



REPARACIÓN DE ESTRUCTURAS DE MADERA MEDIANTE INJERTOS. RECUPERACIÓN DE ELEMENTOS TRACCIONADOS

Mikel Landa Esparza

El presente artículo trata del desarrollo de una intervención concreta; la recuperación estructural de la cubierta principal de la Iglesia de Santa María de Salvatierra en Álava. Durante los años 70, se llevaron a cabo una serie de intervenciones, tanto en las fábricas como en las cubiertas. La intervención realizada en la cubierta de la nave principal, consistió en la colocación de correas cabrios y tabla nueva encima de las cerchas existentes; encima de la tabla se colocó una capa de hormigón armado habitualmente llamada de compresión, y teja cerámica colocada sobre mortero de cemento.

1. PATOLOGÍAS ESTRUCTURALES EXISTENTES

La detección de una serie de patologías por parte del párroco condujo a la realización de una visita de inspección que derivó en un proyecto de restauración estructural de la cubierta principal de madera.

Patologías en correas y elementos secundarios

Se encontraron roturas en varias correas; roturas en el centro del vano debidas a momentos flectores excesivos en zonas en las que la madera tenía nudos. En la fotografía inferior derecha (Fig. 1), se aprecia una rotura en el apoyo de una correa debida a un exceso de carga y un apoyo mal diseñado, que genera una tracción perpendicular a la fibra que la madera no soporta.

Se encontraron algunas de las patologías reparadas, generalmente con soluciones metálicas, ejecutadas más como soluciones provisionales, que definitivas.

La última intervención en la cubierta supuso la colocación de una capa de hormigón armado que generaba una sobrecarga para la que los elementos de madera y sus uniones no estaban concebidos.

Patologías en cerchas

Inicialmente se encontraron patologías en varias cerchas. Dichas patologías se concentraban en los tirantes. Las dos cerchas unidas en el centro de sus vanos habían roto por la unión, y otras dos cerchas de tirante entero se encontraban rotas en zonas de nudos y desviación de fibras en la madera. La rotura del tirante



Rotura en vano de correa

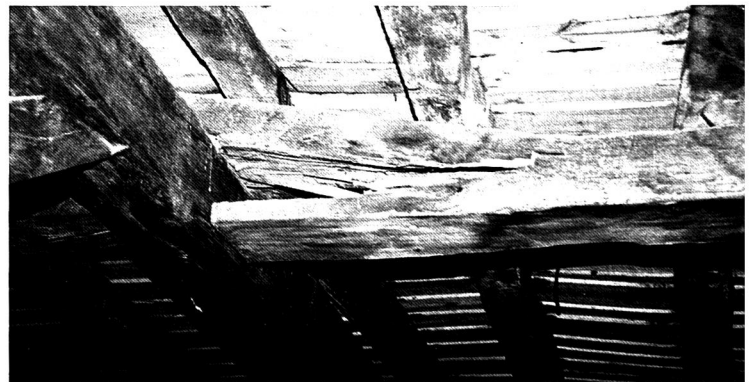


Fig. 1. Rotura en apoyo de correa

generaba una deformación en el conjunto de la cercha que dejaba de trabajar como tal para pasar a apoyar la abrazadera del pendolón directamente sobre las bóvedas. Ello genera un segundo orden de patologías en las bóvedas de la nave principal, ya que las bóvedas no están pensadas para soportar el peso de la cubierta.

La fotografía del Rayo de Júpiter (Fig. 2) nos muestra una rotura en dos planos horizontales de cortante. Dicha rotura se produce por un exceso de tensión en dichos planos. La tracción que es capaz de soportar un Rayo de Júpiter está limitada por la tensión que son capaces de soportar los dos planos de cortante que en la fotografía se muestran como rotos. Por geometría, la dimensión de dicho plano es muy limitado, y la tensión a cortante paralelo en madera es muy inferior a la resistencia a tracción paralela (relación 1 a 6), por lo que la limitación vendrá siempre dada por los planos de cortante. El exceso de tensión generado por la capa de hormigón armado ha llevado a la rotura por el punto más débil que es la unión.

