AIDIMME
INSTITUTO TECNOLÓGICO

2020-2021
ENTREGABLE

Proyecto "RESTRUCTMAD"

INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE SOLUCIONES INNOVADORAS DE REPARACIÓN Y REFUERZO PARA ESTRUCTURAS DE MADERA

ENTREGABLE:

3.3 - Ficha técnica resumen de los resultados alcanzados durante el proyecto

Número de proyecto: 22000046
Expediente: IMDEEA/2020/18
Duración: Del 01/07/2020 al 30/09/2021
Coordinado en AIDIMME por: ABIÁN PÉREZ, MIGUEL ANGEL
Línea de I+D: **BIOMATERIALES**

GENERALITAT VALENCIANA
IVACE INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD EMPRESARIAL
UNIÓN EUROPEA
Fondo Europeo de Desarrollo Regional
Una manera de hacer Europa
"Proyecto cofinanciado por los Fondos FEDER, dentro del Programa Operativo FEDER de la Comunitat Valenciana 2014 - 2020"

ÍNDICE

1 Objetivos

2 Resultados obtenidos en el paquete de trabajo 4: Estado del arte sobre soluciones de reparación y refuerzo para madera estructural

3 Resultados obtenidos en el paquete de trabajo 5: Desarrollo de soluciones innovadoras de reparación y refuerzo para madera estructural

4 Resultados obtenidos en el paquete de trabajo 6: Aplicación y caracterización de las soluciones desarrolladas

5 Resumen. Conclusiones

GENERALITAT VALENCIANA
IVACE INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD EMPRESARIAL
UNIÓN EUROPEA Fondo Europeo de Desarrollo Regional
Una manera de hacer Europa
"Proyecto cofinanciado por los Fondos FEDER, dentro del Programa Operativo FEDER de la Comunitat Valenciana 2014 - 2020"

1. OBJETIVOS

El proyecto de I+D **RESTRUCTMAD** (Investigación y desarrollo de soluciones innovadoras de reparación y refuerzo para estructuras de madera), desarrollado en cooperación con empresas valencianas, tiene como objetivo investigar y desarrollar soluciones innovadoras de reparación y refuerzo de estructuras de madera, con mejoras sustanciales respecto a las ya existentes: mayor resistencia y capacidad portante, menor impacto medioambiental, menor coste y uso de materiales, menor tiempo de ejecución, aplicación directa en obra, etc.

El proyecto está financiado por el **IVACE** (Instituto Valenciano de Competitividad Empresarial) y cofinanciado por el Programa Operativo **FEDER** de la Comunidad Valenciana 2014-2020. RESTRUCTMAD empezó en junio de 2020 y ha concluido en septiembre de 2021.

Los **objetivos específicos** del proyecto son los siguientes:

1) **Investigar las soluciones actuales para reparar y reforzar estructuras de madera**.
2) **Desarrollar soluciones de reparación y refuerzo con ventajas sustanciales respecto a las existentes** (mayor resistencia y capacidad portante, menor impacto medioambiental, menor coste y uso de materiales, menor tiempo de ejecución, aplicación directa en obra, uso de madera reciclada o de restos de madera, etc.). Estos sistemas y soluciones serán aplicables a estructuras de madera antiguas, patrimoniales, modernas y actuales; y tendrán en cuenta tanto la madera aserrada como otros materiales modernos derivados de ella (madera laminada encolada, contralaminada, etc.).
3) **Aplicar las soluciones desarrollados a elementos que presenten daños, deterioros o requieran mayor resistencia estructural**.
4) **Ensayar los elementos reparados/reforzados para caracterizarlos mecánicamente según el CTE**.
5) **Difundir de forma efectiva el proyecto y sus resultados**.
6) **Transferir y promover los resultados a empresas de la Comunitat Valenciana**, escogiendo los canales más adecuados para que la transferencia tenga el mayor impacto posible.

Las soluciones propuestas permiten ejecutar las rehabilitaciones y modernizaciones de estructuras de madera (antiguas, patrimoniales, modernas y actuales), con ventajas relevantes respecto a los ya existentes en tres aspectos fundamentales: sostenibilidad, competitividad y fiabilidad.

Los resultados del proyecto se dirigen principalmente a la industria de 1ª y 2ª transformación de la madera, a empresas y profesionales de la construcción y la rehabilitación, así como a estudios de arquitectura e ingeniería para construcción y estructuras y empresas de software para estructuras.

En este documento, con el objetivo de **transferir tecnológicamente los resultados y promocionarlos**, se resumen los **principales resultados técnicos** obtenidos en el proyecto.

GENERALITAT VALENCIANA
IVACE INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD EMPRESARIAL
UNIÓN EUROPEA Fondo Europeo de Desarrollo Regional
Una manera de hacer Europa
"Proyecto cofinanciado por los Fondos FEDER, dentro del Programa Operativo FEDER de la Comunitat Valenciana 2014 - 2020"

2. RESULTADOS OBTENIDOS EN EL PAQUETE DE TRABAJO 4: ESTADO DEL ARTE SOBRE SOLUCIONES DE REPARACIÓN Y REFUERZO PARA MADERA ESTRUCTURAL

Tarea 4.1: Análisis de las propiedades mecánicas de la madera en estructuras antiguas y modernas

4.1.1. Estructuras de madera antigua

Las características de la madera nueva son muy distintas a las de la madera antigua presente en edificaciones tanto residenciales como patrimoniales. Aunque en ocasiones las tipologías constructivas son iguales, las secciones y especies utilizadas cambian, y sobre todo la calidad de la madera puede ser muy distinta.

Las tipologías constructivas suelen ser bastante sencillas: forjados planos o inclinados y estructuras cerchadas.

Estructuras cerchadas.
Son estructuras que tienen una buena calidad de madera. Normalmente se ejecutaban con madera por completo o bien con tirantes metálicos.

Figura 1. Cercha combinada madera-metal.

Figura 2. Cercha completa de madera.

Normalmente en estas estructuras, que empezaron a realizarse a finales del siglo XIX, existe madera aserrada de calidad, principalmente de mobila vieja y pino silvestre o laricio. Su estado de conservación suele ser bueno, por la aireación de la estructura.

Estructuras de forjado y cubiertas.

Existen diversas morfologías y tipologías que se han utilizado desde hace siglos. La calidad de la madera y las especies utilizadas es muy variable, al igual que su estado de conservación.

En la Comunitat Valenciana, las especies que principalmente aparecen son los distintos pinos autóctonos y madera importada, incluyendo la mobila y el abeto; y en algunas ocasiones elementos de chopo, tanto como madera aserrada como en forma de rollizo, dependiendo de la disponibilidad de zonas donde obtener la madera. También se encuentra que hubo una época en que la madera de calidad se importaba.

Figura 3. Estructura de madera aserrada de forjado con revoltón.

Figura 4. Estructura de madera aserrada de forjado con revoltón.

En esta categoría se incluyen también los forjados de cubierta inclinados, que pueden tener elementos de madera aserrada o en forma de rollizo.

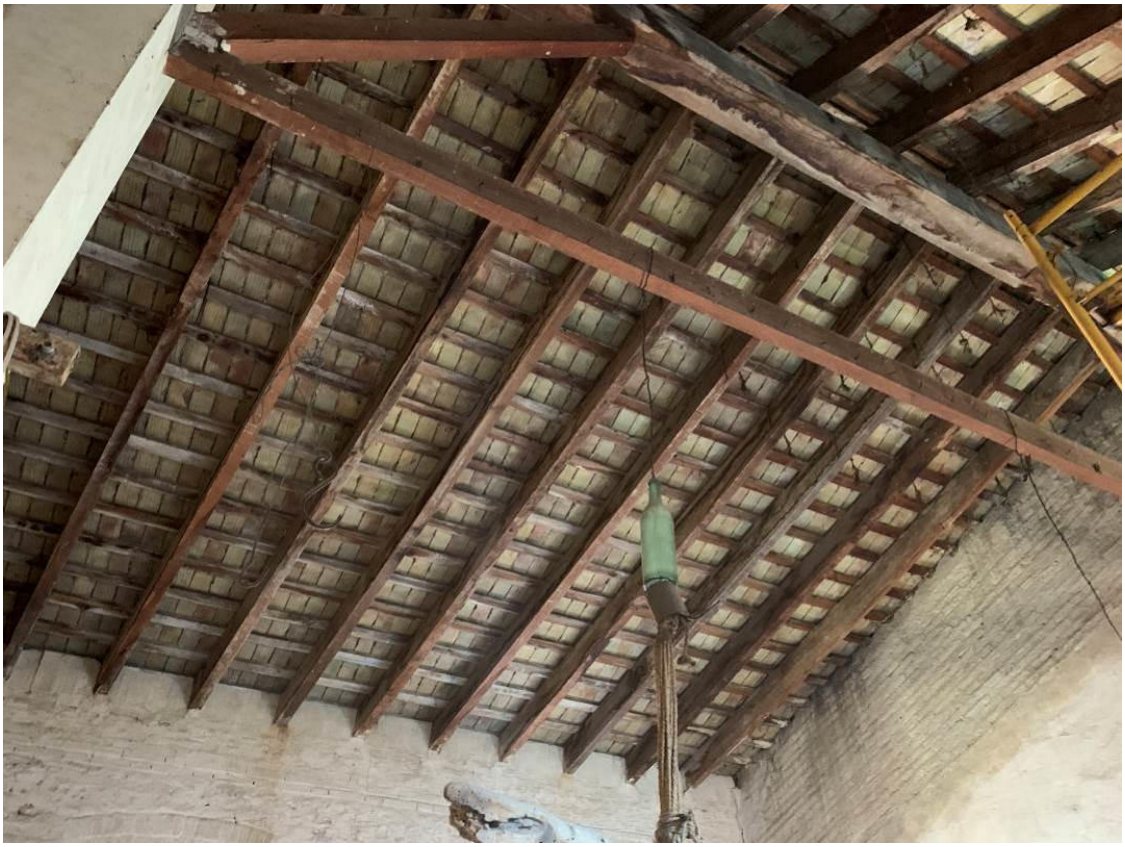


Figura 5. Estructura de cubierta a dos aguas con viguetas aserradas, listón y tablero cerámico.

4.1.2. Propiedades mecánicas de las especies de madera antigua

En las anteriores estructuras aparecen distintas especies de madera, que se enumeran a continuación:

- Mobila vieja: *Pinus taeda, P. palustris, P. ellioti* en forma de madera aserrada
- Pino rojo, albar o Suecia: *P. sylvestris* en forma de madera aserrada o rollizo
- Pino laricio o negral: *Pinus nigra* en forma de madera aserrada o rollizo
- Pino marítimo: *Pinus pinaster* en forma de madera aserrada o rollizo
- Pino blanco o carrasco: *Pinus halepensis* en forma de rollizo
- Abeto: *Abies sp./ Picea sp.* en forma de madera aserrada
- Chopo: *Populus nigra* en forma de rollizo
- Roble: *Quercus sp.* en forma de rollizo

Las características mecánicas según el Código Técnico de la Edificación (CTE) de estas especies es muy variable, por lo que se han resumido aquellas con mayor representación en las estructuras existentes en la Comunitat Valenciana. Las características y su clasificación según el CTE se han realizado mediante ensayos realizados con la técnica no destructiva de emisión-recepción de ultrasonidos.

Los principales resultados, una vez recopilados y analizados estadísticamente, se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 1. Tabla de valores de clasificación de madera antigua.
***Los valores son orientativos pero reflejan la media de los casos observados.**

ESPECIE	TIPOLOGIA	CALIDAD/DEGRADACIÓN	Nº ESTRUCTURAS ANALIZADAS	Nº ELEMENTOS ANALIZADOS	CLASIFICACIÓN MEDIA*
Mobila vieja	Aserrada	En buen estado de conservación	56	287	C35
	Aserrada	En estado medio de degradación	32	176	C24
P. sylvestris/ pinus nigra	Aserrada	En buen estado de conservación	36	196	C27
	Aserrada	En estado medio de degradación	47	154	C22
	Rollizo	En general siempre tienen parte de la albura degradada	8	27	C18
P. pinaster	Aserrada/rollizo	En general siempre tienen parte de la albura degradada	11	21	C18
P. halepensis	rollizo	En general siempre tienen parte de la albura degradada	13	29	C16
Abetos	Aserrada	En buen estado de conservación	23	63	C30
	Aserrada	En estado medio de degradación	7	22	C24
Chopo	Rollizo	En general siempre tienen parte dela albura degradada	18	38	C16
Roble	Rollizo	En general siempre tienen parte dela albura degradada	4	17	D30

A continuación se muestran los valores característicos de las clases resistentes y algunas imágenes de algunas especies de madera.

Tabla E.1 Madera aserrada. Especies de coníferas y chopo. Valores de las propiedades asociadas a cada Clase Resistente

Propiedades		Clase resistente											
		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Resistencia (característica) en N/mm²													
- Flexión	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
- Tracción paralela	$f_{t,0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30
- Tracción perpendicular.	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
- Compresión paralela	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	22	22	23	25	26	27	29
-Compresión perpendicular	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2
- Cortante	$f_{v,k}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Rigidez, en kN/mm²													
- Módulo de elasticidad paralelo medio	$E_{0,medio}$	7	8	9	9,5	10	11	11.5	12	13	14	15	16
- Módulo de elasticidad paralelo 5⁰-percentíl	$E_{0,k}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,0	10,7
- Módulo de elasticidad perpendicular medio	$E_{90,medio}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53
- Módulo transversal medio	G_{medio}	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00
Densidad, en kg/m³													
- Densidad característica	ρ_k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460
- Densidad media	ρ_{medio}	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550

Figura 6. Tabla de clases resistentes según el CTE. Fuente: CTE.

4.1.3. Estructuras de madera nueva

Las estructuras de madera nueva y las características de los elementos que las configuran se encuentran determinadas usualmente por el Código Técnico de la Edificación, de obligado cumplimiento desde 2006.

