

## Nuevas técnicas de reparación de estructuras de madera. Elementos flexionados. Aporte de madera-uniión encolada

Mikel Landa Esparza. Dr. Arquitecto

En el artículo se presentan las soluciones de reparación de elementos estructurales de madera con los sistemas de refuerzo y sustitución, sus ventajas e inconvenientes. Se describe el reciente sistema de reparación de aporte de madera encolada, los tipos de unión y las condiciones de ejecución donde la temperatura y la humedad de la madera son la más determinantes para garantizar la calidad de la unión.

La edificación abarca un campo muy amplio de posibilidades de actuación; estas posibilidades de actuación se plantean en función de la gran variedad de tipos constructivos, compositivos, funcionales y de las tecnologías con las que el arquitecto cuenta para desarrollar su actividad profesional en el campo de la edificación.

Una parte considerable de esas obras de edificación que se acometen, son actuaciones sobre edificios existentes, en los cuales existen partes importantes que se deben respetar. Este respeto por lo existente se puede enfocar de diversas maneras; desde un mantenimiento formal de algunos elementos decorativos, hasta la conservación de la estructura, manteniendo ésta su función resistente después de la actuación.

Históricamente la madera ha sido el material ideal para la construcción de estructuras resistentes hasta bien entrado el siglo XX y por ello gran parte de las actuaciones de rehabilitación de edificios con que el arquitecto se puede encontrar se realizan sobre estructuras resistentes de madera.

La forma habitual, todavía hoy, de enfrentarse con un edificio que se pretende renovar, es la de sustituir la estructura portante de madera, de la cual es difícil conocer su estado exacto de conservación y por lo tanto no resulta fiable, por una estructura nueva de hormigón armado o acero laminado.

La fiabilidad de las dos soluciones mencionadas reside en el conocimiento que existe de los materiales, de la divulgación y la generalización de ese conocimiento, de la existencia de Normas para su cálculo y control, y del hecho de que son estructuras nuevas diseñadas y calculadas desde el proyecto. De la estructura de madera sobre la que se va a actuar, no se conocen los cálculos que en su día se hicieron para dimensionar los elementos de la estructura, (probablemente no se hicieron; antiguamente los carpinteros de armar dimensionaban las estructuras basándose en la experiencia), ni la capacidad actual de los elementos resistentes. A esto hay que añadir que las estructuras de madera suelen sufrir deterioros por humedades debidas a falta de manteni-

miento de cocinas, baños ó cubiertas, que habitualmente van acompañados de ataque de hongos ó insectos xilófagos; estos ataques pueden afectar a la resistencia de los elementos, aumentando la desconfianza en la estructura.

A pesar de lo comentado hasta el momento, los conocimientos que sobre la madera tenemos actualmente son tan fiables como los que podemos tener sobre otros materiales para estructuras gracias a los muchos estudios que sobre ella se han realizado en centros tecnológicos de todo el mundo.

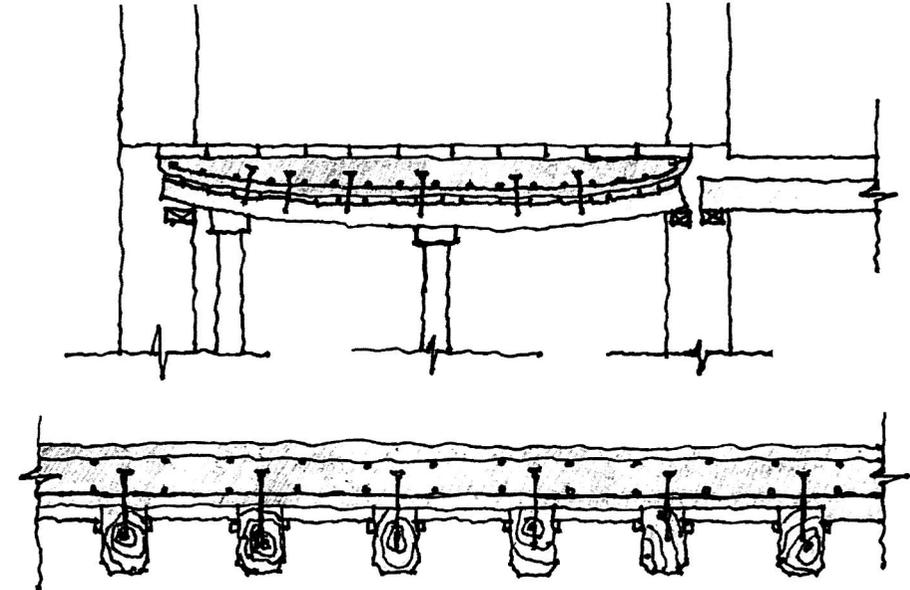
Baste con citar que en Europa cada uno de los países con industria maderera importante tiene un centro tecnológico dedicado al estudio e investigación acerca de la madera, y posee una norma de cálculo de estructuras de madera. En España no ha existido hasta el momento Norma para el cálculo de estructuras de madera lo que ha obligado a utilizar normas de otros países como son la Canadiense, Británica, Francesa y fundamentalmente la Alemana.

