laminae of Reinforced Glued-Laminated Wood Beams*. PhD Thesis, Oregon State University, pp. 233.

- Tingley, D. A.; Gilham, P. C.; Kent, S. M. (1996). Long term load performance of FRP reinforced glulam bridge girders. *Proc National Conference on Wood Transportation Structures*. pp. 201-206.
- Titirla, M.; Michel, L.; Ferrier, E. (2019) Mechanical behavior of glued-in rods (carbon and glass fiber-reinforced polymers) for timber structures—An analytical and experimental study. *Composite Structures* 208, pp. 70-77 [DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.09.101].
- Tlustochowicz, G.; Serrano, E.; Steiger, R. (2011). "State-of-the-art review on timber connections with glued-in steel rods". *Materials and Structures*, 44(5), pp. 997-1020 [DOI: 10.1617/s11527-010-9682-9].
- Triantafyllou, T.C.; Deskovic, N. (1991) Innovative prestressing with FRP sheets: mechanics of short-term behavior. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 117(7), pp. 1652-1672 [DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1991)117:7(1652)]
- Triantafyllou, T.C.; Deskovic, N. (1992) Prestressed FRP sheets as external reinforcement of wood members. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 118(5), pp. 1270-1284 [DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1992)118:5(1270)]
- US Department of Agriculture (1999) *Wood Handbook – Wood as an Engineering Material*. General Technical Report FPL-GTR113. US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin.
- US Department of Defense (1999) *The composite materials handbook- Mil-17, vol.2, Materials properties*, US Dept. of Defense, pp. 694.
- Valbuena-Carabaña, M.; López de Heredia, U.; Fuentes-Utrilla, P.; González-Doncel, I.; Gil, L. (2010) Historical and recent changes in the Spanish forests: A socio-economical process. *Review of Paleobotany and Palynology*, 162, pp. 492-506 [DOI: 10.1016/j.revpalbo.2009.11.003].
- Valluzzi, M. R., Garbin, E., Modena, C. (2007). Flexural strengthening of timber beams by traditional and innovative techniques. *Journal of Building Appraisal*, 3(2), pp. 125-143. [DOI: 10.1057/palgrave.jba.2950071].
- Varela, S. (2007). *Control genético de capacidad de rebrote y emisión de raíces adventicias en familias híbridas de procedencias de Pinus pinaster*. Proyecto Fin de Carrera, EPS Lugo, Universidad de Santiago de Compostela. Pp. 78.
- Vega, J. A.; Pérez-Gorostiaga, P.; Fonturbel, T.; Cuiñas, P.; Hernando, C.; Guijarro, M.; Durán, M.V. (2003). *Regeneración de P. pinaster Ait. tras incendios forestales y medidas silvícolas para favorecerla*. Informe final del Proyecto INIA SC-99-018-C2, Madrid.
- Vignote, S. (2014). *Principales maderas de coníferas en España características, tecnología y aplicaciones*. Monografía (Informe Técnico). E.T.S.I. Montes Universidad Politécnica de Madrid. pp.170.
- Wheeler, A. S.; Hutchinson, A. R. (1998). Resin repairs to timber structures. *International journal of adhesion and adhesives*, 18(1), pp.1-13. [DOI: 10.1016/S0143-7496(97)00060-2]
- Widmann, R.; Steiger, R.; Gehri, E. (2007) Pull-out strength of axially loaded steel rods bonded in glulam perpendicular to the grain. *Materials and Structures* 40, pp.827-838 [DOI: 10.1617/s11527-006-9111-2].
- Willmann, J.; Knauss, M.; Benesch, T.; Apolinarska, A.A.; Gramazio, F.; Kohler, M. (2016) Robotic timber construction – Expanding additive fabrication to new dimensions. *Automation in construction* 61, pp. 16-23 [DOI:10.1016/j.autcon.2015.09.011].

- Xavier, J.; Oliveira, M.; Morais, J.; Pinto, J. (2009) Measurement of the shear properties of clear wood by the Arcan test. *Holzforschung* 63, pp.217–225 [DOI : 10.1515/HF.2009.034].
- Ximénez de Embún, J.; Ceballos, L. (1938) *Plan general para la repoblación forestal de España*. Madrid.
- Yahyaei-Moayyed, M.; Taheri, F. (2011). Experimental and computational investigations into creep response of AFRP reinforced timber beams. *Composite structures*, 93(2), pp.616-628.[DOI: 10.1016/j.compstruct.2010.08.017]
- Yanchuk, A.D., Dancik, B.P., Micko, M.M. (1983). Intraconal variation in wood density of trembling aspen in Alberta. *Wood Fiber Science* 15, pp. 387–394.
- Yang, H.; Liu, W.; Lu, W.; Zhu, S.; Geng, Q. (2016) Flexural behavior of FRP and steel reinforced glulam beams: Experimental and theoretical evaluation. *Construction and Building Materials*, 106, pp.550-563. [DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.135].
- Zas, R.; Merlo, E. (2008) El programa de mejora genética de Pinus pinaster en Galicia. *Boletín del CIDEU* 6-7, pp.5-24.
- Zakic, B. D. (1973) Inelastic bending of wood beams. *Journal of the Structural Division (ASCE)*, 99(10), pp.2079-2095.
- Zaw, K. M.; Mohamed, Z.; Saleh, A. L.; Bakar, S. A. (2005). A modified stress model to predict the ultimate bending strength of solid timber beams using plastic approach. *Jurnal Kejuruteraan Awam, Vol.17 (2)*, pp. 30–45. [DOI: 10.11113/mjce.v17.124].
- Zhang, S.Y.; Yu, Q.; Chauret, G.; Koubaa, A. (2003). Selection for Both Growth and Wood Properties in Hybrid Poplar Clones. *Forest Science* 49(6), pp.901–908. [DOI: 10.1093/forestscience/49.6.901].
- Zhou, D. (1990) A study of oriented structural board made from hybrid poplar. *Holz als Roh- und Werkstoff* 48, pp 293 296. [DOI: 10.1007/BF02626522]
- Zigler, R.; Pokorny, M. (2015). Fire protection of timber structures strengthened with FRP materials. *Civil Engineering Journal*, 4, pp.1-8 [DOI: 10.14311/CEJ.2015.04.0022].
- Zoido, F.; Arroyo, A. (2003). La población de España. *Tendencias demográficas durante el siglo XX en España*. pp. 17-75. Instituto Nacional de Estadística (INE). Madrid.
- Zobel, B.J.; Buijtenen, J.P. (1989). Wood variation. Its causes and control. Springer Series in Wood Science. Berlin [DOI: 10.1007/978-3-642-74069-5].

10.2. Enlaces webs

<http://www.cesefor.com/> [Consultada 05/10/2018]

https://www.mapa.gob.es/es/desarrollorural/estadisticas/forestal_estad_anual_cortas_madera.aspx [Consultada 05/10/2018]

<https://www.cost.eu/actions/FP1101/> [Consultada 05/10/2018]

<http://tu1207.eu/> [Consultada 05/10/2018]

<http://www.populuscyl.es/contenido/subastas-madera-chopo-propietarios-privados> [Consultada 17/12/18].

<http://www.garnica.one/> [Consultada 19/02/19].

<http://www.arbolapp.es/especies/ficha/pinus-pinaster/> [Consultada 10/01/19].

<https://floradeiberia.com/407/pinus-pinaster-pino-resinero-pino-maritimo/> [Consultada 10/01/19].

<http://www.arbolapp.es/especies/ficha/pinus-pinaster/> [Consultada 10/01/19].

<https://tabuyodelmonte.wordpress.com/2011/12/16/el-pino-resinero-i-nomenclatura-y-distribucion/> [Consultada 10/01/19].

www.tukabamboo.com (Consultado 29/12/2018).

<https://www.losan.es> [Consultada 29/12/2018].

<https://www.ebanisterianavas.com> [Consultada 29/12/2018].

http://www.fidiaglobalservice.com/eng/materiali_schede/FIDFLAX%20UNIDIR%20300%20HS50.pdf [Consultada 29/12/2018]

http://www.fidiaglobalservice.com/eng/materiali_schede/FIDGLASS_Unidir_300_HT73.pdf [Consultada 29/12/2018]

<https://www.owenscorning.com/composites> [Consultada 29/12/2018]

<https://esp.sika.com/dms/getdocument.get/77e047e0-9003-3c78-bc7f-005a97f059df/SikaWrap-230%20C.pdf> [Consultada 29/12/2018]

<https://esp.sika.com/dms/getdocument.get/86bc0479-a66f-3707-87d5e6342b961d93/Sika%20CarboDur%20E.pdf> [Consultada 29/12/2018]

<https://www.finsa.com/publicaciones/doc-prod05.nsf/fichastec/16-es?OpenDocument&L=ES> [Consultada 29/12/2018]

<https://www.villapol.com> [Consultada 10/01/2019]

10.3. Normativa

ASTM D578-00 Standard Specification for Glass Fiber Strands.

ASTM D4541-17 Pull-off strength of coatings using portable adhesion testers.

CTE-DB-SE-AE (2009) Código técnico de la edificación. Documento básico. Seguridad estructural. Acciones en la edificación.

CTE-DB-SE-M (2009) Código técnico de la edificación. Documento básico. Seguridad estructural. Madera.

CTE-DB-SI (2009) Código técnico de la edificación. Documento básico. Seguridad en caso de incendio.

N FB 52-001-4:2011 Règles d'utilisation du bois dans les constructions. Partie 4: Classement visuel pour l'emploi en structures pour les principales essences résineuses et feuillues.

N FB 52-001:2007 Classement visuel pour l'emploi en structures des bois sciés français résineux et feuillus.

NP 4305:1995 Madeira serrada de pinheiro bravo para estruturas. Classificação visual.

- UNE-EN 301:2014. Adhesivos. Adhesivos fenólicos y aminoplásticos para estructuras de madera bajo carga. Clasificación y requisitos de comportamiento.
- UNE-EN 338:2016. Madera estructural. Clases resistentes.
- UNE-EN 380:1998. Estructuras de madera. Métodos de ensayo. Principios generales para los ensayos de carga estática.
- UNE-EN 384:2016. Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad.
- UNE-EN 408:2012. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas.
- UNE-EN 1542:2000. Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la adhesión por tracción directa.
- UNE-EN 1912:2012 Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de calidades visuales y especies.
- UNE 12127:1998. Textiles. Tejidos. Determinación de la masa por unidad de superficie de muestras pequeñas.
- UNE-EN 13183-1:2002 / AC (2004). Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 1: Determinación por el método de secado en estufa
- UNE-EN ISO 13934-1:2013 Textiles. Propiedades de los tejidos frente a la tracción. Parte 1: Determinación de la fuerza máxima y del alargamiento a la fuerza máxima por el método de la tira.
- UNE-EN 14081-1:2016. Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por su resistencia. Parte 1: Requisitos generales.
- UNE-EN 15425:2017. Adhesivos. Adhesivos de poliuretano de un componente para estructuras de madera bajo cargas. Clasificación y requisitos de comportamiento.
- UNE 40600-6:1996. Textiles. Tejidos. Construcción. Métodos de análisis. Parte 6: Determinación de la masa de los hilos de urdimbre y de trama por unidad de superficie, en un tejido.
- UNE 56528:1978. Características físico-mecánicas de la madera. Preparación de probetas para ensayos.
- UNE 56535:1977. Características físico-mecánicas de la madera. Determinación de la resistencia a la compresión axial.
- UNE 56543:1988. Características físico-mecánicas de la madera. Determinación del esfuerzo cortante.
- UNE 56544:2011 Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas.
- UNE-EN ISO 527-5:2010. Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 5: Condiciones de ensayo para plásticos compuestos unidireccionales reforzados con fibras.
- UNE-EN-ISO 4624:2016. Pinturas y barnices. Ensayo de adherencia por tracción
- UNE-EN ISO 9513:2013. Materiales metálicos. Calibración de las cadenas extensométricas utilizadas en ensayos uniaxiales.

ISO 6238:2018. Adhesives. Wood to wood adhesive bonds. Determination of shear strength by compressive loading.

ISO 13061-6:2014. Physical and mechanical properties of wood -- Test methods for small clear wood specimens -- Part 6: Determination of ultimate tensile stress parallel to grain.

11. ANEXO

I. Ensayos caracterización madera

A. Compresión. Probetas distintos ángulos

Tabla 172. Datos ensayos a compresión sobre probetas libre de defectos de madera de chopo.

#	L (mm)	b (mm)	h (mm)	Área (mm ²)	Fuerza (kN)	Tensión (MPa)	LVDT (mm)	SG 1 (μ m/m)	SG 2 (μ m/m)	SG 3 (μ m/m)	Tiempo (seg)
Ch_A.01	61,27	18,83	20,30	382,2	17,41	45,55	1,9868	2297,1884	795,6360	3957,7445	252
Ch_B.01	60,09	19,82	20,19	400,2	13,12	32,79	1,9872	1784,8030	375,7613	1265,5758	189
Ch_C.01	62,26	21,93	22,03	483,1	20,30	42,02	1,7354	1024,4797	749,8570	5255,1856	408
Ch_D.01	61,27	19,83	21,10	418,4	15,44	36,90	1,6707	2527,6303	1044,0792	737,9905	223
Ch_E.01	61,21	21,25	22,55	479,2	16,39	34,20	1,0227	2407,7585	247,1337	1304,7970	235
Ch_A.02	59,09	20,65	21,18	437,4	2,10	4,81	3,8785	4484,7155	63,3153	3999,5535	109
Ch_B.02	61,33	21,35	21,36	456,0	1,86	4,09	4,8974	10934,4802	163,6345	6407,2839	101
Ch_C.02	60,20	20,80	20,99	436,6	1,82	4,17	2,9498	7048,6028	73,1097	2981,2799	95
Ch_D.02	60,45	20,54	22,30	458,0	1,76	3,83	2,9016	4432,5601	42,7023	5752,2773	92
Ch_E.02	60,59	20,58	21,02	432,6	1,66	3,84	2,9261	-	-	-	87
Ch_A.03	61,54	21,31	22,03	469,5	1,72	3,67	1,7595	-	-	-	28
Ch_B.03	61,01	20,32	20,45	415,5	1,44	3,47	2,2328	3093,6566	20,1474	1797,7656	75
Ch_C.03	59,17	21,03	21,53	452,8	1,69	3,73	1,9877	4155,5188	25,8533	3327,8384	85
Ch_D.03	59,55	19,18	20,83	399,5	1,97	4,93	2,4360	6372,6907	64,3615	3901,7736	101
Ch_E.03	60,08	20,59	21,41	440,8	1,67	3,78	2,5213	6021,3777	84,6101	4206,2518	86
Ch_A.04	60,40	20,73	19,89	412,3	3,34	8,09	2,2677	2808,4975	570,5976	3790,4105	167
Ch_B.04	60,25	20,82	21,28	443,0	4,57	10,31	4,8347	-	-	-	232
Ch_C.04	61,35	20,90	21,97	459,2	4,06	8,85	2,8703	4279,5857	496,5778	4839,4246	204
Ch_D.04	60,69	20,23	20,49	414,5	4,59	11,08	4,9596	3276,3246	1646,4453	5081,7967	233
Ch_E.04	60,77	20,48	20,71	424,1	3,06	7,22	3,9517	5901,0319	1029,5683	2516,0673	156
Ch_A.05	61,97	21,83	21,22	463,2	-	-	-	-	-	-	-
Ch_B.05	61,57	19,29	19,72	380,4	3,32	8,74	4,9179	1332,4647	2095,5930	884,0974	170
Ch_C.05	59,90	21,01	19,91	418,3	2,59	6,19	3,9386	6219,5804	1033,3502	2054,0514	133
Ch_D.05	60,92	20,61	21,27	438,4	3,34	7,61	2,1064	3805,7808	319,1180	3741,0421	168
Ch_E.05	61,05	20,72	21,18	438,8	3,41	7,76	2,7505	2182,9341	1292,1228	3147,4260	172
Ch_A.06	61,83	21,27	21,02	447,1	2,04	4,57	2,8915	-	-	-	45
Ch_B.06	59,58	21,18	20,89	442,5	2,22	5,02	12,7773	4824,9049	5272,4612	178,2346	126
Ch_C.06	59,02	19,82	20,39	404,1	1,48	3,66	2,6412	6143,4986	2969,7294	130,5453	77
Ch_D.06	60,44	20,71	19,80	410,1	1,57	3,83	3,0112	2732,1015	2397,8238	128,4243	81
Ch_E.06	60,04	19,36	20,33	393,6	1,68	4,27	1,1823	2944,6815	2089,3532	134,4561	82

Tabla 173. Datos ensayos a compresión sobre probetas libre de defectos de madera de pino pinaster.

#	L (mm)	b (mm)	h (mm)	Área (mm ²)	Fuerza (kN)	Tensión (MPa)	LVDT (mm)	SG 1 (μ m/m)	SG 2 (μ m/m)	SG 3 (μ m/m)	Tiempo (seg)
Pp_A.01	59,96	20,88	21,44	447,7	20,51	45,81	1,0288	1742,5917	906,1689	1271,2762	292
Pp_B.01	54,36	20,24	19,24	389,4	-	-	-	-	-	-	-
Pp_C.01	61,78	20,92	20,64	431,8	-	-	-	-	-	-	-
Pp_D.01	62,82	19,48	20,42	397,8	14,41	36,24	1,1642	3875,5312	1371,8608	2656,9447	205
Pp_E.01	61,48	21,36	20,98	448,1	20,38	45,47	1,6520	2757,8128	912,9166	867,1989	290
Pp_A.02	61,3	19,84	21,32	423,0	-	-	-	-	-	-	-
Pp_B.02	63,02	21,1	20,58	434,2	-	-	-	-	-	-	-
Pp_C.02	61,48	18,46	20,56	379,5	3,14	8,28	1,9194	9527,8542	1905,2707	11229,1739	155
Pp_D.02	61,86	20,32	21,08	428,3	-	-	-	-	-	-	-
Pp_E.02	60,56	21,12	20,48	432,5	4,26	9,85	1,6828	2524,3234	135,9199	1321,6599	214
Pp_A.03	58,88	20,88	20,62	430,5	3,01	6,99	1,5592	4103,8637	239,3665	3424,6337	151
Pp_B.03	62,08	21,2	20,04	424,8	-	-	-	-	-	-	-
Pp_C.03	61,28	19,34	21,18	409,6	-	-	-	-	-	-	-
Pp_D.03	58,3	20,9	20,42	426,8	-	-	-	-	-	-	-
Pp_E.03	62,96	20,56	20,76	426,8	4,00	9,37	2,4248	9052,8377	1581,4925	4655,1335	201
Pp_A.04	62,52	20,58	20,96	431,4	-	-	-	-	-	-	-
Pp_B.04	59,6	19,68	19,94	392,4	4,19	10,68	8,7528	3722,4528	382,5712	4070,2034	105
Pp_C.04	59,66	20,48	21,4	438,3	-	-	-	-	-	-	-

Pp_D.04	60,74	21,16	20,16	426,6	4,25	9,96	1,2366	3199,7780	724,1392	2139,4833	213
Pp_E.04	60,54	20,56	21,24	436,7	4,46	10,21	10,2493	-	-	-	149
Pp_A.05	61,28	19,3	20,38	393,3	-	-	-	-	-	-	-
Pp_B.05	61,72	20,74	21,96	455,5	-	-	-	-	-	-	-
Pp_C.05	59,6	19,52	20,8	406,0	-	-	-	-	-	-	-
Pp_D.05	61,62	20,66	20,12	415,7	-	-	-	-	-	-	-
Pp_E.05	62,94	20,56	21,18	435,5	6,22	14,29	5,0175	1969,4327	340,4458	1376,4108	156
Pp_A.06	61,22	20,72	20,68	428,5	-	-	-	-	-	-	-
Pp_B.06	65,98	20,28	20,96	425,1	-	-	-	-	-	-	-
Pp_C.06	61,64	21,4	19,76	422,9	-	-	-	-	-	-	-
Pp_D.06	59,4	20,98	20,02	420,0	3,31	7,87	3,3923	3403,7624	2311,8940	261,1782	83
Pp_E.06	59,84	19,72	21,1	416,1	3,61	7,96	10,2396	2847,8546	561,3359	187,9556	81

B. Tracción paralela

Madera de chopo

Tabla 174. Datos ensayos a tracción paralela de madera chopo (12%HR).

#	L (mm)	b (mm)	h (mm)	A (mm ²)	Fuerza (kN)	Tensión (MPa)	SG1 (μm)	Carrera (mm)	Módulo de elasticidad (MPa)	Tiempo (seg)
TP_CH.01	349,26	7,20	6,86	49,4	2,56	51,83	2.976,25	2,048	15.859,32	24
TP_CH.02	349,84	7,78	7,34	57,1	5,09	89,27	3.211,07	4,672	24.557,37	33
TP_CH.03	348,40	6,46	7,60	49,1	3,62	73,82	3.910,32	10,027	30.070,46	63
TP_CH.04	349,68	7,98	7,52	60,0	4,73	78,95	4.228,64	4,629	22.082,00	35
TP_CH.05	349,12	7,88	7,38	58,2	3,80	65,50	2.342,71	3,499	32.210,65	46

Madera de pinaster

Tabla 175. Datos ensayos a tracción paralela de madera pinaster (12%HR).

#	L (mm)	b (mm)	h (mm)	A (mm ²)	Fuerza (kN)	Tensión (MPa)	SG1 (μm)	Carrera (mm)	Módulo de elasticidad (MPa)	Tiempo (seg)
TP_PP.01	348,96	7,48	8,06	60,3	4,03	66,78	2.831,39	3,179	14.385,39	31
TP_PP.02	348,82	7,02	8,14	57,1	3,65	63,89	3.912,50	2,859	17.936,95	35
TP_PP.03	349,36	5,66	8,28	46,9	3,66	78,10	3.092,40	3,627	28.750,04	32
TP_PP.04	349,92	7,64	8,46	64,6	4,09	63,32	2.988,87	4,971	30.505,68	62
TP_PP.05	349,14	7,32	8,08	59,1	4,92	83,12	4.141,64	4,203	21.753,24	38

C. Cortante (UNE 56.543:1988)

Madera de chopo

Tabla 176. Datos ensayos a cortante de madera chopo (12%HR).

#	L (mm)	h (mm)	A (mm ²)	Fuerza (kN)	Tensión (MPa)	LVDT (mm)	Tiempo (seg)	Notas
ST_Chopo.01	49,9	41,5	2070,9	17,97	8,7	1,4905	57	
ST_Chopo.02	48,7	41,5	2021,1	20,87	10,3	1,3371	45	
ST_Chopo.03	50,6	38,8	1963,3	25,77	13,1	2,0238	77	
ST_Chopo.04	49,2	41,4	2036,9	20,62	10,1	2,4259	68	
ST_Chopo.05	49,5	43,5	2153,3	9,36	4,3	1,2851	33	Presencia de médula
ST_Chopo.06	50,0	40,6	2030,0	16,68	8,2	1,9148	46	
ST_Chopo.07	49,0	41,6	2038,4	14,05	6,9	1,7886	49	
ST_Chopo.08	50,1	41,3	2069,1	12,89	6,2	1,5614	42	
ST_Chopo.09	48,3	42,1	2033,4	9,38	4,6	1,3039	39	
ST_Chopo.10	48,5	40,5	1964,3	18,67	9,5	1,182	41	

Madera de pinaster

Tabla 177. Datos ensayos a cortante de madera pino pinaster (12%HR).

#	L (mm)	h (mm)	A (mm ²)	Fuerza (kN)	Tensión (MPa)	LVDT (mm)	Tiempo (seg)	Notas
ST_Pinaster.01	49,15	47,95	2356,7	31,18	13,2	3,3943	132	
ST_Pinaster.02	49,45	47,8	2363,7	27,53	11,6	2,7182	163	
ST_Pinaster.03	49,65	47,75	2370,8	29,80	12,6	2,4196	133	
ST_Pinaster.04	49,75	48,15	2395,5	31,19	13,0	3,1584	184	
ST_Pinaster.05	49,65	48,05	2385,7	29,88	12,5	2,5343	147	
ST_Pinaster.06	49,45	47,05	2326,6	30,48	13,1	2,8416	165	
ST_Pinaster.07	49,15	48,6	2388,7	28,65	12,0	2,7668	161	
ST_Pinaster.08	49,55	47,4	2348,7	27,45	11,7	2,8138	164	
ST_Pinaster.09	49,5	47,7	2361,2	25,33	10,7	2,7059	157	
ST_Pinaster.10	49,4	48,35	2388,5	27,85	11,7	2,2829	132	
ST_Pinaster.11	49,45	48	2373,6	26,30	11,1	3,0447	178	
ST_Pinaster.12	49,3	47,95	2363,9	29,20	12,4	3,1741	185	

II. Ensayos de fibras de refuerzo

A. Caracterización de tejidos de refuerzo

Tabla 178. Diámetro medio del filamento de los tejidos de refuerzo.