La fotografía de la unión a media madera (Fig. 3) muestra además un error de diseño. Se trata de una unión a media madera con clavija. La limitación de resistencia de dicha unión viene dada por la dimensión del plano horizontal de la clavija, plano al que habrá que aplicar la capacidad de carga de la madera a cortante. La resistencia a tracción de dicha unión es muy inferior a la resistencia a tracción de la escuadría de madera completa, del orden de 1/40. Solamente desplazando el plano horizontal de la unión hacia arriba en su mitad izquierda y hacia abajo en su mitad derecha, llegaremos a la conocida unión en Diente de Perro, cuya capacidad resistente es muy superior, ya que se puede ejecutar sin clavija intermedia. Las comprobaciones de dicha unión son más comple-



Vista de la rotura del talón del embarbillado a cortante, por falta de longitud. La forma de la rotura sigue la forma de la espiga del embarbillado

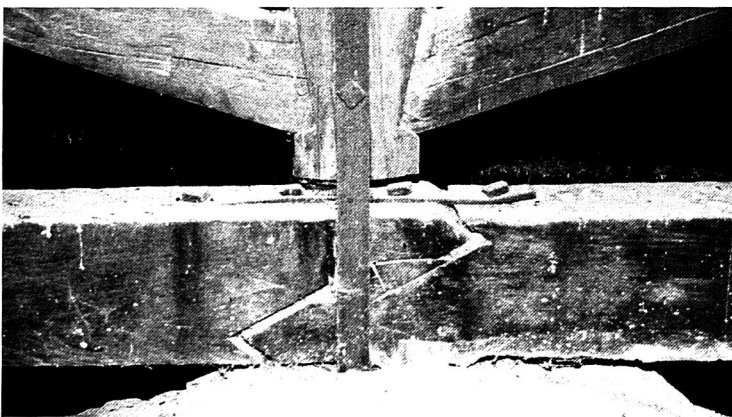


Fig. 2. Rotura en la unión en Rayo de Júpiter

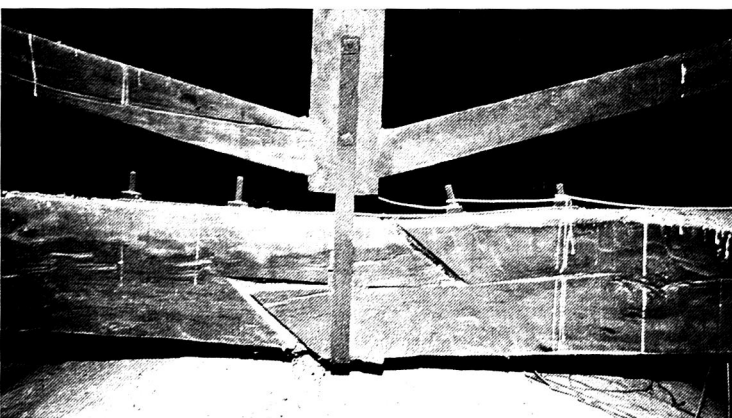


Fig. 3. Rotura en la unión a media madera con clavija

jas y se comentarán más adelante, ya que se ha empleado de una de las soluciones de reparación de tirantes de cerchas.

La comprobación del desplazamiento de los pendolones hasta cargar en las bóvedas incluso en las cerchas en las que los tirantes no habían roto, indujo a pensar que existían roturas en las cabezas de los tirantes y que en ninguno de los casos éstos actuaban como tales, pasando una buena parte de la cubierta a cargar directamente sobre las bóvedas.

Una vez en fase de ejecución de la obra, y eliminados la capa de hormigón y la tabla, se pudo comprobar el estado de las cabezas de las cerchas.

La unión entre par y tirante en una cercha se produce por medio de un embarbillado, que transmite la compresión del par generando una tracción en el tirante. Esto es posible gracias al trabajo a compresión del plano o planos de contacto de par y tirante y al trabajo a cortante del prisma proyección horizontal de dichos planos. El punto crítico de la unión del par y el tirante es este prisma virtual que trabaja cortante, y cuya comprobación es la que limita la

capacidad de transmitir cargas del par al tirante y, exceptuando los casos de uniones en mitad de tirantes arriba comentados, la resistencia total de la cercha. Un exceso de carga en la cercha produce una rotura en el punto más débil.