Se encuentran las mismas estructuras que se utilizaban con madera antigua; pero al existir ya madera técnica como la madera laminada encolada (MLE o *glulam*) hay construcciones de mayores dimensiones, como puentes, pasarelas cubiertas de centros comerciales y piscinas, etc.

Figura 7. Cubierta plana de roble en porche de jardin.

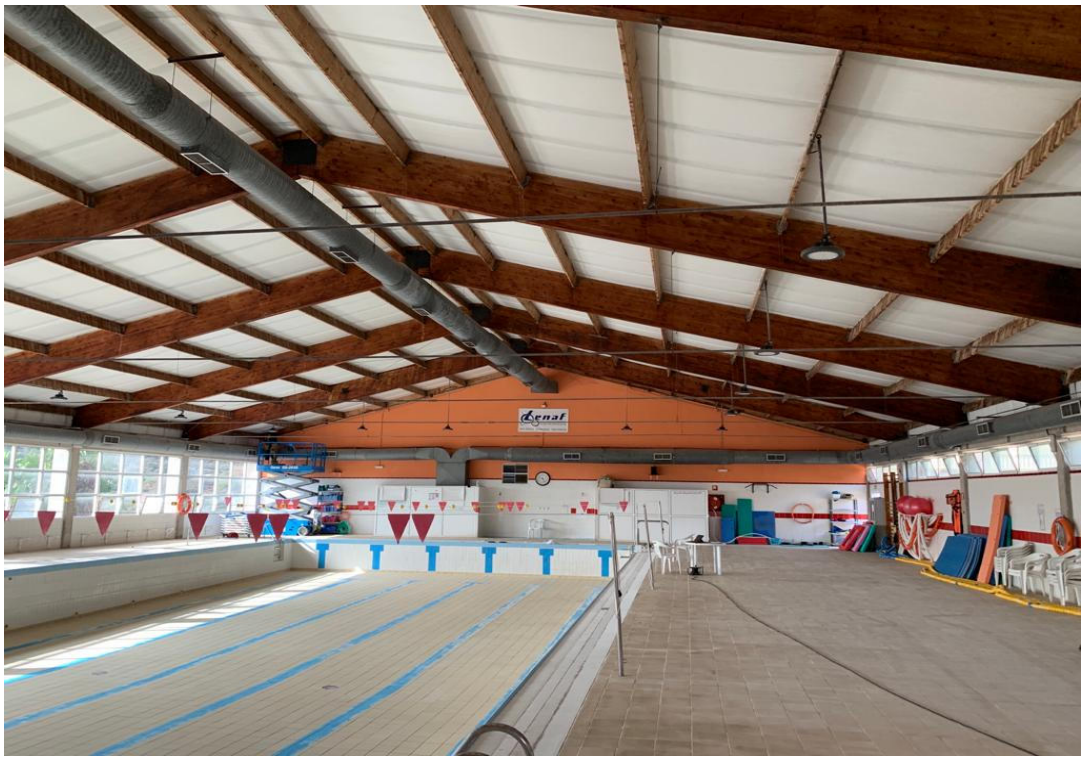


Figura 8. Vigas de madera laminada encolada de abeto en una cubierta de piscina.

4.1.4. Propiedades mecánicas de la madera nueva

En la actualidad se pueden diseñar y calcular las estructuras con distintas especies de madera, dependiendo de las prestaciones que se deseen, pero siempre siguiendo las directrices del CTE.

En las siguientes tablas pueden verse las clasificaciones, especies y características de las especies normalizadas. Hay especies que se usaban antiguamente, pero que han caído en desuso, como el *Pinus halepensis* o la mobila vieja. La mobila que existe ahora en el mercado recibe el nombre de "mobila nueva" o "mobila melis"; su clasificación está determinada por normas de Estados Unidos, y no está considerada ni en las normas españolas ni en las europeas.

En la actualidad, tanto para obra nueva como para rehabilitación, se solicitan elementos de madera tanto aserrada como laminada que cumplan con ciertos requisitos. Principalmente se emplean elementos de madera aserrada con clase resistente **C22 y C24 de pino**, y elementos de madera laminada con clase resistente **GL24h y GL28h de pino y abeto**.

Norma	Especie (Procedencia)	Clase resistente									
		C14	C16	C18	C22	C24	C27	C30	C35	D35	D40
UNE 56544:2011	Pino silvestre (España)	-	-	ME-2	MEG	-	ME-1	-	-	-	-
	Pino pinaster (España)	-	-	ME-2	-	ME-1	-	-	-	-	-
	Pino insignis (España)	-	-	ME-2	-	ME-1	-	-	-	-	-
	Pino laricio (España)	-	-	ME-2	MEG	-	-	ME-1	-	-	-
NF B 52.001-4	Abeto (Francia)	-	-	-	ST-III	ST-II	-	ST-I	-	-	-
	Falso abeto (Francia)	-	-	-	ST-III	ST-II	-	ST-I	-	-	-
	Pino oregón (Francia)	-	-	-	ST-III	ST-II	-	-	-	-	-
	Pino pinaster (Francia)	-	-	ST-III	-	ST-II	-	-	-	-	-
DIN 4074	Abeto (Europa: Central, N y E)	-	S7	-	-	S10	-	S13	-	-	-
	Falso abeto (Europa: Central, N y E)	-	S7	-	-	S10	-	S13	-	-	-
	Pino silvestre (Europa: Central, N y E)	-	S7	-	-	S10	-	S13	-	-	-
INSTA 142	Abeto (Europa: N y NE)	T0	-	T1	-	T2	-	T3	-	-	-
	Falso abeto (Europa: N y NE)	T0	-	T1	-	T2	-	T3	-	-	-
	Pino silvestre (Europa: N y NE)	T0	-	T1	-	T2	-	T3	-	-	-
BS 4978	Abeto (Reino Unido)	-	GS	-	-	SS	-	-	-	-	-
	Pino silvestre (Reino Unido).	-	GS	-	-	SS	-	-	-	-	-
BS 5756	Iroko (Africa)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	HS
	Jarrah (Australia)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	HS
	Teca (Africa y Asia SE)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	HS

Figura 9. Asignación de clase resistente para diferentes especies arbóreas y procedencias según normas de clasificación. Fuente: CTE

	Clases resistentes		
Madera laminada encolada homogénea	**GL24h**	**GL28h**	**GL32h**
- Todas las láminas	C24	C30	C40
Madera laminada encolada combinada	**GL24c**	**GL28c**	**GL32c**
- Láminas externas (1)	C24	C30	C40
- Láminas internas	C18	C24	C30

Figura 10. Correspondencias conocidas entre Clases Resistentes de madera laminada encolada y de madera aserrada Fuente: CTE

Tarea 4.2: Análisis de las situaciones más frecuentes en las estructuras que requieren refuerzo o reparación

Son varios los agentes bióticos y abióticos que pueden degradar la madera, tanto superficialmente como en profundidad. Además, según la naturaleza del agente que actúe, la degradación puede ser superficial, leve o grave, pudiendo llegar incluso al colapso de estas estructuras.

A continuación se describen esos agentes y sus efectos sobre la madera.

4.2.1. Agentes bióticos

Estas degradaciones son las más importantes por la cantidad de daños que ocasiona, si bien no todos los agentes son igual de nocivos.

Existen dos grupos que aglutinan a estos agentes: **los hongos y los insectos xilófagos.**

Los hongos xilófagos necesitan unas condiciones de humedad alta y que este comprendido entre el 18-20% y el 35-50%. Existen varios tipos:

a. **Hongos cromógenos y mohos**: son los que únicamente manchan la madera, sin afectar a su estructura.
b. **Hongos de pudrición**: afectan a la estructura de la madera, pudiendo ocasionar daños importantes.

Existen tres tipos de hongos de pudrición: blanca que degrada la lignina, parda que lo hace con la celulosa, y blanda que afecta a las dos.

Figura 11. Degradaciones por hongos de pudrición blanda y parda.

Figura 12. Degradación por hongos de pudrición parda o cubica.

Los insectos xilófagos producen, debido a que se alimentan de madera, degradaciones más o menos importantes, en los distintos estados de los individuos durante su desarrollo. Los principales insectos que atacan a la madera son las termitas, carcoma gruesa y carcoma fina:

c. **Termitas subterráneas**: Este tipo de termita ataca a madera de albura y duramen con un alto grado de humedad (16-25%) en la madera. Los individuos se desplazan desde debajo del suelo, mediante regueros de tierra y excrementos, a buscar la madera para alimentar al resto de individuos de la colonia. Las subespecies que se pueden encontrar más comúnmente en España son las *Reticulitermes banyulensis* y las *Reticulitermes grassei.* Son los insectos xilófagos que mayores daños ocasionan a las estructuras de madera.

Figura 13. Termitas subterráneas (*Reticulitermes*).

Figura 14. Daño que origina en la madera las termitas subterráneas (*Reticulitermes*).

d. **Termitas aéreas o de madera seca:** Son similares en morfología a las termitas subterráneas, pero las colonias no se encuentran bajo tierra, sino en la misma madera. También se diferencia en que el número de individuos es mucho más pequeño, unos cientos como mucho. Las especies que se encuentran tanto en la península ibérica como en las islas son *Cryptotermes brevis* y *Kalotermes flavicollis*.

Figura 15. Izquierda: Termitas aéreas de madera seca (*Cryptotermes*). Derecha: Excrementos de termita aérea con forma poligonal.

e. **Cerambícidos (carcoma gruesa)**: Son xilófagos de madera seca y realizan galerías de forma ovalada de entre 6 y 10 mm de diámetro. Son las larvas las que generan la degradación. Se alimentan de la madera de albura de coníferas y frondosas.

Figura 16. Adulto de Cerambicido (*Hylotrupes Bajulus*).

Figura 17. Degradación por carcoma gruesa en una viga de madera.

4.2.2. Agentes abióticos

HUMEDAD/AGUA

Ésta es una de las principales causas de la degradación de la madera, tanto por sí sola como ayudando a que otros agentes, tanto abióticos como bióticos, la estropeen.

Esta humedad o agua se absorbe y genera movimientos de dilatación y contracción en la estructura de la madera que provoca curvaturas, alabeos, etc. Además, esta humedad favorece que agentes como hongos, termitas, el sol, etc., entre otros, actúen destruyendo la estructura.

Figura 18. Ejemplo de daño que origina la humedad continuada en estructuras.

Figura 19. Ejemplo de daño que origina la humedad continuada en estructuras.

RADIACIÓN SOLAR

La exposición constante al sol genera una degradación lenta de la capa exterior de la madera, adoptando inicialmente un color marrón que acaba convirtiéndose en gris en su fase final. Posteriormente a esta degradación y por acción de la erosión (fricción, aire o agua), esta capa generada desaparece, dejando al descubierto otra capas en buen estado en las que puede continuar la degradación.

Figura 20. Ejemplo de daño que origina la radiación solar, la erosión posterior y los hongos de pudrición en una tarima de pino en un puente en la playa.

EL FUEGO

El fuego es un agente degradador abiótico que puede llegar a degradar la madera tanto superficialmente como en profundidad. Esta profundidad dependerá de la intensidad de la fuente de ignición y del tiempo de exposición.

Esta degradación que se produce se llama carbonización, que a su vez también es la encargada de frenar o reducir la combustión, al aislar la madera sana del oxígeno necesario para una degradación más profunda.

También será muy variable la profundidad de la degradación, dependiendo de la especie, la densidad, la naturaleza de la misma, etc. En cualquier caso, nunca será la misma si es un abeto, un pino (coníferas), un roble o un chopo (frondosas).

Figura 21. Degradación/carbonización de vigas de madera por llamas durante un incendio.

4.2.3. Situaciones más habituales que requieren refuerzo o reparación

Suelen encontrarse muchas situaciones en las que se considera necesario realizar refuerzo, tanto en madera nueva como en antigua. Estas situaciones son variadas y pueden tener origen físico, mecánico o de diseño.

Origen físico

Principalmente los agentes que suelen hacer el mayor daño se asocian a la mojazón o el aumento del porcentaje de humedad interno en los elementos. Las termitas y, aunque no sea tan reconocido, la pudrición, son los dos agentes bióticos que provocan más daños.

Los encuentros de diferentes piezas mal resueltos, las entradas de agua por cubiertas o conducciones de agua/bajantes son algunas de las situaciones más comunes.

En el caso de los agentes abióticos con carácter estructural, es el fuego el agente que más situaciones comprometidas genera, siendo la degradación solar más común en las degradaciones de carácter superficial o visual.

Figura 22. Degradación por exposición al sol, hongos y carcoma en una estructura nueva de madera laminada, con exposición a la intemperie.

Figura 23. Degradación por termitas subterráneas en el tirante de una cercha en una cubierta antigua.

Origen mecánico

Principalmente se manifiestan con presencia de fisuras y grietas, deformaciones y movimientos.

La sobrecarga por mal dimensionado, junto a las anomalías propias de la madera, es uno de los aspectos más comunes en este tipo de situaciones. En ocasiones, la sobrecarga se produce porque los forjados se refuerzan con elementos de hormigón o metálicos o porque se realizan en ellos sustituciones de las baldosas por otras más pesadas; en casos no del todo excepcionales, la sobrecarga se debe a ampliaciones en altura del edificio (nuevas plantas).
En madera antigua, las degradaciones suelen ser uno de los factores que ocasionan situaciones de este tipo, pues la degradación causa disminución de la resistencia mecánica y de la sección efectiva del elemento, por lo que disminuye su capacidad de aguantar cargas y tensiones.

Por el contrario, en madera nueva, el mal diseño y la mala ejecución suelen ser la causa de este tipo de anomalías. En ocasiones, el mal secado de la madera causa también fendas estructurales en lugar de las fendas de secado normales, que no suelen causar problemas mecánicos.

Figura 24. Grietas profundas por madera revirada y sobrecarga.