Tipo probeta	Imagen microscópica 1 (μm)	Imagen microscópica 2 (μm)	Imagen microscópica 3 (μm)	Imagen microscópica 4 (μm)	Imagen microscópica 5 (μm)	Notas
Fv_UNI 1200_1	21,2	18,9	21,0	21,6	22,6	
Fv_UNI 1200_2	21,2	19,3	21,0	21,2	21,2	
Fv_UNI 1200_3	15,2	18,8	20,6	23,0	17,9	
Fv_UNI 1200_4	15,7	16,5	18,8	20,9	18,0	
Fv_UNI 1200_5	21,0	14,6	20,8	22,2	24,2	
Fv_UNI 1200_6	17,2	16,0	19,8	20,7	23,4	
Fv_UNI 1200_7	19,1	17,9	18,5	23,9	24,8	
Fv_UNI 1200_8	19,5	21,0	22,3	23,9	19,2	
Fv_UNI 1200_9	22,0	20,5	22,4	22,7	19,2	
Fv_UNI 1200_10	17,9	18,7	18,0	20,9	23,4	
Fv_UNI 1200_11	18,5	15,3	22,1	18,3	23,0	
Fv_UNI 1200_12	21,2	19,6	18,0	19,8	20,6	
Fv_UNI 1200_13	17,3	17,2	18,9	22,3	22,0	
Fv_UNI 1200_14	21,9	16,8	18,0	22,7	18,7	
Fv_UNI 1200_15	21,0	17,8	20,0	18,0	22,5	
Fv_UNI 1200_16	16,8	21,0	17,8	19,3	20,5	
Fv_UNI 1200_17	17,2	17,8	21,9	16,3	16,5	
Fv_UNI 1200_18	20,5	17,2	17,8	18,9	20,9	
Fv_UNI 1200_19	21,2	16,5	16,6	20,9	19,8	
Fv_UNI 1200_20	18,7	18,6	20,1	20,8	18,8	
Fv_UNI 1200_21	19,8	18,6	20,2	21,2	18,9	
Fv_UNI 1200_22	22,0	19,6	20,4	19,3	21,3	
Fv_UNI 1200_23	17,8	21,0	20,8	18,3	14,6	
Fv_UNI 1200_24	19,2	18,3	14,9	21,6	21,2	
Fv_UNI 1200_25	26,4	18,5	16,9	26,7	21,8	
Fv_UNI 1200_26	22,5	20,5	19,8	19,3	21,2	
Fv_UNI 1200_27	16,8	21,3	16,3	20,5	19,5	
Fv_UNI 1200_28	21,0	16,1	17,8	22,4	21,2	
Fv_UNI 1200_29	20,1	19,1	19,3	27,0	21,6	
Fv_UNI 1200_30	19,8	17,7	19,3	23,7	19,2	
Fv_UNI 1200_31	17,8	19,8	20,0	24,5	19,3	
Fv_UNI 1200_32	18,3	16,0	21,6	22,5	20,8	
Fv_UNI 1200_33	18,7	18,9	19,8	19,3	20,5	
Fv_UNI 1200_34	17,9	21,0	17,2	19,3	20,9	

Tipo probeta	Imagen microscópica 1 (μm)	Imagen microscópica 2 (μm)	Imagen microscópica 3 (μm)	Imagen microscópica 4 (μm)	Imagen microscópica 5 (μm)	Notas
Fv_UNI 1200_35	20,1	19,7	22,3	21,6	18,9	
Fv_UNI 1200_36	19,3	19,8	20,1	20,8	19,8	
Fv_UNI 1200_37	19,5	17,7	21,6	23,7	20,8	
Fv_UNI 1200_38	16,5	18,8	19,3	20,9	21,0	
Fv_UNI 1200_39	19,8	21,3	20,1	19,2	20,1	
Fv_UNI 1200_40	15,9	21,9	19,3	19,5	19,8	
Fv_UNI 1200_41	18,5	15,9	19,8	22,5	20,1	
Fv_UNI 1200_42	17,9	19,2	21,6	20,6	20,1	
Fv_UNI 1200_43	16,9	20,5	20,5	19,3	19,8	
Fv_UNI 1200_44	19,8	19,8	22,0	17,8	23,4	
Fv_UNI 1200_45	20,1	20,1	21,2	18,0	23,1	
Fv_UNI 1200_46	20,6	21,4	21,2	23,1	21,2	
Fv_UNI 1200_47	23,9	18,6	21,6	17,8	15,7	
Fv_UNI 1200_48	18,3	18,5	18,0	19,3	19,8	
Fv_UNI 1200_49	19,8	18,2	19,3	18,7	22,5	
Fv_UNI 1200_50	22,5	18,6	18,7	22,2	26,7	
Fv_UNI 300_1	18,00	17,75	21,00	21,25	18,50	
Fv_UNI 300_2	21,00	17,75	21,00	19,75	17,75	
Fv_UNI 300_3	21,00	18,75	20,25	19,50	20,00	
Fv_UNI 300_4	19,00	18,75	17,00	21,00	18,00	
Fv_UNI 300_5	18,75	21,75	17,00	21,00	19,50	
Fv_UNI 300_6	19,00	18,75	16,75	21,00	22,50	
Fv_UNI 300_7	20,75	22,50	20,25	21,00	19,25	
Fv_UNI 300_8	22,25	21,75	17,00	22,00	17,00	
Fv_UNI 300_9	22,25	16,00	18,00	20,25	19,75	
Fv_UNI 300_10	19,00	16,75	21,00	22,00	21,00	
Fv_UNI 300_11	20,25	20,75	23,00	18,25	19,75	
Fv_UNI 300_12	20,00	21,75	20,50	21,75	20,25	
Fv_UNI 300_13	20,50	20,00	21,25	20,25	21,75	
Fv_UNI 300_14	21,25	21,00	19,00	21,00	19,25	
Fv_UNI 300_15	20,25	20,75	20,75	21,75	20,50	
Fv_UNI 300_16	20,00	22,25	18,75	20,25	17,75	
Fv_UNI 300_17	19,50	22,25	22,75	21,75	17,25	
Fv_UNI 300_18	22,00	20,00	21,00	20,25	21,00	
Fv_UNI 300_19	21,25	22,25	20,75	17,50	20,25	
Fv_UNI 300_20	21,25	20,00	20,00	19,50	20,50	
Fv_UNI 300_21	20,25	21,75	19,75	20,25	19,00	
Fv_UNI 300_22	21,00	19,75	21,25	21,75	21,00	
Fv_UNI 300_23	16,75	21,00	19,50	20,25	19,50	
Fv_UNI 300_24	19,75	23,00	20,50	22,50	23,75	
Fv_UNI 300_25	18,75	21,75	21,50	21,50	20,25	
Fv_UNI 300_26	20,50	20,00	22,50	19,50	23,00	
Fv_UNI 300_27	20,50	20,25	22,25	19,50	22,00	
Fv_UNI 300_28	21,00	20,00	20,50	19,50	22,50	
Fv_UNI 300_29	21,00	20,75	19,25	20,25	21,00	
Fv_UNI 300_30	22,00	20,75	20,25	22,00	21,75	
Fv_UNI 300_31	21,00	20,00	22,25	22,25	18,75	
Fv_UNI 300_32	20,00	19,00	21,75	21,25	18,25	
Fv_UNI 300_33	17,75	20,00	21,00	21,25	16,75	
Fv_UNI 300_34	19,75	21,75	21,00	21,50	21,75	
Fv_UNI 300_35	20,00	20,00	22,25	20,75	24,50	
Fv_UNI 300_36	19,75	24,00	22,25	21,25	23,00	
Fv_UNI 300_37	21,25	24,75	25,25	21,75	22,25	
Fv_UNI 300_38	21,25	22,75	21,25	23,25	20,25	
Fv_UNI 300_39	21,25	23,75	21,00	20,75	22,50	
Fv_UNI 300_40	19,25	20,75	21,25	19,50	21,25	
Fv_UNI 300_41	18,00	23,00	23,00	22,25	22,25	
Fv_UNI 300_42	18,25	22,00	25,25	22,50	23,25	
Fv_UNI 300_43	19,00	21,50	20,75	22,50	23,25	
Fv_UNI 300_44	19,50	20,50	19,75	20,50	15,50	
Fv_UNI 300_45	19,50	21,25	21,00	23,25	14,50	

11. ANEXOS

Tipo probeta	Imagen microscópica 1 (μm)	Imagen microscópica 2 (μm)	Imagen microscópica 3 (μm)	Imagen microscópica 4 (μm)	Imagen microscópica 5 (μm)	Notas
Fv_UNI 300_46	20,00	21,25	22,00	22,00	22,75	
Fv_UNI 300_47	20,00	20,75	18,75	22,50	22,50	
Fv_UNI 300_48	20,25	18,75	18,75	23,00	19,75	
Fv_UNI 300_49	20,50	19,75	19,75	24,00	18,75	
Fv_UNI 300_50	20,00	20,75	23,00	17,00	20,25	
FL_UNI 300_01	23,20	21,10	20,10	23,90	26,90	
FL_UNI 300_02	23,90	20,90	19,20	23,80	27,40	
FL_UNI 300_03	25,10	22,70	18,70	27,40	24,70	
FL_UNI 300_04	29,50	21,00	19,80	21,20	24,30	
FL_UNI 300_05	22,60	22,00	20,90	23,00	21,20	
FL_UNI 300_06	18,70	21,70	20,60	17,80	11,30	
FL_UNI 300_07	19,30	22,70	18,10	18,90	16,10	
FL_UNI 300_08	17,40	11,60	17,50	18,10	22,30	
FL_UNI 300_09	24,20	14,30	17,30	18,40	18,10	
FL_UNI 300_10	16,80	12,10	20,20	18,90	19,40	
FL_UNI 300_11	14,80	13,40	14,00	16,60	21,70	
FL_UNI 300_12	20,50	18,80	14,00	19,40	21,70	
FL_UNI 300_13	17,20	24,90	17,00	20,40	20,80	
FL_UNI 300_14	17,70	24,90	19,00	18,30	22,60	
FL_UNI 300_15	20,30	23,00	15,00	17,50	20,70	
FL_UNI 300_16	21,80	21,60	19,80	18,40	18,70	
FL_UNI 300_17	22,70	21,90	19,20	17,20	18,70	
FL_UNI 300_18	22,40	20,40	22,00	18,90	16,70	
FL_UNI 300_19	20,30	21,70	22,70	22,70	16,20	
FL_UNI 300_20	21,20	20,80	21,10	21,60	18,60	
FL_UNI 300_21	18,00	18,60	15,00	24,90	20,00	
FL_UNI 300_22	18,10	17,60	18,90	20,80	22,90	
FL_UNI 300_23	21,60	17,00	18,80	19,90	20,90	
FL_UNI 300_24	21,80	18,90	24,70	18,50	21,20	
FL_UNI 300_25	23,00	18,00	24,20	25,00	22,00	
FL_UNI 300_26	23,40	16,00	23,40	20,40	16,20	
FL_UNI 300_27	27,40	23,70	22,00	21,00	16,50	
FL_UNI 300_28	24,60	25,90	21,90	20,70	15,40	
FL_UNI 300_29	23,70	27,90	21,20	17,80	15,00	
FL_UNI 300_30	13,80	27,40	22,70	20,00	16,40	
FL_UNI 300_31	12,90	20,30	22,20	23,00	19,40	
FL_UNI 300_32	13,80	25,20	19,00	21,60	22,10	
FL_UNI 300_33	13,80	28,20	21,00	26,70	20,30	
FL_UNI 300_34	13,80	25,10	19,00	25,30	20,70	
FL_UNI 300_35	23,00	25,70	23,00	19,10	22,40	
FL_UNI 300_36	24,90	29,00	19,30	14,20	18,10	
FL_UNI 300_37	23,00	14,80	19,60	16,80	19,60	
FL_UNI 300_38	19,60	17,80	19,60	16,20	21,20	
FL_UNI 300_39	21,80	20,30	23,90	14,00	18,40	
FL_UNI 300_40	19,10	18,60	22,70	14,10	21,00	
FL_UNI 300_41	19,30	19,40	22,70	21,60	20,30	
FL_UNI 300_42	21,80	15,90	18,50	21,90	21,00	
FL_UNI 300_43	21,60	20,30	18,90	19,20	21,10	
FL_UNI 300_44	17,00	19,50	18,10	23,60	24,60	
FL_UNI 300_45	18,10	18,70	20,70	21,70	24,70	
FL_UNI 300_46	22,60	18,80	18,10	18,20	18,80	
FL_UNI 300_47	22,10	15,90	21,10	18,90	17,60	
FL_UNI 300_48	21,60	16,80	23,80	19,50	15,60	
FL_UNI 300_49	16,40	15,90	20,40	20,40	17,80	
FL_UNI 300_50	18,30	15,10	21,70	19,10	19,40	

III. Ensayos caracterización fibras tracción

A. Ensayos de refuerzos naturales

Tabla 179. Datos ensayos a tracción de los distintos refuerzos naturales.

Tipo probeta	L (mm)	b (mm)	h (mm)	A _{neto} (mm ²)	Fuerza (kN)	Tensión (MPa)	Defor. (mm)	MOE (MPa)	Tiempo (seg)	Notas
Roble [QA]_01	190,0	0,56	27,50	15,68	0,66	41,92	0,90	8.139	113,00	
Roble [QA]_02	191,0	0,56	27,00	15,39	0,61	39,65	0,81	7.975	113,00	
Roble [QA]_03	188,6	0,56	27,00	15,39	0,88	57,48	1,13	8.659	115,00	
Roble [QA]_04	189,5	0,56	25,70	14,65	0,42	28,96	0,66	7.794	110,00	
Roble [QA]_05	189,3	0,56	26,00	14,82	0,84	56,53	1,02	9.015	115,00	
Roble [QA]_06	189,6	0,56	24,50	13,97	0,82	58,98	1,09	8.952	118,00	
Roble [QA]_07	188,6	0,56	25,80	14,71	0,56	38,29	0,73	7.492	114,00	
Roble [QA]_08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	NULO
Roble [QA]_09	190,0	0,56	26,90	15,33	0,64	41,53	0,68	7.323	111,00	
Roble [QA]_10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	NULO
Roble [QA]_11	190,5	0,56	25,00	14,25	0,53	36,85	0,96	6.937	114,00	
Roble [QA]_12	190,5	0,56	25,80	14,71	0,60	40,76	0,79	6.771	112,00	
Roble [QA]_13	189,0	0,56	26,20	14,93	0,73	48,94	0,77	7.574	109,00	
Roble [QA]_14	191,0	0,56	25,50	14,54	0,80	55,27	0,92	10.494	113,00	
Roble [QA]_15	189,8	0,56	26,70	15,22	1,07	70,05	1,11	9.630	116,00	
Roble [QA]_16	191,0	0,56	24,50	13,97	0,96	68,92	1,41	8.305	122,00	
Roble [QA]_17	190,9	0,56	24,00	13,68	0,75	54,72	0,81	8.227	112,00	
Roble [QA]_18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	NULO
Roble [QR]_01	200,0	0,96	25,72	24,69	0,81	32,63	1,37	5.010	346	
Roble [QR]_02	200,0	0,96	24,50	23,52	0,72	30,54	1,43	4.905	103	
Roble [QR]_03	200,5	0,96	23,90	22,94	0,95	41,33	1,54	6.137	126	
Roble [QR]_04	200,0	0,96	24,80	23,81	0,74	31,01	1,28	5.388	111	
Roble [QR]_05	200,0	0,96	25,28	24,27	1,06	43,57	1,49	6.590	113	
Roble [QR]_06	200,3	0,96	24,50	23,52	1,05	44,43	1,64	6.380	114	
Roble [QR]_07	201,3	0,96	24,34	23,37	0,90	38,39	1,51	5.953	129	
Roble [QR]_08	199,9	0,96	24,88	23,88	1,34	56,16	1,64	6.773	181	
Roble [QR]_09	200,4	0,96	24,76	23,77	0,39	16,39	0,81	5.633	185	
Roble [QR]_10	200,3	0,96	25,04	24,04	0,54	22,56	1,11	5.414	219	
Roble [QR]_11	200,4	0,96	25,10	24,10	1,06	43,82	1,88	6.182	173	
Roble [QR]_12	200,5	0,96	24,22	23,25	0,62	26,74	1,39	6.469	291	
Arce_01	199,9	1,16	25,06	29,07	3,35	115,08	3,43	7.109	135	
Arce_02	201,8	1,16	24,72	28,68	3,87	134,90	4,05	6.799	130	
Arce_03	200,4	1,16	25,30	29,35	4,30	146,59	4,03	7.499	130	
Arce_04	200,2	1,16	24,60	28,54	4,73	165,82	4,05	8.008	133	
Arce_05	200,3	1,16	25,56	29,65	4,37	147,36	3,67	7.909	128	
Arce_06	200,4	1,16	24,74	28,70	2,53	87,99	3,41	7.236	126	
Arce_07	199,9	1,16	24,65	28,59	4,20	146,78	3,88	8.241	128	
Arce_08	199,9	1,16	25,44	29,51	4,39	148,62	4,12	7.949	130	
Arce_09	199,7	1,16	25,50	29,58	3,09	104,57	1,94	8.382	118	
Arce_10	199,9	1,16	25,60	29,70	3,54	119,25	2,56	8.507	122	
Arce_11	200,3	1,16	25,12	29,14	4,51	154,82	3,80	8.636	125	
Arce_12	200,5	1,16	21,38	24,80	3,49	140,90	4,29	8.089	130	
Bambú[nt]_01	200,5	0,64	25,40	16,26	0,98	60,53	1,13	8.979	116	
Bambú[nt]_02	200,3	0,64	24,60	15,74	1,21	76,85	1,49	8.216	117	
Bambú[nt]_03	200,5	0,64	24,80	15,87	0,85	53,70	1,19	8.515	117	
Bambú[nt]_04	199,4	0,64	25,10	16,06	0,71	44,10	0,81	7.850	114	
Bambú[nt]_05	199,7	0,64	25,00	16,00	1,27	79,18	1,51	8.359	117	
Bambú[nt]_06	199,0	0,64	25,20	16,13	2,29	141,94	2,77	7.750	140	
Bambú[tt]_01	201,1	0,64	24,80	15,87	0,22	13,90	0,47	4.601	103	
Bambú[tt]_02	199,8	0,64	25,20	16,13	0,27	16,63	0,64	3.565	119	
Bambú[tt]_03	198,8	0,64	25,00	16,00	0,44	27,75	1,37	4.327	122	
Bambú[tt]_04	198,2	0,64	24,90	15,94	0,31	19,71	0,73	3.830	114	
Bambú[tt]_05	197,8	0,64	24,70	15,81	0,33	21,03	0,73	4.460	113	
Bambú[tt]_06	199,1	0,64	25,20	16,13	0,43	26,72	1,66	4.151	125	
FL_01	198,9	0,80	18,80	6,30	1,48	161,10	9,21	8.371	383	
FL_02	198,1	0,80	20,10	6,74	1,59	160,36	9,90	8.307	381	
FL_03	197,6	0,80	19,20	6,44	1,52	161,47	9,42	6.591	359	
FL_04	199,5	0,80	20,20	6,77	1,20	196,02	6,11	6.416	373	

Tipo probeta	L (mm)	b (mm)	h (mm)	A _{meta} (mm ²)	Fuerza (kN)	Tensión (MPa)	Defor. (mm)	MOE (MPa)	Tiempo (seg)	Notas
FL_05	200,4	0,80	18,90	6,34	1,66	162,71	10,21	6.256	387	
FL_06	199,9	0,80	19,60	6,57	1,63	160,11	10,17	6.109	379	
FL_07	199,6	0,80	19,40	6,50	1,67	158,72	10,53	7.205	393	
FL_08	197,3	0,80	20,60	6,91	1,66	162,49	10,19	5.465	377	
FL_09	201,0	0,80	20,30	6,80	1,71	168,20	10,18	7.753	398	
FL_10	200,1	0,80	19,00	6,37	1,60	171,60	9,35	6.042	363	
FL_11	198,0	0,80	20,00	6,70	1,23	179,96	6,83	4.882	344	NULO
FL_12	199,1	0,80	20,50	6,87	1,58	153,06	10,33	4.682	428	NULO

B. Ensayos de tejidos de refuerzo

Tabla 180. Datos ensayos a tracción de los distintos tejidos de refuerzo.

Tipo probeta	L (mm)	b (mm)	h (mm)	A _{fibra} (mm ²)	Fuerza (kN)	Tensión (MPa)	Defor. (mm)	MOE (MPa)	Tiempo (seg)	Notas
UNI300-Fv_01	194,2	0,26	28,70	4,55	3,18	698,41	3,39	29.885	15,16	
UNI300-Fv_02	190,1	0,24	29,16	4,63	3,63	784,77	3,82	29.372	17,55	
UNI300-Fv_03	189,2	0,26	28,60	4,54	3,64	801,55	3,67	30.998	16,3	
UNI300-Fv_04	188,4	0,22	28,44	4,51	3,16	701,06	3,35	30.982	14,81	
UNI300-Fv_05	188,5	0,24	29,20	4,63	3,30	711,82	3,46	30.482	15,37	
UNI300-Fv_06	188,4	0,24	29,32	4,65	3,17	681,32	3,50	27.351	15,65	
UNI300-Fv_07	190,6	0,26	28,42	4,51	3,40	753,09	3,93	29.617	16,45	
UNI300-Fv_08	190,7	0,26	28,14	4,47	3,05	683,08	3,63	29.736	15,55	
UNI300-Fv_09	182,8	0,24	28,30	4,49	3,15	701,06	3,78	28.322	15,92	
UNI300-Fv_10	188,4	0,24	28,57	4,53	3,12	687,43	3,43	28.586	14,22	
UNI300-Fv_11	187,1	0,22	27,82	4,42	2,93	663,17	3,18	27.339	13,73	
UNI300-Fv_12	189,7	0,24	28,26	4,48	3,28	731,71	3,65	30.201	15,19	
UNI1200-Fv_01	204,1	1,10	25,30	12,70	7,62	599,97	3,36	12.297	84	
UNI1200-Fv_02	200,8	1,10	25,40	12,75	9,53	747,40	3,52	14.913	92	
UNI1200-Fv_03	200,2	1,10	24,80	12,45	7,77	624,12	4,14	13.746	94	
UNI1200-Fv_04	188,9	1,10	25,10	12,60	8,14	646,02	3,25	12.935	88	
UNI1200-Fv_05	203,4	1,20	25,50	12,80	7,53	588,24	3,81	9.249	95	
UNI1200-Fv_06	200,6	1,10	25,40	12,75	10,74	842,30	4,73	13.422	117	
UNI1200-Fv_07	188,9	1,00	25,00	12,55	8,26	658,17	3,91	11.265	88	
UNI1200-Fv_08	188,0	0,95	25,60	12,85	9,54	742,34	4,39	12.896	102	
UNI1200-Fv_09	189,6	1,03	25,10	12,60	9,46	750,78	4,13	12.709	100	
UNI1200-Fv_10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	NULO
UNI1200-Fv_11	188,8	1,04	25,30	12,70	8,39	660,60	4,82	11.401	91	
UNI1200-Fv_12	200,8	1,04	25,30	12,70	9,62	757,44	4,24	11.920	102	
UNI1200-Fv_13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	NULO
UNI1200-Fv_14	188,6	1,04	25,10	12,60	8,42	668,24	4,70	12.294	90	
UNI1200-Fv_15	189,3	1,04	25,10	12,60	8,45	670,62	3,59	12.587	92	
UNI1200-Fv_16	188,1	1,01	25,30	12,70	8,60	677,13	3,80	12.274	92	
UNI1200-Fv_17	203,5	1,03	25,00	12,55	-	-	-	-	-	Rot. Mordaza
UNI1200-Fv_18	188,7	1,00	25,10	12,60	10,25	813,48	4,31	12.967	111	
UNI1200-Fv_19	201,1	1,03	25,20	12,65	10,25	809,86	4,61	11.868	109	
UNI1200-Fv_20	189,2	1,07	25,30	12,70	10,19	802,32	4,17	12.051	108	
UNI1200-Fv_21	188,0	1,01	25,20	12,65	9,66	763,61	4,07	12.184	102	
UNI230-Fc_01	212,8	0,16	18,22	2,50	4,08	1633,01	2,74	146.897	163	
UNI230-Fc_02	203,6	0,16	17,84	2,45	3,70	1511,16	2,11	144.334	171	
UNI230-Fc_03	206,9	0,18	17,68	2,42	4,55	1875,23	3,67	157.576	285	
UNI230-Fc_04	204,3	0,16	19,02	2,61	2,84	1089,13	2,43	139.800	172	
UNI230-Fc_05	203,5	0,16	18,44	2,53	1,89	748,92	2,20	110.595	116	
UNI230-Fc_06	211,3	0,16	18,60	2,55	5,19	2033,92	3,18	154.660	235	
UNI230-Fc_07	210,4	0,18	19,08	2,62	4,95	1891,64	2,92	160.767	235	
UNI230-Fc_08	217,6	0,18	18,38	2,52	3,94	1565,35	2,39	160.097	186	
UNI230-Fc_09	211,9	0,16	17,96	2,46	1,75	710,31	1,03	110136	76	
UNI230-Fc_10	213,8	0,16	18,20	2,50	1,72	688,84	0,99	123424	75	
UNI230-Fc_11	212,5	0,16	18,72	2,57	4,28	1669,03	2,52	152563	200	
UNI230-Fc_12	204,1	0,16	18,06	2,48	3,82	1544,27	2,15	161394	345	
UNI230-Fc_13	206,4	0,16	18,32	2,51	2,84	1130,74	1,62	146205	250	

Tipo probeta	L (mm)	b (mm)	h (mm)	A _{fibra} (mm ²)	Fuerza (kN)	Tensión (MPa)	Defor. (mm)	MOE (MPa)	Tiempo (seg)	Notas
UNI230-Fc_14	214,1	0,16	17,78	2,44	3,94	1616,79	2,52	140752	360	
UNI230-Fc_15	208,9	0,16	17,86	2,45	3,71	1516,32	2,25	151252	340	
UNI230-Fc_16	211,9	0,16	18,12	2,48	4,90	1974,29	3,20	164.781	467	

C. Ensayos laminados fibra de vidrio

Tabla 181. Datos ensayos a tracción de los laminados de fibra de vidrio.