Se encontraron rotas todas las cabezas de los tirantes. Se aprecia en las fotografías que dichas roturas dibujan el prisma virtual de trabajo a cortante del embarbillado. La rotura de los talones del embarbillado lleva a que el tirante ya no trabaja como tal, se produce un desplazamiento horizontal de los apoyos inferiores de los pares tal y como se ve en las fotografías; ello deriva en que el pendolón descende hasta hacer contacto con el tirante, o en su caso con la bóveda de piedra. La rotura se debe a dos motivos fundamentalmente, primero a que los talones de los embarbillados son excesivamente cortos, y por lo tanto su capacidad resistente es muy limitada. Por otra parte, al exceso de carga que supone una capa de hormigón en una estructura que no está dimensionada para ello.

2. PROPUESTA DE RESTAURACIÓN DE LA CUBIERTA

El proyecto de recuperación estructural de la cubierta propone la eliminación de la teja cerámica y de la capa de hormigón armado. Se respetan todas las cerchas excepto una de ellas, procediendo a su reparación. Se elimina el orden de correas, de manera que los cabios nuevos pasan a apoyar en el durmiente perimetral y en cumbrera. Los motivos de plantear dicha solución son la compatibilidad del sistema propuesto con el edificio en el que se asienta y su sistema constructivo, y la disponibilidad económica, siendo esta solución más económica que la sustitución integral de la cubierta.

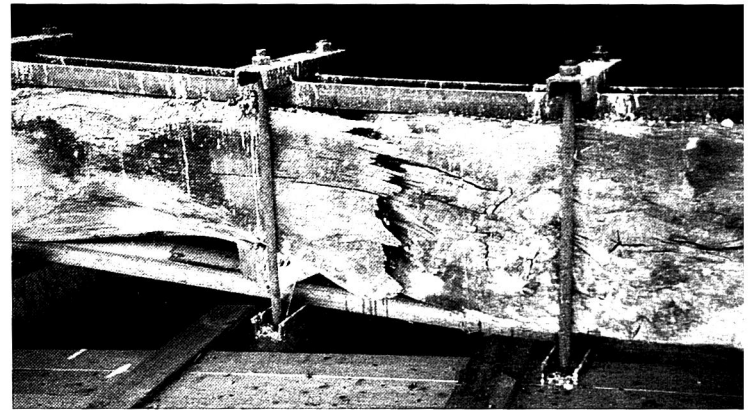
3. RECUPERACIÓN DE DOS TIRANTES DE MADERA MEDIANTE INJERTOS

A continuación se desarrollan las dos reparaciones ejecutadas en los tirantes de las cerchas. Su interés reside en la poca frecuencia con que los elementos atirantados aparecen en los entramados de madera. El ejemplo más frecuente de madera trabajando a tracción se encuentra en el tirante de una cercha. El esfuerzo que transmiten los dos pares al tirante se descompone en un esfuerzo vertical, que queda compensado con la reacción en los apoyos y en un esfuerzo horizontal que absorbe el tirante a tracción.

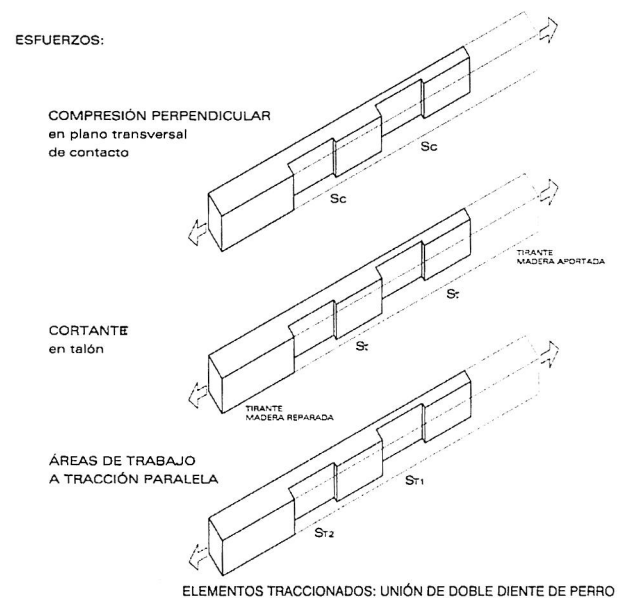
En ambos casos se decidió emplear la técnica de reparación de elementos estructurales de madera mediante injertos, aunque con criterios diferentes; de esta manera, mientras en la primera de ellas se empleó una unión tradicional para trabajar a tracción, en la segunda se empleó una unión a media madera (que no soportan esfuerzos a tracción) confiando la resistencia a la resina Epoxy. El objeto de emplear dos soluciones distintas es investigar acerca de la dificultad de su empleo en obra y acerca de su coste de puesta en obra.