Origen por mal diseño de la estructura

Ya sea con madera antigua o con madera nueva, un mal diseño o dimensionado de una estructura puede dar lugar al movimiento y rotura de los elementos de madera que la componen. Principalmente, suelen darse casos de flechas elevadas, roturas y fendas.

Dichas situaciones se producen por varios motivos, como la falta de sección, interejes superiores a lo establecido y sobrecargas superiores a la máxima permitida por el material.

Figura 25. Vigas con flecha importante por tener una longitud elevada y baja sección.

Tarea 4.3: Investigación sobre soluciones de reparación y refuerzo para madera estructural

En esta tarea se recopiló información científico-técnica respecto a las soluciones de reparación y refuerzo para madera estructural. Para ello se recurrió a artículos científicos y técnicos, libros, guías técnicas, manuales, normas europeas e internacionales, memorias de proyectos de investigación, tesinas y tesis doctorales. Asimismo, a partir de búsquedas en las bases de datos de patentes, se recopilaron patentes relacionadas con esas soluciones.

A continuación se exponen las **fichas técnica resumidas de las soluciones**, adaptadas a las necesidades de empresas, profesionales (arquitectos, ingenieros, etc.) y Administraciones.

TÉCNICA 1: REPARACIÓN MEDIANTE ELEMENTOS RÍGIDOS DE REFUERZO EMBEBIDOS EN RESINAS

TÉCNICA	**REPARACIÓN MEDIANTE ELEMENTOS RÍGIDOS DE REFUERZO EMBEBIDOS EN RESINAS**
Definición	De modo general, el fundamento de esta técnica radica en la restauración de partes de los elementos de madera afectados por degradaciones normalmente bióticas (termitas, carcomas fina o gruesa y hongos de pudrición) mediante elementos de refuerzo. Estos elementos suelen ser varillas cilíndricas de fibras de vidrio pretensadas y reforzadas con poliéster, embebidas después en resinas epoxi mezcladas con áridos, de forma que se cubran los huecos de la madera desaparecida. En ocasiones se usan placas en vez de varillas. **Vigueta saneada, ranurada y con las varillas colocadas antes del encofrado (izquierda); y vigueta después del encofrado (derecha).**
Proceso	El proceso consta, por lo general, de los siguientes pasos: • Se apuntala el elemento que necesita ser reparado o consolidado. • Se determina la extensión de la degradación que sufre el elemento (zona, longitud y sección afectadas). • Se procede a limpiar y eliminar los restos degradados. • Se realiza el encofrado y taladrado o ranurado para las varillas. El encofrado se realiza normalmente con tablones o tableros. Los taladros o ranuras pueden ejecutarse de forma recta (es decir, paralelamente a la fibra de la madera) o con cierta inclinación. Debe

	intentarse siempre que la superficie de contacto de la varilla sea lo más extensa posible con todos los elementos, dependiendo de cómo sea el acceso al elemento (superior, inferior o completo). • Se colocan las varillas en los taladros o ranuras y se encolan éstas con resinas. En general, antes resulta conveniente aplicar a la madera una imprimación adecuada y compatible con las resinas. • Se mezclan los componentes del mortero (resina y áridos) y se vierte éste en la zona encofrada. • Se produce el polimerizado/curado de la resina durante el tiempo recomendado por el fabricante. • Se procede al desencofrado y a la limpieza del elemento reparado. Para ello, deben eliminarse los restos y alisar o pintar las superficies reparadas.
Ventajas	• Permite reconstituir el elemento y consolidar la estructura de forma que visualmente parece el mismo elemento de madera. • La técnica puede ejecutarse sin necesidad de descubrir totalmente el elemento degradado y sin tener que abrir mucho espacio alrededor de la zona degradada, dado que las resinas epoxi se vierten sobre un encofrado. • El elemento de madera recupera parte o toda su capacidad portante y sus propiedades mecánicas, al tiempo que conserva su apariencia inicial. • Los elementos de madera no cambian demasiado su aspecto, y se consigue una reparación efectiva desmontando solamente una pequeña parte de los forjados. • El elemento reparado puede aguantar cargas a las 24 horas de su reparación, si bien el máximo de resistencia se alcanza a los 3-7 días, dependiendo de las resinas epoxi utilizadas. • Aunque su uso mayoritario es para elementos horizontales (vigas, viguetas, cerchas), puede utilizarse también para elementos verticales (columnas, pilares). • Es aplicable tanto a madera nueva como a madera antigua. • La parte reparada con resinas epoxi es completamente durable frente a insectos y hongos xilófagos, y no necesita tratamientos.
Desventajas y limitaciones	• Se desconoce el comportamiento mecánico-elástico de la madera reparada y sus mecanismos de fallo. • No existe por ahora normativa ni tampoco guías de aplicación y de soluciones constructivas. • Ha habido algunas investigaciones sobre la durabilidad a medio plazo de los elementos reparados y los resultados han sido positivos, pero no hay aún experiencia en el comportamiento a largo plazo (50 años) de dichos elementos. • La elevada capacidad de unión de las resinas epoxi disminuye rápidamente a temperaturas por encima de 25ºC, lo que puede ser una limitación para la técnica si los elementos de madera se encuentran cerca de conductos de calefacción o expuestos al sol. • Las resinas epoxi son capaces de fijarse bien con madera que tenga hasta un 22% de contenido en humedad, sin ninguna disminución significativa en la resistencia de la unión madera-resina y sin cambios

	en el lugar de fallo. Para contenidos en humedad de la madera superiores al 30%, la resistencia de la unión madera-epoxi se reduce un 60-65%, lo que constituye una limitación para la aplicación de la técnica en madera húmeda. • Aunque el precio de los resinas epoxi se ha abaratado en la última década, el coste de esta técnica puede ser elevado cuando hay que reparar muchos elementos, especialmente si todos sufren degradación en gran parte de su longitud. • Por motivos económicos, no se recomienda su uso si el elemento ha perdido más de 1/3 de su volumen. • La técnica requiere operarios formados en ella y con experiencia. • Es necesario un control de calidad apropiado *in situ* para la aplicación de los adhesivos y para el encofrado.

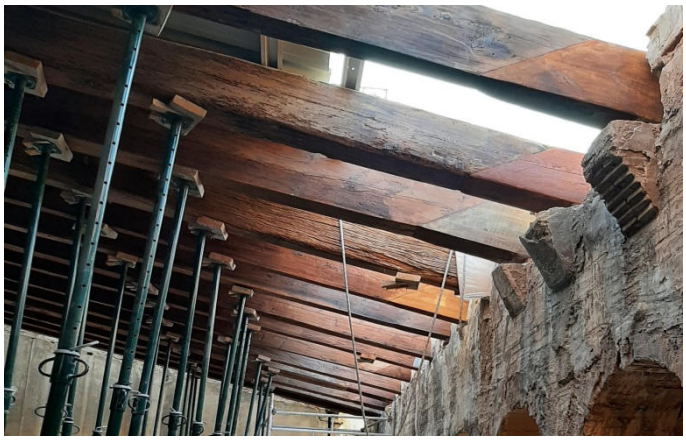
TÉCNICA 2: REFUERZO MEDIANTE PLÁSTICOS REFORZADOS CON FIBRAS

TÉCNICA	REFUERZO MEDIANTE PLÁSTICOS REFORZADOS CON FIBRAS
Definición	Esta técnica usa materiales de plásticos reforzados con fibras (en inglés, FRP: *Fiber Reinforced Polymer*), que se adhieren o incrustan en los elementos de madera. Los materiales FRP son compuestos que incluyen fibras que proporcionan rigidez y la capacidad de soportar cargas, embebidas en una resina polimérica que transfiere las cargas entre las fibras y proporcionan protección para éstas. Estos materiales están disponibles en una amplia variedad de formas y tienen propiedades que varían considerablemente dependiendo del material de la fibra (carbono, basalto, cerámica, metales, etc.), de la proporción de fibras y de su orientación. Dos tipos de FRP muy utilizados son los GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer* o plásticos reforzados con fibras de vidrio) y los CFRP (Carbon *Fiber Reinforced Polymer* o plásticos reforzados con fibras de carbono). Para refuerzos estructurales, se usan generalmente dos formas principales de FRP: varillas fabricadas por pultrusión o placas/tiras. Para refuerzos internos, las varillas pultrusionadas y las placas se colocan en ranuras o incisiones realizadas previamente en el elemento. Para refuerzos externos, se usan placas o tiras que se adhieren mediante resinas al elemento de madera. **Viga reforzada con tiras de FRP**
Proceso	El proceso consta, por lo general, de los siguientes pasos: • Se apuntala el elemento que necesita ser reparado o consolidado. • Se analiza el fallo del elemento (falta de sección, rotura parcial, grietas, etc.) y se determina su extensión. • Se eligen los tamaños de las telas o tiras de FRP que deben utilizarse para el fallo. • Se procede a limpiar y eliminar los restos degradados, así como posibles restos de pinturas.

	• Se mezclan los componentes del adhesivo y se aplica este sobre la zona del fallo. Después se coloca allí la placa o tira de FRP. En general, antes de aplicar el adhesivo resulta conveniente aplicar a la madera una imprimación adecuada y compatible con el adhesivo. • Se produce el polimerizado/curado de la resina durante el tiempo recomendado por el fabricante, durante el cual hay que aplicar presión. • Se eliminan los restos del adhesivo y se alisan o pintan las superficies reforzadas.
Ventajas	• Aumenta la resistencia mecánica (hasta el 140% en refuerzos madera-madera) y la capacidad portante del elemento reforzado. • Los elementos reforzados tienen una menor variabilidad en sus propiedades que los elementos no reforzados y son más estables dimensionalmente. • Reduce los efectos negativos de los defectos o singularidades (nudos, grietas, médula, baja densidad, etc.) de la madera en los elementos. • La relación resistencia/peso de los FRP es excelente y su comportamiento elástico es lineal a tracción. • Puede aplicarse *in situ* y de forma rápida. • Los FRP tienen una buena resistencia a la corrosión. • Es de uso muy flexible. • Aunque su uso mayoritario es para elementos horizontales (vigas, viguetas, cerchas), puede utilizarse también para elementos verticales (columnas, pilares). • Es aplicable tanto a madera nueva como a madera antigua. • El elemento reparado puede aguantar cargas a las 24 horas de su reparación, si bien el máximo de resistencia se alcanza a los 3-7 días, dependiendo de las resinas epoxi utilizadas para unir el FRP a la madera. • Puede utilizarse para aumentar la resistencia mecánica de la madera laminada encolada (en este caso suele usarse GFRP, bien en placas/tiras o bien en varillas).
Desventajas y limitaciones	• Si bien hay bastante experiencia en la aplicación de esta técnica al hormigón, en el caso de la madera se necesita mucha más investigación. • Se necesita más investigación sobre ensayos a largo plazo y sobre la durabilidad, a fin de tener en cuenta los efectos de las variaciones en contenido en humedad de la madera y en las condiciones ambientales. • No existen factores de fluencia para deflexiones a largo plazo, como se define en los códigos técnicos o en el CTE para vigas de madera sometidas a flexión. • No existe por ahora normativa ni tampoco guías de aplicación y de soluciones constructivas. • Cuando los FRP se exponen a elevadas temperaturas, su resistencia mecánica y su rigidez se reducen debido a la pérdida de la integridad mecánica de la matriz de polímeros. Para prevenir esta situación, puede cubrirse el FRP con madera o tableros derivados de ella, que tienen un efecto aislante que lo protegerá del fuego.

	• Se empeora el aspecto visual del elemento reforzado, ya que se oculta total o parcialmente la madera. Una solución para este inconveniente es cubrir la zona reparada con madera o tableros derivados. • El coste de algunos FRP es elevado por el momento (por ejemplo, los CFRP), si bien la tendencia del precio es a la baja. • Es necesario un control de calidad apropiado para la aplicación *in situ* del adhesivo. • La técnica requiere operarios formados en ella y con experiencia.

TÉCNICA 3: REFUERZO MEDIANTE PRÓTESIS/INJERTOS DE MADERA

TÉCNICA	REFUERZO MEDIANTE PRÓTESIS/INJERTOS DE MADERA
Definición	Esta técnica se basa en la sustitución de la madera degradada de un elemento por una prótesis o injerto de madera sólida conectada a la parte restante de un elemento mediante placas o varillas encoladas. Por madera sólida debe entenderse tanto madera aserrada como madera laminada encolada, madera contralaminada, madera microlaminada o madera reconstituida. También pueden usarse tableros lignocelulósicos.  **Viguetas reforzadas mediante prótesis de madera en su extremo derecho** La prótesis debe ser de la misma especie que la madera que se repara, o al menos similar o semejante en cuanto a propiedades mecánicas. El contenido de humedad de la prótesis debería ser el mismo que el del elemento que se repara. Las uniones de carpintería tradicionales que suelen encontrarse en estructuras antiguas de madera pueden clasificarse en cuatro tipos principales, de acuerdo con su disposición y geometría: a) A caja y espiga. Esta unión consta de dos componentes: el agujero de la caja y la lengua de la espiga. La espiga se inserta en el agujero de la caja. Normalmente, estas uniones forman una configuración tipo "L" o "T". b) Ensamble en caja simple. La muesca es una ranura en forma de "V" generalmente perpendicular a la longitud del elemento. Esta clase de unión suele estar ligada a tirantes de cerchas. c) Empalme a media madera. En este tipo de unión, el final o parte de un elemento se superpone por el final o parte del centro. d) Unión en bisel. Es un método de unión de dos miembros de extremo a extremo. Es similar a un empalme a media madera con miembros coaxiales. El uso de prótesis de madera tiene la ventaja de que permite crear una nueva unión usando la misma geometría y los mismos materiales que la antigua y, por tanto, garantiza la misma elasticidad.

