

2020/21

RESTRUCTMAD

Investigación y desarrollo de soluciones innovadoras de reparación y refuerzo para estructuras de madera

Nº Expte: IMDEEA/2020/18

Programa: PROYECTOS DE I+D EN COOPERACIÓN CON EMPRESAS

Paquete de trabajo 4 – Estado del arte sobre soluciones de reparación y refuerzo para madera estructural

Entregable: 4.2 – Fichas técnicas de las principales soluciones de refuerzo y reparación para estructuras de madera

Breve descripción

Fichas técnicas de las principales soluciones de refuerzo y reparación para estructuras de madera

Realizado por:

AIDIMME

Director y coordinador técnico del proyecto:

Miguel Ángel Abián

mabian@aidimme.es

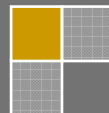


GENERALITAT
VALENCIANA

ivACE
INSTITUTO VALENCIANO DE
COMPETITIVIDAD EMPRESARIAL



Una manera de hacer Europa



Contenido

RESUMEN EJECUTIVO	3
1 INTRODUCCIÓN.....	4
1.1 NECESIDAD DE LA REPARACIÓN Y REFUERZO DE ESTRUCTURAS DE MADERA.....	4
1.2 SOLUCIONES DE MAYOR INTERÉS PARA LA REPARACIÓN Y REFUERZO DE ESTRUCTURAS DE MADERA	7
1.3 BIBLIOGRAFÍA.....	10
2 FICHAS RESUMEN DE LAS PRINCIPALES SOLUCIONES DE REFUERZO Y REPARACIÓN PARA ESTRUCTURAS DE MADERA.....	11
Resumen. Conclusiones.....	17

RESUMEN EJECUTIVO

El presente entregable corresponde a la **tarea 4.3** (*Investigación sobre soluciones de reparación y refuerzo para madera estructural*) del proyecto de I+D RESTRUCTMAD, financiado por el **IVACE** (Instituto Valenciano de Competitividad Empresarial) y cofinanciado por fondos del Programa Operativo **FEDER** de la Comunitat Valenciana 2014-2020.

En la **tarea 4.3** se ha recopilado información científico-técnica respecto a las soluciones de reparación y refuerzo para madera estructural. Para ello se ha recurrido 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 han recopilado patentes relacionadas con esas soluciones.

Por su interés, las soluciones en las que se ha centrado la investigación son las siguientes:

- 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.

Se ha analizado el comportamiento de todas esas soluciones, así como los inconvenientes que presentan para ser utilizadas en obra.

A partir de toda la información recopilada se han preparado unas completas **fichas técnicas**, parte de cuyo contenido se ha utilizado después para preparar unas **fichas resumidas** adaptadas a las necesidades de empresas, profesionales (arquitectos, ingenieros, etc.) y Administraciones, a fin de transferir y promover los resultados obtenidos.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 NECESIDAD DE LA REPARACIÓN Y REFUERZO DE ESTRUCTURAS DE MADERA

En numerosos edificios, algunos de ellos de gran valor patrimonial e histórico, la estructura es total o parcialmente de madera. La necesidad de conservar y rehabilitar dichos edificios ha sido y es muy importante en el sector de la arquitectura.

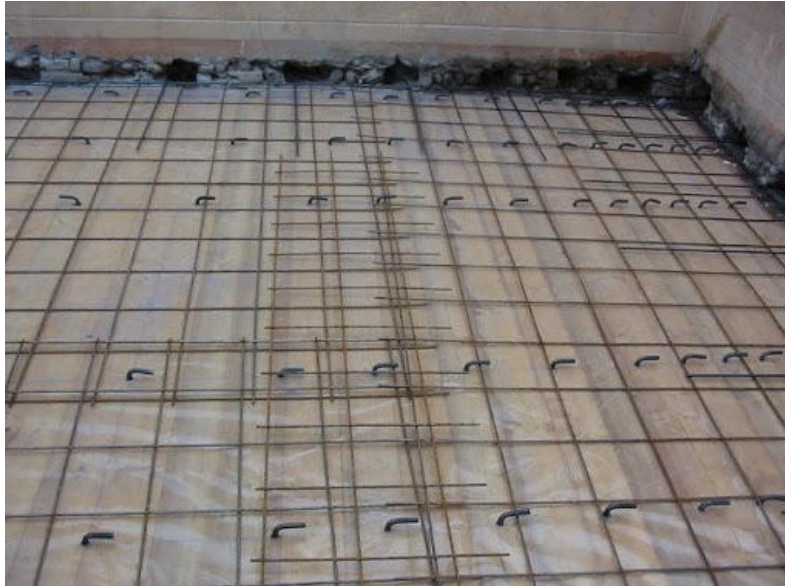
Hasta ahora, cuando se detectan deterioros en la estructura de un edificio o cambian las necesidades estructurales de este (por cambio de uso, por ejemplo), se sustituyen los elementos de madera por otros de hormigón o acero, o se interviene la estructura mediante sistemas de hormigón o metálicos (Nuere, 2007), reduciendo/eliminando la función estructural o convirtiendo en decorativa la estructura de madera.