Uniones tradicionales. Doble diente de perro

La primera de las roturas se ha producido por una combinación de factores. Hay que tener en cuenta que un tirante de una cercha suele estar siempre muy sobredimensionado, ya que la tensión máxima a la que puede trabajar por escuadría, es el resultado de multiplicar la tensión máxima de trabajo de la madera por la superficie de la sección transversal. Sin embargo, en condiciones normales no trabajará a dicha tensión ya que la capacidad de transmi-



Vista de la rotura del tirante y de la reparación metálica existente



Diente de perro, comprobaciones

tir esfuerzos de las uniones es inferior, y esto es evidente en el caso de los embarbillados. La tensión a la que trabaja la unión en embarbillado es función de la longitud del talón y del perímetro de la espiga (son las que definen la superficie de trabajo) y multiplicada por la tensión a la que es capaz de trabajar la madera a cortante, que es muy inferior a la tensión a la que trabaja la madera a tracción. Es por ello que todas las cerchas han roto por la unión de par y tirante. En los dos casos que nos ocupan, esto no ha sucedido debido a que en las zonas de rotura del tirante se produce la conjunción de varios factores, por una parte el exceso de tensión que supone la capa de hormigón, por otra una desviación de fibra localizada debida a la existencia en la zona de nudos importantes. La desviación de la fibra ha hecho que la rotura se produzca por un esfuerzo de tracción en la barra pero que localmente ha producido una rotura por cortante entre las fibras de la madera. La capacidad resistente de la madera a cortante es del orden del 15% de la capacidad de resistencia a tracción.

El proyecto plantea la eliminación del exceso de carga como punto de partida para acometer las soluciones de reparación mediante injertos. Esto devuelve a las cerchas de la estructura la posibilidad de resistir las cargas de la nueva cubierta sin grandes modificaciones en su diseño, si exceptuamos las reparaciones.

Se plantea la reparación del tirante de la primera de las cerchas mediante una unión tradicional que habitualmente se emplea en elementos traccionados como es el diente de perro.

Diente de Perro. Comportamiento

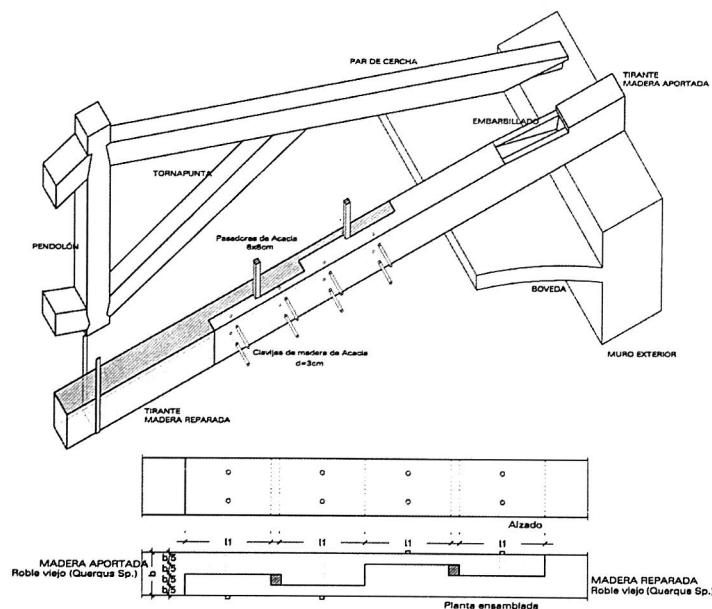
El diente de perro tiene una cierta capacidad de resistir esfuerzos de tracción, basada en el contacto de los planos de testa, que trabajarán a compresión.

Para calcular la resistencia de dicha unión, hay que realizar tres comprobaciones. La primera de ellas, es la capacidad de resistir de los planos de contacto a compresión; su resistencia viene definida por la resistencia de la madera a compresión paralela, y la superficie S_c de contacto de dichos planos. La segunda es la capacidad de resistir a cortante de los planos longitudinales del talón del Diente de Perro, que viene definida por la resistencia a cortante de la madera y la superficie S_t de dichos planos. La tercera comprobación viene dada por la capacidad de resistir a tracción de las secciones débiles, que viene a su vez limitada por la resistencia a tracción paralela de la madera y por la superficie S_{t1} y S_{t2} de cada una de las secciones. Esta última comprobación no suele ser crítica. Del equilibrio entre las dos primeras comprobaciones se llegará a una unión óptima en resistencia y dimensiones.