	Muchas veces se utilizan varillas metálicas para unir la prótesis al resto del elemento, si bien pueden usarse varillas de madera, de FRP y de otros materiales.
Proceso	El proceso consta, por lo general, de los siguientes pasos: • Se apuntala el elemento que necesita ser reparado o consolidado. • Se analiza el fallo del elemento (falta de sección, rotura parcial, grietas, etc.) y se determina su extensión. • Se elige la prótesis o injerto de madera y el tipo de unión adecuado (que depende de la zona y el esfuerzo solicitado). • Se procede a limpiar y eliminar los restos degradados, así como posibles restos de pinturas. • Se prepara en taller la prótesis o injerto de madera, con el mecanizado de la zona de unión o encolado al elemento que se repara. • Se adhiere la prótesis al elemento, normalmente con varillas que han sido encoladas previamente. • Se produce el polimerizado/curado del adhesivo durante el tiempo recomendado por el fabricante, durante el cual hay que aplicar presión. • Se eliminan los restos del adhesivo y se alisan o pintan las superficies reparadas.
Ventajas	• El precio de los materiales es bajo (por lo general, se usa madera y varillas metálicas). • El aspecto resultante de los elementos reparados es el más parecido al que tenían inicialmente. • Si la realización y los materiales son buenos, la capacidad portante y la resistencia estructural serán buenos. • Aunque su uso mayoritario es para elementos horizontales (vigas, viguetas, cerchas), puede utilizarse también para elementos verticales (columnas, pilares). • Con resinas epoxi, el elemento reparado puede aguantar cargas a las 24 horas de su reparación, si bien el máximo de resistencia se alcanza a los 3-7 días. • Puede utilizarse para aumentar la resistencia mecánica de la madera laminada encolada (normalmente con varillas), redistribuyendo las cartas que soporta el elemento. • La aplicación de la técnica con varillas metálicas encoladas está bien estudiada para los tipos de unión más habituales y se dispone de modelos numéricos de las uniones. • Existe normativa (CTE) para algunas de las uniones más habituales.
Desventajas y limitaciones	• Falta investigación para el caso de prótesis unidas al elemento mediante varillas que no sean metálicas (p.ej, de FRP). • No existen guías de aplicación y de soluciones constructivas. • Es necesario un control de calidad apropiado para la aplicación *in situ* del adhesivo. • Se necesitan mucha cantidad de horas de mano de obra para que el aspecto y el resultado estructural sean buenos. • Es inevitable un trabajo previo en la carpintería para que la prótesis

	tenga la forma y las dimensiones adecuadas. • Si la madera utilizada para la prótesis no es durable o no se ha tratado previamente, el refuerzo será susceptible de degradarse. • La técnica requiere operarios formados en ella y con experiencia.

3. RESULTADOS OBTENIDOS EN EL PAQUETE DE TRABAJO 5: DESARROLLO DE SOLUCIONES INNOVADORAS DE REPARACIÓN Y REFUERZO PARA MADERA ESTRUCTURAL

Tarea 5.1: Definición de las especificaciones que deben cumplir las soluciones de reparación y refuerzo

A continuación se presentan muy resumidas las especificaciones que deben cumplir las soluciones de reparación y refuerzo:

1. Necesidad de que la solución sea aplicable en obra (*in situ*).
2. Menor coste posible.
3. El elemento reparado/reforzado debe ser visualmente similar al elemento en su estado original.
4. resistencia estructural debe ser como mínimo semejante a la que tenía el elemento en su estado original.
5. Menor impacto ambiental posible.

Tarea 5.2: Desarrollo de las soluciones de reparación y refuerzo

A continuación se proporciona un resumen de los resultados de mayor interés de esta tarea.

A partir de las especificaciones anteriores, se propusieron **tres soluciones de reparación y refuerzo, a las que se incorporaron numerosas variaciones e innovaciones**:

- Reparación mediante elementos rígidos de refuerzo embebidos en resinas.
- Refuerzos mediante materiales compuestos de polímeros reforzados con fibras (FRP) adosados con resinas.
- Refuerzo mediante prótesis de madera encoladas a los elementos.

La primera solución consiste en eliminar la parte dañada del elemento que se desea reparar y en elaborar después una mezcla de resina con otros materiales para crear un encofrado en la parte eliminada, encofrado que se unirá a la parte en buen estado del elemento mediante un elemento rígido (por ejemplo, varillas).

La segunda solución se basa en colocar adherida una banda de FRP (plástico reforzado con fibras) en dirección longitudinal o perpendicular al elemento.

La tercera consiste en eliminar la parte dañada del elemento que se desea reparar/reforzar. Se prepara una prótesis de madera que coincida en características estructurales de la madera del elemento (usualmente de madera antigua), y en forma con la parte eliminada. La prótesis se une a la parte sana mediante un elemento rígido, de igual manera que se hace en la primera de estas tres soluciones.

5.2.1. Reparación mediante elementos rígidos de refuerzo embebidos en resinas

Esta solución consiste en eliminar la parte dañada del elemento de madera estructural. Para sustituir esa parte eliminada se elabora una mezcla de resina con otro elemento que, mediante un encofrado y una unión con un elemento rígido (varilla de fibra de vidrio, en el caso del proyecto), se mantiene unido a la parte sana del elemento.

En concreto, la varilla de fibra de vidrio se une a la zona sana del elemento mediante un taco químico.

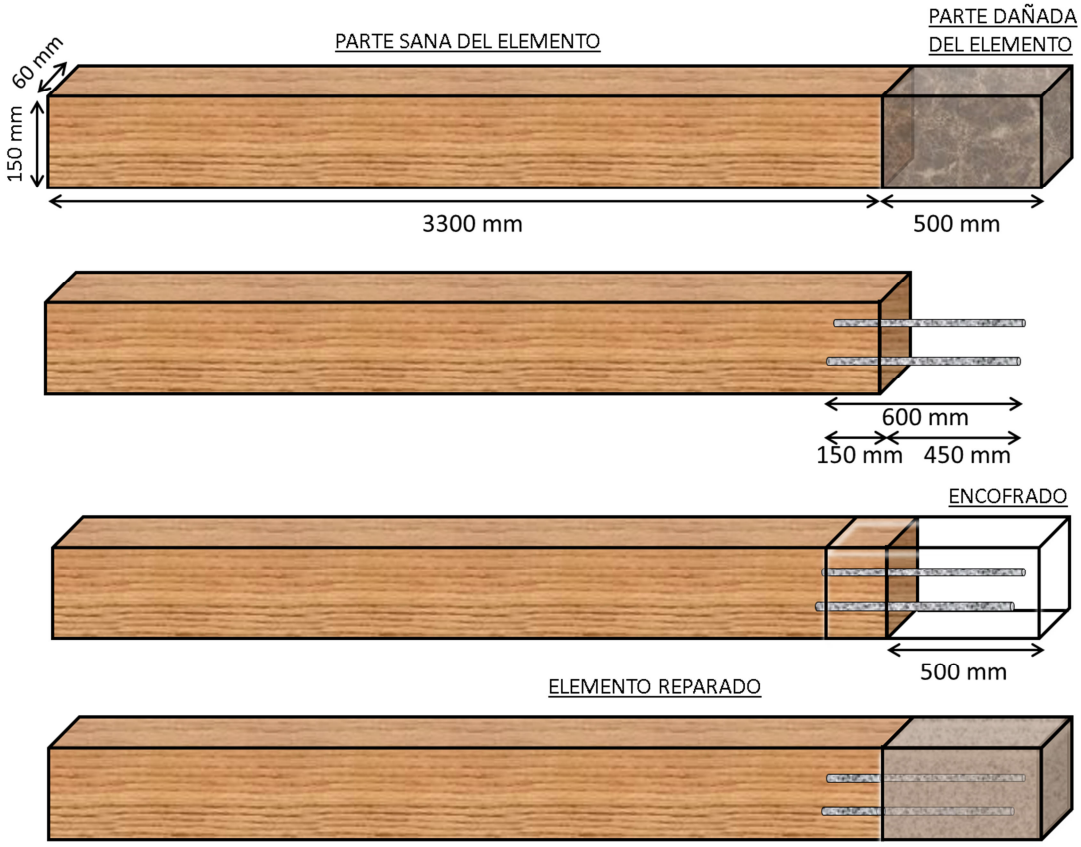


Figura 1. Reparación mediante elementos rígidos de refuerzo embebidos en resinas.

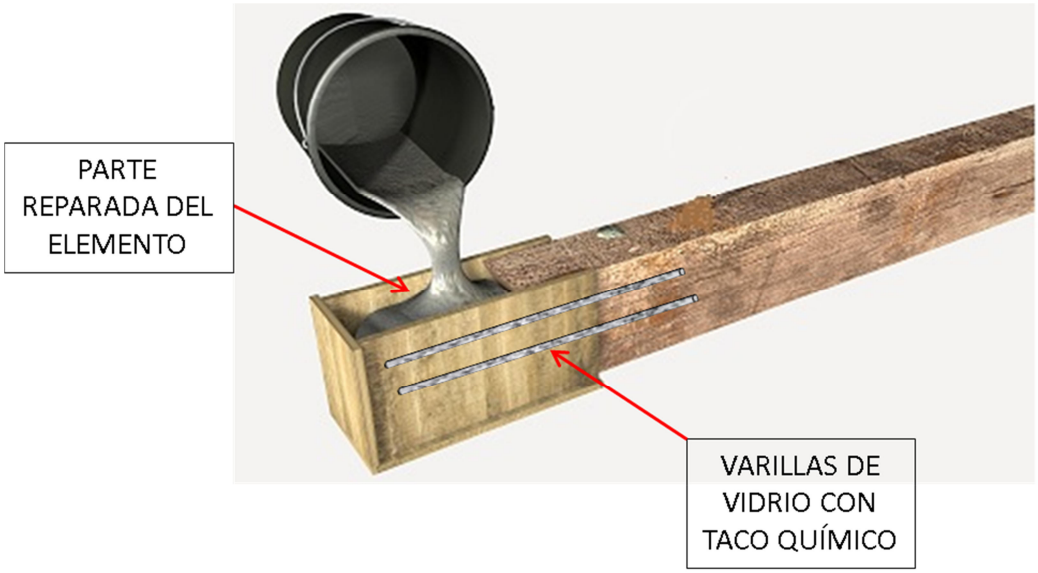


Figura 2. Sistema de reparación mediante elementos rígidos de refuerzo embebidos en resinas.

En el caso de la parte reparada del elemento se probaron diferentes materiales para ver cuáles funcionaban mejor con la resina elegida. A la combinación de la resina y el material se le llama mezcla.

El siguiente paso fue la elaboración de las mezclas. Debido a la reacción exotérmica que produce la resina al mezclarse, subía la temperatura.

Figura 3. Ejemplo de mezcla desarrollada (3): resina A + arena + vermiculita. Su densidad es de 1.020 kg/m^3.

Figura 4. Ejemplo de mezcla desarrollada (4): resina A + arena + serrín. Su densidad es de 1.333 kg/m^3.

Figura 5. Ejemplo de mezcla desarrollada (8): resina A + arena + arlita. Su densidad es de 1.225 kg/m^3.

Figura 6. Ejemplo de mezcla desarrollada (14): resina A + arena + serrín. Su densidad es de 1.333 kg/m^3.

Para tener un control sobre la reactividad de las mezclas en función de la cantidad de resina y material, se midió la temperatura de la mezcla en función del tiempo. Para ello se utilizó un sensor de temperatura que incluye el viscosímetro. Por dificultades técnicas, no pudo medirse la temperatura de las primeras cuatro muestras; la temperatura de la mezcla (13) no se midió porque, por la dificultad de realizarla, se descartó para el proyecto.

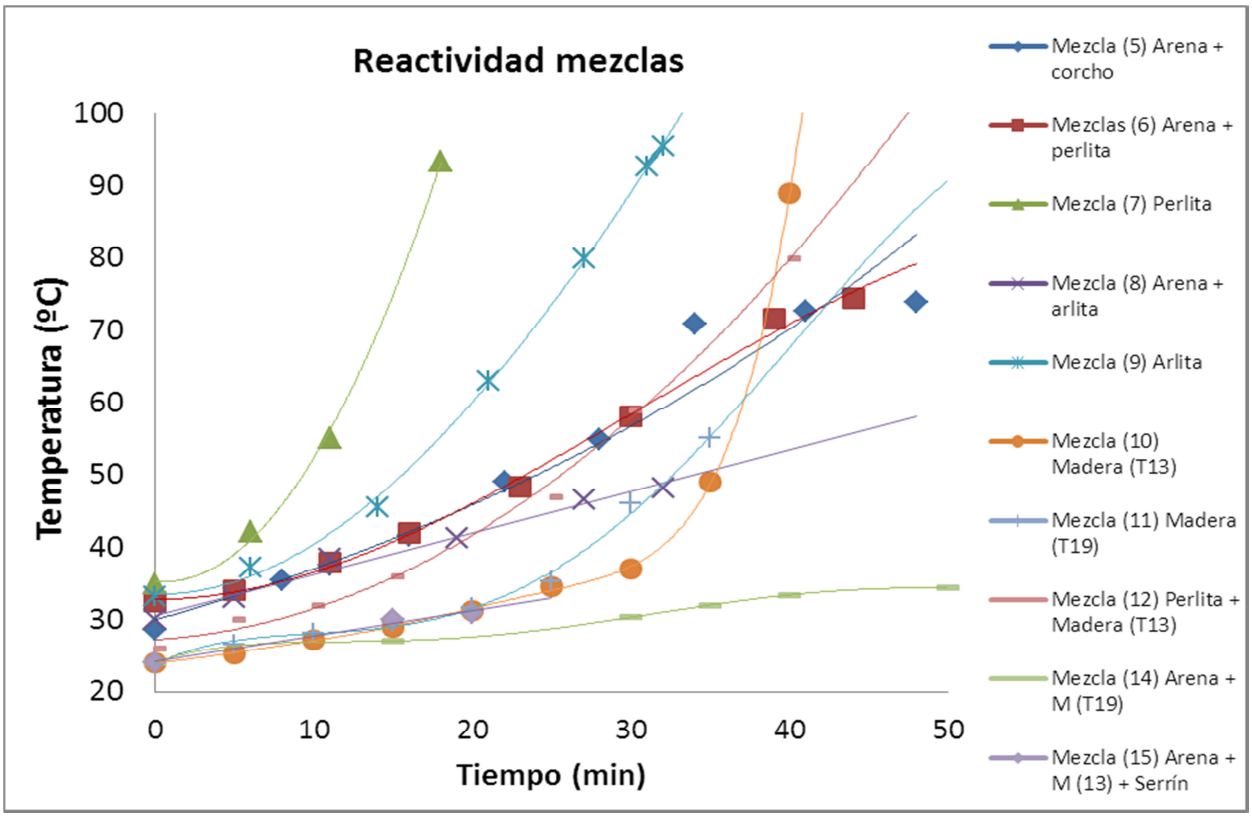


Figura 7. Reactividad de las mezclas.