Tipo probeta	L (mm)	b (mm)	h (mm)	A _{meta} (mm ²)	A _{fibra} (mm ²)	Porc. (%)	Fuerza (kN)	Tensión (MPa)	Defor. (mm)	MOE (MPa)	Tiempo (seg)	Notas
UNI300_RFv1_01	248,9	0,40	14,80	5,92	2,35	39,68	2,12	953,07	5,04	41.064	233	
UNI300_RFv1_02	248,1	0,45	14,75	6,64	2,34	35,27	2,03	910,84	4,41	44.472	214	
UNI300_RFv1_03	247,6	0,45	14,90	6,71	2,36	35,27	2,20	986,25	5,06	46.907	255	
UNI300_RFv1_04	249,5	0,40	14,50	5,80	2,30	39,68	1,14	514,24	4,88	40.297	217	
UNI300_RFv1_05	250,4	0,50	14,85	7,43	2,36	31,74	2,06	925,92	4,74	42.932	230	
UNI300_RFv1_06	249,9	0,45	15,05	6,77	2,39	35,27	2,34	1051,09	5,43	44.914	259	
UNI300_RFv1_07	249,6	0,40	14,20	5,68	2,25	39,68	2,44	1096,33	5,60	25.989	268	NULO
UNI300_RFv1_08	247,3	0,40	14,75	5,90	2,34	39,68	2,03	910,84	4,90	43.244	237	
UNI300_RFv1_09	251	0,55	14,35	7,89	2,28	28,85	1,79	802,27	4,27	38925	204	
UNI300_RFv1_10	250,1	0,45	14,30	6,44	2,27	35,27	2,14	960,61	4,72	45604	236	
UNI300_RFv1_11	248	0,40	14,60	5,84	2,32	39,68	1,98	889,73	5,19	37510	235	
UNI300_RFv1_12	249,1	0,40	14,95	5,98	2,37	39,68	2,30	1034,50	5,52	41.896	256	
UNI300_RFv1_13	250,2	0,45	14,70	6,62	2,33	35,27	1,78	800,76	4,06	40.472	200	
UNI300_RFv1_14	249,7	0,40	14,65	5,86	2,32	39,68	1,97	885,21	4,57	43.228	224	
UNI1200_RFv2_01	250,2	2,09	15,02	31,44	7,27	23,12	-	-	-	-	-	Rot. Mordaza
UNI1200_RFv2_02	249,5	2,05	14,97	30,63	7,24	23,65	-	-	-	-	-	Rot. Mordaza
UNI1200_RFv2_03	249,7	1,99	15,09	30,07	7,30	24,28	15,05	500,50	0,95	20.214	247	
UNI1200_RFv2_04	249,9	2,03	14,91	30,31	7,21	23,80	13,19	435,17	0,97	23.158	244	
UNI1200_RFv2_05	251,2	2,16	14,32	30,93	6,93	22,41	16,07	519,56	1,13	22.344	266	
UNI1200_RFv2_06	250,0	2,10	14,20	29,77	6,87	23,09	13,54	454,82	0,98	23.013	239	
UNI1200_RFv2_07	250,3	2,23	14,42	32,11	6,98	21,74	13,83	430,71	0,89	20.558	235	
UNI1200_RFv2_08	249,6	2,19	14,25	31,25	6,90	22,07	13,06	417,92	0,83	21.206	224	
UNI1200_RFv2_09	250,4	2,03	14,04	28,45	6,80	23,89	12,42	436,56	0,95	21.609	227	
UNI1200_RFv2_10	249,7	2,10	14,24	29,90	6,89	23,05	14,90	498,33	1,07	21.323	255	
UNI1200_RFv2_11	249,8	2,24	14,28	31,99	6,91	21,61	13,76	430,13	0,95	21.410	237	
UNI1200_RFv2_12	250,6	2,13	13,98	29,82	6,77	22,69	12,58	421,86	0,78	22.469	218	
UNI1200_RFv2_13	250,9	2,27	14,19	32,16	6,87	21,35	13,70	426,00	0,98	19.975	240	
UNI1200_RFv2_14	249,8	2,18	14,51	31,64	7,02	22,20	14,79	467,45	1,12	21.505	256	
UNI1200_RFv2_15	250,1	2,19	14,43	31,66	6,99	22,06	15,01	474,10	1,04	21.529	254	
UNI1200_RFv2_16	251,1	2,00	14,21	28,41	6,88	24,20	13,60	478,70	0,96	21.777	240	
UNI1200_RFv2_17	249,6	2,05	14,23	29,23	6,89	23,57	13,83	473,14	0,92	22.077	239	
UNI1200_RFv2_18	249,2	2,10	14,39	30,21	6,96	23,05	13,92	460,77	0,98	22.936	238	
UNI1200_RFv2_19	249,4	2,17	14,33	31,04	6,93	22,34	14,28	460,05	0,99	20.591	247	
UNI1200_RFv2_20	251,8	2,17	14,03	30,48	6,79	22,27	13,70	449,48	0,83	22.315	228	
UNI1200_RFv2_21	250,2	2,11	14,17	29,94	6,86	22,90	13,60	454,24	0,89	20.494	236	
UNI1200_RFv2_22	250,5	2,21	14,17	31,37	6,86	21,87	-	-	-	-	-	Rot. Mordaza
UNI2400_RFv3_01	249,9	3,11	14,28	44,36	13,82	31,16	22,01	496,17	1,12	28.449	298	
UNI2400_RFv3_02	251,8	2,93	14,13	41,44	13,67	33,00	24,64	594,59	1,16	30.245	325	
UNI2400_RFv3_03	249,7	2,91	14,05	40,85	13,60	33,30	26,11	639,17	1,16	29.727	329	
UNI2400_RFv3_04	251,1	3,13	14,49	45,32	14,03	30,96	27,33	603,05	1,24	29.604	346	
UNI2400_RFv3_05	250,2	3,47	14,23	49,44	13,78	27,87	28,94	585,36	1,45	24.991	372	
UNI2400_RFv3_06	249,8	3,56	14,26	50,77	13,80	27,19	28,20	555,45	2,25	25.772	422	
UNI2400_RFv3_07	250,1	3,57	14,18	50,67	13,73	27,09	25,92	511,55	1,45	27.866	349	
UNI2400_RFv3_08	250,3	3,29	14,22	46,83	13,76	29,39	29,61	632,29	1,28	26.854	360	
UNI2400_RFv3_09	251,2	3,07	14,07	43,14	13,62	31,56	-	-	-	-	-	Rot. Mordaza
UNI2400_RFv3_10	250,8	3,05	14,25	43,43	13,80	31,77	-	-	-	-	-	Rot. Mordaza
UNI2400_RFv3_11	250,7	4,02	14,37	57,75	13,91	24,08	-	-	-	-	-	Rot. Mordaza
UNI2400_RFv3_12	249,5	2,94	14,32	42,10	13,86	32,93	25,63	608,79	0,93	29.169	311	
UNI2400_RFv3_13	249,9	3,84	14,32	54,99	13,86	25,21	30,51	554,83	1,30	25.769	371	
UNI2400_RFv3_14	250,2	3,26	14,31	46,64	13,85	29,69	25,31	542,67	1,16	25.121	328	
UNI2400_RFv3_15	249,8	3,57	14,11	50,34	13,66	27,14	29,61	588,20	1,75	26.982	411	

Tipo probeta	L (mm)	b (mm)	h (mm)	A _{meta} (mm ²)	A _{fibra} (mm ²)	Porc. (%)	Fuerza (kN)	Tensión (MPa)	Defor. (mm)	MOE (MPa)	Tiempo (seg)	Notas
UNI2400_RFv3_16	250,4	3,82	14,23	54,37	13,78	25,34	28,68	527,50	1,54	22.464	376	
UNI2400_RFv3_17	250,5	3,83	14,20	54,43	13,75	25,25	28,26	519,20	1,46	23.937	368	
UNI2400_RFv3_18	249,6	3,27	14,23	46,50	13,78	29,63	25,83	555,48	1,24	25.181	331	
UNI2400_RFv3_19	251,3	3,16	14,39	45,48	13,93	30,63	28,60	628,85	1,32	27.724	363	
UNI2400_RFv3_20	250,9	3,66	14,21	52,00	13,75	26,45	-	-	-	-	-	Rot. Mordaza
UNI2400_RFv3_21	249,3	3,55	14,11	50,06	13,66	27,29	28,46	568,52	1,56	24.358	387	
UNI2400_RFv3_22	250,6	2,93	14,22	41,71	13,76	33,00	25,83	619,28	1,42	28.449	338	

IV. Ensayos de adhesivos

A. Ensayos de cortante

Madera de chopo (12%HR)

Tabla 182. Datos ensayos a cortante de madera chopo (12%HR).

Tipo probeta	Madera de chopo 12%HR										
	L (mm)	h (mm)	A (mm ²)	Fuerza (kN)	Tensión (Mpa)	LVDT 1 (mm)	LVDT 2 (mm)	LVDT 3 (mm)	Fallo	Tiempo (seg)	Notas
ST_CH_AD1_S.01	47,7	42,3	2017,7	17,48	8,7	1,7057	2,2146	1,666	A	71	
ST_CH_AD1_S.02	47,4	40	1896,0	11,17	5,9	1,9604	2,2633	1,1383	A	76	
ST_CH_AD1_S.03	49,5	44,3	2192,9	8,68	4,0	1,2943	1,6518	1,2615	A	51	
ST_CH_AD1_S.04	48,4	40,3	1950,5	7,89	4,0	2,5659	2,194	1,5093	A	91	
ST_CH_AD1_S.05	50,3	39,5	1986,9	13,81	7,0	2,1351	3,4441	2,5351	A	81	
ST_CH_AD1_S.06	49,4	41,0	2025,4	13,22	6,5	1,2841	1,0501	0,5185	A	57	
ST_CH_AD1_S.07	50,7	41,1	2083,8	9,51	4,6	1,8783	1,177	1,2629	A	67	
ST_CH_AD1_S.08	49,7	40,7	2022,8	2,69	1,3	0,9533	0,5712	0,3919	C	50	NULA
ST_CH_AD1_S.09	47,5	41,4	1966,5	13,39	6,8	1,1598	1,2205	1,0593	A	49	
ST_CH_AD1_S.10	49,4	42,2	2084,7	9,91	4,8	1,303	0,6282	0,7432	A	62	
ST_CH_AD1_S.11	50,3	41,3	2077,4	9,63	4,6	1,7602	2,5958	2,175	A	71	
ST_CH_AD1_S.12	48,8	41,8	2039,8	13,17	6,5	0,7977	0,3863	0,5147	A	36	
ST_CH_AD1_S.13	47,8	40,8	1950,2	5,73	2,9	1,3054	1,0513	1,0209	A	43	
ST_CH_AD1_S.14	50,3	42,6	2142,8	5,27	2,5	0,8048	0,6829	0,7584	A	39	
ST_CH_AD1_S.15	49,4	41,1	2030,3	12,52	6,2	3,2935	3,3847	2,3279	A	89	
ST_CH_AD2_S.01	49,7	38,3	1903,5	10,81	5,7	2,0473	3,2843	1,8658	A	89	
ST_CH_AD2_S.02	49,6	40,0	1984,0	14,46	7,3	2,4592	3,1637	2,1978	A	100	
ST_CH_AD2_S.03	49,6	42,0	2083,2	7,87	3,8	1,5559	1,2464	0,4022	A	55	
ST_CH_AD2_S.04	49,6	41,6	2063,4	6,78	3,3	2,2812	2,6119	1,672	A	88	
ST_CH_AD2_S.05	49,5	41,6	2059,2	9,91	4,8	1,4247	2,1993	1,5733	A	70	
ST_CH_AD2_S.06	50,2	40,8	2048,2	15,52	7,6	1,7562	2,2264	1,6343	A	79	
ST_CH_AD2_S.07	50,0	40,7	2035,0	11,15	5,5	1,7399	3,1009	2,0592	A	80	
ST_CH_AD2_S.08	49,3	40,3	1986,8	16,4	8,3	2,6052	2,9609	1,8558	A	97	
ST_CH_AD2_S.09	49,8	39,5	1967,1	14,47	7,4	2,0752	2,5224	1,712	C	84	
ST_CH_AD2_S.10	49,7	41,1	2042,7	10,61	5,2	1,4152	1,6397	1,2227	A	59	
ST_CH_AD2_S.11	49,4	40,6	2005,6	17,71	8,8	3,5301	4,2734	3,7304	A	129	
ST_CH_AD2_S.12	49,6	41,0	2033,6	12,82	6,3	1,2019	1,4141	0,8742	A	51	
ST_CH_AD2_S.13	48,7	39,5	1923,7	16,73	8,7	2,2168	2,5279	1,8706	A	92	
ST_CH_AD2_S.14	50,0	39,6	1980,0	11,33	5,7	2,8917	3,5106	2,4913	A	109	
ST_CH_AD2_S.15	50,1	40,5	2029,1	13,16	6,5	2,4175	2,9616	2,117	A	92	
ST_CH_AD3_S.01	52,2	41,2	2153,3	16,13	7,5	1,7204	1,5964	0,9896	A	79	
ST_CH_AD3_S.02	48,4	40,9	1982,0	16,95	8,6	3,4245	1,3702	1,1018	A	136	
ST_CH_AD3_S.03	49,9	41,1	2055,4	19,89	9,7	1,4688	1,8634	1,0686	A	75	
ST_CH_AD3_S.04	49,1	41,2	2025,4	15,04	7,4	1,6424	2,0482	1,6681	A	69	
ST_CH_AD3_S.05	52,0	41,0	2134,6	19,83	9,3	1,5697	1,7485	0,9913	A	77	
ST_CH_AD3_S.06	49,1	40,7	1998,8	19,3	9,7	0,9448	0,9093	0,6889	A	57	
ST_CH_AD3_S.07	51,1	40,3	2061,3	10,09	4,9	1,1361	1,7658	0,8445	B	100	
ST_CH_AD3_S.08	49,4	41,8	2064,9	18,85	9,1	1,4345	1,3505	0,7397	A	68	
ST_CH_AD3_S.09	49,5	42,9	2125,7	19,89	9,4	1,0388	1,06	0,0013	A	59	
ST_CH_AD3_S.10	50,1	40,9	2053,6	19,43	9,5	1,3308	1,3332	1,0441	A	65	

Tipo probeta	Madera de chopo 12%HR									Fallo	Tiempo (seg)	Notas
	L (mm)	h (mm)	A (mm ²)	Fuerza (kN)	Tensión (Mpa)	LVDT 1 (mm)	LVDT 2 (mm)	LVDT 3 (mm)				
ST_CH_AD4_S.01	39,9	51,7	2063,6	9,14	4,4	2,84	-	-	A	61		
ST_CH_AD4_S.02	40,5	51,9	2099,3	6,47	3,1	2,899	-	-	A	43		
ST_CH_AD4_S.03	40,4	51,5	2082,7	7,12	3,4	3,042	-	-	A	47		
ST_CH_AD4_S.04	40,3	51,3	2065,6	7,1	3,4	3,681	-	-	A	47		
ST_CH_AD4_S.05	39,7	51,6	2048,5	9,23	4,5	4,953	-	-	A	62		
ST_CH_AD4_S.06	40,2	51,3	2063,3	11,44	5,5	4,358	-	-	A	77		
ST_CH_AD4_S.07	40,4	51,0	2060,2	4,37	2,1	2,537	-	-	A	28		
ST_CH_AD4_S.08	40,0	50,3	2011,8	11,66	5,8	2,027	-	-	A	77		
ST_CH_AD4_S.09	39,8	51,6	2053,7	6,62	3,2	4,001	-	-	A	44		
ST_CH_AD4_S.10	41,4	51,7	2138,5	8,37	3,9	2,892	-	-	A	55		
ST_CH_AD5_S.01	51,0	40,3	2055,3	9,2	4,5	2,6406	1,7585	4,2341	A	85		
ST_CH_AD5_S.02	50,4	40,0	2016,0	17,2	8,5	2,3132	2,7708	2,1373	A	73		
ST_CH_AD5_S.03	49,2	40,1	1972,9	13,38	6,8	4,3626	2,0507	1,8623	A	106		
ST_CH_AD5_S.04	48,3	39,7	1917,5	7,2	3,8	2,9175	2,9523	1,8178	A	88		
ST_CH_AD5_S.05	49,3	41,2	2031,2	12,78	6,3	2,8972	2,6658	1,6581	A	92		
ST_CH_AD5_S.06	50,6	39,8	2013,9	2,31	1,1	1,8202	0,3503	0,2829	A	54		
ST_CH_AD5_S.07	50,3	42,5	2137,8	8,06	3,8	2,9938	1,7266	1,2017	A	89		
ST_CH_AD5_S.08	50,1	41,2	2064,1	17,3	8,4	2,6843	2,3856	1,757	A	83		
ST_CH_AD5_S.09	49,4	40,0	1976,0	3,73	1,9	1,8235	0,4902	0,852	A	56		
ST_CH_AD5_S.10	49,7	41,3	2052,6	13,71	6,7	2,2048	2,5533	1,4025	A	78		
ST_CH_AD5_S.11	49,8	41,6	2071,7	9,59	4,6	3,4377	2,6005	2,1965	A	99		
ST_CH_AD5_S.12	48,5	40,4	1959,4	16,76	8,6	2,2312	3,1935	2,1781	A	78		
ST_CH_AD5_S.13	51,0	40,0	2040,0	5,31	2,6	3,592	2,8107	2,252	A	99		
ST_CH_AD5_S.14	50,2	42,4	2128,5	10,91	5,1	0,9138	0,6514	0,4559	A	39		
ST_CH_AD5_S.15	50,6	42,4	2145,4	17,55	8,2	1,6911	1,9739	1,3303	A	62		
ST_CH_AD1_R.01	49,0	42,4	2077,6	12,23	5,9	1,9973	1,6226	0,9807	A	89		
ST_CH_AD1_R.02	48,8	42,5	2074,0	10,91	5,3	1,659	0,9589	0,6106	A	70		
ST_CH_AD1_R.03	48,6	44,1	2143,3	8,04	3,8	2,3163	1,5455	1,4371	A	85		
ST_CH_AD1_R.04	49,1	40,0	1964,0	11,68	5,9	1,4616	1,2341	0,3049	B	75		
ST_CH_AD1_R.05	50,0	44,1	2205,0	9,62	4,4	1,2088	0,8867	0,7333	C	58		
ST_CH_AD1_R.06	48,3	44,0	2125,2	12,31	5,8	1,98	0,4947	0,1698	A	87		
ST_CH_AD1_R.07	49,3	44,6	2198,8	10,36	4,7	2,8913	2,1595	1,3254	B	114		
ST_CH_AD1_R.08	50,2	43,7	2193,7	8,47	3,9	3,398	4,3433	0,0819	B	94		
ST_CH_AD1_R.09	49,8	43,8	2181,2	9,88	4,5	1,5453	1,3131	0,4771	B	61		
ST_CH_AD1_R.10	50,7	42,5	2154,8	14,17	6,6	1,8408	1,7524	0,8288	A	85		
ST_CH_AD1_R.11	50,4	43,3	2182,3	9,88	4,5	2,2609	1,4306	0,658	C	100		
ST_CH_AD1_R.12	48,6	44,4	2157,8	8,55	4,0	2,3394	1,6491	1,0898	A	86		
ST_CH_AD1_R.13	49,3	43,4	2139,6	12,51	5,8	1,8873	2,2176	1,7566	A	110		
ST_CH_AD1_R.14	50,0	45,0	2250,0	9,08	4,0	1,9689	1,5444	0,6147	C	72		
ST_CH_AD1_R.15	49,4	44,8	2213,1	10,97	5,0	2,4972	5,6867	1,55	C	107		
ST_CH_AD2_R.01	46,7	41,6	1942,7	15,23	7,8	1,2223	1,5472	1,2017	A	105		
ST_CH_AD2_R.02	50,0	42,4	2120,0	18,35	8,7	1,4757	0,8367	0,8015	A	98		
ST_CH_AD2_R.03	49,3	43,1	2124,8	11,69	5,5	2,6671	1,8769	1,3425	A	116		
ST_CH_AD2_R.04	48,7	42,0	2045,4	8,79	4,3	4,3825	3,5444	3,1082	D	174	NULO	
ST_CH_AD2_R.05	50,4	41,8	2106,7	9,63	4,6	2,3656	1,4743	0,971	A	115		
ST_CH_AD2_R.06	48,8	43,1	2103,3	6,15	2,9	2,9194	1,5573	1,2214	D	118	NULO	
ST_CH_AD2_R.07	48,1	40,4	1943,2	9,57	4,9	0,9417	0,5258	0,6714	A	61		
ST_CH_AD2_R.08	49,4	42,6	2104,4	19,93	9,5	1,693	1,2515	1,2333	A	91		
ST_CH_AD2_R.09	50,0	41,6	2080,0	17,65	8,5	1,1461	1,0476	0,6	A	86		
ST_CH_AD2_R.10	49,6	42,8	2122,9	11,43	5,4	1,3947	1,2044	0,3282	A	81		
ST_CH_AD2_R.11	50,1	41,9	2099,2	13,4	6,4	1,8334	1,3669	1,273	A	95		
ST_CH_AD2_R.12	49,0	43,2	2116,8	14,24	6,7	1,0116	0,2731	0,4373	D	71	NULO	
ST_CH_AD2_R.13	49,1	41,8	2052,4	19,89	9,7	1,2624	1,0659	1,0526	A	85		
ST_CH_AD2_R.14	49,1	43,3	2126,0	19,91	9,4	1,8361	1,5891	1,2373	A	106		
ST_CH_AD2_R.15	49,6	42,1	2088,2	12,01	5,8	3,1631	3,5497	2,7195	B	136		
ST_CH_AD3_R.01	49,1	42,1	2065,0	19,91	9,6	1,7421	1,854	1,4912	A	94		
ST_CH_AD3_R.02	50,5	42,6	2156,0	6,44	3,0	0,7433	0,8931	0,07	A	55		
ST_CH_AD3_R.03	51,9	42,4	2205,3	19,62	8,9	1,714	1,3799	1,0962	A	85		
ST_CH_AD3_R.04	49,7	42,0	2089,5	18,08	8,7	0,9341	0,705	0,6284	A	65		
ST_CH_AD3_R.05	51,6	42,3	2184,8	16,2	7,4	0,0399	2,7455	0,0624	B	99		
ST_CH_AD3_R.06	52,2	42,8	2236,3	18,33	8,2	0,7825	1,8118	0,6771	A	71		

11. ANEXOS

Tipo probeta	Madera de chopo 12%HR									Fallo	Tiempo (seg)	Notas
	L (mm)	h (mm)	A (mm ²)	Fuerza (kN)	Tensión (Mpa)	LVDT 1 (mm)	LVDT 2 (mm)	LVDT 3 (mm)				
ST_CH_AD3_R.07	50,9	42,6	2173,0	16,74	7,7	1,269	1,5131	1,129	A	61		
ST_CH_AD3_R.08	51,5	43,2	2229,5	19,49	8,7	0,7565	0,235	0,0131	A	52		
ST_CH_AD3_R.09	49,8	43,1	2151,0	12,84	6,0	1,0289	0,5411	0,0019	A	42		
ST_CH_AD3_R.10	50,0	41,8	2092,5	8,17	3,9	1,8971	1,0494	0,5304	A	87		
ST_CH_AD3_R.11	49,3	42,7	2107,6	14,34	6,8	0,4847	0,7265	0,5607	A	56		
ST_CH_AD3_R.12	51,3	42,7	2192,6	11,22	5,1	0,1057	0,4113	0,2531	A	42		
ST_CH_AD3_R.13	52,1	42,2	2203,3	13,81	6,3	0,3521	0,5288	0,1303	A	52		
ST_CH_AD3_R.14	48,9	41,9	2051,0	19,48	9,5	1,4957	1,9841	0,9169	A	70		
ST_CH_AD3_R.15	51,1	39,2	2005,7	5,15	2,6	0,3355	0,6218	0,3446	A	44		
ST_CH_AD4_R.01	41,1	50,5	2074,4	<0,5	-	-	-	-	B	-	NULO	
ST_CH_AD4_R.02	40,6	50,3	2045,8	<0,5	-	-	-	-	B	-	NULO	
ST_CH_AD4_R.03	41,1	50,4	2072,4	<0,5	-	-	-	-	B	-	NULO	
ST_CH_AD4_R.04	40,4	50,4	2035,4	<0,5	-	-	-	-	B	-	NULO	
ST_CH_AD4_R.05	40,7	50,7	2066,9	<0,5	-	-	-	-	B	-	NULO	
ST_CH_AD4_R.06	41,1	50,1	2052,8	<0,5	-	-	-	-	B	-	NULO	
ST_CH_AD4_R.07	41,0	49,8	2041,8	<0,5	-	-	-	-	B	-	NULO	
ST_CH_AD4_R.08	40,8	50,6	2065,1	<0,5	-	-	-	-	B	-	NULO	
ST_CH_AD4_R.09	40,3	50,0	2015,8	<0,5	-	-	-	-	B	-	NULO	
ST_CH_AD4_R.10	41,32	50,5	2086,7	<0,5	-	-	-	-	B	-	NULO	
ST_CH_AD5_R.01	50,9	43,0	2188,7	<0,5	-	-	-	-	B	-	NULO	
ST_CH_AD5_R.02	50,7	44,2	2240,9	<0,5	-	-	-	-	B	-	NULO	
ST_CH_AD5_R.03	49,8	41,0	2041,8	<0,5	-	-	-	-	B	-	NULO	
ST_CH_AD5_R.04	49,8	41,7	2076,7	<0,5	-	-	-	-	B	-	NULO	
ST_CH_AD5_R.05	48,9	44,6	2180,9	<0,5	-	-	-	-	B	-	NULO	
ST_CH_AD5_R.06	49,8	41,8	2081,6	<0,5	-	-	-	-	B	-	NULO	

Madera de pino pinaster (12%HR)

Tabla 183. Datos ensayos a cortante de madera pino pinaster (12%HR)

Tipo probeta	Madera de pino pinaster 12%HR									Fallo	Time (seg)	Notas
	L (mm)	h (mm)	A (mm ²)	Fuerza (kN)	Tensión (Mpa)	LVDT 1 (mm)	LVDT 2 (mm)	LVDT 3 (mm)				
ST_PP_AD1_S.01	41,6	47,4	1971,8	22,27	11,3	2,562	-	-	A	89		
ST_PP_AD1_S.02	41,2	46,7	1925,9	20,73	10,8	1,999	-	-	B	83		
ST_PP_AD1_S.03	41,4	47,4	1963,3	21,55	11,0	2,653	-	-	A	86		
ST_PP_AD1_S.04	41,3	46,22	1908,0	27,25	14,3	3,243	-	-	A	108		
ST_PP_AD1_S.05	40,9	47,7	1951,9	20,77	10,6	1,588	-	-	A	83		
ST_PP_AD1_S.06	40,6	47,4	1925,4	19,48	10,1	2,885	-	-	B	77		
ST_PP_AD1_S.07	41,5	46,6	1932,0	26,93	13,9	3,271	-	-	A	107		
ST_PP_AD1_S.08	41,6	46,5	1934,4	20,14	10,4	2,017	-	-	A	80		
ST_PP_AD1_S.09	41,3	47,14	1948,8	15,2	7,8	1,07	-	-	B	61		
ST_PP_AD1_S.10	41,1	47,54	1954,8	26,55	13,6	4,049	-	-	A	106		
ST_PP_AD2_S.01	40,2	47,7	1919,4	26,34	13,7	2,058	-	-	A	105		
ST_PP_AD2_S.02	41,4	47,6	1968,7	26,51	13,5	2,674	-	-	B	106		
ST_PP_AD2_S.03	41,7	47,58	1971,2	27,96	14,2	3,223	-	-	A	112		
ST_PP_AD2_S.04	40,9	46,66	1984,1	24,11	12,2	3,059	-	-	A	96		
ST_PP_AD2_S.05	41,2	47,5	1957,0	28,11	14,4	2,391	-	-	A	112		
ST_PP_AD2_S.06	41,8	47,18	1971,2	28,03	14,2	3,71	-	-	A	113		
ST_PP_AD2_S.07	39,1	47,78	1866,3	22,83	12,2	4,814	-	-	A	91		
ST_PP_AD2_S.08	41,1	47,24	1943,5	28,79	14,8	3,351	-	-	A	116		
ST_PP_AD2_S.09	40,9	47,4	1940,6	23,61	12,2	1,607	-	-	A	95		
ST_PP_AD2_S.10	40,6	47,08	1911,4	25,85	13,5	1,749	-	-	A	104		
ST_PP_AD3_S.01	41,16	46,74	1923,8	19,86	10,3	2,585	-	-	A	91		
ST_PP_AD3_S.02	41,16	46,96	1932,9	16,1	8,3	1,971	-	-	A	64		
ST_PP_AD3_S.03	41,1	47,3	1944,0	24,45	12,6	2,448	-	-	A	97		
ST_PP_AD3_S.04	40,96	47,3	1937,4	20,31	10,5	3,076	-	-	A	82		
ST_PP_AD3_S.05	41,58	46,66	1940,1	15,88	8,2	1,93	-	-	A	63		
ST_PP_AD3_S.06	40,3	46,56	1876,4	20,57	11,0	4,61	-	-	B	82		
ST_PP_AD3_S.07	41,52	46,44	1928,2	21,75	11,3	2,336	-	-	B	99		