Esta carencia acaba de ser subsanada con la aparición de la traducción española de la nueva Norma de cálculo de estructuras de madera de rango Europeo, el Eurocódigo 5, y que se convertirá en Norma de obligado cumplimiento con la aprobación de la correspondiente NBE-EM.

Estos conocimientos se pueden aplicar para la realización de un análisis sobre el estado de una estructura de madera sobre la que se pretende actuar, de modo que se puedan saber con exactitud cuáles son los elementos que se pueden conservar, aquellos que no cumplen su función estructural y los que sin cumplir esa función pueden ser reparados para recuperar sus capacidades mecánicas.

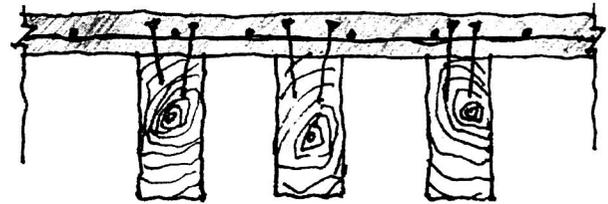
### SISTEMAS DE ACTUACIÓN HABITUALES

En la actualidad existen varias formas de enfrentarse a obras de rehabilitación de edificios con estructura de madera; en una rehabilitación, una de las primeras decisiones a tomar es la de saber hasta qué punto se va a mantener la estructura existente. La estructura de gran parte de los edificios que se



2. Refuerzo co acero. Ejemplo

1. Catedral de Santa María. Vitoria- Gasteiz. Torre del campanario. Chapitel



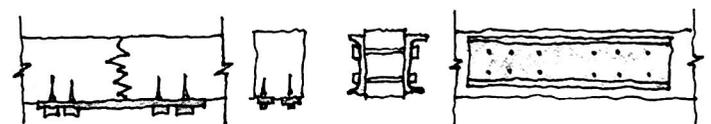
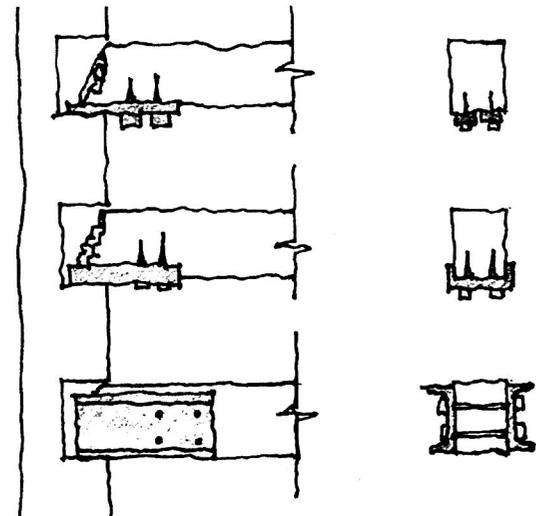
3. Refuerzo con hormigón. Losa sobre forjado de madera

rehabilitan hoy en día es una combinación de elementos portantes exteriores de fábrica de piedra y elementos interiores, tanto horizontales como verticales de madera; estos elementos suelen ser forjados, cubiertas, y pilares y vigas.

Para la correcta toma de la decisión fundamental, que es la de saber el alcance del mantenimiento de la estructura actual, se necesitan dos pasos previos que son: en primer lugar, la toma de datos de la estructura actual, de manera que nos permita saber hasta qué punto los elementos que pertenecen a esa estructura están en condiciones de satisfacer las cargas nuevas a que van a ser sometidos, y en segundo lugar, el conocimiento de las técnicas que pueden ser aplicables a aquellos elementos que no cumpliendo las nuevas condiciones a que van a ser sometidos, pueden sin embargo ser reparados para de esta forma volver a tener la resistencia que el nuevo uso va a solicitar.