A partir de toda la información obtenida tanto de mezclas, densidades y temperatura, **se concluyó que las mejores mezclas son las que contienen arena**.

Esta opción permite controlar mejor el pico exotérmico del avance de la reacción de la resina epoxi y evita que se modifique el volumen inicial de la muestra. Por otra parte, teniendo en cuenta la densidad, las mezclas de resina y arena con vermiculita, corcho y perlita, presentan valores similares, alrededor de 1.000 kg/m^3. Esta misma combinación con serrín de madera alcanza más densidad, 1.330 kg/m^3, aunque también podría ser buena opción para el sistema por el acabado superficial, muy similar al del elemento de madera reparado.

Finalmente, de las 15 mezclas desarrolladas se eligieron **5 mezclas** como óptimas para este tipo de solución de reparación, y con ellas se realizaron más adelante ensayos a flexión para determinar cuáles tenían mejores propiedades mecánicas:

- **Mezcla (2): Resina A + arena.**
- **Mezcla (4): Resina A + arena + serrín.**
- **Mezcla (5): Resina A + arena + corcho.**
- **Mezcla (10) pero añadiendo además arena: Resina A + arena + madera tamizada a cierto tamaño óptimo. Se denomina a esta mezcla (10´).**
- **Mezcla (15): Resina A + arena + serrín + madera tamizada a cierto tamaño óptimo.**

Por otro lado, se desarrolló el taco químico que sirve para adherir la varilla de fibra de vidrio a la parte sana de la del elemento, pues esta varilla une el elemento embebido en resina con el elemento ya saneado. Para desarrollar este taco químico se mezcló resina con diferentes cargas (a cada una de estas mezclas se le denomina combinación).

Las combinaciones que se propusieron para el taco químico fueron ocho:

- **Combinación 1**: resina A únicamente.
- **Combinación 2**: resina A + aerosil en una proporción del 2 %.
- **Combinación 3**: resina A + aerosil en una proporción del 4 %.
- **Combinación 4**: resina A + garamite en una proporción del 3 %.
- **Combinación 5**: resina A + polvo de madera en una proporción del 4 %.
- **Combinación 6**: resina A + polvo de madera en una proporción del 8 %.
- **Combinación 7**: taco químico comercial.
- **Combinación 8**: resina B únicamente.

Figura 8. Medida de la viscosidad de la combinación 4.

Figura 9. Medida de la viscosidad de la combinación 5.

Figura 10. Medida de la viscosidad de la combinación 6.

Para probar la efectividad de los 8 tacos químico desarrollados, se hicieron probetas de madera que simulan la conexión con elemento a reparar, y en ellas se introdujo una varilla de fibra de vidrio con cada tipo de combinación. Se realizaron tres probetas para cada una de las combinaciones (total=24 probetas).

Figura 11. Todas las probetas terminadas y preparadas para la extracción.

Una vez curado el adhesivo del taco químico, las 24 muestras se ensayaron en una máquina de ensayo donde se extrajeron las varillas, midiendo la fuerza necesaria para despegar la varilla de la probeta de madera.

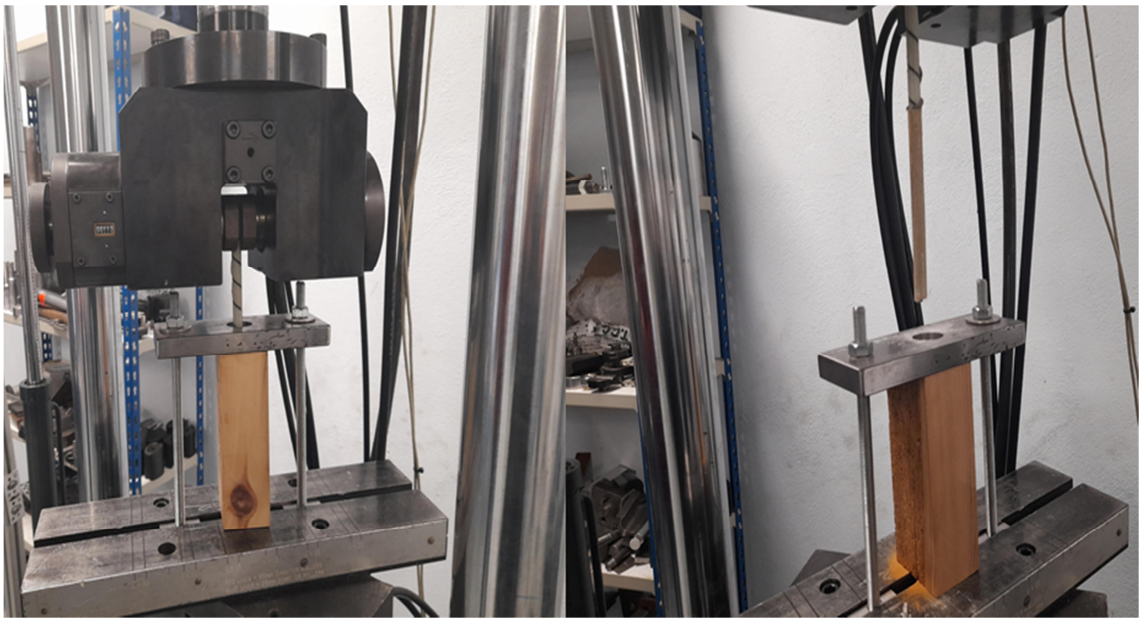


Figura 12. Ensayo de extracción.

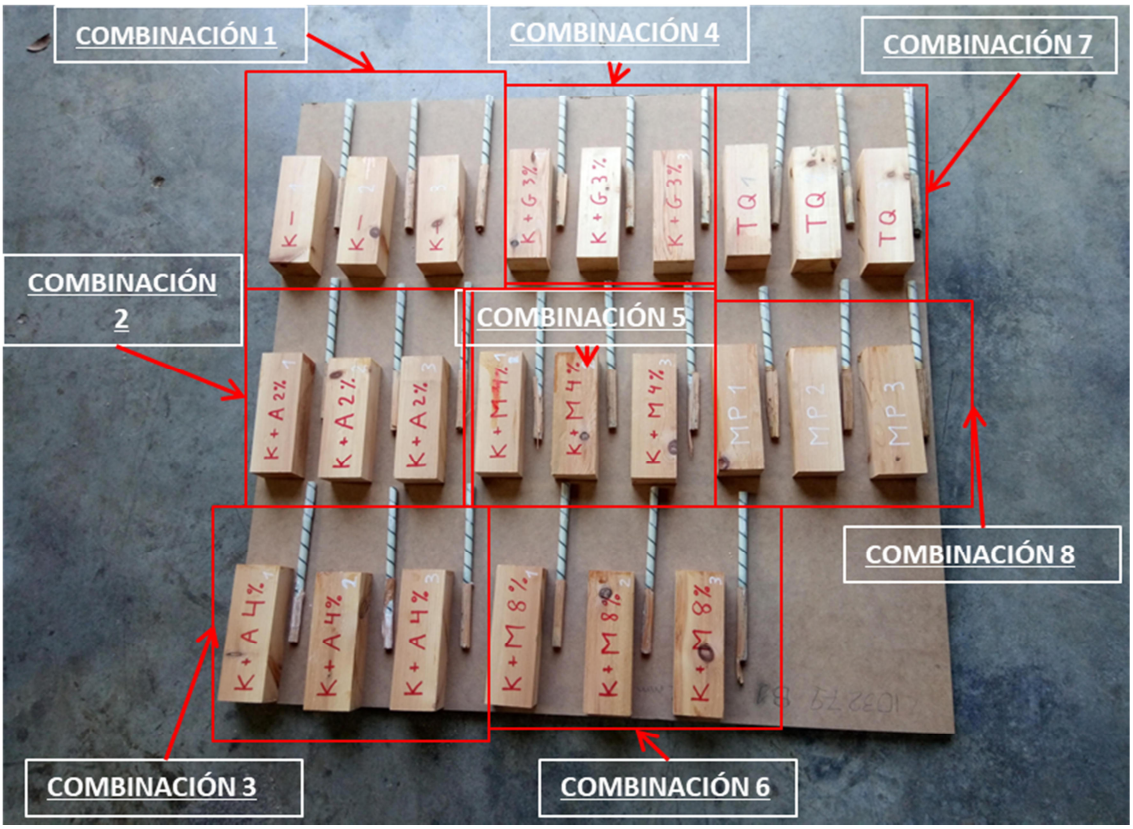


Figura 13. Probetas después del ensayo de extracción.

Una vez analizados los resultados del ensayo de extracción y teniendo en cuenta consideraciones sobre la viscosidad para el uso en obra, se decidió **utilizar la combinación 6 (Resina A + polvo de madera al 8%) como taco químico para la solución de reparación mediante elementos rígidos de refuerzo embebidos en resinas**, por los siguientes motivos:

a) De las 2 combinaciones de madera es la que da valores más altos a la extracción.
b) Tiene una viscosidad adecuada para su trabajo en obra; no es tan fluida como la resina A sola.
c) Respecto a la combinación 3 (Aerosil 4%) que tiene unos valores de carga medios parecidos, la combinación 6 los tiene más similares entre sí, con menor dispersión. Esto resulta de interés a la hora de confiar en el adhesivo para una estructura, pues se valora mucho que no tenga dispersión.
d) También comparando con la combinación 3, **el polvo de madera es un material que no daña al medioambiente, de muy fácil abastecimiento y bajo precio**.
e) Además, como se aprecia en la siguiente imagen, la combinación 6 se adhiere muy bien a las paredes del agujero de la probeta ya que ha arrancado mucha madera en el ensayo. Esto significa que es un buen taco químico para el proceso de reparación, ya que por contener el mismo material que se repara tiene una cohesión excepcional.

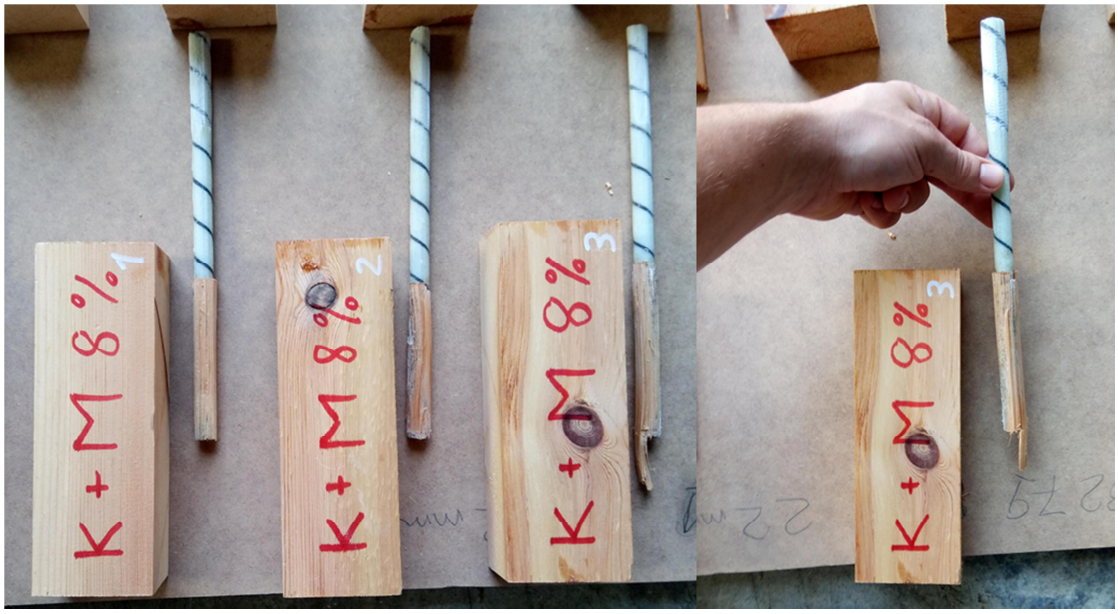


Figura 14. Combinación 6 (Resina A + polvo de madera al 8%).

5.2.2. Refuerzos mediante materiales compuestos de polímeros reforzados con fibras (FRP) adosados con resinas

Las fibras pueden ser de varios materiales, pero para el proyecto se eligieron fibras de carbono, por su amplia disponibilidad y porque están bien caracterizadas.

Figura 15. Detalle FRP. FUENTE: Clamdesarrollo

Los polímeros reforzados con las fibras de carbono se utilizan a escala industrial para multitud de usos (coches, aviones, etc.). Este material tiene un alto coeficiente de elasticidad y es ideal para los casos en los que se busca una elevada rigidez.

La solución en este caso propone que las bandas vayan adheridas o incrustadas en el elemento a reparar, en el caso de las vigas en la sección inferior ya que es donde mayor esfuerzo debe resistir, además, se colocan longitudinalmente porque de esta manera recubre mayor superficie. Las bandas se adhieren al elemento mediante una resina a la que se llama B.