Una vez calculados los esfuerzos que transmiten los pares al tirante, se comparan con la capacidad resistente de la unión en doble diente de perro para ver si el diseño es el adecuado, y rediseñarla hasta que cumpla con la resistencia necesaria.

Esta unión no necesita de más elementos ni de encolados para cumplir su función resistente. Se han colocado pasadores transversales para evitar que posibles movimientos diferenciales entre ambas partes del injerto deriven en una disminución de la superficie de contacto a compresión.

La capacidad máxima de resistencia del tirante será la que resulte de calcular a tracción la sección débil. La sección débil es aquella en la existe mayor superficie de madera cortada a testa. En el caso que nos ocupa, la unión se ha diseñado para que existan tres secciones débiles, que tengan la misma sección de madera entera.



Reparación: unión en doble diente de perro

Teniendo en cuenta que la unión a testa no trabaja a tracción aunque se encuentre encolada, la resistencia máxima de la unión será la que resulte de multiplicar la tensión de tracción de la madera por la superficie de madera entera.

Reparación propuesta

La reparación consiste en la eliminación de la parte de madera dañada, hasta el apoyo en el muro, ya que la rotura se encuentra relativamente cerca del apoyo, y añadir madera hasta completar el tirante.

La unión de tirante con par se ejecuta por medio de un embarbillado, teniendo en cuenta la longitud del talón necesaria para transmitir correctamente las cargas. La unión entre la madera reparada y la madera aportada se realiza por medio de una unión en doble Diente de Perro. La unión es doble debido para aumentar la capacidad resistente de la unión, aumentando la superficie S_c de contacto a compresión, la superficie de trabajo a cortante S_t y la superficie S_{t2} de madera entera en las secciones débiles a testa.

La madera empleada es roble de características similares en cuanto a calidad, vejez, humedad y escuadría.

Las clavijas empleadas son de madera de acacia. Una vez reparada la cercha ésta trabajará del mismo modo que cuando fue concebida. Siendo el tirante un elemento único, y el embarbillado una transmisión de esfuerzos por contacto entre par y tirante, sin transmisión de momentos.

Proceso de ejecución de la reparación

Se aprecia el estado de una de las cerchas de la cubierta. El pendolón ha descendido hasta que la abrazadera toca a la bóveda y el propio pendolón al tirante. La bóveda recibe una carga no prevista en la clave. El tirante trabaja a tracción y a flexión.

Desmontaje de la capa de carga de hormigón armado. El desmontaje se realiza por pequeños tramos simétricos a cada lado de cumbrera para evitar desequilibrios en los entramados. Se aprecian las deformaciones en la tablazón que han generado patologías en cabios, correas y cerchas.

Descarga de la estructura. Se ha desmontado la tablazón, los cabios y las correas, que serán sustituidas. Se apea la cercha a reparar. La cercha se apea mediante una viga de M.L.E. a las dos cerchas vecinas, y mediante un apoyo blando en la bóveda.

Una vez descargada la cercha se procede a la preparación de la superficie de trabajo en la zona a reparar. Se aprecia la reparación existente consistente en perfiles metálicos superior e inferior y abrazaderas formadas por perfiles en U y varilla roscada.

La preparación de la madera aportada puede ser ejecutada en taller aportando precisión y ahorrando tiempo.

En este caso se ha ejecutado a pie de obra. Se aprecia la ejecución de los talones, de los planos de compresión y de los de testa. Se ejecuta primero la unión en la madera aportada, para posteriormente emplear dicha unión como plantilla para ejecutar su negativo en la madera reparada.

Para permitir el trabajo en el tirante, se ha desmontado el par y se ha apeado el resto de la cercha. Se comienza a trabajar en el tirante en la ejecución de la unión en doble diente de perro, eliminando la madera a partir de la rotura con un corte a testa.

Se puede apreciar la unión entre tornapunta y par, por medio de un embarbillado con espiga ciega y al unión entre par y pendolón por medio de otro embarbillado.