De aquí se deduce que el conocimiento de estas técnicas es fundamental a la hora de tomar decisiones en rehabilitación, ya que su desconocimiento hace tomar como solución en gran parte de los casos, la de eliminar toda la estructura de madera y sustituirla por una nueva de acero u hormigón.

Centrándonos en las soluciones de reparación de elementos estructurales de madera, y evitando de esta forma la sustitución de estructuras completas, las posibilidades que existen son diversas; algunas de ellas tienden a conservar la estética de los elementos de madera y serán apropiadas



4. Refuerzo con hormigón. Losa colaborante

das en aquellos elementos que vayan a quedar vistos, otras modifican completamente la estética y por lo tanto se utilizarán en aquellos lugares en que la estructura no vaya a quedar vista.

Además de la estética, que en algunos casos puede llegar a ser fundamental, existen otras razones de tipo económico, de medios de ejecución, de resistencia al fuego, de construcción... que van a hacer que el director de obra se decante por una solución o por otra.

#### **Sustitución de elementos dañados**

Si el daño en el elemento estructural es de tal magnitud que no permite una actuación encaminada a reparar y devolver al elemento su capacidad portante, ó el valor del elemento es escaso, la solución que se adopta habitualmente es la de sustituir el elemento dañado por otro que cumpla su función. En algunos casos esta sustitución supone la eliminación de los elementos de madera preexistentes, y en otros, por motivos decorativos, se dejan los elementos de madera adosados ó colgando de la nueva estructura.

Los materiales por los que son sustituidos los elementos de las estructuras de madera en rehabilitación son el acero, el hormigón armado y la madera.

#### **• Sustitución por elementos de acero**

Se suele enfocar desde dos perspectivas: adosar a los elementos estructurales de madera perfiles metálicos que los suplan en su trabajo, ó eliminar los elementos de madera y sustituirlos por elementos metálicos resistentes. En el segundo caso se trata de una estructura totalmente nueva; en el primero la estructura de madera queda con una función puramente decorativa.

#### **• Sustitución por elementos de hormigón**

Suele implicar un aumento de cargas en la estructura. La solución más común es la de colocar una malla metálica sobre el forjado de madera que no se elimina (figuras 2 y 3), y ejecutar sobre él una losa de hormigón, preferiblemente aligerada. Esta losa regulariza la superficie superior, con la ventaja que ello representa para la colocación de pavimentos y con la desventaja que supone la elevación de la cota de forjado. Esta solución debe tener en cuenta si el forjado de madera que se deja, es capaz de cumplir la sollicitación a tracción que va a soportar; en caso negativo, el trabajo debe realizarse solamente la losa de hormigón, y debe ser diseñada para ello.

#### **• Sustitución por elementos de madera**

Es la solución a priori más lógica y normalmente la más sencilla. La pieza dañada se elimina y se coloca en su lugar otra de la misma sección y de las mismas características. Si el nuevo uso del edificio y las cargas que ese uso implica no aumentan, y el problema del elemento no residía en su sección, la pieza nueva deberá tener la misma sección que la vieja. Si las cargas aumentan ó el elemento dañado no esta-

ba correctamente dimensionado para su función, habrá que aumentar la sección en la medida en que el cálculo lo indique. Esta solución suele ser relativamente económica sobre todo en elementos estructurales sencillos, como por ejemplo en forjados.

#### **Refuerzo de elementos de madera**

Es en este campo donde los avances se están produciendo con más rapidez, y donde se están concentrando los esfuerzos de investigación. El refuerzo o reparación consiste en devolver la capacidad portante necesaria al elemento de madera dañado para que vuelva a cumplir su función. Los métodos empleados difieren en el material que devuelve a la pieza su capacidad portante y en la forma empleada para hacer trabajar conjuntamente a ese material y la madera. Los clasificaremos según el tipo de material resistente.