En la siguiente imagen se muestra las dos formas de colocar las bandas teniendo en cuenta que en dicha imagen los elementos a reparar están al revés para poder mostrar la colocación de las bandas; es decir, las bandas siempre quedan debajo de la viga.

Figura 16. Disposiciones del FRP en el elemento a reparar.

5.2.3. Refuerzos mediante prótesis de madera encoladas a los elementos

En esta solución, se refuerza el elemento mediante prótesis de madera junto a varillas de fibra de vidrio que se encolan a ambas partes y sirven de unión.

Lo destacable de la solución es que la madera que se estudia es madera antigua, con el fin de que las futuras reparaciones o rehabilitaciones en obra se compongan de este tipo de madera. La ventaja de la madera antigua respecto a una pieza de madera nueva es que la antigua tiene unas propiedades similares a la viga que se está restaurando, tanto de resistencia como estéticas. Entonces, una vez colocada la prótesis, las diferencias con el elemento inicial son mínimas.

La manera de simular un elemento en uso como una viga consiste en realizar un corte en uno de sus lados y, posteriormente, volverla a unir. Se realizan dos tipos de cortes para comprobar cuál da mejor resultados, uno a 90 grados y el otro a 45 grados. Para volver a unir el elemento se utilizan varillas de fibra de vidrio encoladas con la resina B.

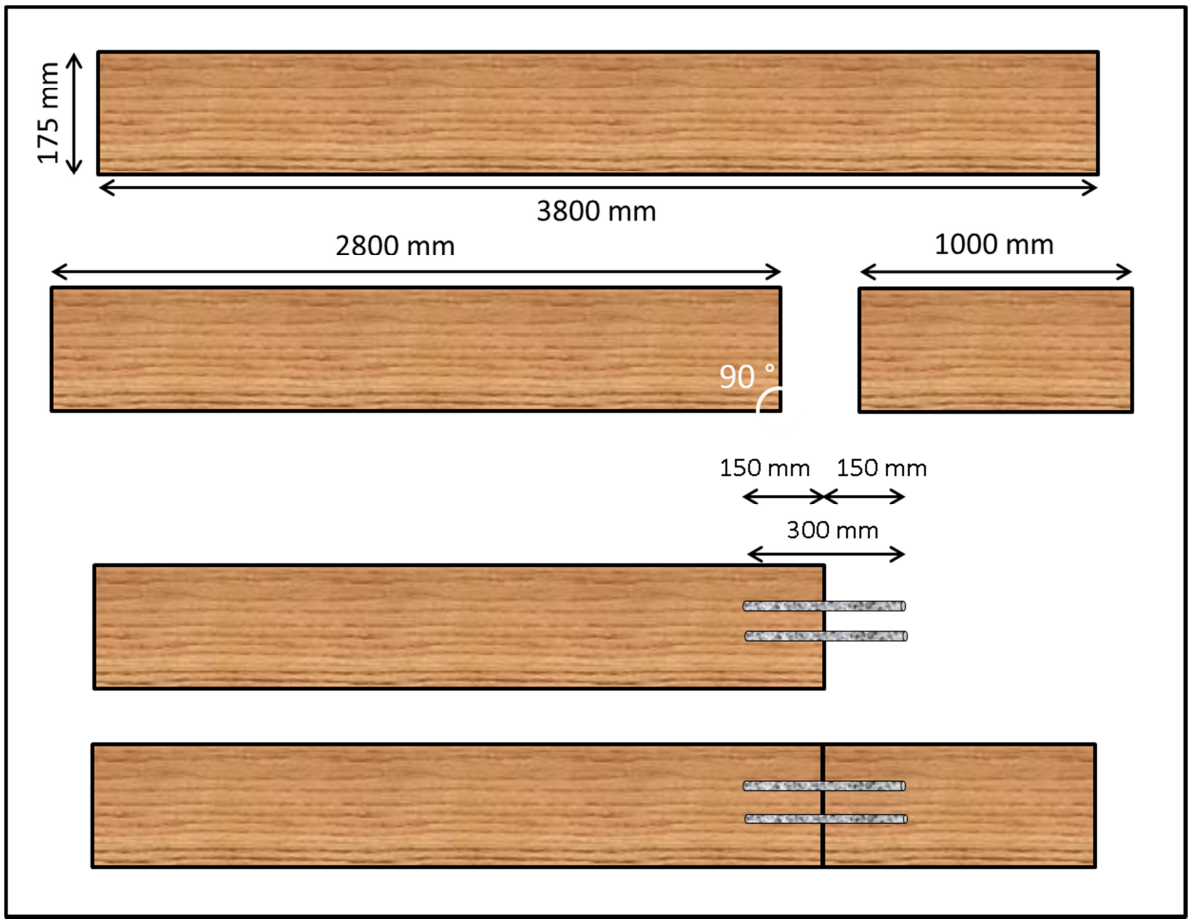


Figura 17. Prótesis de madera con el corte a 90°.

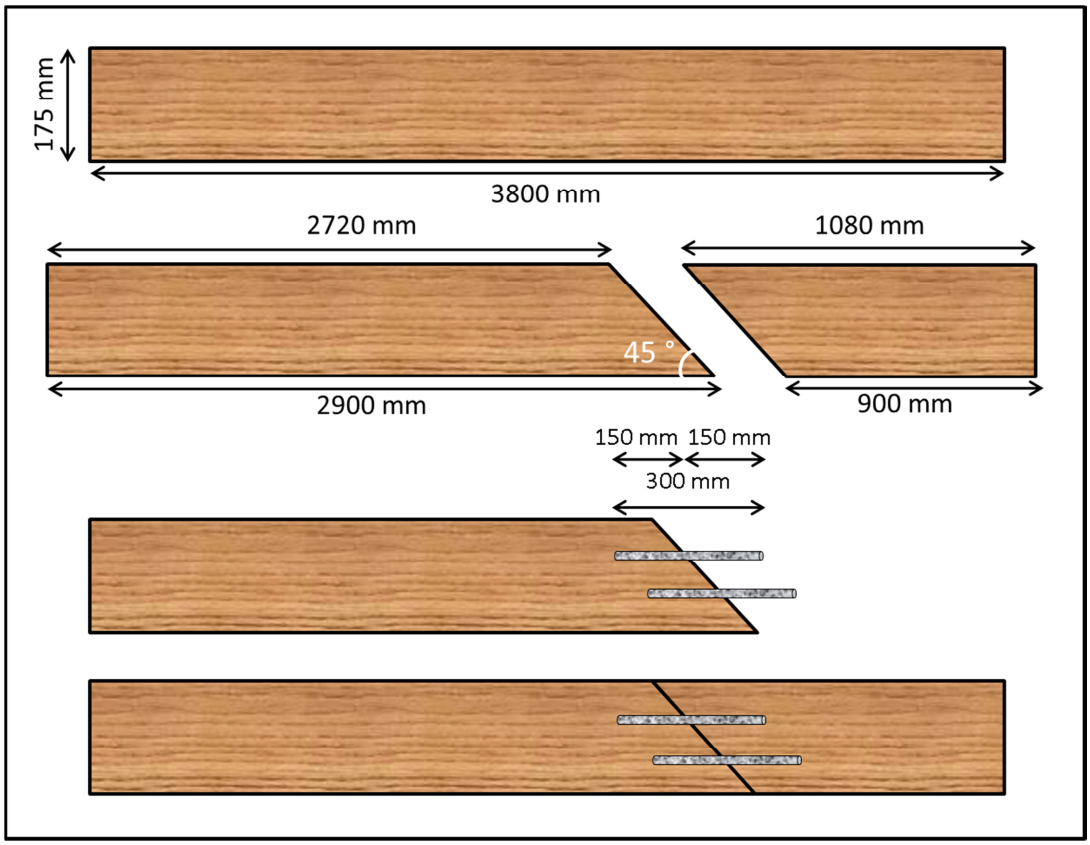


Figura 18. Prótesis de madera con el corte a 45°.

4. RESULTADOS OBTENIDOS EN EL PAQUETE DE TRABAJO 6: APLICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS SOLUCIONES DESARROLLADAS

Tarea 6.1: Aprovisionamiento de madera para reparar o reforzar, y acondicionamiento y preparación previa de los elementos

La madera elegida para el aprovisionamiento corresponde a vigas de madera antigua procedentes de derribo que conservan su integridad estructural y en las que pueden realizarse los ensayos de rotura a flexión una vez ejecutados en ellas los refuerzos/reparaciones pertinentes.

Las especies de madera de las vigas del proyecto son del género *Pinus sp.* Estas especies se han seleccionado por ser las que más se usaban para la realización de edificaciones, sobre todo en la Comunitat Valenciana. Algunas de ellas, como el pino silvestre, se siguen usando. Dentro de dicho género, las especies seleccionadas corresponden a las que generalmente se conocen como "mobila" (*Pinus palustris, Pinus taeda, Pinus echinata* y *Pinus elliottii*) y pino silvestre (*Pinus sylvestris*).

Figura 1. Vigas aprovisionadas para el proyecto.

De todo el grupo de vigas **se seleccionaron 55** con características similares de densidad, resistencia, etc. De ellas:

a) 20 se utilizaron para la reparación mediante elementos rígidos de refuerzo embebidos en resina con diferentes cargas.
b) 20 se destinaron a los refuerzos mediante materiales compuestos de polímeros reforzados con fibras (FRP).
c) 10 se reservaron para el refuerzo mediante prótesis de madera unidas con elementos rígidos de refuerzo y encoladas a los elementos.
d) 5 se emplearon y ensayaron sin reforzar, para establecer los valores de control.

La madera se acondicionó el tiempo necesario hasta alcanzar una humedad de equilibrio higroscópico (HEH) del 11-12%.

Tarea 6.2: Aplicación de las soluciones de reparación y refuerzo a la madera aprovisionada

A continuación se presentan muy resumidamente los resultados más destacables.

6.2.1. Aplicación de la solución de elementos rígidos de refuerzo embebidos en resinas

Se repararon 20 viguetas de madera antigua de pino silvestre de 380x15x6 cm. Inicialmente estaban intactas y se cortaron con motosierra para simular zonas deterioradas que hubieran sido eliminadas como paso previo a la reparación de las viguetas.

Antes de cortarlas, las viguetas se caracterizaron mediante ultrasonidos para conocer la resistencia inicial de cada una y, posteriormente, comparar la resistencia final una vez reparadas.

Figura 2. Viguetas seleccionadas para la reparación mediante elementos rígidos de refuerzo embebidos en resinas.

Figura 3. Corte con motosierra de las viguetas para simular zonas deterioradas eliminadas como paso previo a la reparación.

Figura 4. Viguetas "saneadas" con el elemento rígido ya colocado (varillas de vidrio pretensadas).

Para el material de encofrado se hicieron las 5 mezclas seleccionadas en el PT5:

- Resina A + arena
- Resina A + arena + corcho
- Resina A + arena + serrín
- Resina A + arena + madera tamizada
- Resina A + arena + madera tamizada + serrín

Figura 5. Vertido de una de las mezclas de encofrado (resina A + arena + madera tamizada).

Figura 6. Resultado antes de desencofrar (resina A + arena + madera tamizada).

Figura 7. Viguetas finales una vez desencofradas (resina A + arena + madera tamizada).

Figura 8. Viguetas finales reparadas para las 5 mezclas.

6.2.2. Aplicación de la solución de refuerzo mediante PRP

En las soluciones innovadoras basadas en FRP, se desarrollaron combinaciones de FRP de distintos tipos y de resinas epoxi para determinar la combinación más resistente y económica, así como de mejor adherencia a la madera.

Tras numerosas pruebas iniciales, se seleccionó la combinación más favorable y se repararon 20 viguetas de madera antigua (dimensiones: 340x15-17x5-6 cm) con tiras de un CFRP (1,4 mm y 5 cm de ancho) y una resina epoxi comercial (resina B). La especie de las vigas era *Pinus* sp.

Como se explicó anteriormente las tiras de FRP se colocaron solapadas (adheridas) en 10 viguetas y solapadas en las otras 10 viguetas, siempre en la cara inferior.

Figura 9. Viguetas finales reforzadas mediante tira de FRP solapado en su cara inferior.

Figura 10. Viguetas finales reforzadas mediante tira de FRP incrustado en su cara inferior.

6.2.3. Aplicación de la solución de prótesis de madera

Se aplicó esta solución de reparación a diez viguetas de madera antigua de mobila y pino silvestre de 3.800 mm x 175 mm x 60 mm, previamente acopiadas, acondicionadas y preparadas.

Se cortaron 5 vigas con corte vertical ("v") a 90° y 5 con corte en diagonal ("d") a 45°. Las partes cortadas simulan prótesis, que se unen al resto de las viguetas mediante varillas de vidrio pretensadas unidas a la madera con taco químico.

Las siguientes imágenes ilustran el proceso.

Figura 11. Introducción de la varilla que une la parte "sana" del elemento con la prótesis.

Figura 12. Unión prótesis-vigueta.

Figura 13. Ejemplo de unión prótesis-vigueta con los dos cortes (diagonal y vertical).

Tarea 6.3: Caracterización mecánica de los elementos reparados y reforzados, y modelado de éstos

A continuación se presentan muy resumidamente los resultados más destacables.

6.3.1. Caracterización mecánica de los elementos reparados mediante la solución de elementos rígidos de refuerzo embebidos en resinas

Los ensayos destructivos a flexión axial y módulo se elasticidad se realizaron según la norma UNE-EN 408:2011+A1:2012. Previamente, antes de ser reparadas las viguetas, esas propiedades se determinaron mediante ensayos de emisión-recepción de ultrasonidos, a fin de poder compararlas entre los elementos no reparados y los reparados.

Figura 14. Máquina de ensayo a flexión con viga.