Además de la reparación del tirante, se ha recuperado la geometría original de la cercha, elevando el tirante y recolocando el pendolón y los tornapuntas.

Presentación de las dos partes. Una vez presentadas se va comprobando en cada uno de los planos de contacto la precisión de la ejecución de la unión, para seguir trabajando la madera y rebajar la tolerancia máxima hasta 2 mm.

La ayuda de medios auxiliares es importante ya que la necesidad de trabajar “in situ” obliga a presentar la madera aportada varias veces, hasta llegar a la tolerancia exigida en los planos de la unión.

Retoque de los planos de unión longitudinales con el empleo de herramienta manual, sean formones y gubias o cepillos eléctricos.

Encolado de las dos mitades. Se ha empleado cola de poliuretano, debido a que su función no es estructural, sino exclusivamente de montaje.

Para el encolado se ha controlado la humedad tanto en la madera reparada como en la madera aportada, en cada uno de los planos de encolado. El valor de humedad tiene que estar por debajo de 20% en línea de cola. Se controla también la temperatura que debe estar por encima del valor del fabricante.

Uniones a media madera con resinas Epoxy para elementos traccionados

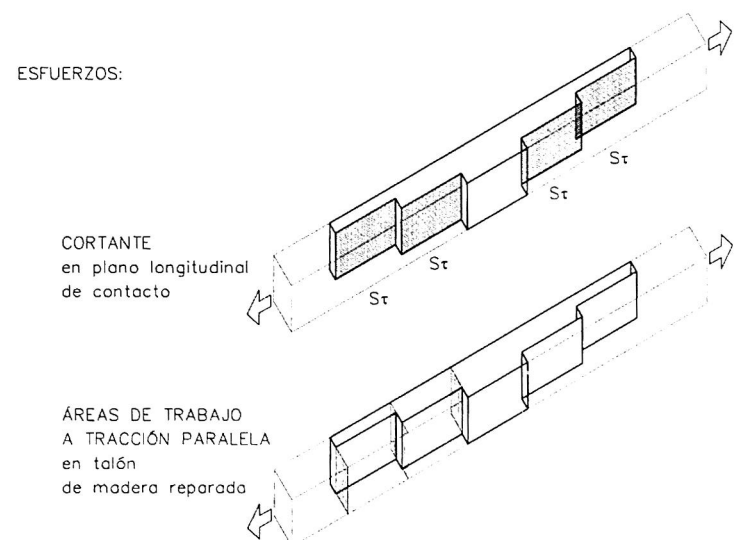
El segundo tirante roto, tiene unas características similares a primero en cuanto a las condiciones que se han producido para llegar a dicha rotura. La forma de dicha rotura difiere, y se decide que en lugar de eliminar toda la madera hasta el apoyo, se elimine solamente una zona concreta de madera, respetando el tirante a ambos lados de la rotura. Esto lleva a que el injerto deberá unirse con la madera reparada por sus dos extremos.

Se pensó en emplear una unión diferente de la empleada en la primera de las reparaciones, de modo que en lugar de diseñar una unión tradicionalmente empleada en elementos traccionados, como es el Diente de Perro, se pensó en aprovechar las características de la resina Epoxy para emplear una unión mucho más sencilla como es la media madera.

Unión a media madera, comportamiento

La unión a media madera no tiene capacidad de resistir esfuerzos de tracción longitudinal. Por ello, se empleó resina Epoxy como cola para permitir que el injerto cumpliera su función resistente.

La capacidad resistente de la unión a media madera encolada viene limitada por dos factores, que son los que habrá que calcular