#### **• Refuerzo de elementos de madera con elementos metálicos clavados y atornillados**

Se suelen utilizar chapas metálicas adosadas a los lados del elemento de madera (figura 4) que le devuelven su capacidad de resistir. Se emplean en las zonas en que la madera se ha deteriorado, tales como empotramientos en muros ó zonas de rotura de la madera. Necesitan una superficie amplia de clavado ó atornillado por lo que la chapa será de grandes dimensiones. No es una solución utilizable cuando la estructura tenga un valor estético.

#### **• Refuerzo de elementos de madera mediante elementos embebidos en formulaciones Epoxy**

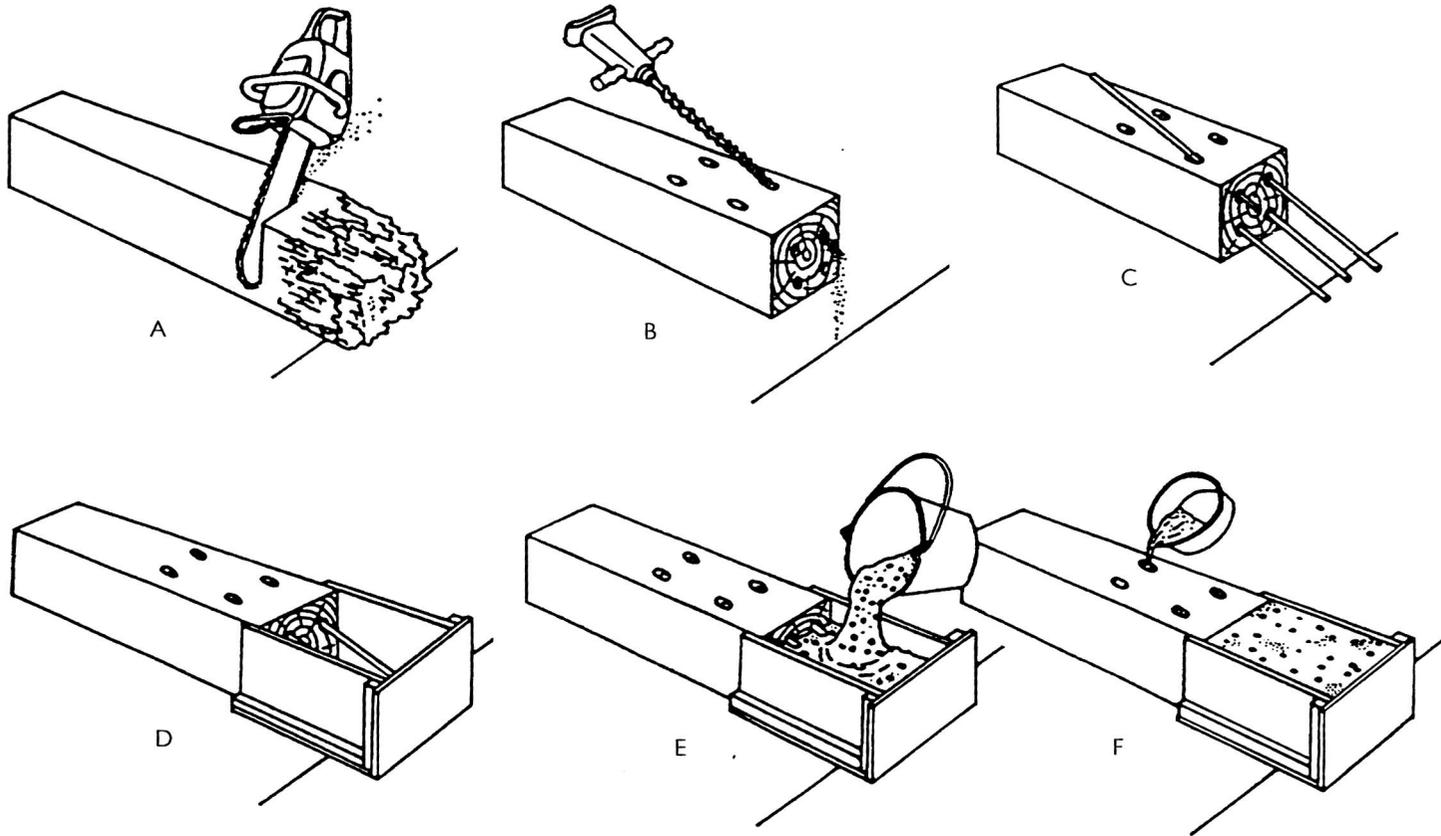
Esta solución tiene la ventaja con respecto a las anteriores de que la unión entre el elemento de refuerzo y la madera es más eficaz y que la unión queda oculta, en algunos casos totalmente. Consiste en realizar unos rebajes a la madera que permitan la inserción de elementos metálicos o de fibra de vidrio (figura 5) que quedarán embebidos en resinas; se suelen emplear resinas epoxy.