Figura 15. Ejemplo de rotura: viga 3, carga de rotura: 13.966 N

Figura 16. Ejemplo de rotura: viga 10, carga de rotura: 6.448 N

Figura 17. Ejemplo de rotura: viga 20, carga de rotura: 14.373 N

La siguiente imagen muestra los resultados obtenidos de la resistencia a flexión, antes y después de la reparación mediante elementos rígidos de refuerzo embebidos en resinas.

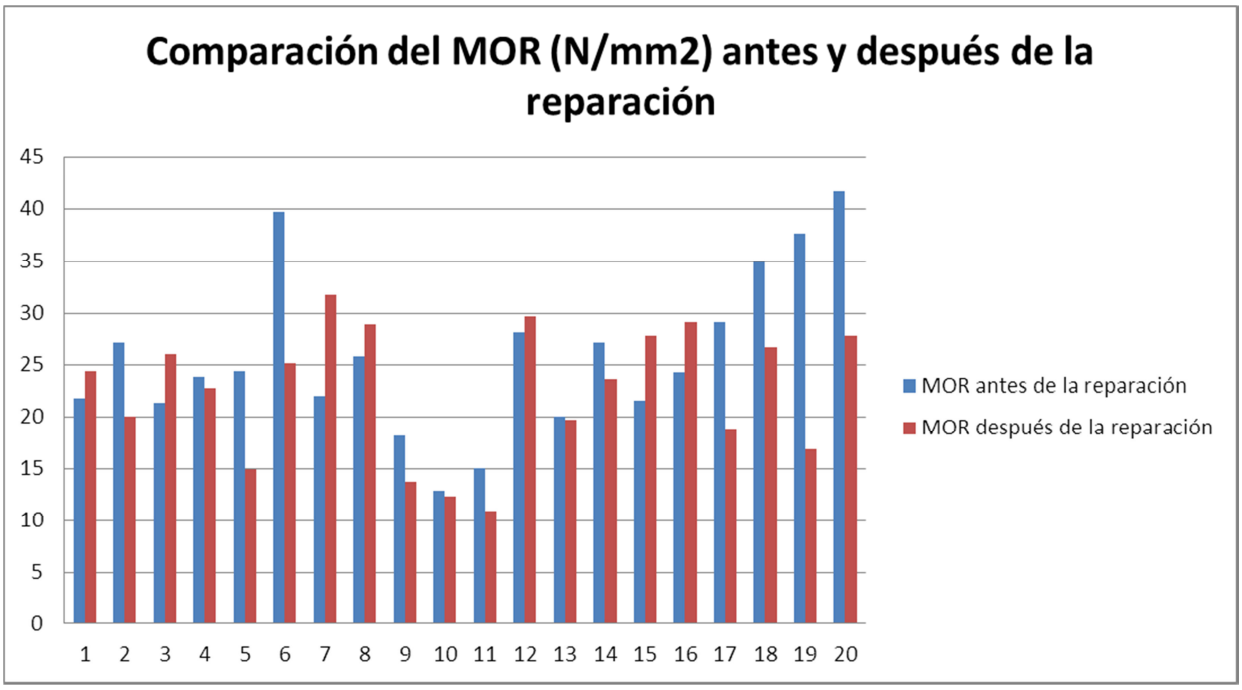


Figura 18. Comparación entre la resistencia a flexión antes y después de la reparación, para todas las mezclas.

La siguiente imagen muestra los promedios de la resistencia a flexión, antes y después de la reparación.

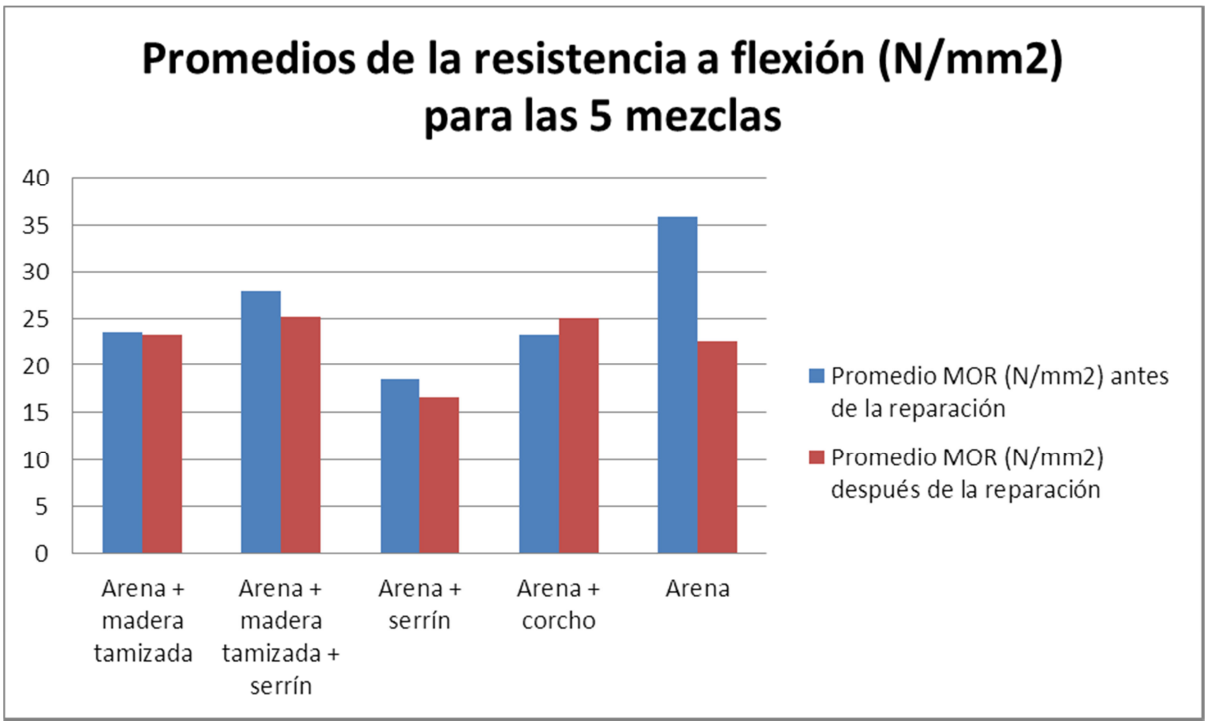


Figura 19. Comparación entre la resistencia a flexión media antes y después de la reparación, para todas las mezclas.

En conclusión, para la **reparación mediante elementos rígidos de refuerzo embebidos en resinas**, **las mezclas para encofrado de arena + serrín y de arena + corcho** son las que mejor cumplen los dos requisitos siguientes, que resultan imprescindibles para una solución de reparación de madera estructural:

a) Buena adherencia y unión sólida de la mezcla a la madera normal, sin degradaciones.
b) Resistencia a flexión total del elemento reparado muy similar o superior a la del elemento "sano".

Ambas mezclas no aumentan la resistencia de flexión del elemento reparado, pero sí proporcionan una resistencia muy similar a la de madera "sana" de calidad media. **Además, utilizan materias primas renovables y reciclables (corcho y serrín).**

6.3.2. Caracterización mecánica de los elementos reforzados mediante FRP

Una vez preparadas las 10 vigas con FRP solapado y las otras 10 vigas con FRP incrustado se procedió a ensayarlas según la norma UNE-EN 408:2011+A1:2012 para determinar su módulo de elasticidad y su resistencia a flexión. Previamente, antes de ser reforzadas las viguetas, esas dos propiedades se determinaron mediante ensayos de emisión-recepción de ultrasonidos, a fin de poder compararlas entre los elementos no reforzados y los reforzados.

Las dos imágenes siguientes muestran la disposición del ensayo para el FRP solapado y el FRP incrustado.

Figura 20. Disposición en máquina de ensayo de un elemento reforzado con lámina de FRP incrustada.

Figura 21. Disposición en máquina de ensayo de un elemento reforzado con lámina de FRP solapada.

Las notables mejoras en resistencia a flexión y elasticidad de las vigas reforzadas se muestran en las gráficas siguientes.

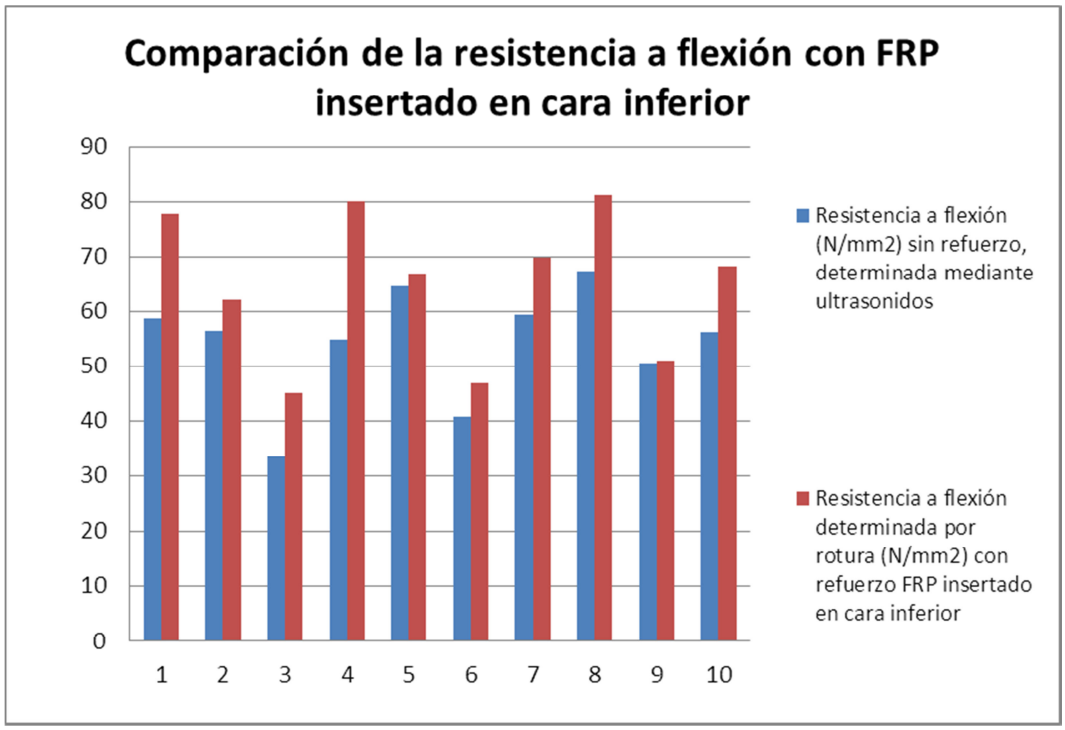


Figura 22. Comparación entre la resistencia a flexión (MOR) con la vigueta sin reforzar y con la vigueta reforzada mediante tira de FRP insertada en su cara inferior.

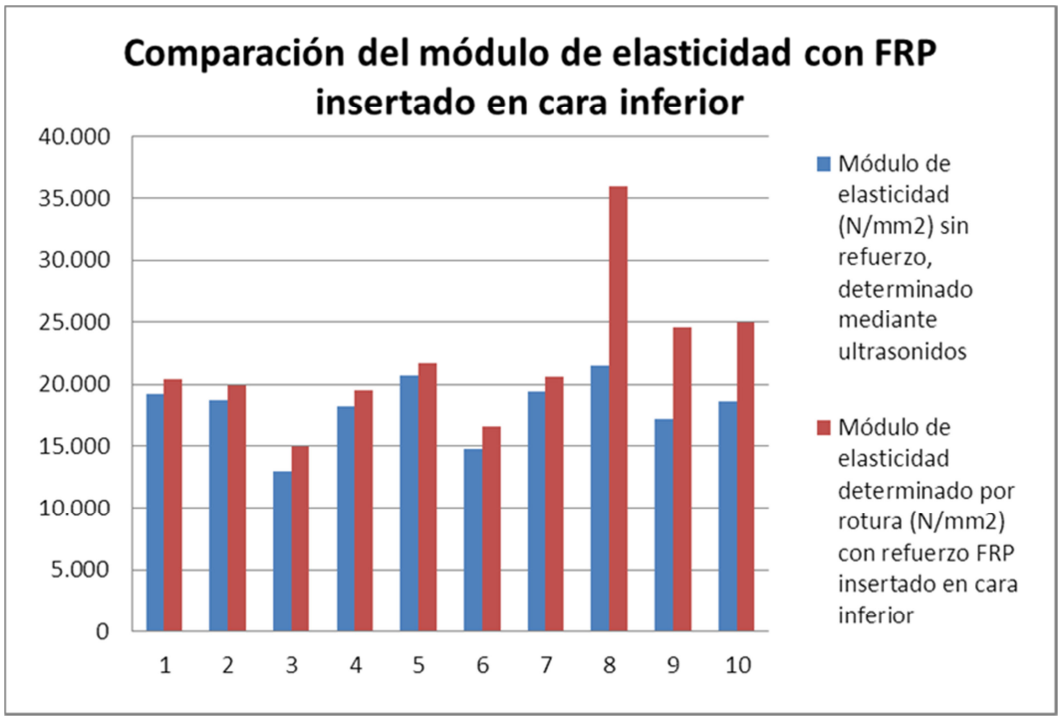


Figura 23. Comparación entre el módulo de elasticidad (MOE) con la vigueta sin reforzar y con la vigueta reforzada mediante tira de FRP insertada en su cara inferior.