Comprobaciones: Elementos traccionados. Unión a doble media madera

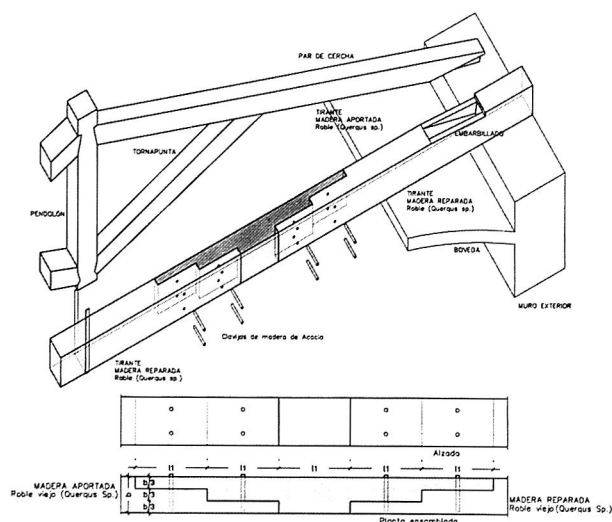
en el momento de diseñar la unión. La primera de las comprobaciones consiste en conocer la capacidad máxima de resistencia a tracción de la unión, dada por la capacidad de resistir a tracción de la sección débil, o sea la sección entera en un corte a testa. Si se trata de una media madera sencilla, la sección débil tiene el 50% de madera que la sección completa, por lo que resistirá un 50% de la sección entera del tirante. Habrá que multiplicar la superficie de madera entera por la resistencia de la madera a tracción paralela para conocer dicho valor. La segunda comprobación consistirá en calcular la longitud de la unión para que la resistencia de los planos longitudinales de encolado, resistan como mínimo, tanto como la sección débil. La resistencia de los planos de encolado longitudinales resulta de multiplicar su superficie S_t por la capacidad resistente de la madera a cortante paralelo. El empleo de resinas Epoxy específicamente diseñadas para su uso en reparación de elementos estructurales de madera lleva a que la resistencia a cortante de la unión resina-madera sea superior al cortante de la propia madera, y el cortante de la resina sea también superior a dicho valor. La longitud de la unión vendrá de equilibrar la resistencia máxima de la unión con la resistencia de los planos longitudinales de encolado, ya que aumentar la longitud a partir de dicho valor no supone una mejora en la resistencia del conjunto.

Al tratarse de un tirante en el que los esfuerzos a tracción son iguales en toda su longitud, el cálculo y el diseño de las dos uniones son similares. La unión podrá ser por tanto simétrica.

Reparación propuesta

En el caso que nos ocupa, el 50% de la resistencia del tirante no era suficiente, por lo que se diseñó una unión a doble media madera. Dicha unión tiene tres secciones débiles iguales, y en cada una de ellas la madera entera supone el 66,6% del total. Éste será el valor máximo de resistencia de la unión, referenciado a la escuadría completa del tirante. La longitud de los planos longitudinales se ha adecuado para su resistencia a tracción igual dicho valor.

Del mismo modo que en el ejemplo anterior, la capacidad resistente del tirante en su conjunto viene limitada por la unión entre par y tirante en el extremo, que habitualmente es muy inferior a la capacidad del tirante, por lo que 2/3 de su resistencia es suficiente. El cálculo de dicha unión es relativamente sencillo.



Unión a doble media madera

Resina Epoxy

El comportamiento de las resinas Epoxy al fuego en las prótesis tradicionales, se mejora de manera drástica al emplear la resina como cola, con un espesor de pocos milímetros. La resina queda protegida por la madera, y el avance del fuego en línea de cola queda limitado por el avance del fuego en la escuadría de madera. El empleo de resina para la ejecución de injertos no supone pérdida de estabilidad al fuego del elemento estructural reparado.

La tolerancia en este tipo de uniones puede ser de 5 mm. La presión no es un condicionante tal y como sucede en las colas, ya que se trata de un material que por sus características tiene capacidad de relleno.

La temperatura de trabajo de la resina debe ser superior a 10°C. A mayor temperatura, mayor rapidez de endurecimiento. El tiempo de trabajo de la resina es de 45 minutos. El tiempo de endurecimiento de 3 a 5 horas. El tiempo de polimerización es de 24 horas. La presión no es un condicionante como en las colas, ya que se trata de un material que por sus características tiene capacidad de relleno.