En este tipo de reparaciones, es fundamental que la longitud del anclaje permita que las dos partes trabajen solidariamente. La resina epoxy se combina con áridos para formar un mortero. Este mortero es más económico que la resina y las características mecánicas de la formulación son suficientes para la unión; además disminuye el coeficiente de dilatación térmica de la resina epoxy.

#### **• Refuerzo de elementos de madera mediante encolado con madera**

Los refuerzos de elementos de madera, que emplean madera como material resistente son los menos usuales y es en éste grupo donde se engloba la propuesta que presenta éste artículo. El sistema se comentará al final de este apartado.

Existen investigaciones realizadas para la recuperación de estructuras de madera mediante ensambles tradicionales, como los que ha realizado el TRADA Británico. Este centro de investigación ha realizado recientemente un interesante



5. Refuerzo de elementos de madera mediante elementos embebidos en formulaciones Epoxy

estudio acerca de la eficiencia de varios tipos de uniones para ser utilizados en reparaciones, de modo que se conozcan sus comportamientos y puedan ser utilizados en aquellos casos en que su eficacia sea suficiente. Las uniones ensayadas por TRADA contemplan tipos tradicionales de unión como son la unión inclinada y el Rayo de Júpiter, afianzados con clavijas de madera de Roble, o con bulones y conectores, uniones mecánicas mediante planos oblicuos verticales y reparaciones de almas de vigas de madera por medio de cajados longitudinales armados con varillas metálicas y rellenos de resinas epoxy. En los ensayos realizados no se encolan las uniones que quedan afianzadas por medio de elementos mecánicos. Los resultados obtenidos no aconsejan el uso de estas uniones en zonas muy solicitadas.

• **Mantenimiento de la estructura**

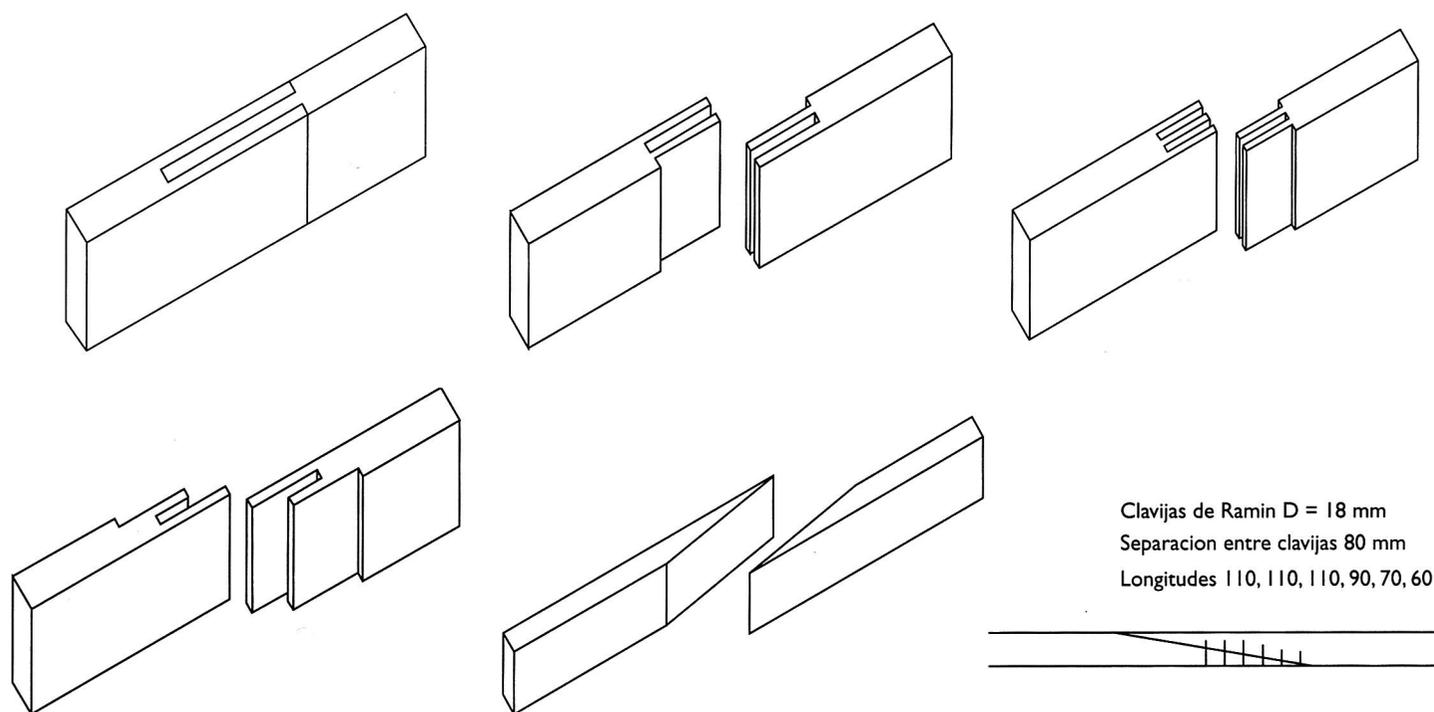
Es la actuación lógica en aquellas estructuras en las cuales los elementos resistentes de madera no se encuentran deteriorados ni deformados y pueden seguir cumpliendo su misión estructural sin variar su escuadría; se trata en éste caso de mantener los elementos estructurales tal y como están sin modificarlos ni eliminarlos. Es habitual encontrarse con estructuras de madera para rehabilitar donde una parte de ella se mantiene, otra parte se sustituye y otra parte se refuerza ó consolida.