Tipo probeta	Madera de pino pinaster 12%HR										Notas
	L (mm)	h (mm)	A (mm ²)	Fuerza (kN)	Tensión (Mpa)	LVDT 1 (mm)	LVDT 2 (mm)	LVDT 3 (mm)	Fallo	Time (seg)	
ST_PP_AD3_S.08	41,66	46,7	1945,5	15,43	7,9	1,949	-	-	B	62	
ST_PP_AD3_S.09	41,42	46,54	1927,7	18,76	9,7	1,776	-	-	A	75	
ST_PP_AD3_S.10	41,1	46,76	1921,8	24,86	12,9	2,749	-	-	A	100	
ST_PP_AD3_S.11	40,92	46	1882,3	24,77	13,2	2,598	-	-	B	99	
ST_PP_AD4_S.01	41,24	47,18	1945,7	10,27	5,3	0,815	-	-	A	68	
ST_PP_AD4_S.02	41,16	47,44	1952,6	3,76	1,9	0,725	-	-	B	25	
ST_PP_AD4_S.03	41	47,84	1961,4	3,15	1,6	0,197	-	-	B	21	
ST_PP_AD4_S.04	41,32	46,92	1938,7	4,08	2,1	0,808	-	-	B	27	
ST_PP_AD4_S.05	40,46	47,2	1909,7	0,78	0,4	0,126	-	-	-	4	NULO
ST_PP_AD4_S.06	41,44	41,78	1731,4	0,96	0,6	0,557	-	-	-	6	NULO
ST_PP_AD4_S.07	41,1	47,66	1958,8	4,43	2,3	0,568	-	-	B	30	
ST_PP_AD4_S.08	41,3	47,06	1943,6	12,87	6,6	1,394	-	-	A	86	
ST_PP_AD4_S.09	41,76	46,56	1944,3	16,98	8,7	2,407	-	-	A	113	
ST_PP_AD4_S.10	40,94	46,74	1913,5	5,36	2,8	2	-	-	B	36	
ST_PP_AD4_S.11	40,94	47,54	1946,3	14,06	7,2	2,076	-	-	A	93	
ST_PP_AD1_R.01	40,7	46,7	1899,8	6,84	3,6	2,31	-	-	B	27	
ST_PP_AD1_R.02	40,7	46,0	1873,1	9,31	5,0	2,63	-	-	B	38	
ST_PP_AD1_R.03	40,7	46,7	1899,8	9,53	5,0	0,538	-	-	B	38	
ST_PP_AD1_R.04	41,4	44,6	1847,4	8,01	4,3	2,651	-	-	B	34	
ST_PP_AD1_R.05	40,7	47,0	1912,9	10,18	5,3	0,71	-	-	B	40	
ST_PP_AD1_R.06	40,7	48,0	1953,6	9,3	4,8	0,715	-	-	B	36	
ST_PP_AD1_R.07	39,0	46,9	1829,9	13,61	7,4	1,598	-	-	B	54	
ST_PP_AD1_R.08	40,7	46,9	1908,6	16,27	8,5	0,747	-	-	B	64	
ST_PP_AD1_R.09	41,2	47,3	1947,0	11,57	5,9	2,124	-	-	B	45	
ST_PP_AD1_R.10	41,0	46,1	1892,7	5,43	2,9	0,946	-	-	B	21	
ST_PP_AD2_R.01	41,1	46,0	1888,8	9,84	5,2	0,533	-	-	B	41	
ST_PP_AD2_R.02	41,4	46,4	1920,2	5,06	2,6	1,203	-	-	B	21	
ST_PP_AD2_R.03	41,6	47,2	1964,4	7,16	3,6	4,575	-	-	B	28	
ST_PP_AD2_R.04	41,2	46,9	1932,3	8,45	4,4	1,824	-	-	B	34	
ST_PP_AD2_R.05	41,2	46,5	1919,3	15,85	8,3	2,279	-	-	A	63	
ST_PP_AD2_R.06	41,3	47,0	1944,6	9,09	4,7	1,688	-	-	B	36	
ST_PP_AD2_R.07	41,1	46,9	1928,4	12,71	6,6	1,391	-	-	B	51	
ST_PP_AD2_R.08	41,4	46,5	1925,3	12,39	6,4	2,533	-	-	B	49	
ST_PP_AD2_R.09	41,2	46,1	1900,1	9,38	4,9	0,262	-	-	B	38	
ST_PP_AD2_R.10	41,4	46,5	1924,9	11,33	5,9	2,106	-	-	B	45	
ST_PP_AD3_R.01	41,6	47,3	1965,0	21,07	10,7	3,171	-	-	A	84	
ST_PP_AD3_R.02	41,3	45,4	1876,0	16,05	8,6	2,644	-	-	B	64	
ST_PP_AD3_R.03	41,3	46,1	1902,9	15,42	8,1	1,713	-	-	B	62	
ST_PP_AD3_R.04	40,8	46,6	1902,1	9,46	5,0	0,929	-	-	B	38	
ST_PP_AD3_R.05	41,9	47,1	1975,2	11,29	5,7	3,133	-	-	B	45	
ST_PP_AD3_R.06	41,1	46,0	1889,7	15,84	8,4	2,567	-	-	B	63	
ST_PP_AD3_R.07	41,6	45,9	1909,6	17,78	9,3	4,486	-	-	B	69	
ST_PP_AD3_R.08	42,1	46,5	1955,8	22,41	11,5	2,803	-	-	A	90	
ST_PP_AD3_R.09	41,1	46,6	1915,1	13,82	7,2	0,536	-	-	B	55	
ST_PP_AD3_R.10	41,4	46,4	1919,3	13,17	6,9	4,496	-	-	B	53	
ST_PP_AD4_R.01	40,5	47,4	1919,0	<0,5	-	-	-	-	B	-	NULO
ST_PP_AD4_R.02	41,2	46,1	1897,5	<0,5	-	-	-	-	B	-	NULO
ST_PP_AD4_R.03	41,1	45,5	1869,1	<0,5	-	-	-	-	B	-	NULO
ST_PP_AD4_R.04	41,0	46,1	1890,9	<0,5	-	-	-	-	B	-	NULO
ST_PP_AD4_R.05	40,9	47,7	1951,7	<0,5	-	-	-	-	B	-	NULO
ST_PP_AD4_R.06	40,0	47,3	1892,0	<0,5	-	-	-	-	B	-	NULO
ST_PP_AD4_R.07	40,5	45,6	1847,7	<0,5	-	-	-	-	B	-	NULO
ST_PP_AD4_R.08	40,9	46,9	1920,1	<0,5	-	-	-	-	B	-	NULO
ST_PP_AD4_R.09	40,5	48,0	1944,0	<0,5	-	-	-	-	B	-	NULO
ST_PP_AD4_R.10	40,0	47,7	1908,0	<0,5	-	-	-	-	B	-	NULO

Madera chopo (ciclos de envejecimiento)

Tabla 184. Datos ensayos a cortante de madera chopo tras los ciclos de envejecimiento.

11. ANEXOS

Tipo probeta	Madera de chopo ciclos de envejecimiento										Notas
	L (mm)	h (mm)	A (mm ²)	Fuerza (kN)	Tensión (Mpa)	LVDT 1 (mm)	LVDT 2 (mm)	LVDT 3 (mm)	Fallo	Time (seg)	
CC_AD1_S.01	50,1	41,8	2094,2	14,88	7,1	3,389	2,691	2,912	A	97	
CC_AD1_S.02	49,7	40,8	2027,8	15,87	7,8	4,641	5,104	4,159	B	135	
CC_AD1_S.03	49,45	41,6	2057,1	11,48	5,6	1,181	0,294	0,464	A	43	
CC_AD1_S.04	48,75	40,7	1984,1	13,35	6,7	2,981	2,806	2,287	A	81	
CC_AD1_S.05	49,2	41,8	2056,6	19,53	9,5	3,135	3,481	2,558	A	101	
CC_AD1_S.06	48,25	42	2026,5	18,25	9,0	1,892	1,742	1,151	B	65	
CC_AD1_S.07	49,45	42,15	2084,3	9,81	4,7	1,521	1,203	0,395	A	45	
CC_AD1_S.08	48,6	40,95	1990,2	13,44	6,8	3,426	3,732	2,45	A	95	Rotura frágil
CC_AD1_S.09	48,25	40,6	1959,0	12,73	6,5	2,883	2,27	1,921	A	80	
CC_AD1_S.10	49,2	41,7	2051,6	16,85	8,2	2,333	2,914	2,011	A	87	
CC_AD1_S.11	49,8	42,6	2121,5	8,92	4,2	1,806	1,364	0,936	B	59	
CC_AD1_S.12	49	41,6	2038,4	14,16	6,9	3,164	2,792	2,404	A	91	
CC_AD1_S.13	49,35	42,6	2102,3	10,46	5,0	2,265	1,664	1,485	A	69	
CC_AD1_S.14	49,3	41,3	2036,1	9,95	4,9	2,612	2,306	1,941	A	69	
CC_AD1_S.15	49,65	42,75	2122,5	17,47	8,2	1,875	2,075	1,488	A	68	
CC_AD2_S.01	49,7	42,65	2119,7	13,06	6,2	0,196	3,697	2,416	A	83	
CC_AD2_S.02	49,3	40,8	2011,4	11,37	5,7	2,712	2,239	1,175	A	79	Ligera torsión
CC_AD2_S.03	49,65	42,35	2102,7	16,16	7,7	5,831	5,164	3,819	C	165	
CC_AD2_S.04	49,7	39,2	1948,2	14,16	7,3	2,269	2,747	1,762	B	80	
CC_AD2_S.05	51,1	39,8	2033,8	16,06	7,9	3,3	3,399	2,364	A	102	
CC_AD2_S.06	50,15	41,85	2098,8	10,11	4,8	1,555	1,031	0,716	A	40	
CC_AD2_S.07	51,15	39,9	2040,9	15,19	7,4	2,404	2,353	1,424	A	73	
CC_AD2_S.08	50,15	40,45	2028,6	11,71	5,8	4,243	4,191	3,155	A	120	
CC_AD2_S.09	50,55	40,4	2042,2	14,52	7,1	2,086	1,319	1,423	B	70	
CC_AD2_S.10	50,2	40,65	2040,6	13,54	6,6	2,098	2,42	1,893	A	63	
CC_AD2_S.11	49,45	42,35	2094,2	8,47	4,0	1,988	2,271	1,762	A	62	
CC_AD2_S.12	49,5	41,5	2054,3	12,54	6,1	1,947	2,192	1,316	A	71	
CC_AD2_S.13	50,65	42,45	2150,1	17,48	8,1	2,678	2,501	1,924	A	75	
CC_AD2_S.14	50,25	40,3	2025,1	13,84	6,8	0,56	2,872	2,209	B	109	
CC_AD2_S.15	48,75	41,2	2008,5	7,79	3,9	1,977	1,949	0,566	A	69	
CC_AD3_S.01	52,15	41,25	2151,2	14,96	7,0	2,249	1,221	0,001	A	60	
CC_AD3_S.02	49	41,7	2043,3	5,5	2,7	0,723	0,867	0,414	A	35	
CC_AD3_S.03	49,25	41,55	2046,3	11,98	5,9	0,693	1,699	0,778	A	52	
CC_AD3_S.04	48,95	41,85	2048,6	14,71	7,2	3,106	4,011	2,396	B	129	
CC_AD3_S.05	48,7	41,9	2040,5	19,8	9,7	1,772	1,861	1,202	B	66	
CC_AD3_S.06	50,25	41,55	2087,9	19,86	9,5	1,069	1,281	0,951	B	49	
CC_AD3_S.07	52,55	41,45	2178,2	14,86	6,8	1,393	0,861	0,01	C	48	
CC_AD3_S.08	49,3	41,25	2033,6	19,86	9,8	1,786	1,628	1,376	C	60	
CC_AD3_S.09	51,1	40,55	2072,1	16,46	7,9	1,158	1,444	0,005	A	49	
CC_AD3_S.10	48,4	40,85	1977,1	19,88	10,1	1,921	1,492	1,422	A	71	
CC_AD3_S.11	52,45	41,15	2158,3	18,56	8,6	1,186	1,275	0,908	A	47	
CC_AD3_S.12	52,05	40,75	2121,0	19,81	9,3	1,535	1,113	1,131	B	54	
CC_AD3_S.13	51,2	41,15	2106,9	19,88	9,4	2,332	2,158	1,284	B	77	
CC_AD3_S.14	51,4	42,3	2174,2	11,75	5,4	1,085	1,197	0,792	A	35	
CC_AD3_S.15	52,35	41	2146,4	7,71	3,6	1,766	0,357	0,486	A	48	
CC_AD5_S.01	51,2	40,3	2063,4	13,53	6,6	1,973	2,185	1,85	A	68	
CC_AD5_S.02	50,55	40,85	2065,0	13,91	6,7	2,778	3,51	2,347	A	91	
CC_AD5_S.03	48,6	41,4	2012,0	19,88	9,9	3,112	2,731	2,018	B	90	
CC_AD5_S.04	49,85	41,65	2076,3	18,82	9,1	3,892	3,101	2,033	A	110	
CC_AD5_S.05	48,15	41,45	1995,8	14,39	7,2	2,748	2,213	1,397	A	85	
CC_AD5_S.06	49,65	41,7	2070,4	15,76	7,6	2,125	2,128	1,057	A	75	
CC_AD5_S.07	49,8	40,85	2034,3	15,13	7,4	2,234	2,925	2,15	A	76	
CC_AD5_S.08	51	40,8	2080,8	15,55	7,5	2,53	2,449	1,965	A	83	
CC_AD5_S.09	50,4	40,75	2053,8	18,13	8,8	2,539	3,489	2,721	A	83	
CC_AD5_S.10	49,3	42,3	2085,4	15,85	7,6	3,081	3,184	2,453	A	98	
CC_AD1_R.01	49,45	42,9	2121,4	10,67	5,0	2,689	1,361	0,89	B	81	
CC_AD1_R.02	49	41,75	2045,8	17,96	8,8	2,47	1,858	1,136	B	84	
CC_AD1_R.03	48,2	42,9	2067,8	7,44	3,6	2,896	1,624	1,287	B	86	
CC_AD1_R.04	48,35	43,6	2108,1	8,68	4,1	2,367	2,081	1,197	B	76	
CC_AD1_R.05	49,25	43,2	2127,6	13,15	6,2	3,381	2,459	1,905	B	121	
CC_AD1_R.06	50,3	41	2062,3	12,49	6,1	2,026	1,359	0,669	A	73	

Tipo probeta	Madera de chopo ciclos de envejecimiento										Notas
	L (mm)	h (mm)	A (mm ²)	Fuerza (kN)	Tensión (Mpa)	LVDT 1 (mm)	LVDT 2 (mm)	LVDT 3 (mm)	Fallo	Time (seg)	
CC_AD1_R.07	48,15	39,85	1918,8	10,16	5,3	1,791	1,475	0,761	A	58	
CC_AD1_R.08	49,25	43,65	2149,8	11,62	5,4	2,026	1,344	1,148	A	71	
CC_AD1_R.09	49,6	42,95	2130,3	9,26	4,3	2,233	1,466	0,886	B	69	
CC_AD1_R.10	49,4	44,5	2198,3	8,96	4,1	1,757	1,248	0,969	B	55	
CC_AD1_R.11	49,25	40,95	2016,8	8,73	4,3	0,615	1,009	0,615	A	50	
CC_AD1_R.12	49,35	41,1	2028,3	14,43	7,1	2,386	1,317	0,162	A	80	
CC_AD1_R.13	49,7	40,2	1997,9	14,38	7,2	2,991	1,883	1,2	B	98	
CC_AD1_R.14	49,8	40,9	2036,8	15,54	7,6	2,303	1,632	1,251	A	74	
CC_AD1_R.15	48,9	43,2	2112,5	9,54	4,5	1,944	1,569	0,896	B	61	
CC_AD2_R.01	50	40,8	2040,0	15,09	7,4	2,924	2,013	1,467	A	94	
CC_AD2_R.02	49,8	40,15	1999,5	12,5	6,3	2,057	1,172	0,775	A	65	
CC_AD2_R.03	49,1	44,9	2204,6	15,87	7,2	2,201	1,715	1,285	B	68	
CC_AD2_R.04	49,7	41,65	2070,0	18,56	9,0	2,409	2,233	1,375	B	73	
CC_AD2_R.05	50,2	42,8	2148,6	12,09	5,6	2,435	1,986	1,232	A	75	
CC_AD2_R.06	49,55	41,9	2076,1	14,25	6,9	3,411	3,286	2,532	C	99	
CC_AD2_R.07	49,05	42,45	2082,2	13,47	6,5	2,833	2,779	1,823	B	88	
CC_AD2_R.08	50,2	39,6	1987,9	10,01	5,0	3,931	3,208	1,158	A	113	
CC_AD2_R.09	50,7	42	2129,4	12,09	5,7	2,54	1,445	1,294	A	74	
CC_AD2_R.10	48	42,8	2054,4	11,61	5,7	3,609	2,752	2,566	B	100	
CC_AD2_R.11	48,8	39,75	1939,8	16,93	8,7	3,124	2,841	1,767	B	100	
CC_AD2_R.12	49,9	41,9	2090,8	18,04	8,6	1,864	1,405	0,882	A	63	
CC_AD2_R.13	49	40,6	1989,4	12,17	6,1	1,876	1,553	0,946	A	59	
CC_AD2_R.14	49,95	43,1	2152,8	18,61	8,6	2,403	1,827	1,54	A	78	
CC_AD2_R.15	48,75	39,2	1911,0	9,19	4,8	4,108	3,436	3,057	C	115	
CC_AD3_R.01	49,7	42,43	2108,8	10,61	5,0	1,485	1,116	0,478	B	60	
CC_AD3_R.02	50,45	43,5	2194,6	6,3	2,9	0,478	0,519	0,501	C	33	
CC_AD3_R.03	51,25	44,15	2262,7	4,73	2,1	0,447	0,362	0,229	C	25	
CC_AD3_R.04	49,65	43,95	2182,1	9,22	4,2	0,832	1,074	0,548	B	55	
CC_AD3_R.05	48,4	41,65	2015,9	12,09	6,0	0,939	0,743	0,18	B	48	
CC_AD3_R.06	52	42,2	2194,4	17,02	7,8	1,102	0,711	0,093	C	56	
CC_AD3_R.07	51	42,45	2165,0	13,65	6,3	0,567	0,885	0,184	B	53	
CC_AD3_R.08	49,4	43,3	2139,0	19,92	9,3	1,414	1,026	0,153	A	63	
CC_AD3_R.09	51,5	41,95	2160,4	17,58	8,1	1,146	0,918	0,293	B	52	
CC_AD3_R.10	51,5	42,15	2170,7	9,49	4,4	1,059	1,163	0,839	B	54	
CC_AD3_R.11	50,65	41,8	2117,2	15,41	7,3	1,015	0,386	0,01	C	46	
CC_AD3_R.12	49,5	41,9	2074,1	14,04	6,8	3,086	2,613	1,628	B	108	
CC_AD3_R.13	50,85	42,7	2171,3	19,23	8,9	0,538	0,385	0,339	C	48	
CC_AD3_R.14	49,25	42,95	2115,3	14,78	7,0	0,984	0,926	0,727	B	45	
CC_AD3_R.15	51,5	41,5	2137,3	7,14	3,3	0,651	0,937	0,425	A	33	

B. Tracción perpendicular (pull-off)

Madera de chopo (12%HR)

Tabla 185. Datos ensayos a tracción perpendicular (pull-off) de madera chopo (12%HR).

Tipo probeta	Madera de chopo 12%HR										Notas	
	øExt (mm)	øInt (mm)	A (mm ²)	Fuerza (kN)	Tensión (Mpa)	LVDT1 (mm)	LVDT2 (mm)	LVDT3 (mm)	LVDT4 (mm)	Fallo		Time (seg)
PO_AD1_S.01	43,50	9,50	1415,3	3,4	2,4	2,4289	0,1902	0,0052	0,3312	A	167	
PO_AD1_S.02	43,38	9,87	1401,5	2,12	1,5	1,7632	0,0757	0,0302	0,0738	A	120	
PO_AD1_S.03	43,71	9,81	1425,0	3,78	2,7	3,7238	0,004	0,4078	0,0438	A	255	
PO_AD1_S.04	43,61	9,52	1422,5	3,96	2,8	4,7614	0,2041	0,3874	0,0302	A	320	
PO_AD1_S.05	44,18	9,50	1462,1	4,42	3,0	4,8493	0,2913	0,276	0,1264	A	333	
PO_AD1_S.06	43,61	10,59	1405,6	5,08	3,6	5,7001	0,0176	0,2831	0,4367	A	390	
PO_AD2_S.01	43,36	9,04	1412,4	4,21	3,0	4,0828	0,2384	0,0004	1,0248	A	275	
PO_AD2_S.02	44,39	9,33	1479,2	3,03	2,0	4,269	0,5664	0,4019	0,2196	A	293	
PO_AD2_S.03	42,80	9,09	1373,8	3,35	2,4	2,5316	0,1096	0,5181	0,5745	A	172	
PO_AD2_S.04	41,31	10,04	1261,1	3,93	3,1	3,7577	0,5724	1,0217	0,0691	A	254	

Tipo probeta	Madera de chopo 12%HR											Notas
	øExt (mm)	øInt (mm)	A (mm ²)	Fuerza (kN)	Tensión (Mpa)	LVDT1 (mm)	LVDT2 (mm)	LVDT3 (mm)	LVDT4 (mm)	Fallo	Time (seg)	
PO_AD2_S.05	43,26	9,74	1395,3	3,71	2,7	3,4425	0,0758	5,6938	0,5244	A	233	
PO_AD2_S.06	43,63	10,42	1409,8	4,06	2,9	2,9054	0,0653	0,4887	0,7586	A	197	
PO_AD3_S.01	43,22	9,81	1391,5	2,76	2,0	2,7338	0,3091	0,8765	0,0215	A	186	
PO_AD3_S.02	43,02	8,84	1392,2	3,57	2,6	1,9809	2,8681	0,7077	0,4077	A	137	
PO_AD3_S.03	43,38	9,41	1408,4	4,22	3,0	1,9781	0,7953	0,6819	0,563	A	137	
PO_AD3_S.04	43,40	9,50	1408,5	4,97	3,5	2,4582	0,72	1,0517	0,5972	A	168	
PO_AD3_S.05	43,40	9,50	1408,5	1,48	1,1	0,7043	0,1916	0,304	0,35	A	48	
PO_AD3_S.06	43,40	9,50	1408,5	3,52	2,5	1,4256	0,5251	0,2514	0,7072	A	98	
PO_AD1_R.01	44,8	9,50	1505,4	2,54	1,7	1,5305	0,2365	0,0042	0,3783	A	103	
PO_AD1_R.02	45,12	9,50	1528,0	3,07	2,0	1,7655	0,1365	0,1035	0,3244	A	122	
PO_AD1_R.03	43,27	9,91	1393,4	2,42	1,7	1,7238	0,4862	0,006	0,1282	A	118	
PO_AD1_R.04	43,43	10,29	1398,2	1,76	1,3	1,1368	0,1461	5,8024	0,0901	A	78	
PO_AD1_R.05	43,25	9,59	1396,9	2,25	1,6	1,5836	0,0017	0,4008	0,087	A	108	
PO_AD1_R.06	43,89	8,23	1459,7	3,97	2,7	3,0467	0	0,5785	0,053	A	209	
PO_AD2_R.01	43,01	8,79	1392,2	4,12	3,0	2,5538	0,0249	0,5007	0,2829	D	173	
PO_AD2_R.02	43,21	9,57	1394,5	4,7	3,4	4,6035	0,6898	0,3339	0,0631	A	314	
PO_AD2_R.03	43,32	9,64	1400,9	4,36	3,1	3,6915	0,8858	0,3828	0,1839	A	249	
PO_AD2_R.04	43,20	9,50	1394,9	2,45	1,8	2,7009	0,3485	0,1695	0,3295	A	186	
PO_AD2_R.05	43,68	9,06	1434,0	2,76	1,9	2,7591	0,0783	0,4578	0,5694	A	186	
PO_AD2_R.06	43,02	9,91	1376,4	3,72	2,7	3,4526	0,5468	0,61	0,055	A	236	
PO_AD3_R.01	43,01	9,43	1383,0	3,78	2,7	1,9899	0,2593	0,7715	0,0126	D	136	
PO_AD3_R.02	43,06	9,61	1383,7	3,95	2,9	3,6306	0,0758	0,3535	0,7366	D	329	
PO_AD3_R.03	43,07	9,42	1387,2	2,23	1,6	5,1981	0,6105	0,5696	5,9431	A	357	
PO_AD3_R.04	43,05	9,82	1379,8	<0,5	0,0					-	-	NULO
PO_AD3_R.05	43,00	9,50	1381,3	2,96	2,1	1,6777	0,4397	0,4739	0,1314	A	114	
PO_AD3_R.06	43,00	9,50	1381,3	2,83	2,0	1,4853	0,2416	0,3567	0,3145	A	102	

Madera de chopo (ciclo de envejecimiento)

Tabla 186. Datos ensayos a tracción perpendicular (pull-off) de madera chopo tras los ciclos de envejecimiento.