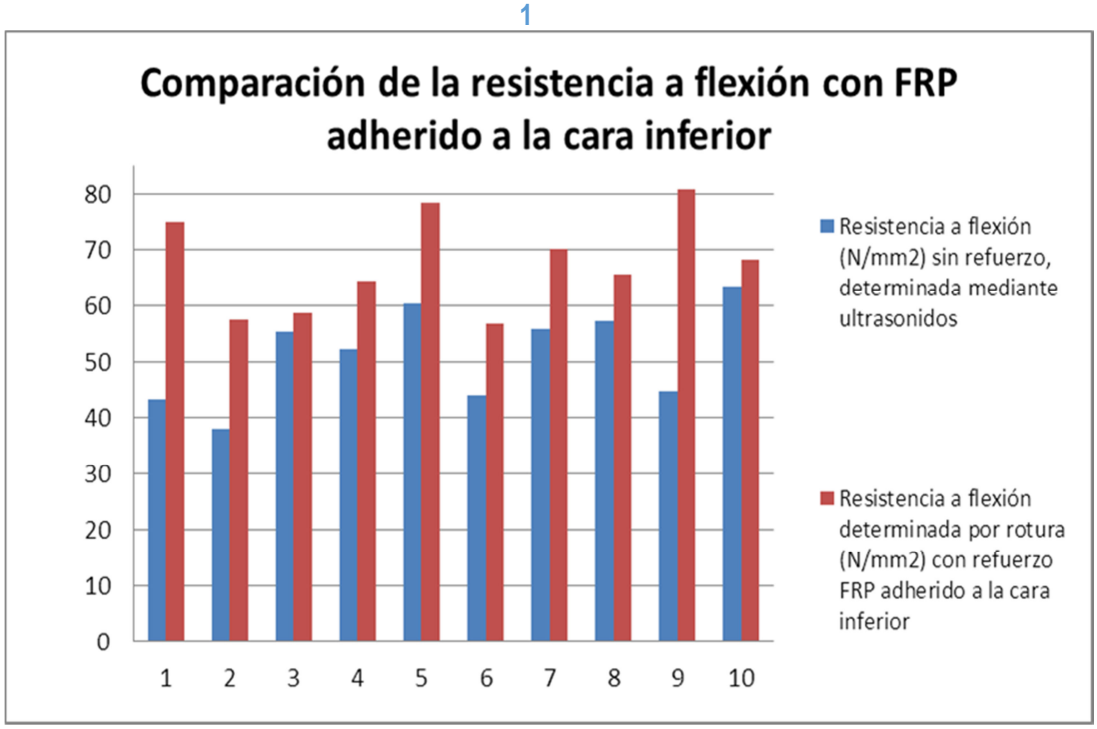


Figura 24. Comparación entre la resistencia a flexión (MOR) con la vigueta sin reforzar y con la vigueta reforzada mediante tira de FRP adherida a su cara inferior.

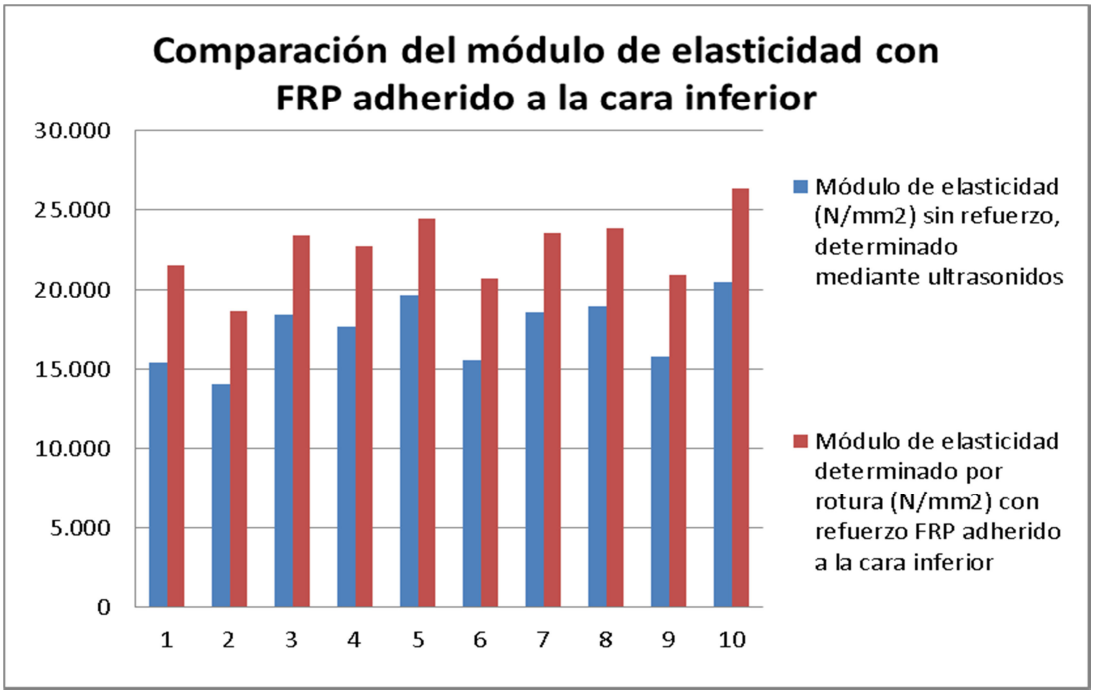


Figura 25. Comparación entre el módulo de elasticidad (MOE) con la vigueta sin reforzar y con la vigueta reforzada mediante tira de FRP adherida a su cara inferior.

En resumen, la solución de refuerzo mediante FRP es muy efectiva y totalmente compatible con la madera. Aumentó significativamente la resistencia a flexión y el módulo de elasticidad de las viguetas reforzadas. En el caso del FRP insertado en la cara inferior de la vigueta, el MOR aumentó un 19,65%, y el MOE, un 20,82%. En el caso del FRP adherido a la cara inferior de la vigueta, el MOR aumentó un 31,30 %, y el MOE, un 29,54 %.

Esta solución tiene también la ventaja de que es sencilla de aplicar tanto en laboratorio como en obra.

6.3.3. Caracterización mecánica de los elementos reparados mediante prótesis de madera

Las 10 viguetas reparadas mediante prótesis de madera se ensayaron según la norma UNE-EN 408:2011+A1:2012 para determinar su módulo de elasticidad y su resistencia a flexión. Previamente, antes de ser reforzadas las viguetas, esas dos propiedades se determinaron mediante ensayos de emisión-recepción de ultrasonidos, a fin de poder compararlas entre los elementos no reparados y los reparados.

Las siguientes imágenes ilustran los ensayos realizados.

Figura 26. Resultado rotura viga 1d, carga soportada: 7.024 N

Figura 27. Resultado rotura viga 3d, carga soportada: 7.540 N

Figura 28. Resultado rotura viga 2c, carga soportada: 15.572 N

La siguiente gráfica muestra los resultados de la resistencia a flexión, para corte vertical y diagonal, antes y después de las reparación de las viguetas mediante prótesis.

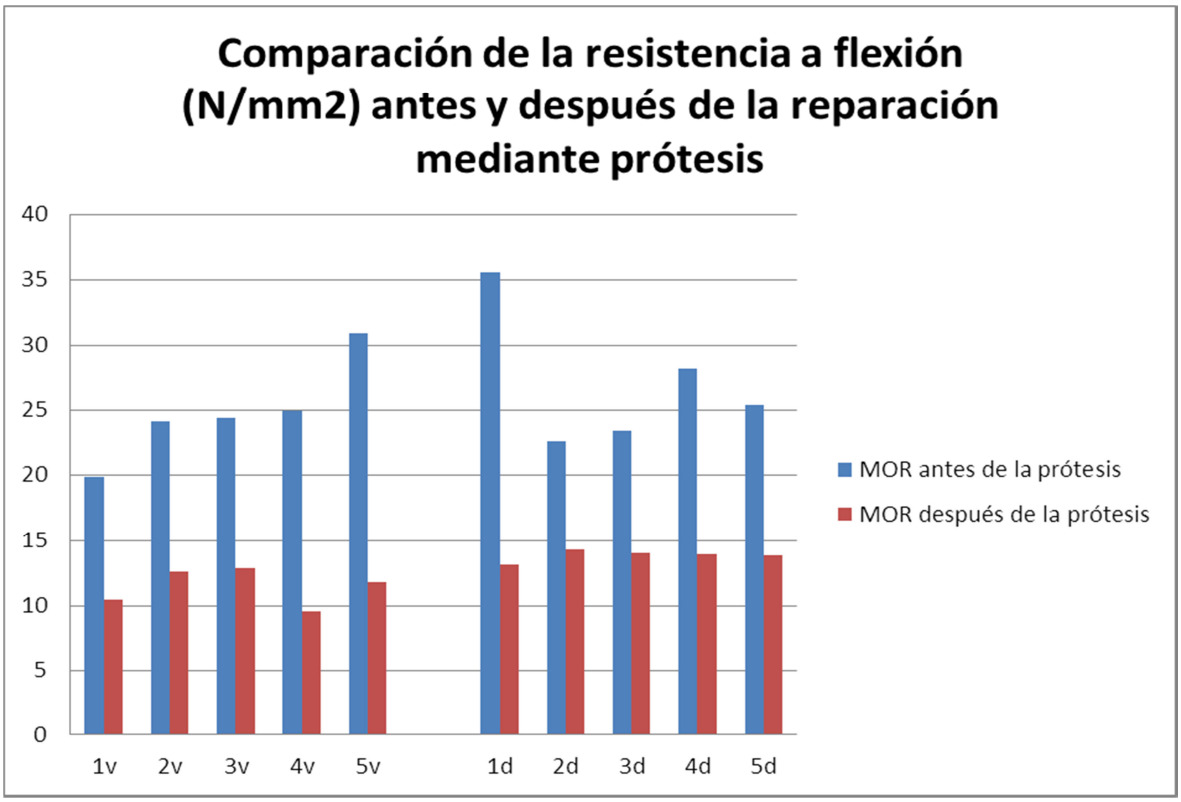


Figura 29. Comparación de la resistencia a flexión, para corte vertical y diagonal, antes y después de las reparación de las viguetas mediante prótesis.

En resumen, para la solución de reparación mediante prótesis de madera, en ninguno de los casos ensayados se consigue superar los 14 N/mm^2 de media (que corresponderían a una clase resistente del C14, que es la clase resistente mínima del CTE), por lo cual se considera que el taco químico empleado en esta solución no es adecuado para rehabilitación, o que el tipo de corte debe ser más complejo para permitir mayor superficie de encolado.

Se pierde entre un 60 y un 70% de resistencia en comparación con la resistencia a flexión de las viguetas originales.

En el futuro será necesario investigar más tacos químicos o desarrollar alguno específico para prótesis de madera, así como probarlos con cortes más complicados que el vertical o el diagonal (por ejemplo, rayo de Júpiter).

5. RESUMEN. CONCLUSIONES

Se realizó un completo análisis de las propiedades mecánicas de la madera en estructuras antiguas y modernas, y de las situaciones en que estas estructuras requieren intervención.

Se realizaron fichas técnicas resumidas de las soluciones de reparación y refuerzo, adaptadas a las necesidades de empresas, profesionales (arquitectos, ingenieros, etc.) y Administraciones.

Se definieron las especificaciones que deben cumplir las soluciones de reparación y refuerzo de interés para el proyecto:

1. Necesidad de que la solución sea aplicable en obra (*in situ*).
2. Menor coste posible.
3. El elemento reparado/reforzado debe ser visualmente similar al elemento en su estado original.
4. resistencia estructural debe ser como mínimo semejante a la que tenía el elemento en su estado original.
5. Menor impacto ambiental posible.

A partir de dichas especificaciones, se propusieron **tres soluciones de reparación y refuerzo, a las que AIDIMME incorporó numerosas variaciones e innovaciones**:

a) Reparación mediante elementos rígidos de refuerzo embebidos en resinas.
b) Refuerzos mediante materiales compuestos de polímeros reforzados con fibras (FRP) adosados con resinas.
c) Refuerzo mediante prótesis de madera encoladas a los elementos.

Se aplicaron las tres soluciones innovadoras de reparación y refuerzo a lotes de vigas de madera antigua, y después éstas se caracterizaron mecánicamente mediante ensayos de flexión a rotura.

Los valores de resistencia a flexión y del módulo de elasticidad de las vigas reparadas/reforzadas se compararon con los que tenían las vigas antes de su reparación o refuerzo, que se habían medido previamente mediante la técnica no destructiva de emisión-recepción de ultrasonidos. Las principales conclusiones obtenidas se exponen a continuación.

Para la **solución de reparación mediante elementos rígidos de refuerzo embebidos en resinas**, **las mezclas para encofrado de arena + serrín y de arena + corcho** son las que mejor cumplen los dos requisitos siguientes, que resultan imprescindibles para una solución de reparación de madera estructural:

a) Buena adherencia y unión sólida de la mezcla a la madera normal, sin degradaciones.
b) Resistencia a flexión total del elemento reparado muy similar o superior a la del elemento "sano".

Ambas mezclas no aumentan la resistencia de flexión del elemento reparado, pero sí proporcionan una resistencia muy similar a la de madera "sana" de calidad media. **Además, utilizan materias primas renovables y reciclables (corcho y serrín).**

La solución de refuerzo mediante FRP es muy efectiva y totalmente compatible con la madera. Aumentó significativamente la resistencia a flexión y el módulo de elasticidad de las viguetas reforzadas. En el caso del FRP insertado en la cara inferior de la vigueta, el MOR aumentó un 19,65%, y el MOE, un 20,82%. En el caso del FRP adherido a la cara inferior de la vigueta, el MOR aumentó un 31,30 %, y el MOE, un 29,54 %.

Esta solución tiene también la ventaja de que es sencilla de aplicar tanto en laboratorio como en obra.

Para la solución de reparación mediante prótesis de madera, en ninguno de los casos ensayados se consigue superar los 14 N/mm^2 de media (que corresponderían a una clase resistente del C14, que es la clase resistente mínima del CTE), por lo cual se considera que el taco químico empleado en esta solución no es adecuado para rehabilitación, o que el tipo de corte debe ser más complejo para permitir mayor superficie de encolado.

Con esta solución, se pierde entre un 60 y un 70% de resistencia en comparación con la resistencia a flexión de las viguetas originales. En el futuro será necesario investigar más tacos químicos o desarrollar alguno específico para prótesis de madera, así como probarlos con cortes más complicados que el vertical o el diagonal (por ejemplo, rayo de Júpiter).