**SISTEMA DE UNIÓN ENCOLADA CON APORTE DE MADERA**

En la actualidad existen conocimientos suficientes sobre todas las técnicas comentadas, teniendo todas ellas ventajas e inconvenientes. A este grupo de sistemas de reparación se ha unido recientemente el sistema de reparación de elementos estructurales de madera con aporte de madera por medio de una unión encolada. Esta tecnología permite la reparación de elementos estructurales de madera de forma sencilla, de tal forma que los elementos reparados puedan seguir cumpliendo su función resistente. Es éste un sistema que prácticamente no altera la imagen del elemento reparado.

Se trata de reparar un elemento de madera dañado por medio de un aporte de madera y una unión encolada. El sistema consiste en eliminar la parte de madera dañada a la que se realiza un rebaje, aportando madera de las mismas características con el rebaje correspondiente y uniéndolas por medio de un encolado.

Para la realización de dichas uniones es necesario controlar una serie de parámetros como son la temperatura de la madera, la humedad de la madera, la presión de encolado, el tiempo de encolado y la precisión del encolado. Necesita además del apuntalamiento de la parte de la estructura afectada por la reparación debido a que momentáneamente el elemento estructural a reparar pierde toda resistencia.



6. Unión ortogonal

Como ventajas de esta técnica se consideran, los pocos medios necesarios para llevar a cabo la operación, la posibilidad de utilizar madera de la propia obra para reparar la parte dañada, la facilidad de ejecución de la unión, su fiabilidad, su buen comportamiento ante los cambios climáticos y el fuego, y su mínimo impacto estético en la estructura reparada.

Como inconvenientes, los más importantes son la necesidad de controlar la temperatura y la humedad de la madera durante el encolado, la necesidad de mantener estos parámetros durante varias horas, y la dificultad de manejo de la herramienta en función de la accesibilidad de la estructura.

#### Tipos de unión encolada

La reparación por medio de encolado se puede afrontar de varias maneras en función de la resistencia final que se necesite, de la zona en que se debe reparar el elemento, y de la accesibilidad de la maquinaria.

##### • Unión ortogonal

Se llama unión ortogonal a aquella unión cuyos planos de encolado forman ángulos rectos. Se trata de cajas y espigas pasantes, las unas en la madera a reparar y las otras en la madera aportada. Las uniones ortogonales deben siempre ser ejecutadas de manera que todos los planos que forman la unión sean verticales. Son uniones adecuadas para los apoyos de vigas, o en zonas de momento máximo, si la resistencia necesaria no excede al 50%<sup>1</sup> de la resistencia del elemento original.