Tipo probeta	Madera de chopo ciclos de envejecimiento											Notas
	øExt (mm)	øInt (mm)	A (mm ²)	Fuerza (kN)	Tensión (Mpa)	LVDT1 (mm)	LVDT2 (mm)	LVDT3 (mm)	LVDT4 (mm)	Fallo	Time (seg)	
cc_PO_AD1_S.01	58,31	10,46	2584,5	9,19	3,6	8,732	0,2706	0,2697	0,9782	C	597	
cc_PO_AD1_S.02	58,12	9,59	2580,8	6,01	2,3	3,3721	0,4777	0,1753	0,0311	C	230	
cc_PO_AD1_S.03	59	11,5	2630,1	6,84	2,6	2,5168	0,1365	0,1035	0,3244	B	172	
cc_PO_AD1_S.04	59	10	2655,4	4,5	1,7	1,2507	0,004	0,4078	0,0438	B	86	
cc_PO_AD1_S.05	58,3	10,72	2579,2	6,34	2,5	5,2653	0,7869	0,075	0,1462	A	358	
cc_PO_AD1_S.06	53,5	12,84	2118,5	5,61	2,6	2,2444	0,6773	0,0076	0,6076	B	153	
cc_PO_AD2_S.01	59,5	10	2702,0	1,55	0,6	0,3785	0,038	0,0868	0,0501	-	26	NULO
cc_PO_AD2_S.02	59,5	10	2702,0	2,66	1,0	0,7532	0,1016	0,1282	0,1422	A	93	
cc_PO_AD2_S.03	59,67	11,06	2700,3	6,36	2,4	2,8008	0,1446	0,3297	0,466	C	198	
cc_PO_AD2_S.04	59,5	10	2702,0	3,87	1,4	0,9537	0,0756	0,4779	0,6685	A	67	
cc_PO_AD2_S.05	59,5	10	2702,0	4,4	1,6	1,1566	0,2231	0,3972	0,0411	A	77	
cc_PO_AD2_S.06	58,26	10,63	2577,1	6,31	2,4	2,3555	0,3815	0,4644	0,4154	A	163	
cc_PO_AD3_S.01	57,76	8,92	2557,8	4,31	1,7	0,9892	0,7833	0,6917	0,663	A	68	
cc_PO_AD3_S.02	57,27	10,58	2488,1	4,43	1,8	1,5555	0,195	0,8301	0,4147	A	107	
cc_PO_AD3_S.03	58,42	8,98	2617,1	4,21	1,6	1,5855	0,5011	0,391	0,3052	A	110	
cc_PO_AD3_S.04	58,5	9	2624,2	5,69	2,2	2,9464	0,355	0,489	0,432	A	204	
cc_PO_AD3_S.05	58,63	10,83	2607,7	4,17	1,6	0,9721	0,582	0,505	0,672	A	67	
cc_PO_AD3_S.06	58,66	9,91	2625,4	3,93	1,5	1,0969	0,468	0,366	0,425	C	101	
cc_PO_AD1_R.01	57,61	9,57	2534,7	7,47	2,9	2,4382	0,7319	0,5861	0,7702	B	169	
cc_PO_AD1_R.02	58,25	11,18	2566,7	6,17	2,4	3,001	0,5768	0,0868	1,0237	B	208	
cc_PO_AD1_R.03	59	10	2655,4	<0,5	0,0					-	-	NULO
cc_PO_AD1_R.04	59	10	2655,4	4,09	1,5	1,3291	0,2156	0,3698	0,3985	A	92	
cc_PO_AD1_R.05	59	10	2655,4	2,46	0,9	0,8641	0,1923	0,1467	0,3674	A	60	
cc_PO_AD1_R.06	59	10	2655,4	3,67	1,4	1,0724	0,2033	0,2516	0,4459	A	75	
cc_PO_AD2_R.01	58,5	10	2609,3	2,71	1,0	0,7294	0	0	0		50	NULO
cc_PO_AD2_R.02	58,5	10	2609,3	3,14	1,2	0,7769	0,2454	0,2596	0,3244	A	55	

Tipo probeta	øExt (mm)	øInt (mm)	A (mm ²)	Madera de chopo ciclos de envejecimiento								Fallo	Time (seg)	Notas
				Fuerza (kN)	Tensión (Mpa)	LVDT1 (mm)	LVDT2 (mm)	LVDT3 (mm)	LVDT4 (mm)					
cc_PO_AD2_R.03	58,5	10	2609,3	2,86	1,1	0,6603	0,2687	0,2169	0,2984	A	45	NULO		
cc_PO_AD2_R.04	58,5	10	2609,3	2,27	0,9	0,6638	-	-	-	-	-			
cc_PO_AD2_R.05	58,76	9,42	2642,1	6,01	2,3	2,2728	0,7675	0,3558	0,576	D	154			
cc_PO_AD2_R.06	58,25	10,09	2584,9	6,05	2,3	2,5647	0,5312	0,3566	0,831	D	176			
cc_PO_AD3_R.01	58,3	9,88	2592,8	7,4	2,9	3,7664	0,4754	0,3836	0,1187	B	262			
cc_PO_AD3_R.02	57,4	10,11	2507,4	5,88	2,3	2,4114	0,3511	1,4384	0,0939	B	168			
cc_PO_AD3_R.03	58,33	10,17	2591,0	6,05	2,3	1,8052	0,3185	0,2493	0,2907	A	126			
cc_PO_AD3_R.04	57,17	10,06	2487,5	7,67	3,1	4,509	0,0343	0,4486	0,7507	B	308			
cc_PO_AD3_R.05	58,1	10,38	2566,6	6,61	2,6	3,1977	0,6148	0,2705	0,1345	A	218			
cc_PO_AD3_R.06	58,53	11,88	2579,7	6,1	2,4	2,0258	0,902	0,5705	0,4255	A	140			

V. Ensayos flexión escala 1/25

A. Vigas dúo chopo

Tabla 187. Datos ensayos a flexión de vigas dúo de chopo escala reducida 1/25.

Tipo probeta	Vigas dúo de chopo escala 1/25												
	L (mm)	b (mm)	h (mm)	A (mm ²)	Fuerza Rotura (kN)	Carrera Total (mm)	Fuerza Defor. (kN)	LVDT (mm)	MOR (MPa)	MOEG (MPa)	Tiempo (seg)	Densidad (kg/m ³)	HR (%)
M.00.01	1200	40	60	2400	10,38	38,70	0,81	1,72	86,54	9.886,28	232	425,08	12
M.00.02	1200	40	60	2400	9,06	34,38	0,81	2,03	75,59	8.218,55	206	387,73	12
M.00.03	1200	40	60	2400	6,60	26,39	0,74	2,14	55,04	7.071,67	158	362,63	12
M.00.04	1200	40	60	2400	6,38	24,30	0,80	2,23	53,21	6.823,27	145	362,88	12
M.00.05	1200	40	60	2400	8,58	32,47	0,80	2,17	71,59	7.487,01	194	378,55	12
M.00.06	1200	40	60	2400	5,50	18,08	0,80	2,12	45,88	7.436,02	108	399,48	12
M.00.07	1200	40	60	2400	8,42	29,75	0,80	1,93	70,26	8.397,80	178	419,45	12
M.00.08	1200	40	60	2400	8,81	35,57	0,80	2,41	73,52	8.098,33	213	393,28	12
M.00.09	1200	40	60	2400	7,47	27,13	0,80	2,29	62,28	6.578,20	162	382,31	12
M.00.10	1200	40	60	2400	9,94	33,34	0,80	2,05	82,89	8.557,40	200	410,18	12
M.00.11	1200	40	60	2400	9,21	36,72	0,80	2,07	76,81	8.464,47	220	412,09	12
M.00.12	1200	40	60	2400	9,79	38,82	0,80	1,97	81,64	8.265,96	232	400,49	12
M.00.13	1200	40	60	2400	6,15	35,63	0,80	3,21	51,29	4.026,37	213	331,59	12
M.00.14	1200	40	60	2400	9,66	44,20	0,80	1,92	80,55	8.842,29	265	381,30	12
M.00.15	1200	40	60	2400	8,52	32,12	0,80	1,98	71,06	8.163,07	192	403,85	12
M.00.16	1200	40	60	2400	8,93	36,59	0,80	2,18	74,49	7.493,82	219	381,95	12
M.00.17	1200	40	60	2400	7,14	32,63	0,80	2,55	59,54	5.552,62	196	338,05	12
M.00.18	1200	40	60	2400	5,53	23,33	0,80	2,47	46,10	6.293,81	140	372,19	12
M.00.19	1200	40	60	2400	6,05	29,35	0,80	2,55	50,48	5.957,13	176	339,92	12
M.00.20	1200	40	60	2400	2,16	17,38	0,76	3,46	18,03	3.276,03	104	381,40	12
M.00.21	1200	40	60	2400	11,54	41,99	0,80	1,52	96,21	11.820,59	252	463,38	12
M.00.22	1200	40	60	2400	10,42	40,31	0,79	1,83	86,93	9.204,20	242	446,79	12
M.00.23	1200	40	60	2400	7,87	37,06	0,80	2,47	65,65	6.647,68	222	364,41	12
M.00.24	1200	40	60	2400	12,10	46,75	0,80	1,66	100,91	10.796,55	280	449,03	12
M.00.25	1200	40	60	2400	9,67	41,36	0,80	2,01	80,65	9.118,10	248	390,17	12
M.00.26	1200	40	60	2400	9,55	49,59	0,80	2,29	76,06	7.189,69	297	367,83	12
M.00.27	1200	40	60	2400	8,32	37,72	0,80	2,25	69,36	6.820,91	226	359,93	12
M.00.28	1200	40	60	2400	8,26	36,23	0,80	2,18	68,87	7.045,19	217	375,00	12
M.00.29	1200	40	60	2400	8,99	34,11	0,80	2,03	74,97	9.220,27	204	433,36	12
M.00.30	1200	40	60	2400	8,23	31,37	0,80	1,97	68,62	9.167,56	188	448,57	12
M.00.31	1200	40	60	2400	10,27	39,14	0,80	1,88	85,68	8.917,07	235	424,52	12
M.00.32	1200	40	60	2400	9,77	41,64	0,80	2,00	81,47	8.436,02	250	388,28	12
M.00.33	1200	40	60	2400	6,87	35,98	0,80	2,53	57,27	6.315,39	216	339,95	12
M.00.34	1200	40	60	2400	9,30	39,20	0,80	2,11	77,61	7.889,48	235	410,51	12
M.00.35	1200	40	60	2400	9,76	38,02	0,80	2,01	81,38	8.927,60	228	391,60	12
M.00.36	1200	40	60	2400	8,58	38,23	0,80	2,18	71,54	8.154,13	229	377,59	12
M.00.37	1200	40	60	2400	8,08	33,95	0,80	2,21	67,43	7.021,54	203	379,02	12

11. ANEXOS

Tipo probeta	Vigas dúo de chopo escala 1/25												
	L (mm)	b (mm)	h (mm)	A (mm ²)	Fuerza Rotura (kN)	Carrera Total (mm)	Fuerza Defor. (kN)	LVDT (mm)	MOR (MPa)	MOEG (MPa)	Tiempo (seg)	Densidad (kg/m ³)	HR (%)
M.00.38	1200	40	60	2400	8,25	37,45	0,80	2,32	68,79	6.995,80	225	393,49	12
M.00.39	1200	40	60	2400	7,91	30,99	0,81	2,28	66,00	7.170,75	185	355,51	12
M.00.40	1200	40	60	2400	4,85	19,33	0,80	2,42	40,46	6.219,13	115	362,97	12
M.00.41	1200	40	60	2400	3,87	27,72	0,80	2,30	32,30	7.059,61	166	411,71	12
M.00.42	1200	40	60	2400	8,93	36,87	0,80	1,76	74,46	8.937,64	221	400,94	12
M.00.43	1200	40	60	2400	8,98	29,11	0,80	2,05	74,87	8.635,07	174	395,07	12
M.00.44	1200	40	60	2400	6,73	24,73	0,80	2,19	56,15	7.600,75	148	426,87	12
M.00.45	1200	40	60	2400	7,17	23,60	0,81	2,01	59,82	8.614,04	141	386,00	12
M.00.46	1200	40	60	2400	7,17	23,60	0,81	2,01	78,01	10.044,23	141	479,70	12
M.00.47	1200	40	60	2400	11,55	40,85	0,80	1,65	96,30	10.666,16	245	444,93	12
M.00.48	1200	40	60	2400	9,00	32,59	0,81	1,90	75,09	9.413,57	195	434,72	12
M.00.49	1200	40	60	2400	8,79	27,82	0,80	1,98	73,31	8.909,18	166	414,32	12
M.00.50	1200	40	60	2400	6,88	26,93	0,80	2,35	57,40	6.626,68	161	355,96	12
M.00.51	1200	40	60	2400	12,10	39,78	0,80	1,75	100,93	10.288,09	238	434,16	12
M.00.52	1200	40	60	2400	9,75	45,83	0,82	2,07	81,36	8.407,38	275	421,62	12
M.00.53	1200	40	60	2400	7,40	32,04	0,80	2,81	61,70	5.628,46	192	343,94	12
M.00.54	1200	40	60	2400	5,15	22,30	0,80	2,87	42,95	5.070,47	133	412,54	12
M.00.55	1200	40	60	2400	5,98	21,23	0,80	2,33	49,88	7.068,39	127	372,08	12
M.00.56	1200	40	60	2400	3,26	17,58	0,80	2,70	27,20	5.212,33	105	480,19	12
M.00.57	1200	40	60	2400	4,36	15,67	0,81	2,22	36,34	7.234,13	93	394,08	12
M.00.58	1200	40	60	2400	6,71	32,12	0,81	2,71	56,01	5.494,54	192	404,05	12
M.00.59	1200	40	60	2400	9,47	38,01	0,80	2,11	78,96	8.218,12	227	391,82	12
M.00.60	1200	40	60	2400	8,49	29,46	0,80	2,00	70,79	7.753,36	176	379,64	12
M.00.61	1200	40	60	2400	6,53	24,22	0,81	2,34	54,43	6.837,14	145	370,39	12
M.00.62	1200	40	60	2400	7,20	27,08	0,81	2,50	60,09	6.550,71	162	358,04	12
M.00.63	1200	40	60	2400	4,99	21,67	0,80	2,63	41,62	6.073,93	130	390,02	12
M.00.64	1200	40	60	2400	4,67	16,81	0,81	2,52	38,95	6.928,26	100	398,80	12
M.00.65	1200	40	60	2400	12,36	39,80	0,79	1,64	103,05	11.181,41	238	487,96	12
M.00.66	1200	40	60	2400	6,44	24,98	0,80	2,38	53,75	6.651,30	149	358,73	12
M.00.67	1200	40	60	2400	8,60	35,57	0,80	2,45	71,70	6.723,33	213	394,14	12
M.00.68	1200	40	60	2400	8,20	34,42	0,80	2,55	68,40	6.629,46	206	374,64	12
M.00.69	1200	40	60	2400	9,53	34,21	0,81	1,72	79,49	10.567,44	205	485,29	12
M.00.70	1200	40	60	2400	7,86	30,04	0,82	2,34	65,52	7.072,91	180	424,80	12
M.00.71	1200	40	60	2400	7,06	25,81	0,80	2,41	58,87	6.820,97	154	373,39	12
M.00.72	1200	40	60	2400	9,65	28,83	0,80	1,87	80,45	9.283,48	172	396,84	12
M.00.73	1200	40	60	2400	8,10	26,60	0,80	2,18	67,54	8.157,90	159	390,45	12
M.00.74	1200	40	60	2400	9,20	38,79	0,80	2,12	76,78	7.832,11	232	362,58	12
M.00.75	1200	40	60	2400	7,08	27,96	0,80	2,19	59,08	7.570,83	167	367,52	12
M.00.76	1200	40	60	2400	10,07	43,92	0,80	1,56	84,02	9.151,35	263	406,92	12
M.00.77	1200	40	60	2400	5,96	23,64	0,84	2,47	49,69	6.348,52	141	358,77	12
M.00.78	1200	40	60	2400	7,73	22,50	0,80	1,88	64,46	9.384,35	134	402,93	12
M.00.79	1200	40	60	2400	8,88	36,34	0,80	2,39	74,05	7.307,44	218	380,04	12
DT.00.01	1200	40	60	2400	8,14	32,48	0,80	2,55	67,80	6.476,10	195	384,37	12
DT.00.02	1200	40	60	2400	9,11	58,53	0,80	2,14	75,90	8.010,80	351	416,11	12
DT.00.03	1200	40	60	2400	10,74	34,36	0,80	2,51	89,50	7.235,20	206	460,21	12
DT.00.04	1200	40	60	2400	7,24	49,11	0,82	1,84	60,30	10.223,20	295	378,89	12
DT.00.05	1200	40	60	2400	8,17	38,94	0,80	2,64	68,10	6.360,00	234	395,94	12
DT.00.06	1200	40	60	2400	9,08	32,36	0,80	2,10	75,70	8.408,00	194	461,53	12
DT.00.07	1200	40	60	2400	6,59	56,44	0,80	2,06	54,90	8.428,90	339	379,31	12
DT.00.08	1200	40	60	2400	8,90	42,75	0,80	2,22	74,20	7.462,10	350	381,15	12
DT.00.09	1200	40	60	2400	4,55	31,27	0,80	2,27	37,90	7.864,00	188	432,79	12
DT.00.10	1200	40	60	2400	10,46	41,02	0,80	2,31	87,20	7.718,70	246	360,06	12
DT.00.11	1200	40	60	2400	9,49	30,40	0,80	2,03	79,10	8.878,40	183	443,20	12
DT.00.12	1200	40	60	2400	8,28	49,47	0,80	1,97	69,00	8.999,30	312	386,63	12
DT.00.13	1200	40	60	2400	7,09	61,53	0,81	2,28	59,10	7.605,40	369	359,56	12
DT.00.14	1200	40	60	2400	8,80	31,99	0,80	2,35	73,30	7.379,30	192	433,44	12
DT.00.15	1200	40	60	2400	9,36	44,85	0,80	2,10	78,00	8.275,20	269	348,23	12
DT.00.16	1200	40	60	2400	11,03	39,67	0,80	2,09	91,90	8.932,60	312	469,97	12
DT.00.17	1200	40	60	2400	8,34	40,29	0,80	1,88	69,50	9.673,90	242	393,10	12
DT.00.18	1200	40	60	2400	12,04	51,74	0,80	2,45	100,30	6.971,30	311	395,47	12

Tipo probeta	Vigas dúo de chopo escala 1/25												
	L (mm)	b (mm)	h (mm)	A (mm ²)	Fuerza Rotura (kN)	Carrera Total (mm)	Fuerza Defor. (kN)	LVDT (mm)	MOR (MPa)	MOEG (MPa)	Tiempo (seg)	Densidad (kg/m ³)	HR (%)
DT.00.19	1200	40	60	2400	9,20	39,74	0,80	2,29	76,70	7.812,20	239	327,04	12
DT.00.20	1200	40	60	2400	5,60	36,38	0,80	2,18	46,70	8.027,70	218	368,69	12
DT.00.21	1200	40	60	2400	8,39	32,06	0,80	2,66	69,90	6.186,50	193	401,31	12
DT.00.22	1200	40	60	2400	6,08	51,04	0,80	2,08	50,70	8.009,50	307	405,93	12
DT.00.23	1200	40	60	2400	8,18	40,57	0,80	2,08	68,20	8.571,80	244	420,25	12
DT.00.24	1200	40	60	2400	10,18	48,77	0,80	2,21	84,80	7.939,00	293	388,80	12
DT.00.25	1200	40	60	2400	6,16	27,85	0,80	2,66	51,30	6.176,50	167	440,07	12
DT.00.26	1200	40	60	2400	7,78	72,47	0,80	2,90	64,80	5.713,30	435	386,73	12
DT.00.27	1200	40	60	2400	8,70	45,86	0,80	2,54	72,50	6.749,00	275	342,02	12
DT.00.28	1200	40	60	2400	6,56	36,09	0,82	2,44	54,70	7.197,00	217	474,61	12
DT.00.29	1200	40	60	2400	6,50	23,49	0,80	2,39	54,20	7.121,90	141	441,42	12
DT.00.30	1200	40	60	2400	8,87	59,25	0,80	2,39	73,90	7.015,20	356	425,74	12
DT.00.31	1200	40	60	2400	9,22	31,77	0,80	2,75	76,80	5.784,00	191	438,09	12
DT.00.32	1200	40	60	2400	9,04	31,66	0,80	2,11	75,30	8.149,90	190	423,37	12
DT.00.33	1200	40	60	2400	5,18	44,93	0,80	2,08	43,20	7.974,60	269	390,83	12
DT.00.34	1200	40	60	2400	10,66	47,14	0,80	2,26	88,80	7.599,50	283	433,26	12
DT.00.35	1200	40	60	2400	8,24	35,12	0,80	2,58	68,70	6.846,20	168	369,92	12
DT.00.36	1200	40	60	2400	10,12	47,11	0,80	2,06	84,30	8.039,70	283	430,09	12
DT.00.37	1200	40	60	2400	8,32	37,12	0,80	2,27	69,30	7.350,10	223	402,26	12
DT.00.38	1200	40	60	2400	8,47	49,45	0,80	2,16	70,60	8.387,30	297	455,39	12
DT.00.39	1200	40	60	2400	9,05	34,64	0,80	1,97	75,40	8.511,10	208	387,35	12
DT.00.40	1200	40	60	2400	7,21	44,19	0,80	2,24	60,10	8.030,10	265	436,85	12
DT.00.41	1200	40	60	2400	10,88	36,26	0,80	2,09	90,70	7.856,40	218	435,17	12
DT.00.42	1200	40	60	2400	7,78	39,67	0,80	1,96	64,80	8.882,70	238	365,39	12
DT.00.43	1200	40	60	2400	8,59	52,70	0,80	2,16	71,60	7.906,40	330	419,33	12
DT.00.44	1200	40	60	2400	9,77	41,95	0,80	2,06	81,40	8.704,50	252	435,13	12
DT.00.45	1200	40	60	2400	7,62	46,33	0,80	1,80	63,50	9.851,40	278	392,24	12
DT.00.46	1200	40	60	2400	8,90	40,88	0,82	2,38	74,20	7.272,60	245	408,58	12
DT.00.47	1200	40	60	2400	9,86	44,21	0,80	1,99	82,20	8.307,20	265	440,81	12
DT.00.48	1200	40	60	2400	10,14	52,81	0,81	1,92	84,50	9.821,20	317	403,99	12
DT.00.49	1200	40	60	2400	8,88	35,55	0,80	1,90	74,00	10.980,00	213	364,33	12
DT.00.50	1200	40	60	2400	5,17	41,31	0,80	2,35	43,10	7.639,50	248	342,16	12
DT.00.51	1200	40	60	2400	7,36	30,24	0,80	2,36	61,30	7.628,90	182	325,23	12
DT.00.52	1200	40	60	2400	8,94	47,02	0,80	2,11	74,50	8.025,40	282	454,14	12
DT.00.53	1200	40	60	2400	6,84	42,74	0,80	2,23	57,00	7.783,90	257	411,09	12
DT.00.54	1200	40	60	2400	8,46	49,51	0,80	2,63	70,50	6.346,90	297	418,56	12
DT.00.55	1200	40	60	2400	7,63	36,21	0,80	2,22	63,60	7.741,60	224	406,89	12
DT.00.56	1200	40	60	2400	6,10	48,50	0,80	2,28	50,80	7.711,20	291	319,48	12
DT.00.57	1200	40	60	2400	8,15	44,20	0,80	2,34	67,90	7.494,60	265	332,93	12
DT.00.58	1200	40	60	2400	5,69	49,10	0,82	1,98	47,40	9.364,80	295	359,42	12
DT.00.59	1200	40	60	2400	9,14	63,86	0,80	2,44	76,20	7.157,80	383	425,26	12
DT.00.60	1200	40	60	2400	9,30	59,75	0,80	2,70	77,50	5.740,80	359	488,40	12
DT.00.61	1200	40	60	2400	8,99	35,07	0,80	2,28	74,90	7.818,80	210	411,91	12
DT.00.62	1200	40	60	2400	6,37	39,53	0,80	2,67	53,10	6.156,20	239	377,35	12
DT.00.63	1200	40	60	2400	8,48	43,28	0,80	2,33	70,70	7.188,20	260	372,18	12
DT.00.64	1200	40	60	2400	8,86	24,29	0,80	2,37	73,80	7.271,60	146	447,13	12
DT.00.65	1200	40	60	2400	8,41	47,40	0,80	2,13	70,10	8.810,90	285	411,58	12
DT.00.66	1200	40	60	2400	9,31	47,88	0,80	2,46	77,60	6.875,00	288	415,09	12
DT.00.67	1200	40	60	2400	8,22	52,06	0,80	1,98	68,50	9.219,20	297	398,37	12
DT.00.68	1200	40	60	2400	7,84	28,10	0,80	2,13	65,30	7.994,60	169	398,55	12
DT.00.69	1200	40	60	2400	8,02	32,26	0,79	2,52	66,80	6.417,40	194	348,12	12
DT.00.70	1200	40	60	2400	8,06	39,90	0,80	2,41	67,20	7.063,20	239	419,84	12
DT.00.71	1200	40	60	2400	8,94	40,54	0,80	2,34	74,50	7.355,90	244	409,00	12
DT.00.72	1200	40	60	2400	7,94	64,10	0,80	2,38	66,20	7.488,40	386	451,60	12
DT.00.73	1200	40	60	2400	7,04	45,74	0,80	1,84	58,70	9.659,60	275	333,28	12
DT.00.74	1200	40	60	2400	9,58	44,26	0,81	2,46	79,80	7.243,70	266	415,74	12
DT.00.75	1200	40	60	2400	10,60	51,98	0,80	2,01	88,30	8.946,70	238	412,23	12
DT.00.76	1200	40	60	2400	8,02	37,06	0,80	2,08	66,80	7.921,30	222	342,10	12
DT.00.77	1200	40	60	2400	8,69	35,39	0,80	2,30	72,40	7.374,40	213	387,73	12
DT.00.78	1200	40	60	2400	8,29	39,34	0,80	2,02	69,10	8.632,60	236	417,28	12