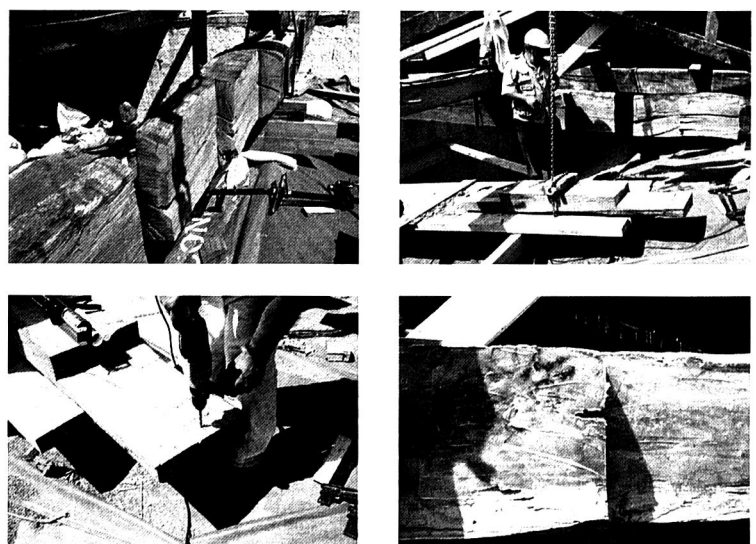
La resistencia de la resina Epoxy es de 45 N/mm² a compresión, 15,5 N/mm² a tracción, y 15 N/mm² a cortante. Los planos de encolado se deben diseñar para que trabajen a esfuerzo cortante. El valor característico de la madera de Roble calidad D30 a esfuerzo cortante es de 3,0 N/mm².

En los ensayos de adherencia madera-resina, la rotura se produce por madera a una tensión media de 6,0 N/mm². Por tanto, será suficiente dimensionar la unión para los valores a cortante de la madera, haciendo trabajar el plano de encolado a cortante, y olvidarnos de la comprobación de la resina Epoxy, cuyo valor será siempre superior.

El empleo de las resinas es hoy en día sencillo, ya que existen dosificadores con boquillas mezcladoras que permiten emplear la cantidad de mezcla deseada con la dosificación exacta, evitando la realización de mediciones tanto de volumen como de peso en obra y su mezcla.

Proceso de ejecución de la reparación

La forma de la rotura aconsejaba cortar el tirante en dos partes y realizar un injerto en el espacio de madera eliminada. Se aprecia





la unión a doble media madera ya ejecutada en los dos lados de la madera reparada.

La estructura se encuentra descargada y apeada en sus dos partes. La madera aportada lista para ser presentada en el tirante. Conviene considerar que en el encolado de las dos piezas, las fendas que intersectan con los planos de encolado, quedarán rellenas de resina, lo que mejorará la calidad de la madera en dicho entorno.

Se realizan taladros en todos los planos longitudinales de encolado que permiten al ser rellenos con resina y ejercer como crampones, reducir la longitud de la unión.

El tiempo abierto de la resina es relativamente corto, del orden de 30 minutos, por lo que será imprescindible tener toda la tarea preparada y realizar toda la operación de encolado en un tiempo inferior.

Una vez pasado el tiempo de encolado, se eliminan los tornillos de ajuste y se hace entrar en carga a la cercha. Estructuralmente el trabajo está terminado. Queda la tarea de igualar las superficies y en su caso de aplicarles algún tipo de protector decorativo.

4. CONSIDERACIÓN ECONÓMICA

Si tenemos en cuenta las dos reparaciones de manera individual, la primera de ellas requiere una gran número de horas de mano de obra para el complejo ajuste de los planos de encolado.

El segundo de los ejemplos emplea una técnica que implica el empleo de una resina de gran calidad, pero su ejecución es más sencilla y requiere pocas horas de mano de obra para el ajuste, principalmente por dos motivos; el primero es que el diseño de la unión es más sencillo, y el segundo es que el empleo de resina admite un ajuste de planos mucho menos preciso.

En conjunto el segundo de los ejemplos es más económico que el primero debido a la incidencia de la mano de obra.

La decisión de emplear uno u otro ejemplos vendrá determinada por la disponibilidad de carpinteros de precisión en obra, por la economía o por la rapidez de ejecución.

En general la intervención en la cubierta se justifica económicamente siendo más rentable reparar las cerchas existentes a pesar de las patologías que presentaban, que fabricar cerchas nuevas.

5. BIBLIOGRAFÍA

- ARRIAGA MARTITEGUI, F., "Consolidación de estructuras de madera mediante refuerzos embebidos en formulaciones Epoxy", Tesis Doctoral, 1986.
- LANDA, M., "Comportamiento de las uniones encoladas para la reparación de elementos estructurales de madera que trabajan a flexión", Tesis Doctoral, 1997.
- "Características mecánicas de las resinas epoxy en aplicaciones estructurales de madera". Tecnifusta Ingeniería, 2005.