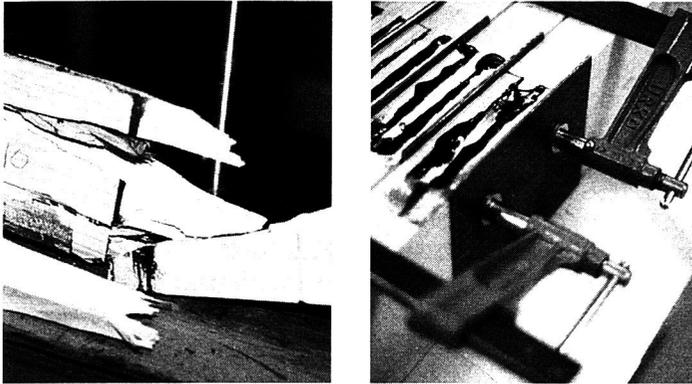
Los tipos de unión ortogonal dependen del número de planos de encolado, desde dos (figura 6), que corresponden a una espiga sencilla, hasta el número de espigas que permita la escuadría a reparar (figuras 7 y 8). A mayor número de espigas, menor longitud de unión; dicha longitud puede ser calculada teniendo en cuenta que la superficie de unión total debe ser por lo menos igual a ocho veces el producto del ancho y el canto del elemento.

Se considera que la transmisión de los esfuerzos se produce a través de los planos longitudinales de encolado, no teniendo en cuenta la aportación de los planos transversales, ya que se trata de encolados a testa, que solamente trabajan correctamente en la zona de compresión de la viga. La forma de mejorar el comportamiento de este tipo de uniones a flexión en el centro del vano de una viga es la de realizar la unión desfasando los planos de encolado transversales (figura 9) de manera que no exista coincidencia de dos planos transversales en la misma sección transversal.

##### • Uniones oblicuas

Las uniones oblicuas son aquellas cuyos planos de encolado no son paralelos a ninguna de las caras del elemento a reparar. Se pueden ejecutar de dos maneras: verticales, o inclinadas. Son uniones adecuadas para cualquier zona de la viga de madera, debido a que son capaces de devolver el 100% de la capacidad resistente de la madera inicial independientemente de la zona en la que se ubiquen.

La unión oblicua vertical (figura 10) es la más eficaz de las uniones encoladas hasta el punto de que ha quedado de-



12. Aporte de madera-Unión encolada. Unión oblicua. Plano de encolado inclinado  
 13. Aporte de madera-Unión encolada. Aplicación de la presión del encolado  
 14. Condiciones de ejecución. Forjado de madera

mostrado que se puede hablar de continuidad de material<sup>2</sup>. La longitud de la unión debe ser superior a seis veces el grueso de la escuadría<sup>3</sup>.

Del mismo modo que en las uniones ortogonales no es lo mismo ejecutar dicha unión de manera vertical u horizontal, tampoco en las uniones oblicuas el comportamiento es el mismo si dicha unión se realiza vertical ó inclinada (figura 11). Las uniones inclinadas necesitan de ayudas en la zona inferior de tracción, debido al esfuerzo de separación de planos de encolado que en ésta parte se produce, de manera que sin dichas ayudas la eficacia de la unión oblicua inclinada a rotura es del 30% de la correspondiente a la madera completa, independientemente de la longitud de la unión. Las ayudas mencionadas consisten en la colocación de clavijas cilíndricas de madera dura encoladas de manera perpendicular al plano de encolado en la zona de tracción, de manera que la eficacia de la unión aumenta en rotura hasta casi el 80%; eficacia que se consigue con una longitud de unión de cuatro veces el canto de la escuadría (figura 12).

#### Materiales empleados

Se emplean únicamente dos materiales, la madera aportada y la cola.

#### • Madera

La madera se aporta para completar el elemento estructural. La resistencia del elemento completo depende de dos factores: de la calidad de las dos partes de madera empleadas, la vieja y la aportada, y del tipo y calidad de la unión.

#### • Cola

La cola que se emplea en este tipo de uniones es la de resorcina. Su empleo se justifica por la amplia experiencia que sobre esta cola existe, gracias a su mayoritario empleo en la fabricación de la madera laminada encolada. Las cualidades de la cola de resorcina permiten la realización del encolado en condiciones asequibles en obra. Cuando estas condiciones no se dan, no es difícil recrearlas en obra a través de sencillos equipos.