11. ANEXOS

Tipo probeta	Vigas dúo de chopo escala 1/25												
	L (mm)	b (mm)	h (mm)	A (mm ²)	Fuerza Rotura (kN)	Carrera Total (mm)	Fuerza Defor. (kN)	LVDT (mm)	MOR (MPa)	MOEG (MPa)	Tiempo (seg)	Densidad (kg/m ³)	HR (%)
DT.00.79	1200	40	60	2400	8,54	69,82	0,80	2,39	71,20	7.100,20	419	411,11	12
DT.00.80	1200	40	60	2400	8,04	34,90	0,81	2,12	67,00	7.883,80	209	418,92	12
DT.00.81	1200	40	60	2400	9,05	48,04	0,80	2,02	75,40	8.731,40	289	412,21	12
DT.00.82	1200	40	60	2400	7,78	47,83	0,80	2,36	64,80	7.176,00	287	416,37	12
DT.00.83	1200	40	60	2400	8,23	42,52	0,81	2,00	68,60	8.153,10	255	414,85	12
L.01.001	1200	40	60	2400	9,01	43,14	0,80	2,32	75,19	7.718,40	258	393,99	12
L.01.002	1200	40	60	2400	8,40	28,69	0,80	2,04	70,11	8.675,08	172	452,08	12
L.01.003	1200	40	60	2400	11,24	45,51	0,81	1,70	93,72	10.980,67	273	476,67	12
L.01.004	1200	40	60	2400	10,18	46,69	0,80	2,01	84,92	8.961,55	280	483,26	12
L.01.005	1200	40	60	2400	8,43	34,47	0,80	2,09	70,28	8.382,09	206	410,81	12
L.01.006	1200	40	60	2400	8,36	24,82	0,80	1,78	69,72	10.262,77	148	465,97	12
L.01.007	1200	40	60	2400	9,95	43,41	0,80	1,90	83,03	9.374,30	260	439,92	12
L.01.008	1200	40	60	2400	8,30	37,98	0,80	2,18	69,25	7.828,76	228	404,20	12
L.01.009	1200	40	60	2400	10,45	49,76	0,80	1,94	87,14	9.555,34	298	447,20	12
L.01.010	1200	40	60	2400	7,62	35,09	0,80	2,11	63,59	8.514,18	210	419,35	12
L.01.011	1200	40	60	2400	10,24	92,27	0,80	2,57	85,42	6.331,97	553	466,22	12
L.01.012	1200	40	60	2400	6,91	28,70	0,80	2,42	57,63	7.313,62	172	484,44	12
L.01.013	1200	40	60	2400	8,29	39,07	0,80	2,11	69,15	7.894,94	234	416,21	12
L.01.014	1200	40	60	2400	7,97	38,86	0,80	2,33	66,51	7.116,34	233	436,29	12
L.01.015	1200	40	60	2400	7,24	38,89	0,80	2,51	60,38	6.214,50	233	386,80	12
L.01.016	1200	40	60	2400	8,18	39,31	0,80	2,29	68,27	7.751,78	236	403,64	12
L.01.017	1200	40	60	2400	7,94	23,65	0,80	1,68	66,22	10.814,01	142	511,66	12
L.01.018	1200	40	60	2400	9,07	48,59	0,80	2,47	75,66	6.673,43	291	495,74	12
L.01.019	1200	40	60	2400	9,77	52,21	0,80	2,07	81,53	9.077,92	313	512,76	12
L.01.020	1200	40	60	2400	9,36	42,20	0,80	2,07	78,07	8.961,25	253	433,39	12
L.01.021	1200	40	60	2400	10,27	58,62	0,80	1,93	85,67	9.342,79	352	449,80	12
L.01.022	1200	40	60	2400	8,92	47,49	0,80	2,09	74,44	8.737,07	285	408,77	12
L.01.023	1200	40	60	2400	10,21	53,30	0,80	2,05	85,15	8.890,54	320	507,99	12
L.01.024	1200	40	60	2400	8,76	36,82	0,80	1,92	73,06	9.321,66	221	418,03	12
L.01.025	1200	40	60	2400	8,80	44,13	0,80	2,10	73,43	8.356,05	265	415,03	12
L.01.026	1200	40	60	2400	8,87	43,66	0,80	2,14	73,99	9.029,80	262	455,30	12
L.01.027	1200	40	60	2400	9,53	43,30	0,80	2,06	79,51	8.624,19	260	489,96	12
L.01.028	1200	40	60	2400	8,79	35,29	0,80	1,98	73,30	8.874,07	212	442,79	12
L.01.029	1200	40	60	2400	8,57	61,18	0,80	2,06	71,52	8.492,09	367	449,04	12
L.01.030	1200	40	60	2400	7,28	41,68	0,80	2,02	60,73	8.521,49	250	434,49	12
L.01.031	1200	40	60	2400	13,99	58,91	0,80	1,52	116,72	12.229,77	353	555,27	12
L.01.032	1200	40	60	2400	9,54	45,81	0,80	1,97	79,55	9.456,84	275	465,75	12
L.01.033	1200	40	60	2400	10,62	45,06	0,80	1,92	88,59	9.592,78	270	522,56	12
L.01.034	1200	40	60	2400	7,62	44,62	0,80	2,39	63,55	7.196,41	268	401,86	12
L.01.035	1200	40	60	2400	8,44	43,22	0,80	1,97	70,41	8.945,72	259	426,98	12
L.01.036	1200	40	60	2400	6,89	27,47	0,80	2,13	57,48	8.208,26	165	425,52	12
L.01.037	1200	40	60	2400	8,67	41,67	0,80	1,97	72,30	9.331,25	250	407,88	12
L.01.038	1200	40	60	2400	10,02	55,50	0,80	2,07	83,60	9.497,79	333	442,94	12
L.01.039	1200	40	60	2400	9,68	48,24	0,80	2,07	80,73	8.697,46	289	473,24	12
L.01.040	1200	40	60	2400	10,67	55,61	0,80	1,85	89,00	10.232,41	334	480,56	12
L.01.041	1200	40	60	2400	7,03	38,55	0,80	2,80	58,66	5.902,39	231	393,11	12
L.01.042	1200	40	60	2400	9,74	38,83	0,74	1,84	81,27	9.348,25	233	530,34	12
L.01.043	1200	40	60	2400	9,36	38,59	0,73	1,75	78,04	9.064,84	231	459,40	12
L.01.044	1200	40	60	2400	8,69	40,62	0,80	1,89	72,45	9.882,21	244	481,26	12
L.01.045	1200	40	60	2400	10,06	58,62	0,80	1,83	83,90	9.880,52	351	491,27	12
L.01.046	1200	40	60	2400	11,89	54,36	0,80	1,67	99,19	10.543,00	326	481,44	12
L.01.047	1200	40	60	2400	7,95	44,46	0,80	2,08	66,31	8.537,29	267	442,07	12
L.01.048	1200	40	60	2400	10,28	41,24	0,80	1,96	85,77	9.109,68	247	448,12	12
L.01.049	1200	40	60	2400	8,34	45,04	0,80	2,00	69,54	7.315,58	270	424,63	12
L.01.050	1200	40	60	2400	8,86	34,19	0,80	2,10	73,94	8.718,18	205	431,04	12
L.01.051	1200	40	60	2400	9,70	36,28	0,80	2,05	80,89	8.889,08	217	479,90	12
L.01.052	1200	40	60	2400	7,11	35,09	0,80	2,60	59,27	6.268,38	210	395,22	12
L.01.053	1200	40	60	2400	10,59	53,92	0,80	1,71	88,35	10.792,30	323	486,19	12
L.01.054	1200	40	60	2400	10,93	47,73	0,80	1,97	91,19	9.306,00	286	497,33	12
L.01.055	1200	40	60	2400	10,44	48,69	0,80	1,97	87,15	8.591,08	292	469,63	12

Tipo probeta	Vigas dúo de chopo escala 1/25												
	L (mm)	b (mm)	h (mm)	A (mm ²)	Fuerza Rotura (kN)	Carrera Total (mm)	Fuerza Defor. (kN)	LVDT (mm)	MOR (MPa)	MOEG (MPa)	Tiempo (seg)	Densidad (kg/m ³)	HR (%)
L.01.056	1200	40	60	2400	9,00	43,55	0,80	2,27	75,09	7.697,81	261	408,20	12
L.01.057	1200	40	60	2400	12,26	48,77	0,80	1,68	102,24	10.536,51	292	536,50	12
L.01.058	1200	40	60	2400	7,73	40,75	0,80	2,54	64,49	6.040,22	244	428,60	12
L.01.059	1200	40	60	2400	10,09	60,92	0,80	2,01	84,14	8.994,48	365	530,68	12
L.01.060	1200	40	60	2400	8,61	33,20	0,80	2,00	71,80	8.853,62	199	419,94	12
L.01.061	1200	40	60	2400	9,91	42,75	0,80	2,11	82,67	8.384,59	256	504,84	12
L.01.062	1200	40	60	2400	10,49	31,26	0,83	1,53	87,47	11.939,08	187	553,06	12
L.01.063	1200	40	60	2400	9,26	41,30	0,81	1,99	77,28	9.110,66	247	455,48	12
L.01.064	1200	40	60	2400	7,80	33,31	0,80	2,01	65,09	8.910,99	199	467,72	12
L.01.065	1200	40	60	2400	9,14	44,48	0,81	1,93	76,20	9.622,03	266	447,06	12
L.01.066	1200	40	60	2400	9,54	40,80	0,81	2,04	79,59	8.650,62	244	434,27	12
L.01.067	1200	40	60	2400	5,34	20,18	0,80	2,39	44,56	7.251,63	121	465,82	12
L.01.068	1200	40	60	2400	9,33	39,29	0,80	1,88	77,84	9.889,96	235	415,60	12
L.01.069	1200	40	60	2400	8,03	32,96	0,81	2,31	66,99	8.379,81	197	411,36	12
L.01.070	1200	40	60	2400	9,54	32,30	0,84	1,92	79,59	9.366,16	193	456,83	12
L.01.071	1200	40	60	2400	7,48	30,16	0,80	2,30	62,36	7.392,52	180	397,94	12
L.01.072	1200	40	60	2400	6,55	24,97	0,80	2,35	54,64	7.109,51	149	407,76	12
L.01.073	1200	40	60	2400	9,29	40,73	0,81	2,02	77,51	8.848,19	244	427,30	12
L.01.074	1200	40	60	2400	11,99	37,99	0,81	1,56	100,02	11.920,36	227	538,08	12
L.01.075	1200	40	60	2400	10,05	35,26	0,81	1,71	83,87	10.494,62	211	449,16	12
L.01.076	1200	40	60	2400	7,96	37,87	0,80	2,35	66,39	7.377,13	227	448,37	12
L.01.077	1200	40	60	2400	11,82	43,29	0,80	1,70	105,81	10.453,35	259	528,11	12
L.01.078	1200	40	60	2400	7,62	36,30	0,80	2,54	63,53	6.563,86	218	396,96	12
L.01.079	1200	40	60	2400	9,15	30,36	1,12	1,69	76,34	11.595,73	182	452,21	12
L.01.080	1200	40	60	2400	8,65	32,16	0,80	1,86	72,18	10.388,72	192	441,62	12
L.01.081	1200	40	60	2400	10,32	38,13	0,81	1,89	86,10	9.686,90	228	450,86	12
L.01.082	1200	40	60	2400	9,68	37,02	0,80	1,78	80,74	9.999,57	222	470,84	12
L.01.083	1200	40	60	2400	8,48	29,55	0,80	1,99	70,74	8.968,25	177	514,54	12
L.01.084	1200	40	60	2400	11,77	46,65	0,81	1,97	98,18	9.566,23	279	525,96	12
L.01.085	1200	40	60	2400	11,86	47,92	0,80	1,89	98,90	9.591,89	287	562,33	12
L.01.086	1200	40	60	2400	7,79	32,79	0,80	1,97	64,96	9.156,97	196	441,87	12
L.01.087	1200	40	60	2400	8,85	33,93	0,80	1,95	73,85	8.210,56	203	458,94	12
L.01.088	1200	40	60	2400	9,92	39,66	0,81	1,85	81,79	9.499,34	237	458,69	12
L.01.089	1200	40	60	2400	9,54	28,52	0,80	1,75	79,60	10.999,76	171	546,46	12
L.01.090	1200	40	60	2400	10,24	35,46	0,80	1,76	85,37	10.513,09	212	485,27	12
L.01.091	1200	40	60	2400	7,79	38,02	0,80	2,40	65,00	6.822,81	228	426,92	12
L.01.092	1200	40	60	2400	8,04	29,79	0,80	2,20	67,08	8.129,83	178	457,99	12
L.01.093	1200	40	60	2400	11,04	41,94	0,82	1,74	92,06	10.487,83	251	487,24	12
L.01.094	1200	40	60	2400	10,38	45,83	0,80	1,96	86,60	9.361,52	274	475,09	12
L.01.095	1200	40	60	2400	10,00	46,14	0,80	1,97	83,43	9.114,48	276	445,73	12
L.01.096	1200	40	60	2400	11,73	46,55	0,80	1,61	97,83	11.549,23	279	517,87	12
L.01.097	1200	40	60	2400	8,65	32,26	0,80	1,94	72,11	8.994,67	193	531,94	12
L.01.098	1200	40	60	2400	7,80	32,13	0,80	2,13	65,05	7.898,43	192	437,64	12
L.01.099	1200	40	60	2400	5,31	23,81	0,81	2,55	44,33	6.348,26	142	419,43	12
L.01.100	1200	40	60	2400	7,55	39,07	0,82	2,08	62,99	8.638,02	234	417,38	12
L.01.101	1200	40	60	2400	9,24	28,90	0,80	1,81	77,03	9.745,34	173	485,64	12
L.01.102	1200	40	60	2400	9,69	42,65	0,81	2,32	80,85	7.153,12	255	443,86	12
L.01.103	1200	40	60	2400	9,92	38,35	0,80	1,97	82,71	8.749,83	230	446,09	12
L.01.104	1200	40	60	2400	8,75	30,55	0,80	1,99	73,01	8.468,24	183	552,98	12
L.01.105	1200	40	60	2400	9,45	37,94	0,81	2,00	78,78	8.704,35	227	486,54	12
L.01.106	1200	40	60	2400	11,55	40,95	0,80	1,66	96,31	10.813,32	245	498,33	12
L.01.107	1200	40	60	2400	10,62	35,63	0,80	1,80	88,57	10.184,91	213	513,73	12
L.01.108	1200	40	60	2400	8,63	37,65	0,83	2,21	72,00	8.042,33	225	418,36	12
L.01.109	1200	40	60	2400	10,56	42,51	0,80	1,91	88,08	8.626,68	255	452,51	12
F.01.001	1200	40	60	2400	9,65	30,85	0,82	2,17	80,5200	10.246,45	185	459,41	12
F.01.002	1200	40	60	2400	12,02	47,56	0,79	1,78	100,2800	10.241,99	285	473,67	12
F.01.003	1200	40	60	2400	9,84	43,30	0,81	2,11	82,0800	7.873,99	260	417,50	12
F.01.004	1200	40	60	2400	6,23	23,90	0,81	2,39	51,9500	6.787,70	143	376,63	12
F.01.005	1200	40	60	2400	10,04	35,67	0,80	1,93	83,7400	9.410,87	214	435,61	12
F.01.006	1200	40	60	2400	8,88	36,67	0,80	1,97	74,0600	8.558,52	220	441,15	12

11. ANEXOS

Tipo probeta	Vigas dúo de chopo escala 1/25												
	L (mm)	b (mm)	h (mm)	A (mm ²)	Fuerza Rotura (kN)	Carrera Total (mm)	Fuerza Defor. (kN)	LVDT (mm)	MOR (MPa)	MOEG (MPa)	Tiempo (seg)	Densidad (kg/m ³)	HR (%)
F.01.007	1200	40	60	2400	8,60	33,62	0,80	2,06	71,7700	8.731,28	202	427,53	12
F.01.008	1200	40	60	2400	8,58	38,56	0,80	2,34	71,5400	7.631,20	231	461,11	12
F.01.009	1200	40	60	2400	8,77	33,66	0,81	2,05	73,1900	8.804,88	202	463,94	12
F.01.010	1200	40	60	2400	8,85	32,00	0,82	2,02	73,8500	8.976,06	192	420,63	12
F.01.011	1200	40	60	2400	10,01	37,38	0,80	1,92	83,5000	9.952,40	224	446,70	12
F.01.012	1200	40	60	2400	8,73	31,54	0,80	2,25	72,7900	8.315,46	189	454,69	12
F.01.013	1200	40	60	2400	8,91	32,66	0,83	1,92	74,2900	9.239,26	196	431,17	12
F.01.014	1200	40	60	2400	6,88	30,33	0,80	2,43	57,4000	5.380,21	182	381,12	12
F.01.015	1200	40	60	2400	8,26	36,97	0,80	2,18	68,8800	7.853,19	222	384,07	12
F.01.016	1200	40	60	2400	8,78	34,77	0,83	1,87	73,2300	9.933,08	209	457,25	12
F.01.017	1200	40	60	2400	8,65	23,86	0,80	1,87	72,1800	10.148,01	143	483,34	12
F.01.018	1200	40	60	2400	9,72	33,47	0,80	1,87	81,0500	9.812,13	201	478,20	12
F.01.019	1200	40	60	2400	9,03	39,35	0,80	2,02	75,3300	8.609,90	236	424,32	12
F.01.020	1200	40	60	2400	8,73	37,54	0,81	2,10	72,8500	8.365,94	225	445,59	12
F.01.021	1200	40	60	2400	8,12	34,58	0,80	1,88	67,7000	9.798,11	207	427,40	12
F.01.022	1200	40	60	2400	8,32	34,60	0,81	1,93	74,3100	8.934,48	208	462,97	12
F.01.023	1200	40	60	2400	11,71	50,94	0,81	1,57	97,6800	12.089,26	306	536,52	12
F.01.024	1200	40	60	2400	9,04	38,82	0,80	2,09	75,3800	8.226,14	233	463,23	12
F.01.025	1200	40	60	2400	9,67	36,60	0,81	1,90	80,6200	9.898,54	220	453,22	12
F.01.026	1200	40	60	2400	10,99	47,39	0,80	1,78	91,7100	10.378,15	284	461,16	12
F.01.027	1200	40	60	2400	8,09	27,80	0,86	1,92	67,4600	9.135,20	167	448,83	12
F.01.028	1200	40	60	2400	10,85	40,89	0,84	1,70	90,4600	11.068,24	245	498,24	12
F.01.029	1200	40	60	2400	8,39	31,88	0,81	2,09	70,0000	8.400,80	191	461,48	12
F.01.030	1200	40	60	2400	5,78	20,50	0,80	2,19	48,2000	8.127,00	123	445,19	12
F.01.031	1200	40	60	2400	10,53	39,27	0,80	1,88	87,8000	10.279,71	236	504,03	12
F.01.032	1200	40	60	2400	8,36	32,68	0,81	2,08	69,7200	8.867,84	196	463,91	12
F.01.033	1200	40	60	2400	10,99	34,05	0,80	1,63	91,6300	11.619,37	204	479,69	12
F.01.034	1200	40	60	2400	9,44	38,72	0,80	2,01	78,7100	9.166,89	232	422,27	12
F.01.035	1200	40	60	2400	10,90	40,94	0,81	1,85	90,9000	10.010,56	246	519,63	12
F.01.036	1200	40	60	2400	7,51	29,09	0,80	2,12	62,6600	8.312,12	174	393,88	12
F.01.037	1200	40	60	2400	10,59	42,81	0,80	1,91	88,3200	9.370,10	257	430,71	12
F.01.038	1200	40	60	2400	9,90	37,54	0,86	2,08	82,6100	8.353,81	225	446,95	12
F.01.039	1200	40	60	2400	10,57	34,34	0,80	1,80	88,1400	10.384,69	206	480,87	12
F.01.040	1200	40	60	2400	10,35	39,06	0,81	1,91	86,3500	9.276,89	234	507,21	12
F.01.041	1200	40	60	2400	8,14	28,39	0,80	1,95	67,9200	9.054,49	170	456,74	12
F.01.042	1200	40	60	2400	7,84	25,88	0,81	2,07	65,4100	8.637,79	155	445,20	12
F.01.043	1200	40	60	2400	8,48	27,86	0,85	1,82	70,7500	10.213,69	167	463,43	12
F.01.044	1200	40	60	2400	10,36	42,11	0,83	1,95	86,4400	9.589,98	253	441,87	12
F.01.045	1200	40	60	2400	7,42	30,79	0,82	2,43	61,9100	6.923,61	185	390,92	12
F.01.046	1200	40	60	2400	7,19	25,53	0,80	2,06	59,9300	9.075,64	153	435,49	12
F.01.047	1200	40	60	2400	11,20	40,31	0,80	1,82	93,4200	10.408,67	242	486,55	12
F.01.048	1200	40	60	2400	7,85	30,98	0,80	2,01	65,4800	9.261,02	186	429,53	12
F.01.049	1200	40	60	2400	9,28	30,70	0,80	1,86	77,3900	10.025,15	184	436,94	12
F.01.050	1200	40	60	2400	9,11	31,34	0,80	2,02	75,9500	9.040,79	188	429,11	12
F.01.051	1200	40	60	2400	9,86	37,86	0,80	1,98	82,2600	9.588,11	227	435,45	12
F.01.052	1200	40	60	2400	9,92	38,23	0,80	1,85	82,7800	10.200,72	229	434,03	12
F.01.053	1200	40	60	2400	10,09	39,07	0,80	1,96	84,1800	9.479,30	234	436,70	12
F.01.054	1200	40	60	2400	9,73	38,11	0,80	2,10	81,1800	8.438,96	229	446,62	12
F.01.055	1200	40	60	2400	11,70	36,92	0,82	1,83	97,6300	10.769,94	222	526,60	12
F.01.056	1200	40	60	2400	7,79	30,29	0,80	2,15	64,9900	8.235,65	182	458,73	12
F.01.057	1200	40	60	2400	9,27	34,34	0,80	1,91	77,3300	9.713,25	206	460,69	12
F.01.058	1200	40	60	2400	12,57	57,69	0,82	1,72	104,8100	10.838,95	346	515,59	12
F.01.059	1200	40	60	2400	12,14	47,21	0,83	1,68	101,2300	11.439,02	283	498,82	12
F.01.060	1200	40	60	2400	7,75	37,77	0,80	2,36	64,6400	7.145,94	227	385,70	12
F.01.061	1200	40	60	2400	8,68	34,54	0,80	2,01	72,4000	8.734,53	207	411,35	12
F.01.062	1200	40	60	2400	11,70	42,53	0,90	1,72	97,6100	10.831,04	255	495,08	12
F.01.063	1200	40	60	2400	10,25	35,16	0,80	1,81	85,4800	10.189,15	211	465,79	12
F.01.064	1200	40	60	2400	7,09	30,29	0,85	2,30	59,1700	8.453,33	182	395,92	12
F.01.065	1200	40	60	2400	8,15	34,15	0,81	2,29	67,9800	7.337,36	205	455,45	12
F.01.066	1200	40	60	2400	7,35	29,02	0,84	2,36	61,3300	7.167,82	174	397,32	12

Tipo probeta	Vigas dúo de chopo escala 1/25												
	L (mm)	b (mm)	h (mm)	A (mm ²)	Fuerza Rotura (kN)	Carrera Total (mm)	Fuerza Defor. (kN)	LVDT (mm)	MOR (MPa)	MOEG (MPa)	Tiempo (seg)	Densidad (kg/m ³)	HR (%)
F.01.067	1200	40	60	2400	9,83	35,50	0,85	1,75	81,9600	10.360,43	213	473,49	12
F.01.068	1200	40	60	2400	9,02	59,60	0,80	2,54	75,2500	6.546,44	358	443,93	12
F.01.069	1200	40	60	2400	9,24	36,74	0,81	1,97	77,0500	9.059,93	220	407,81	12
F.01.070	1200	40	60	2400	8,08	28,75	0,81	2,09	67,4100	8.814,54	172	428,53	12
F.01.071	1200	40	60	2400	9,29	36,98	0,81	2,02	77,5000	8.906,90	222	471,97	12
F.01.072	1200	40	60	2400	10,75	38,60	0,80	1,71	89,6700	11.002,05	232	466,54	12
F.01.073	1200	40	60	2400	9,95	40,49	0,81	1,82	83,0000	9.725,81	243	444,86	12
F.01.074	1200	40	60	2400	11,20	44,80	0,81	1,84	93,4400	9.646,91	269	505,96	12
F.01.075	1200	40	60	2400	9,56	30,72	0,80	1,85	79,7200	9.687,32	185	471,60	12
F.01.076	1200	40	60	2400	11,07	52,71	0,81	1,71	92,3400	10.717,43	316	451,36	12
F.01.077	1200	40	60	2400	8,06	31,59	0,81	1,95	67,2400	9.238,12	190	434,58	12
F.01.078	1200	40	60	2400	8,07	29,76	0,82	2,01	67,2700	8.688,34	179	433,87	12
F.01.079	1200	40	60	2400	8,40	36,20	0,80	2,00	70,0300	8.518,01	217	416,96	12
F.01.080	1200	40	60	2400	10,07	46,68	0,81	1,83	84,0200	10.173,59	280	427,84	12
F.01.081	1200	40	60	2400	5,09	17,06	0,80	2,20	42,4600	7.905,27	102	435,42	12
F.01.082	1200	40	60	2400	8,47	37,69	0,80	2,09	70,6700	8.472,25	226	416,68	12
F.01.083	1200	40	60	2400	7,85	34,94	0,80	2,25	65,4800	7.445,83	210	382,10	12
F.01.084	1200	40	60	2400	7,95	29,98	0,82	1,99	66,2700	8.608,97	180	454,34	12
F.01.085	1200	40	60	2400	8,11	46,37	0,81	2,48	67,6700	6.383,82	278	469,80	12
F.01.086	1200	40	60	2400	11,37	40,47	0,80	1,79	94,8100	10.405,73	243	470,23	12
F.01.087	1200	40	60	2400	9,44	33,11	0,80	1,90	78,7100	9.158,33	199	457,49	12
F.01.088	1200	40	60	2400	8,83	31,04	0,86	2,13	73,6600	8.297,84	186	484,55	12
F.01.089	1200	40	60	2400	9,18	30,02	0,80	1,91	76,5300	9.521,07	180	473,33	12
F.01.090	1200	40	60	2400	8,79	25,81	1,07	1,84	73,2800	9.946,28	155	466,38	12
F.01.091	1200	40	60	2400	6,38	21,55	0,80	2,27	53,2500	7.594,35	130	474,06	12
F.01.092	1200	40	60	2400	10,32	41,22	0,80	2,09	86,0400	9.454,97	247	499,28	12
F.01.093	1200	40	60	2400	9,46	34,30	0,80	2,06	78,9000	8.772,18	206	447,53	12
F.01.094	1200	40	60	2400	8,11	35,57	0,80	1,95	67,6300	9.352,38	214	493,48	12
F.01.095	1200	40	60	2400	7,35	32,22	0,84	2,03	61,3400	8.515,83	193	456,77	12
F.01.096	1200	40	60	2400	8,32	27,72	0,81	2,08	69,4000	8.705,67	166	464,78	12
F.01.097	1200	40	60	2400	7,82	32,95	0,81	2,03	65,1900	8.918,83	198	449,22	12
F.01.098	1200	40	60	2400	10,90	35,98	0,84	1,87	90,8800	9.726,38	216	484,13	12
F.01.099	1200	40	60	2400	6,85	25,34	0,83	2,02	57,1500	8.570,49	152	448,31	12
F.01.100	1200	40	60	2400	8,17	27,31	0,80	2,06	68,1400	8.451,42	164	431,64	12
F.01.101	1200	40	60	2400	8,24	35,42	0,80	2,36	68,7400	7.014,56	212	464,62	12
F.01.102	1200	40	60	2400	7,39	25,70	0,81	2,06	61,6400	8.339,38	154	463,56	12
F.01.103	1200	40	60	2400	9,96	40,75	0,80	2,09	83,1200	8.445,74	245	429,50	12
F.01.104	1200	40	60	2400	10,04	35,50	0,80	1,87	83,7800	9.585,12	213	444,47	12
F.01.105	1200	40	60	2400	10,83	40,19	0,86	1,94	90,3600	9.315,79	241	497,96	12
F.01.106	1200	40	60	2400	8,90	53,93	0,80	2,56	74,1900	6.361,51	324	486,10	12
F.01.107	1200	40	60	2400	7,30	30,10	0,86	2,44	60,9100	7.029,41	181	412,49	12
C.01.001	1200	40	60	2400	9,35	39,70	0,79	2,13	77,96	8.978,47	238	434,01	12
C.01.002	1200	40	60	2400	9,79	44,93	0,79	2,05	81,69	8.748,81	269	404,28	12
C.01.003	1200	40	60	2400	10,04	41,99	0,80	1,99	83,72	9.312,07	252	436,76	12
C.01.004	1200	40	60	2400	6,95	24,40	0,79	2,08	57,93	8.696,36	146	379,20	12
C.01.005	1200	40	60	2400	7,65	25,26	0,79	1,90	63,84	12.251,50	151	453,78	12
C.01.006	1200	40	60	2400	11,00	44,66	0,80	1,60	91,72	11.387,13	267	437,10	12
C.01.007	1200	40	60	2400	10,01	37,48	0,80	1,68	83,48	10.953,68	224	445,01	12
C.01.008	1200	40	60	2400	9,91	52,16	0,80	1,92	82,72	9.915,62	312	462,72	12
C.01.009	1200	40	60	2400	8,01	30,07	0,80	2,02	66,83	9.679,90	180	415,21	12
C.01.010	1200	40	60	2400	7,24	30,08	0,80	2,28	60,41	7.957,36	180	389,94	12
C.01.011	1200	40	60	2400	9,80	45,16	0,80	1,80	81,79	11.131,37	270	439,71	12
C.01.012	1200	40	60	2400	10,41	47,88	0,80	1,51	86,87	10.330,51	287	536,07	12
C.01.013	1200	40	60	2400	8,33	48,01	0,80	2,12	69,49	8.740,44	288	381,86	12
C.01.014	1200	40	60	2400	10,68	40,97	0,80	1,83	89,09	10.370,40	245	447,75	12
C.01.015	1200	40	60	2400	9,40	46,23	0,79	2,05	78,43	9.702,52	277	396,43	12
C.01.016	1200	40	60	2400	10,40	45,78	0,80	1,71	86,76	11.883,98	274	432,11	12
C.01.017	1200	40	60	2400	8,00	30,65	0,80	2,19	66,72	10.399,70	183	414,17	12
C.01.018	1200	40	60	2400	10,91	39,90	0,80	1,58	91,01	12.355,83	239	462,26	12
C.01.019	1200	40	60	2400	11,52	48,45	0,80	1,61	96,12	14.435,15	290	431,85	12