Hay dos tipos de sustituciones que se usan habitualmente:

- **Sustitución por elementos metálicos.** En el caso de las sustituciones por elementos metálicos, suelen adosarse a los elementos de madera perfiles metálicos que los suplan en cuanto a función estructural. O bien, se eliminan los elementos de madera y se sustituyen por elementos metálicos de la resistencia adecuada. En el primer caso, la estructura de madera pierde su carácter estructural o se convierte en meramente decorativa. En el segundo caso, la estructura resultante es nueva y no se conserva nada de la madera original.
- **Sustitución por elementos de hormigón.** Esta solución conlleva casi siempre aumento de cargas en la estructura. La solución más habitual consiste en colocar una malla metálica sobre el forjado de madera y ejecutar sobre él una losa de hormigón. En este caso, las dos estructuras comparten carácter portante.

RESTRUCTMAD

Investigación y desarrollo de soluciones innovadoras de reparación y refuerzo para estructuras de madera



Forjado de madera rehabilitado con hormigón. Esta solución tiene dos desventajas fundamentales: aumento de carga y elevación de la cota del forjado. Fuente: REOTEC

Las mencionadas soluciones, tanto de sustitución total como de intervención mediante sistemas de hormigón o metálicos, son costosas, a menudo desproporcionadas y requieren emplear innecesariamente grandes cantidades materiales no sostenibles ni reciclables. Por otra parte, a veces son difíciles de ejecutar por la geometría del edificio, y suelen ocasionar grietas en los muros y pilares, e incluso hundimientos de los cimientos. Como se ha comentado antes, las soluciones con elementos de hormigón aumentan las cargas en la estructura. Por último, el cálculo estructural de las estructuras reparadas o reforzadas con esos sistemas es difícil de realizar, pues no existe documentación de los sistemas constructivos usados originalmente, y resulta inabordable en el caso de edificios patrimoniales o de carácter singular.

Por los problemas mencionados, existe una necesidad de disponer de soluciones innovadoras para las estructuras de madera, que eviten los inconvenientes mencionados. Estas soluciones deben ser lo bastante generales para aplicarse también a edificios modernos y actuales (es decir, no antiguos ni patrimoniales), pues son numerosos los edificios con estructuras de madera o materiales derivados (madera laminada encolada, contralaminada, etc.) que presentan problemas estructurales por desconocimiento del material, por diseño erróneo, deficiencias en el cálculo estructural o ejecución incorrecta, o bien por una combinación de todos estos factores. El conocimiento en España de la madera como material arquitectónico y de ingeniería es aún muy reducido entre empresas y profesionales, a diferencia de lo que ocurre en otros países (Alemania, Austria, países nórdicos, Estados Unidos, Canadá, Australia).

RESTRUCTMAD

Investigación y desarrollo de soluciones innovadoras de reparación y refuerzo para estructuras de madera



Cercha de madera laminada encolada en un edificio construido en 2018. La madera presenta grietas porque el elemento está mal diseñado (es demasiado curvo para una sección tan grande) y sufre una carga excesiva para su resistencia. Los cálculos estructurales presentaban deficiencias y subestimaron la carga que debía soportar el elemento. Se necesitan soluciones de refuerzo y reparación que puedan aplicarse *in situ* en cualquier edificio, independientemente de su antigüedad. Fuente: IKTK

Asimismo, son numerosos los edificios antiguos y modernos que cambian de uso (y en consecuencia de exigencias estructurales y normativas), y **requieren soluciones de reparación y refuerzo que permitan adecuar la estructura existente a las nuevas exigencias**, sin incurrir en costosas rehabilitaciones o en problemas derivados del uso de otros materiales para los cuales no fue diseñada ni calculada la estructura.

1.2 SOLUCIONES DE MAYOR INTERÉS PARA LA REPARACIÓN Y REFUERZO DE ESTRUCTURAS DE MADERA

En concreto, las soluciones de mayor interés inicial para el proyecto son las siguientes:

- 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.



Ejemplo de reparación mediante elementos rígidos de refuerzo embebidos en resinas. Arriba pueden verse la cabeza muy degradada de una vigueta y los elementos rígidos (varillas de vidrio pretensado).

Debajo, a la izquierda aparece la vigueta después del encofrado y vertido de resina epoxi; y a la derecha, la vigueta reparada. Fuente: SOFCAR

RESTRUCTMAD

Investigación y desarrollo de soluciones innovadoras de reparación y refuerzo para estructuras de madera



Ejemplos de refuerzos mediante prótesis de madera.



Ejemplo de refuerzo de la cabeza de una viga mediante FRP. Fuente: SOFCAR

Los refuerzos mediante materiales compuestos de polímeros reforzados con fibras (FRP, del inglés *Fiber Reinforced Polymer*) son de especial interés, pues se han utilizado y se utilizan cada vez más para elementos de hormigón ([Subagia et al., 2014](#)).