#### Condiciones de ejecución de la unión

Las condiciones más determinantes para garantizar la calidad de la unión son la temperatura y la humedad de la madera.

La temperatura no podrá ser inferior a los 20°C y la humedad en la madera no deberá superar el 20%.

Si estas condiciones no se cumplen la unión no garantiza su fiabilidad. En el caso de la temperatura, ésta depende de la temperatura ambiente y por ello se puede decir que la unión debe ser ejecutada en aquellos días del año en que el tiempo lo permita; este inconveniente podría desembocar en que el sistema de encolado no sea utilizable debido a que es difícil el empleo de un sistema que dependa de una temperatura exterior tan elevada. En caso de que no se cumpla dicha condición, la temperatura se puede conseguir en el plano de encolado a través de calentadores, conectados a sondas y controladores que permiten a la madera alcanzar la temperatura adecuada durante el tiempo de encolado. Si es la humedad el parámetro que no se cumple debido a que es superior al 20% mencionado, se deben tomar medidas constructivas que permitan que dicha humedad sea reducida hasta niveles inferiores al 20% en toda la parte de madera cercana a los planos de encolado antes de comenzar a ejecutar la unión; dichas medidas constructivas irán dirigidas a ventilar la madera y a eliminar las fuentes de humedad.

El resto de las condiciones, tales como presión de encolado (figura 13), tiempo de prensado, y tolerancias entre planos de encolado, aún sin ser tan determinantes, conviene mantenerlas dentro de los siguientes valores: la presión de encolado no debe ser inferior a 0,5MPa, el tiempo de prensado no deberá ser inferior a las 4 horas y la tolerancia entre planos de encolado no será superior a 2 mm.

Los datos expresados en este artículo han sido extraídos de la tesis doctoral Comportamiento de las uniones encoladas para la reparación de elementos estructurales de madera que trabajan a flexión. Junio 1997, del autor de este artículo.

En el caso de unión vertical en el centro del vano, para ensayos realizados con madera de Ciprés de Lawson (Cha-



maecyparis Lawsoniana), con asignación a clase resistente en rotura para madera entera según Eurocódigo 5, de C27, el resultado de la unión permite igualar dicho resultado.

Dato que ha quedado demostrado y que contradice las recomendaciones de algunos autores y Normas tales como DIN 1052, que indican como regla que se debe respetar una longitud igual a diez veces el grueso de la escuadría.

Los pocos autores que hablan de uniones encoladas resistentes para madera, no hacen diferenciación entre las dos posiciones de la unión en la viga.

#### BIBLIOGRAFÍA

1. AITIM. *GUÍA DE LA MADERA*. 1994
2. ARGÜELLES ALVAREZ, R. Y ARRIAGA MARTITEGUI, F.: *CURSO DE CONSTRUCCIÓN EN MADERA*. COAM MADRID 1988
3. ARRIAGA MARTITEGUI F.: *CONSOLIDACIÓN DE ESTRUCTURAS DE MADERA MEDIANTE REFUERZOS EMBEBIDOS EN FORMULACIONES EPOXY*. TESIS DOCTORAL. 1986
4. CTBA: *LE COLLAGE DU BOIS*
5. DIN 1052 TEIL 1: *HOLTZBAUWERKE; BERECHNUNG UND AUSFÜHRUNG*
6. DIN 1052 TEIL 2: *HOLTZBAUWERKE; MECHANISCHE VERBINDUNGEN*
7. DIN 4074 TEIL 1: *BAUHOLZ FÜR HOLZBAUTEILE; GÜTEBEDINGUNGEN FÜR BAUSCHNITTHOLZ. (NADELHOLZ)*
8. EUROCÓDIGO Nº 5: *ESTRUCTURAS DE MADERA*. 1996
9. GAUZIN-MÜLLER, D.: *LE BOIS DANS LA CONSTRUCTION*. MONITEUR 1990
10. GRAUBER, W.: *ENSAMBLES DE MADERA*. CEAC. BARCELONA 1991
11. INFORMATIONSDIENST HOLZ: *ZIMMERMANNSMÄSSIGE HOLZVERBINDUNGEN*
12. LANDA, M.