11. ANEXOS

Tipo probeta	Vigas dúo de chopo escala 1/25												
	L (mm)	b (mm)	h (mm)	A (mm ²)	Fuerza Rotura (kN)	Carrera Total (mm)	Fuerza Defor. (kN)	LVDT (mm)	MOR (MPa)	MOEG (MPa)	Tiempo (seg)	Densidad (kg/m ³)	HR (%)
C.01.020	1200	40	60	2400	8,74	38,92	0,79	2,08	72,87	8.882,51	233	381,53	12
C.01.021	1200	40	60	2400	10,84	49,91	0,79	1,71	90,45	11.889,22	299	460,30	12
C.01.022	1200	40	60	2400	7,94	32,97	0,80	2,32	66,24	7.895,02	197	383,16	12
C.01.023	1200	40	60	2400	7,44	34,66	0,79	2,26	62,05	7.972,44	208	377,32	12
C.01.024	1200	40	60	2400	9,31	35,85	0,80	1,90	77,63	10.340,34	215	428,07	12
C.01.025	1200	40	60	2400	10,28	40,58	0,80	1,52	85,79	11.584,78	243	448,49	12
C.01.026	1200	40	60	2400	9,69	41,90	0,80	1,96	80,85	9.299,01	251	406,44	12
C.01.027	1200	40	60	2400	9,21	33,83	0,80	1,81	76,83	11.262,68	203	440,04	12
C.01.028	1200	40	60	2400	9,07	44,60	0,79	2,10	75,64	8.642,14	267	400,28	12
C.01.029	1200	40	60	2400	10,05	43,73	0,80	1,77	83,82	10.930,70	262	430,24	12
C.01.030	1200	40	60	2400	10,27	40,47	0,79	1,81	85,71	10.841,68	242	435,42	12
C.01.031	1200	40	60	2400	8,47	33,83	0,80	2,27	70,66	8.371,61	202	375,36	12
C.01.032	1200	40	60	2400	11,68	49,08	0,79	1,60	98,05	13.393,28	294	483,14	12
C.01.033	1200	40	60	2400	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C.01.034	1200	40	60	2400	7,70	36,28	0,80	2,33	64,27	7.102,41	217	375,33	12
C.01.035	1200	40	60	2400	6,35	50,96	0,79	1,98	68,34	8.866,14	305	425,12	12
C.01.036	1200	40	60	2400	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C.01.037	1200	40	60	2400	7,42	36,43	0,78	2,22	61,90	6.638,42	218	360,64	12
C.01.038	1200	40	60	2400	10,55	40,18	0,80	1,68	88,04	10.981,02	240	462,75	12
C.01.039	1200	40	60	2400	7,88	35,44	0,80	2,26	65,74	8.183,94	212	365,35	12
C.01.040	1200	40	60	2400	8,36	37,53	0,80	2,35	69,76	7.410,01	225	385,64	12
C.01.041	1200	40	60	2400	7,13	26,92	0,80	2,18	59,51	8.265,42	161	380,06	12
C.01.042	1200	40	60	2400	10,59	51,86	0,81	1,79	88,36	10.846,04	313	437,30	12
C.01.043	1200	40	60	2400	7,18	26,68	0,80	2,09	59,93	8.697,66	160	414,56	12
C.01.044	1200	40	60	2400	9,54	43,59	0,83	2,13	79,60	8.605,68	261	405,41	12
C.01.045	1200	40	60	2400	9,34	42,31	0,79	2,02	77,94	9.109,18	253	434,36	12
C.01.046	1200	40	60	2400	9,53	41,75	0,80	1,79	79,45	10.102,11	250	485,30	12
C.01.047	1200	40	60	2400	6,09	24,11	0,80	2,30	50,83	6.503,22	144	387,90	12
C.01.048	1200	40	60	2400	10,11	35,92	0,80	1,60	84,32	10.488,55	215	442,44	12
C.01.049	1200	40	60	2400	9,92	37,92	0,80	1,89	82,72	10.202,60	235	424,12	12
C.01.050	1200	40	60	2400	8,62	31,38	0,80	1,80	71,88	10.600,49	188	428,77	12
C.01.051	1200	40	60	2400	8,88	41,35	0,80	2,11	74,08	9.457,38	248	448,07	12
C.01.052	1200	40	60	2400	10,40	50,66	0,80	1,79	86,73	10.831,89	303	455,68	12
C.01.053	1200	40	60	2400	6,68	34,57	0,73	2,12	56,38	9.463,04	207	379,37	12
C.01.054	1200	40	60	2400	6,54	25,60	0,81	2,32	55,00	7.466,26	153	391,05	12
C.01.055	1200	40	60	2400	8,36	32,10	0,80	1,98	69,76	8.977,11	192	440,70	12
C.01.056	1200	40	60	2400	10,12	41,06	0,80	1,85	84,39	10.682,57	246	435,80	12
C.01.057	1200	40	60	2400	8,74	41,59	0,80	2,04	72,91	9.373,87	249	419,69	12
C.01.058	1200	40	60	2400	10,82	48,36	0,79	1,56	90,26	13.110,41	290	450,09	12
C.01.059	1200	40	60	2400	9,16	43,16	0,81	1,96	76,39	9.373,69	258	422,81	12
C.01.060	1200	40	60	2400	10,02	42,57	0,80	1,96	83,96	8.581,21	255	425,91	12
C.01.061	1200	40	60	2400	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C.01.062	1200	40	60	2400	7,86	31,23	0,81	2,13	76,34	8.078,85	187	409,40	12
C.01.063	1200	40	60	2400	8,10	36,00	0,80	2,45	67,59	7.930,47	215	411,33	12
C.01.064	1200	40	60	2400	10,23	45,14	0,83	1,78	85,37	11.054,47	270	439,55	12
C.01.065	1200	40	60	2400	6,52	27,26	0,81	2,55	54,36	7.267,87	163	373,50	12
C.01.066	1200	40	60	2400	10,49	47,59	0,81	1,86	87,52	9.809,02	285	424,26	12
C.01.067	1200	40	60	2400	7,21	28,51	0,81	2,23	60,18	7.416,51	171	424,95	12
C.01.068	1200	40	60	2400	8,94	38,85	0,80	1,94	74,58	9.331,48	233	392,28	12
C.01.069	1200	40	60	2400	10,88	43,76	0,80	1,72	90,79	11.496,86	262	429,21	12
C.01.070	1200	40	60	2400	9,66	35,45	0,81	1,76	80,57	11.404,93	212	462,81	12
C.01.071	1200	40	60	2400	9,08	35,80	0,79	1,89	75,74	10.218,30	214	435,80	12
C.01.072	1200	40	60	2400	7,99	30,35	0,80	2,05	66,65	8.794,02	182	411,75	12
C.01.073	1200	40	60	2400	7,66	31,34	0,80	2,09	63,87	8.271,13	188	392,24	12
C.01.074	1200	40	60	2400	9,67	43,96	0,77	1,79	80,69	9.480,15	264	445,50	12
C.01.075	1200	40	60	2400	9,85	46,98	0,80	1,95	82,13	9.262,62	282	416,48	12
C.01.076	1200	40	60	2400	9,76	47,99	0,80	2,06	81,41	9.011,42	288	407,85	12
C.01.077	1200	40	60	2400	10,72	46,27	0,80	1,89	89,43	10.058,44	277	506,09	12
C.01.078	1200	40	60	2400	9,33	36,87	0,80	1,81	77,82	10.737,07	221	417,95	12
C.01.079	1200	40	60	2400	9,75	43,80	0,80	1,88	81,31	11.044,95	262	444,55	12

Tipo probeta	Vigas dúo de chopo escala 1/25												
	L (mm)	b (mm)	h (mm)	A (mm ²)	Fuerza Rotura (kN)	Carrera Total (mm)	Fuerza Defor. (kN)	LVDT (mm)	MOR (MPa)	MOEG (MPa)	Tiempo (seg)	Densidad (kg/m ³)	HR (%)
C.01.080	1200	40	60	2400	7,48	30,62	0,80	2,20	62,40	8.338,08	183	406,35	12
C.01.081	1200	40	60	2400	8,08	45,56	0,80	2,62	67,41	6.756,15	273	430,75	12
C.01.082	1200	40	60	2400	8,73	42,07	0,80	2,16	72,79	8.481,10	252	398,81	12
C.01.083	1200	40	60	2400	8,80	41,89	0,76	2,24	73,38	8.051,06	251	394,13	12
C.01.084	1200	40	60	2400	9,38	40,52	0,80	1,96	78,25	8.952,03	243	394,95	12
C.01.085	1200	40	60	2400	8,55	37,82	0,80	2,17	71,30	8.013,43	226	388,27	12
C.01.086	1200	40	60	2400	8,81	31,98	0,80	1,91	73,53	9.863,52	191	420,90	12
C.01.087	1200	40	60	2400	9,96	42,70	0,80	1,66	83,08	11.360,28	256	441,52	12
C.01.088	1200	40	60	2400	8,22	41,04	0,80	2,30	68,57	7.712,06	246	368,68	12
C.01.089	1200	40	60	2400	8,30	36,37	0,80	2,03	69,25	8.793,51	218	398,38	12
C.01.090	1200	40	60	2400	8,94	44,03	0,80	1,90	74,55	9.407,89	264	407,64	12
C.01.091	1200	40	60	2400	8,44	37,80	0,80	2,36	70,38	7.328,89	226	432,40	12
C.01.092	1200	40	60	2400	10,14	44,23	0,80	1,94	84,58	9.469,97	265	478,41	12
C.01.093	1200	40	60	2400	9,50	36,84	0,80	1,93	79,23	8.621,09	221	434,14	12
C.01.094	1200	40	60	2400	10,33	49,86	0,80	1,67	86,18	11.609,33	299	431,56	12
C.01.095	1200	40	60	2400	9,61	35,05	0,80	1,83	80,17	9.691,79	210	452,50	12
C.01.096	1200	40	60	2400	9,08	37,86	0,80	2,04	75,71	9.002,48	227	383,46	12
C.01.097	1200	40	60	2400	9,08	34,96	0,80	2,07	75,70	9.146,22	209	411,55	12
C.01.098	1200	40	60	2400	9,06	33,20	0,80	1,77	75,57	10.016,06	199	427,58	12
C.01.099	1200	40	60	2400	10,75	43,64	0,75	1,61	89,69	11.460,48	261	446,68	12
C.01.100	1200	40	60	2400	10,08	39,90	0,80	1,95	84,08	10.028,54	239	453,79	12

B. Vigas dúo de tablero de densidad media

Tabla 188. Datos ensayos a flexión de vigas dúo de tablero de fibras de densidad media (DM) escala reducida 1/25.

Tipo probeta	Vigas dúo de DM escala 1/25												
	L (mm)	b (mm)	h (mm)	A (mm ²)	Fuerza Rotura (kN)	Carrera Total (mm)	Fuerza Defor. (kN)	LVDT (mm)	MOR (MPa)	MOEG (MPa)	Tiempo (seg)	Densidad (kg/m ³)	HR (%)
DM.T.02.01	1200	40	60	2400	-	-	1,5	-	-	-	-	-	-
DM.T.02.02	1200	40	60	2400	3,84	36,38	1,5	12,52	28,83	3685,80	218	-	-
DM.T.02.03	1200	40	60	2400	3,79	35,87	1,5	12,51	28,46	3667,70	214	-	-
DM.T.02.04	1200	40	60	2400	3,74	34,23	1,5	12,21	28,04	3812,20	205	-	-
DM.T.02.05	1200	40	60	2400	3,69	33,41	1,5	12,26	27,71	3771,60	200	-	-
DM.T.02.06	1200	40	60	2400	3,84	34,99	1,5	12,16	28,80	3790,10	209	-	-
DM.T.02.07	1200	40	60	2400	3,70	31,76	1,5	12,10	27,78	3818,00	190	-	-
DM.T.02.08	1200	40	60	2400	3,81	34,81	1,5	12,36	28,57	3753,10	208	-	-
DM.T.02.09	1200	40	60	2400	3,59	32,79	1,5	12,67	26,94	3668,00	196	-	-
DM.T.02.10	1200	40	60	2400	3,57	32,22	1,5	12,53	26,80	3703,60	193	-	-
DM.T.02.11	1200	40	60	2400	3,77	36,75	1,5	13,86	28,26	3716,30	220	-	-
DM.T.02.12	1200	40	60	2400	3,89	38,31	1,5	12,49	29,16	3692,60	229	-	-
DM.T.02.13	1200	40	60	2400	3,72	31,28	1,5	12,15	27,88	3841,70	113	-	-
DM.T.02.14	1200	40	60	2400	3,60	31,35	1,5	12,45	27,02	3709,00	143	-	-
DM.T.02.15	1200	40	60	2400	3,67	31,18	1,5	12,19	27,49	3795,50	188	-	-
DM.T.02.16	1200	40	60	2400	3,91	34,35	1,5	12,23	29,31	3810,80	168	-	-
DM.T.02.17	1200	40	60	2400	3,55	31,85	1,5	12,17	26,63	3739,40	191	-	-
DM.T.02.18	1200	40	60	2400	3,81	33,05	1,5	11,95	28,57	3808,70	198	-	-
DM.T.02.19	1200	40	60	2400	3,70	33,38	1,5	12,38	27,76	3665,60	200	-	-
DM.T.02.20	1200	40	60	2400	3,56	30,74	1,5	12,10	26,72	3750,10	184	-	-
DM.T.02.21	1200	40	60	2400	3,62	32,88	1,5	12,36	27,17	3662,40	197	-	-
DM.RS.02.01	1200	40	60	2400	5,47	36,16	1,5	9,27	41,05	5108,90	216	-	-
DM.RS.02.02	1200	40	60	2400	5,41	37,23	1,5	9,26	40,60	5079,10	223	-	-
DM.RS.02.03	1200	40	60	2400	5,50	37,57	1,5	9,45	41,21	5070,10	225	-	-
DM.RS.02.04	1200	40	60	2400	5,21	33,63	1,5	8,97	39,10	5125,80	201	-	-
DM.RS.02.05	1200	40	60	2400	5,58	38,40	1,5	9,00	41,82	5120,60	230	-	-
DM.RS.02.06	1200	40	60	2400	5,29	35,21	1,5	9,26	39,68	5000,30	211	-	-
DM.RS.02.07	1200	40	60	2400	5,32	34,54	1,5	8,91	39,89	5129,00	207	-	-
DM.RS.02.08	1200	40	60	2400	5,37	34,56	1,5	8,80	40,25	5172,70	207	-	-
DM.RS.02.09	1200	40	60	2400	5,38	36,13	1,5	9,09	40,36	5005,00	216	-	-

Tipo probeta	Vigas dúo de DM escala 1/25												
	L (mm)	b (mm)	h (mm)	A (mm ²)	Fuerza Rotura (kN)	Carrera Total (mm)	Fuerza Deform. (kN)	LVDT (mm)	MOR (MPa)	MOEG (MPa)	Tiempo (seg)	Densidad (kg/m ³)	HR (%)
DM.RS.02.10	1200	40	60	2400	5,47	37,11	1,5	8,98	40,99	5079,90	222	-	-
DM.RS.02.11	1200	40	60	2400	5,44	36,33	1,5	9,01	40,82	5137,70	217	-	-
DM.RS.02.12	1200	40	60	2400	5,32	34,84	1,5	8,95	39,89	5176,00	208	-	-
DM.RS.02.13	1200	40	60	2400	5,44	36,60	1,5	9,42	40,81	4904,90	219	-	-
DM.RS.02.14	1200	40	60	2400	5,64	36,85	1,5	8,91	42,30	5095,50	220	-	-
DM.RS.02.15	1200	40	60	2400	5,07	33,47	1,5	9,14	38,03	5005,70	200	-	-
DM.RS.02.16	1200	40	60	2400	5,35	36,11	1,5	9,24	40,13	4951,90	216	-	-
DM.RS.02.17	1200	40	60	2400	5,32	36,60	1,5	9,46	39,88	4816,40	219	-	-
DM.RS.02.18	1200	40	60	2400	5,45	36,58	1,5	9,22	40,85	4923,50	219	-	-
DM.RS.02.19	1200	40	60	2400	5,15	34,76	1,5	9,62	38,62	4761,10	208	-	-
DM.RS.02.20	1200	40	60	2400	5,36	36,79	1,5	9,51	40,17	4840,20	220	-	-
DM.RS.02.21	1200	40	60	2400	4,93	34,21	1,5	9,29	36,95	4589,60	205	-	-
DM.RD.02.01	1200	40	60	2400	6,45	34,50	1,5	7,69	48,41	5532,30	206	-	-
DM.RD.02.02	1200	40	60	2400	6,72	36,12	1,5	7,77	50,40	6070,40	216	-	-
DM.RD.02.03	1200	40	60	2400	6,37	35,71	1,5	7,74	47,80	6103,10	214	-	-
DM.RD.02.04	1200	40	60	2400	6,80	36,70	1,5	7,34	50,99	6179,70	220	-	-
DM.RD.02.05	1200	40	60	2400	6,77	35,20	1,5	7,50	50,76	6189,90	211	-	-
DM.RD.02.06	1200	40	60	2400	6,53	34,50	1,5	7,62	48,97	6041,90	206	-	-
DM.RD.02.07	1200	40	60	2400	6,92	36,51	1,5	7,42	51,92	6205,60	218	-	-
DM.RD.02.08	1200	40	60	2400	6,23	32,65	1,5	7,27	46,70	6238,20	195	-	-
DM.RD.02.09	1200	40	60	2400	5,64	29,03	1,5	7,83	42,32	5907,20	174	-	-
DM.RD.02.10	1200	40	60	2400	6,56	35,12	1,5	7,54	49,17	6074,80	211	-	-
DM.RD.02.11	1200	40	60	2400	6,89	37,58	1,5	7,71	51,68	5966,80	225	-	-
DM.RD.02.12	1200	40	60	2400	6,63	36,32	1,5	7,92	49,70	5795,30	218	-	-
DM.RD.02.13	1200	40	60	2400	6,87	36,43	1,5	7,69	51,52	6020,70	218	-	-
DM.RD.02.14	1200	40	60	2400	6,71	35,62	1,5	7,65	50,36	6004,00	213	-	-
DM.RD.02.15	1200	40	60	2400	6,22	33,01	1,5	7,75	46,68	5934,60	197	-	-
DM.RD.02.16	1200	40	60	2400	6,53	34,89	1,5	7,81	48,96	5865,10	209	-	-
DM.RD.02.17	1200	40	60	2400	6,86	36,16	1,5	7,67	51,48	5944,30	217	-	-
DM.RD.02.18	1200	40	60	2400	6,35	34,15	1,5	7,76	47,60	5869,60	204	-	-
DM.RD.02.19	1200	40	60	2400	5,95	32,10	1,5	7,99	44,66	5737,50	192	-	-
DM.RD.02.20	1200	40	60	2400	6,17	33,24	1,5	7,96	46,24	5780,30	199	-	-
DM.RD.02.21	1200	40	60	2400	6,43	35,86	1,5	8,07	48,23	5671,40	215	-	-

VI. Ensayos flexión escala estructural (1/2)

A. Vigas dúo chopo

Tabla 189. Datos ensayos a flexión de vigas dúo de chopo escala estructural.

Tipo probeta	Vigas dúo de chopo escala 1/2												
	L (mm)	b (mm)	h (mm)	A (mm ²)	Fuerza Rotura (kN)	Carrera Total (mm)	Fuerza Deform. (kN)	LVDT (mm)	MOR (MPa)	MOEG ₀ (MPa)	Tiempo (seg)	MOEG ₁₂ (MPa)	HR (%)
CH.T.01	2500	84	124	10416	23,2	40,18	6,98	12,29	39,52	8152,56	185	7973,20	9,8
CH.T.02	2500	83	123	10209	21,09	40,47	6,95	13,86	36,95	7230,74	186	7107,81	10,3
CH.T.03	2500	83	123	10209	22,03	43,08	7,00	12,97	38,60	7747,25	198	7685,27	11,2
CH.T.04	2500	82	124	10168	17,50	34,33	6,97	14,13	30,54	7157,51	158	7107,41	11,3
CH.T.05	2500	84	124	10416	13,41	24,36	6,97	12,36	22,84	7751,27	112	7619,50	10,3
CH.T.06	2500	82	123	10086	23,93	62,99	7,00	12,99	42,44	7923,98	290	7900,20	11,7
CH.T.07	2500	84	124	10416	24,83	49,99	6,97	13,19	42,29	7576,64	230	7531,18	11,4
CH.T.08	2500	84	123	10332	20,88	31,68	6,98	10,70	36,15	9587,05	145	9472,00	10,8
CH.T.09	2500	83	122	10126	11,93	25,14	6,96	14,61	21,25	7104,55	115	7076,13	11,6
CH.T.10	2500	84	121	10164	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH.T.11	2500	82	122	10004	23,55	46,35	6,97	11,86	42,45	8637,23	213	8481,76	10,2
CH.T.12	2500	84	123	10332	28,8	48,22	6,97	11,33	49,86	8813,34	222	8760,46	11,4
CH.T.13	2500	84	122	10248	13,11	35,63	6,97	13,17	23,07	7730,97	154	7599,55	10,3