Por lo común, el fallo que se produce en vigas y viguetas de madera se localiza en la cara traccionada. Si la viga o vigueta presenta nudos u otros defectos en esa cara, su resistencia puede sufrir una gran disminución. El refuerzo mediante materiales compuestos en la mencionada cara presenta un gran interés, ya que se disminuye la posibilidad de que la madera rompa prematuramente y se aumenta la capacidad portante del elemento.

Fibre and polymer properties

Material	Modulus of elasticity (GPa)	Tensile strength (MPa)	Failure strain (%)	CTE ($10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)	Density (g/cm^3)
E-glass	70–80	2000–4800	3.5–4.5	5.0–5.4	2.5–2.6
Carbon (HM)	390–760	2400–3400	0.5–0.8	–1.45	1.85–1.90
Carbon (HS)	240–280	4100–5100	1.60–1.73	–0.6 to –0.9	1.75
Aramid	62–180	3600–3800	1.9–5.5	–2.0	1.44–1.47
Basalt	82–110	860–3450	5.5	3.15	1.52–2.7
Polymer	2.7–3.6	40–82	1.4–5.2	30–54	1.10–1.25

CTE: coefficient of thermal expansion; HM: high modulus; HS: high strength.

Propiedades mecánicas y térmicas de algunos FRP (con fibra de vidrio, de carbono HM, de carbono HS, de aramida, de basalto y de polímero). Fuente: Hollaway *et al.*, 2008.



Viga de madera reforzada con una capa de polímero con fibra de carbono. Fuente: Rescalvo *et al.* (2017).

Sin embargo, hasta ahora la aplicación de refuerzos con FRP a elementos de madera presenta múltiples incógnitas (Rescalvo *et al.*, 2017), que necesitan resolverse antes de que esos refuerzos puedan usarse en construcción de manera generalizada y fiable. Algunas de esas incógnitas son el desconocimiento del comportamiento mecánico-elástico de la estructura y de la madera reforzada/reparada, sus mecanismos de fallo (en concreto, la delaminación madera-FRP) y la falta por ahora de normativa, así como la ausencia de guías de aplicación y de soluciones constructivas.

Dichas incógnitas son también comunes por el momento a los refuerzos mediante prótesis de madera (Chang, 2015) y a la reparación mediante elementos embebidos en resinas (Franke *et al.*, 2015). En este último caso, según Cleary (2014), falta también mucha investigación sobre el modelado del conjunto madera-resina-elemento embebido.

1.3 BIBLIOGRAFÍA

Chang, W-S. Repair and reinforcement of timber columns and shear walls - A review. Construction and Building Materials, 97:14-24, 2015.

Cleary, R. Considering the Use of Epoxies in the Repair of Historic Structural Timber (Masters Thesis). University of Pennsylvania, Philadelphia, 2014.

Franke, S.; Franke, B.M.; Harte, A.M. Failure modes and reinforcement techniques for timber beams – State of the art. Construction and Building Materials, 97:2-13, 2015.

Hollaway, L; Teng, J. Strengthening and rehabilitation of civil infrastructures using fibre-reinforced polymer (FRP) composites. Cambridge, UK, Woodhead Publishing Limited, 2008.

Nuere, E. Madera, en restauración y rehabilitación. Informes de la Construcción 59(506):123-130, 2007.

Subagia, A.; Kim, Y.; Tijing, L.D.; Kim, C.S.; Kyong Shon, H. Effect of stacking sequence on the flexural properties of hybrid composites reinforced with carbon and basalt fiber. Composites Part B: Engineering 58:251-258, 2014.

Rescalvo, F.J.; Valverde-Palacios, I.; Suarez, E.; Gallego, A. Experimental comparison of different carbon fiber composites in reinforcement layouts for wooden beams of historical buildings. Materials, 10(10):1113–1135, 2017.

2 FICHAS RESUMEN DE LAS PRINCIPALES SOLUCIONES DE REFUERZO Y REPARACIÓN PARA ESTRUCTURAS DE MADERA

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 rígidos 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 tablonos 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 25°C, 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 las 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 <i>in situ</i> 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: <i>Fiber Reinforced Polymer</i>), 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 (<i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i> o plásticos reforzados con fibras de vidrio) y los CFRP (<i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i> 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

RESTRUCTMAD

Investigación y desarrollo de soluciones innovadoras de reparación y refuerzo para estructuras de madera

	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 <i>in situ</i> 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 <i>in situ</i> 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 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". - 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. - 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. - 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 cargas 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 <i>in situ</i> 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.

Resumen. Conclusiones

Se ha recopilado información científico-técnica respecto a las **soluciones de reparación y refuerzo para madera estructural**. Para ello se ha recurrido 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 han recopilado patentes relacionadas con esas soluciones.

Por su interés, las soluciones en las que se ha centrado la investigación son las siguientes:

- 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.

Se ha analizado el comportamiento de todas esas soluciones, así como los inconvenientes que presentan para ser utilizadas en obra.

A partir de toda la información recopilada se han preparado unas completas **fichas técnicas**, parte de cuyo contenido se ha utilizado después para preparar unas **fichas resumidas** adaptadas a las necesidades de empresas, profesionales (arquitectos, ingenieros, etc.) y Administraciones, a fin de transferir y promover los resultados obtenidos.