Tipo probeta	Vigas dúo de chopo escala 1/2												
	L	b	h	A	Fuerza Rotura	Carrera Total	Fuerza Defor.	LVDT	MOR	MOEG ₀	Tiempo	MOEG ₁₂	HR
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm ²)	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)	(MPa)	(MPa)	(seg)	(MPa)	(%)
CH.T.14	2500	83	122	10126	24,06	53,35	6,97	13,86	42,85	7516,83	245	7486,76	11,6
CH.T.15	2500	82	121	9922	11,40	24,64	6,98	15,47	20,89	7040,32	113	6927,67	10,4
CH.T.16	2500	83	122	10126	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH.T.17	2500	82	121	9922	19,75	37,62	6,97	13,26	36,19	8045,38	180	8077,56	12,4
CH.T.18	2500	82	123	10086	22,26	44,23	6,99	13,74	39,48	7501,09	212	7298,56	9,3
CH.T.19	2500	84	125	10500	29,78	55,11	6,96	11,65	49,92	8130,05	264	7991,84	10,3
CH.T.20	2500	85	120	10200	20,55	44,07	6,98	14,44	36,94	7362,73	211	7333,28	11,6
CH.T.21	2500	83	121	10043	17,83	35,97	6,95	15,08	32,28	7431,75	179	7290,55	10,1
CH.T.22	2500	84	123	10332	24,08	49,11	6,98	13,07	41,69	7604,79	245	7452,70	10,0
CH.T.23	2500	82	122	10004	30,78	54,49	6,98	11,08	55,48	9459,85	272	9308,49	10,4
CH.T.24	2500	82	122	10004	15,46	26,01	6,97	10,83	27,87	9769,27	129	9700,88	11,3
CH.T.25	2500	84	121	10164	20,53	41,78	6,98	14,03	36,72	7500,22	208	7387,72	10,5
CH.T.26	2500	82	123	10086	20,80	40,50	6,99	13,00	36,89	7842,56	202	7732,76	10,6
CH.T.27	2500	84	122	10248	15,01	25,39	6,98	11,92	26,41	8601,73	126	8532,92	11,2
CH.T.28	2500	83	123	10209	16,74	29,33	6,98	13,08	29,33	7655,58	167	7510,12	10,1
CH.T.29	2500	83	122	10126	18,91	37,31	6,98	14,32	33,68	7257,29	186	7199,23	11,2
CH.R1200.01	2500	83	133	11039	36,75	38,94	6,99	8,98	51,06	8465,58	271	8372,46	10,9
CH.R1200.02	2500	83	135	11205	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH.R1200.03	2500	83	139	11537	29,64	30,97	7,00	7,29	37,71	9491,57	140	9320,72	10,2
CH.R1200.04	2500	83	138	11454	40,88	54,23	6,98	7,04	52,76	9667,61	240	9628,94	11,6
CH.R1200.05	2500	83	139	11537	32,72	44,15	6,99	7,89	41,62	8802,15	197	8731,73	11,2
CH.R1200.06	2500	83	139	11537	32,81	10,56	7,00	7,69	41,74	8851,34	181	8638,91	9,6
CH.R1200.07	2500	83	139	11537	39,50	51,48	6,99	8,37	50,25	8352,57	229	8327,51	11,7
CH.R1200.08	2500	83	139	11537	31,26	32,26	7,00	8,06	39,77	8248,99	146	8026,27	9,3
CH.R1200.09	2500	83	138	11454	32,60	39,45	6,98	7,09	42,07	9795,76	177	9639,03	10,4
CH.R1200.10	2500	83	139	11537	39,88	52,43	7,00	7,52	50,73	9013,49	232	8860,26	10,3
CH.R1200.11	2500	83	139	11537	26,21	46,06	6,98	7,54	33,34	8959,02	206	8699,21	9,1
CH.R1200.12	2500	83	139	11537	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH.R1200.13	2500	83	139	11537	43,43	63,48	7,00	6,82	55,25	9980,96	279	9801,30	10,2
CH.R1200.14	2500	83	139	11537	29,56	37,25	7,00	7,92	37,60	8367,71	167	8150,14	9,4
CH.R1200.15	2500	83	139	11537	32,66	41,78	6,99	8,06	41,55	8339,14	187	8214,05	10,5
CH.R1200.16	2500	83	139	11537	34,45	45,11	7,00	7,31	43,82	9268,79	201	9222,44	11,5
CH.R1200.17	2500	83	138	11454	37,02	49,64	6,98	7,00	47,78	9751,94	220	9576,41	10,2
CH.R1200.18	2500	83	139	11537	32,76	38,10	6,99	6,88	41,67	9917,46	170	9679,44	9,6
CH.R1200.19	2500	83	138	11454	34,42	42,32	6,98	7,18	44,42	9646,13	189	9482,15	10,3
CH.R1200.20	2500	83	139	11537	32,38	37,60	7,00	7,81	41,19	8770,28	169	8559,80	9,6
CH.R1200.21	2500	83	138	11454	33,79	55,37	6,99	8,22	43,61	8242,04	246	8250,28	12,1
CH.R1200.22	2500	83	138	11454	34,04	47,75	6,99	7,38	43,93	9642,24	199	9622,96	11,8
CH.R1200.23	2500	83	139	11537	27,90	39,67	6,98	8,91	35,49	7814,94	179	7643,01	9,8
CH.R1200.24	2500	83	139	11537	32,84	43,06	6,99	7,64	41,78	8816,20	192	8648,69	10,1
CH.R1200.25	2500	83	139	11537	39,95	40,21	6,99	6,97	50,82	10138,51	180	9956,01	10,2
CH.R1200.26	2500	83	138	11454	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH.R1200.27	2500	83	139	11537	19,10	39,34	7,00	8,50	24,30	7945,89	177	7739,29	9,4
CH.R1200.28	2500	83	138	11454	39,81	46,87	6,98	7,16	51,38	9982,72	208	9753,11	9,7
CH.R1200.29	2500	83	139	11537	30,78	34,10	7,00	7,66	39,16	8899,52	154	8739,33	10,2
CH.R1200.30	2500	83	138	11454	26,91	33,16	6,98	7,03	34,73	9720,60	151	9526,19	10,0
CH.R2400.01	2500	81	140	11340	30,83	40,79	6,85	9,78	42,72	7817,78	182	7809,96	11,9
CH.R2400.02	2500	80	141	11280	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH.R2400.03	2500	81	138	11178	31,46	38,46	6,99	7,65	44,87	9556,38	170	9718,84	13,7
CH.R2400.04	2500	80	140	11200	37,17	41,94	6,85	7,00	52,15	9870,55	186	10146,93	14,8
CH.R2400.05	2500	80	138	11040	37,19	41,51	6,99	7,48	53,70	10217,14	183	10401,05	13,8
CH.R2400.06	2500	80	138	11040	31,76	38,61	6,90	7,96	45,86	9112,43	171	9322,01	14,3
CH.R2400.07	2500	80	139	11120	44,51	63,00	6,93	7,49	63,35	9579,00	276	9626,89	12,5
CH.R2400.08	2500	81	138	11178	28,91	45,03	6,92	7,86	41,23	9486,06	198	9552,46	12,7
CH.R2400.09	2500	81	141	11421	31,51	39,66	6,97	8,37	43,05	8314,02	176	8255,83	11,3
CH.R2400.10	2500	79	139	10981	36,70	47,56	6,98	8,81	52,90	8553,92	210	8716,45	13,9
CH.R2400.11	2500	78	139	10842	29,93	45,78	6,95	10,19	43,69	9052,62	203	9206,52	13,7
CH.R2400.12	2500	81	140	11340	38,21	57,29	6,98	7,79	52,95	9104,79	251	9214,05	13,2
CH.R2400.13	2500	81	138	11178	37,85	57,01	6,97	9,10	53,98	8248,07	251	8322,30	12,9
CH.R2400.14	2500	82	141	11562	32,88	43,95	6,96	7,80	44,37	8745,86	196	8798,34	12,6

11. ANEXOS

Tipo probeta	Vigas dúo de chopo escala 1/2				Fuerza Rotura (kN)	Carrera Total (mm)	Fuerza Deform. (kN)	LVDT (mm)	MOR (MPa)	MOEG ₀ (MPa)	Tiempo (seg)	MOEG ₁₂ (MPa)	HR (%)
	L (mm)	b (mm)	h (mm)	A (mm ²)									
CH.R2400.15	2500	81	140	11340	33,26	36,14	6,97	6,71	46,09	10460,84	160	10722,36	14,5
CH.R2400.16	2500	80	137	10960	24,05	27,64	6,98	6,82	35,24	11099,08	124	11254,47	13,4
CH.R2400.17	2500	84	140	11760	32,74	48,39	6,94	7,48	43,75	9031,61	213	9139,99	13,2
CH.R2400.18	2500	84	140	11760	35,62	45,33	6,96	8,55	47,60	8594,95	200	8629,33	12,4
CH.R2400.19	2500	82	140	11480	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH.R2400.20	2500	82	139	11398	38,83	62,48	6,95	6,77	53,92	10630,80	272	10705,22	12,7
CH.R2400.21	2500	84	140	11760	29,69	37,97	6,93	8,24	39,67	8199,76	169	8216,16	12,2
CH.R2400.22	2500	79	138	10902	27,47	41,03	6,99	10,35	40,17	8959,39	183	8905,64	11,4
CH.R2400.23	2500	86	141	12126	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH.R2400.24	2500	84	140	11760	28,01	37,30	6,92	8,78	37,55	7721,57	166	7775,62	12,7
CH.R2400.25	2500	83	142	11786	22,34	25,42	6,93	8,40	29,37	8424,01	115	8424,01	12,0
CH.R2400.26	2500	82	141	11562	30,14	41,25	6,93	9,08	40,67	7512,25	184	7527,27	12,2
CH.R2400.27	2500	85	142	12070	32,54	36,66	6,96	7,13	41,77	8863,09	163	9066,94	14,3
CH.R2400.28	2500	84	140	11760	44,57	58,40	6,96	6,48	59,56	10597,50	256	10788,25	13,8

B. Vigas dúo P. pinaster

Tabla 190. Datos ensayos a flexión de vigas dúo de pino pinaster escala estructural.

Tipo probeta	Vigas dúo de pino pinaster escala 1/2				Fuerza Rotura (kN)	Carrera Total (mm)	Fuerza Deform. (kN)	LVDT (mm)	MOR (MPa)	MOEG ₀ (MPa)	Tiempo (seg)	MOEG ₁₂ (MPa)	HR (%)
	L (mm)	b (mm)	h (mm)	A (mm ²)									
PP.T.01	2500	79	120	9480	23,47	41,55	6,97	12,24	45,39	9485	177	9209,74	9,1
PP.T.02	2500	80	118	9440	31,53	53,99	6,92	11,43	62,27	10447	231	10070,91	8,4
PP.T.03	2500	82	120	9840	25,72	34,73	6,97	8,65	47,92	12631	148	12403,64	10,2
PP.T.04	2500	79	120	9480	36,57	49,59	6,97	8,34	70,72	13629	212	13233,76	9,1
PP.T.05	2500	80	121	9680	16,37	22,96	6,95	9,68	30,75	11251	98	10969,73	9,5
PP.T.06	2500	81	119	9639	30,76	37,97	6,95	8,14	59,00	13454	162	12942,75	8,2
PP.T.07	2500	81	120	9720	15,71	25,38	6,97	11,76	29,63	9424	108	9292,46	10,6
PP.T.08	2500	80	120	9600	36,42	50,53	6,95	9,68	69,55	11013	216	10825,78	10,3
PP.T.09	2500	81	119	9639	28,07	67,20	6,99	15,35	53,84	7688	287	7472,54	9,2
PP.T.10	2500	83	120	9960	28,59	49,07	6,97	11,80	52,63	9332	210	9052,14	9,0
PP.T.11	2500	80	120	9600	28,42	51,54	6,98	12,35	54,27	9349	220	9171,17	10,1
PP.T.12	2500	80	121	9680	22,57	44,54	6,98	13,38	42,39	8051	190	7825,47	9,2
PP.T.13	2500	82	120	9840	40,59	57,39	6,96	9,10	75,63	12183	245	11829,69	9,1
PP.T.14	2500	81	120	9720	26,68	38,40	6,98	8,55	50,32	12574	164	12083,61	8,1
PP.T.15	2500	81	120	9720	47,00	59,67	6,99	8,40	88,65	13450	255	13207,90	10,2
PP.T.16	2500	80	120	9600	27,43	35,77	6,94	9,23	52,38	12412	153	12138,94	9,8
PP.T.17	2500	81	120	9720	31,24	38,96	6,98	8,84	58,92	12786	166	12440,78	9,3
PP.T.18	2500	82	120	9840	24,63	32,91	6,95	9,59	45,89	11828	140	11414,02	8,5
PP.T.19	2500	84	120	10080	22,01	40,03	6,98	13,20	40,03	8264	178	8131,48	10,4
PP.T.20	2500	81	119	9639	24,25	37,78	6,97	11,15	46,51	10584	161	10192,39	8,3
PP.T.21	2500	82	120	9840	21,05	29,02	6,96	9,82	39,22	11188	124	10762,86	8,2
PP.T.22	2500	81	119	9639	38,17	57,74	6,99	9,93	73,21	11378	256	11036,66	9,0
PP.T.23	2500	82	121	9922	36,54	56,26	6,99	10,37	66,96	10369	254	9964,61	8,1
PP.T.24	2500	80	118	9440	29,96	43,37	6,96	9,69	59,17	12049	192	11591,14	8,2
PP.T.25	2500	82	120	9840	19,31	28,83	6,98	10,47	35,98	10529	127	10107,84	8,0
PP.T.26	2500	80	118	9440	36,17	56,90	6,96	10,33	71,44	11434	262	11010,94	8,3
PP.T.27	2500	80	120	9600	29,09	50,45	6,96	11,71	55,55	9643	232	9362,87	9,1
PP.T.28	2500	82	119	9758	28,98	55,08	6,97	9,55	54,91	11939	253	11533,07	8,6
PP.R1200.01	2500	65	138	8970	47,10	57,73	7,01	7,49	77,62	12748	255	12837,24	12,7
PP.R1200.02	2500	66	138	9108	35,30	57,10	7,02	8,67	57,29	10320	253	10278,72	11,6
PP.R1200.03	2500	66	137	9042	30,69	43,54	7,00	7,57	50,54	11722	195	11733,72	12,1
PP.R1200.04	2500	65	138	8970	41,49	49,62	7,01	7,81	68,38	12091	220	11994,27	11,2
PP.R1200.05	2500	65	138	8970	37,49	52,55	7,00	8,94	61,78	10353	234	10425,47	12,7
PP.R1200.06	2500	66	138	9108	33,52	38,64	7,01	7,98	54,40	11882	173	11798,83	11,3
PP.R1200.07	2500	65	138	8970	36,94	45,68	7,00	7,81	60,88	11724	204	11407,45	9,3
PP.R1200.08	2500	65	138	8970	46,89	69,49	7,00	8,06	77,27	11351	306	11123,98	10,0

Tipo probeta	Vigas dúo de pino pinaster escala 1/2												
	L (mm)	b (mm)	h (mm)	A (mm ²)	Fuerza Rotura (kN)	Carrera Total (mm)	Fuerza Deform. (kN)	LVDT (mm)	MOR (MPa)	MOEG ₀ (MPa)	Tiempo (seg)	MOEG ₁₂ (MPa)	HR (%)
PP.R1200.09	2500	65	137	8905	35,33	43,38	7,00	7,93	59,08	11795	194	11806,80	12,1
PP.R1200.10	2500	65	138	8970	36,37	53,55	7,00	9,39	59,94	10061	239	10030,82	11,7
PP.R1200.11	2500	65	138	8970	44,99	62,14	7,00	7,90	74,14	11566	275	11461,91	11,1
PP.R1200.12	2500	65	137	8905	34,95	42,76	7,01	8,08	58,44	11462	191	11530,77	12,6
PP.R1200.13	2500	61	116	7076	29,38	40,31	7,00	8,82	48,42	10754	182	10614,20	10,7
PP.R1200.14	2500	60	116	6960	28,97	69,82	6,95	12,25	78,94	12804	348	12688,76	11,1
PP.R1200.15	2500	61	117	7137	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PP.R1200.16	2500	62	117	7254	25,55	70,76	6,96	15,19	66,23	10563	353	10362,30	10,1
PP.R1200.17	2500	61	116	7076	23,10	49,27	6,97	13,55	61,91	11903	246	11831,58	11,4
PP.R1200.18	2500	61	116	7076	27,08	56,88	6,98	13,04	72,58	12575	284	12612,73	12,3
PP.R1200.19	2500	66	138	9108	36,63	47,20	6,98	6,94	59,45	12850	210	12862,85	12,1
PP.R1200.20	2500	61	117	7137	30,64	92,06	6,95	13,38	80,73	12062	460	11856,95	10,3
PP.R1200.21	2500	61	117	7137	24,11	46,90	6,95	12,50	63,52	12987	234	12909,08	11,4
PP.R1200.22	2500	61	116	7076	20,20	51,32	6,98	15,48	54,14	10587	256	10438,78	10,6
PP.R1200.23	2500	61	116	7076	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PP.R1200.24	2500	60	116	6960	31,76	70,43	6,90	12,69	86,54	12781	351	12589,29	10,5
PP.R1200.25	2500	61	117	7137	22,50	61,47	6,97	15,50	59,28	10370	307	10235,19	10,7
PP.R1200.26	2500	65	138	8970	22,03	45,55	6,96	14,07	54,47	11434	227	11376,83	11,5
PP.R1200.27	2500	66	138	9108	46,53	67,77	6,87	7,12	75,52	13016	338	12794,73	10,3
PP.R2400.01	2500	79	140	11060	30,99	61,82	7,01	9,48	40,83	7575,80	308	7515,19	11,2
PP.R2400.02	2500	70	139	9730	20,79	41,87	7,00	12,81	31,36	6551,80	209	6610,77	12,9
PP.R2400.03	2500	80	139	11120	30,02	33,59	7,00	7,43	39,62	9839,90	167	9879,26	12,4
PP.R2400.04	2500	80	139	11120	28,10	57,46	7,01	10,75	37,09	6811,50	287	7118,02	16,5
PP.R2400.05	2500	69	139	9591	39,72	56,70	7,00	7,60	60,78	11182,00	283	11226,73	12,4
PP.R2400.06	2500	74	140	10360	30,76	37,82	7,01	7,35	43,26	10460,00	188	10794,72	15,2
PP.R2400.07	2500	74	139	10286	32,43	34,58	6,99	7,01	46,27	11171,00	172	11193,34	12,2
PP.R2400.08	2500	72	140	10080	27,25	39,37	7,00	9,61	39,39	8311,40	196	8602,30	15,5
PP.R2400.09	2500	70	140	9800	25,32	54,50	6,99	11,86	37,65	6829,40	272	7013,79	14,7
PP.R2400.10	2500	69	138	9522	23,22	50,09	7,01	13,76	36,05	6332,50	250	6319,84	11,8
PP.R2400.11	2500	68	140	9520	32,37	49,34	7,00	7,88	49,55	10465,00	246	10391,75	11,3
PP.R2400.12	2500	69	139	9591	31,73	63,12	6,99	8,42	48,55	10074,00	315	10114,30	12,4
PP.R2400.13	2500	73	139	10147	34,72	49,86	7,00	7,84	50,22	10012,00	249	9971,95	11,6
PP.R2400.14	2500	79	140	11060	28,99	39,96	7,00	8,28	38,19	8897,70	199	9004,47	13,2
PP.R2400.15	2500	68	140	9520	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PP.R2400.16	2500	69	139	9591	26,35	36,44	7,00	8,39	40,32	9997,00	181	10007,00	12,1
PP.R2400.17	2500	80	139	11120	32,41	47,27	7,00	8,69	42,77	8608,10	236	8763,05	13,8
PP.R2400.18	2500	80	139	11120	26,45	49,24	7,01	9,94	34,91	7369,40	246	7310,44	11,2
PP.R2400.19	2500	80	140	11200	36,01	64,55	7,00	9,37	46,85	7606,70	322	7667,55	12,8
PP.R2400.20	2500	80	140	11200	40,39	77,51	7,01	6,22	52,55	11704,00	387	12090,23	15,3
PP.R2400.21	2500	81	140	11340	27,07	66,09	7,00	10,03	34,78	6900,20	330	7183,11	16,1
PP.R2400.22	2500	80	140	11200	28,90	45,84	7,00	9,87	37,60	7240,70	229	7284,14	12,6
PP.R2400.23	2500	75	140	10500	23,37	27,83	7,01	8,11	32,43	9508,50	138	9489,48	11,8
PP.R2400.24	2500	74	139	10286	32,87	44,40	7,01	8,75	46,90	9078,40	222	8996,69	11,1
PP.R2400.25	2500	80	140	11200	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PP.R2400.26	2500	78	140	10920	21,64	35,08	7,00	10,32	28,88	7176,30	175	7305,47	13,8
PP.R2400.27	2500	73	140	10220	46,12	60,54	7,00	7,15	65,76	11623,00	302	12099,54	16,1
PP.R2400.28	2500	69	140	9660	27,34	46,94	7,00	10,32	41,24	7891,40	234	7859,83	11,6
PP.R2400.29	2500	78	140	10920	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PP.R2400.30	2500	73	140	10220	-	-	-	-	-	-	-	-	-

VII. Ensayos de fluencia

Tabla 191. Resumen de la evolución (semanal) de los ensayos de fluencia sobre vigas dúo testigo.

Testigo chopo	Etapas*	Carga (kN)	LVDT V1 (mm)	Inc. (%)	LVDT V2 (mm)	Inc. (%)	SG V1 (µm/m)	Inc. (%)	SG VR (µm/m)	Inc. (%)
Proceso de Carga	0	0	±0	-	±0	-	±0,005	-	±0,005	-
"	0-1	4	2,352	-	2,005	-	209,4	-	233,3	-

Testigo chopo	Etapas*	Carga (kN)	LVDT V1 (mm)	Inc. (%)	LVDT V2 (mm)	Inc. (%)	SG V1 (µm/m)	Inc. (%)	SG VR (µm/m)	Inc. (%)
"	1-2	4	2,389	-	2,115	-	213,5	-	236,8	-
"	2-3	6	3,506	-	3,051	-	314,7	-	354,4	-
"	3-4	4	2,650	-	2,383	-	231,3	-	261,4	-
"	4-5	8	4,571	-	4,180	-	412,2	-	476,4	-
"	5-6	8	4,673	-	4,305	-	419,5	-	488,8	-
"	6-7	10	5,600	-	5,227	-	509,4	-	599,8	-
LLENADO	7-10	10	5,600	-	5,227	-	509,4	-	599,8	-
Semana 1	"	"	6,118	8,47	5,667	7,76	559,4	8,95	648,0	7,4
Semana 2	"	"	6,407	12,6	5,87	11	568,7	10,4	625,9	4,2
Semana 3	"	"	6,556	14,6	5,945	12,1	618,5	17,6	675,4	11
Semana 4	"	"	6,781	17,4	6,145	14,9	686,0	25,8	735,8	18
Semana 5	"	"	6,964	19,6	6,315	17,2	724,4	29,7	584,0	-3
Semana 6	"	"	7,156	21,7	6,39	18,2	676,7	24,7	533,5	-12
Semana 7	"	"	7,314	23,4	6,475	19,3	725,6	29,8	587,8	-2
Semana 8	"	"	7,351	23,8	6,507	19,7	664,5	23,3	506	-19
Semana 9	"	"	7,4	24,3	6,539	20,1	660,5	22,9	516,1	-16
Semana 10	"	"	7,522	25,6	6,619	21	658,9	22,7	504,4	-19
Semana 11	"	"	7,605	26,4	6,709	22,1	749	32	572,9	-5
Semana 12	"	"	7,63	26,6	6,709	22,1	665,3	23,4	487,7	-23
Semana 13	"	"	7,637	26,7	6,759	22,7	628,8	19	430,9	-39
Semana 14	"	"	7,638	26,7	6,769	22,8	618,8	17,7	410,1	-46
Semana 15	"	"	7,686	27,1	6,839	23,6	633,5	19,6	425,8	-41
Semana 16	"	"	7,691	27,2	6,869	23,9	640,8	20,5	447,9	-34
Semana 17	"	"	7,692	27,2	6,869	23,9	637,7	20,1	445	-35
Semana 18	"	"	7,706	27,3	6,899	24,2	644,1	20,9	447,6	-34
Semana 19	"	"	7,706	27,3	6,919	24,5	608,5	16,3	402	-49
Semana 20	"	"	7,707	27,3	6,919	24,5	616	17,3	406	-48
Semana 21	"	"	7,762	27,9	6,929	24,6	639,8	20,4	429,2	-40
Semana 22	"	"	7,843	28,6	7,009	25,4	553,5	7,98	366,4	-64
Semana 23	"	"	7,926	29,3	7,099	26,4	625,4	18,6	470,3	-28
Semana 24	"	"	8,006	30,1	7,149	26,9	631,8	19,4	492,3	-22
Semana 25	"	"	8,033	30,3	7,179	27,2	617,1	17,5	478,8	-25
Semana 26	"	10	7,987	29,9	7,189	27,3	608,6	16,3	455,1	-32
VACIADO	10-11	0	2,788	-	1,699	-	40,74	-	-192	-
Recuperación 12h		0	2,722	-2,42	1,642	-3,5	39,92	-2,05	-198	3
Recuperación 24h	12	0	2,695	-3,45	1,615	-5,2	33,67	-21	-195	1,9

*Ver apartado 4.1.7, ensayo de fluencia.

Tabla 192. Resumen de la evolución (semanal) de los ensayos de fluencia sobre vigas dúo reforzadas GFRP UNI2400.

Reforzado chopo	Etapas*	Carga (kN)	LVDT VR1 (mm)	Inc. (%)	LVDT VR2 (mm)	Inc. (%)	SG VR1 (µm/m)	Inc. (%)	SG VR2 (µm/m)	Inc. (%)
GFRP 2400										
Proceso de Carga	0	0	±0	-	±0	-	±0,005	-	±0,005	-
"	0-1	4	1,829	-	1,851	-	170,1	-	215,3	-
"	1-2	4	1,865	-	1,910	-	174,2	-	219,4	-
"	2-3	6	2,793	-	2,867	-	262,1	-	327,2	-
"	3-4	4	2,046	-	2,110	-	196,7	-	243,1	-
"	4-5	8	3,800	-	3,799	-	356,6	-	430,7	-
"	5-6	8	3,915	-	3,875	-	365,8	-	439,6	-
"	6-7	10	4,838	-	4,709	-	452,0	-	532,3	-
LLENADO	7-10	10	4,838	-	4,709	-	452,0	-	532,3	-
Semana 1	"	"	5,292	8,58	5,135	8,3	469,2	3,68	580,0	8,22
Semana 2	"	"	5,505	12,1	5,34	11,8	468,5	3,53	583,3	8,73
Semana 3	"	"	5,588	13,4	5,453	13,6	529,6	14,7	628,9	15,4
Semana 4	"	"	5,78	16,3	5,59	15,8	570,4	20,8	665,4	20
Semana 5	"	"	5,94	18,6	5,723	17,7	601,0	24,8	697,4	23,7
Semana 6	"	"	6,09	20,6	5,843	19,4	572,7	21,1	656,7	18,9
Semana 7	"	"	6,21	22,1	5,994	21,4	640,5	29,4	721,4	26,2
Semana 8	"	"	6,24	22,5	6,024	21,8	581,8	22,3	649,8	18,1
Semana 9	"	"	6,295	23,1	6,084	22,6	592,9	23,8	632,4	15,8
Semana 10	"	"	6,394	24,3	6,223	24,3	620,9	27,2	634,1	16,1
Semana 11	"	"	6,487	25,4	6,343	25,8	693,7	34,8	736,7	27,7
Semana 12	"	"	6,51	25,7	6,36	26	619	27	647,1	17,7
Semana 13	"	"	6,521	25,8	6,361	26	559,7	19,3	612,6	13,1
Semana 14	"	"	6,524	25,8	6,361	26	550,9	18	597,3	10,9
Semana 15	"	"	6,553	26,2	6,399	26,4	570,9	20,8	609,1	12,6
Semana 16	"	"	6,569	26,4	6,429	26,7	598,8	24,5	629,6	15,5
Semana 17	"	"	6,577	26,4	6,442	26,9	600,8	24,8	622,2	14,4
Semana 18	"	"	6,596	26,7	6,467	27,2	623,1	27,5	637,3	16,5
Semana 19	"	"	6,591	26,6	6,463	27,1	574,9	21,4	596,2	10,7
Semana 20	"	"	6,58	26,5	6,446	26,9	578	21,8	606,6	12,2
Semana 21	"	"	6,635	27,1	6,542	28	650,1	30,5	624,4	14,7

Reforzado chopo GFRP 2400	Etapas*	Carga (kN)	LVDT VR1 (mm)	Inc. (%)	LVDT VR2 (mm)	Inc. (%)	SG VR1 (µm/m)	Inc. (%)	SG VR2 (µm/m)	Inc. (%)
Semana 22	"	"	6,76	28,4	6,725	30	629,2	28,2	570,3	6,65
Semana 23	"	"	6,858	29,5	6,85	31,3	679,6	33,5	648,7	17,9
Semana 24	"	"	6,929	30,2	6,959	32,3	675,3	33,1	652,9	18,5
Semana 25	"	"	6,949	30,4	6,954	32,3	629,5	28,2	651,7	18,3
Semana 26	"	10	6,885	29,7	6,867	31,4	594,7	24	620,6	14,2
VACIADO	10-11	0	1,945	-	2,359	-	91,98	-	66,76	-
Recuperación 12h		0	1,884	-3,24	2,313	-1,99	94,86	3,04	57,04	-17
Recuperación 24h	12	0	1,886	-3,13	2,297	-2,7	84,44	-8,9	61,15	-9,17

*Ver apartado 4.1.7, ensayo de fluencia.

