

MEDIANTE REFUERZOS Y PRÓTESIS METÁLICAS

RECUPERACIÓN DE FORJADOS DE MADERA

La madera, material estructural biológico por excelencia, es uno de los más empleados en todos los sistemas constructivos a lo largo de la historia. Cuando el paso del tiempo cobra su tributo, existen métodos de tratamiento que le devuelven todo el esplendor y cualidades del primer día.

texto_Carlos González-Bravo (Prof. Dr. Arquitecto. Director de la Escuela de Arquitectura e Ingeniería de Edificación. Universidad Antonio de Nebrija de Madrid)

Los forjados de madera son, desde la más remota antigüedad, un sistema constructivo que ha llegado hasta nuestros días en un estado, en sentido conceptual, inmejorable. Su empleo ha sido variado, combinado, alternado y en una época concreta, desechado. Hoy en día vuelve a ocupar un lugar preponderante en la construcción. Pese a ello, el volumen de obra construida con madera en la actualidad, tanto en el ámbito del patrimonio, como fuera de éste, es abrumador. El en-

foque habitual de este tipo de intervenciones suele ser tímida y, en el mejor de los casos, con una seria escasez de datos acerca de su comportamiento mecánico-residual. Esto se debe a la mala fama que la madera, como estructura, ha heredado desde el pasado, sin olvidar las características tan particulares y, por qué no, caprichosas que este material posee. Si bien la madera tiene un origen biológico, ello no implica, en ningún caso, más facilidad para ser atacada que otros

materiales, como el acero o el hormigón. Muestra de ello es la comparativa que se establece entre acero y madera cuando son empleados como elementos estructurales en los forjados. Por lo que se refiere a los ataques a forjados de madera en ambientes húmedos, las viguetas suelen poseer una capacidad mecánica residual considerablemente alta, comparada con el acero. El estado del forjado metálico (como bien se puede apreciar en la foto inferior izquierda), en



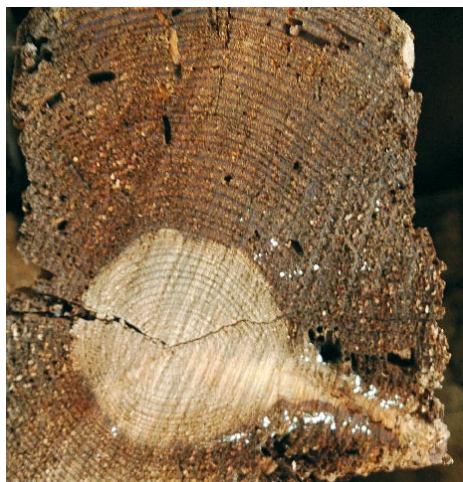
Forjado de viguetas IPN de acero laminado, con 10 años de antigüedad, en una vivienda del casco urbano de Madrid.



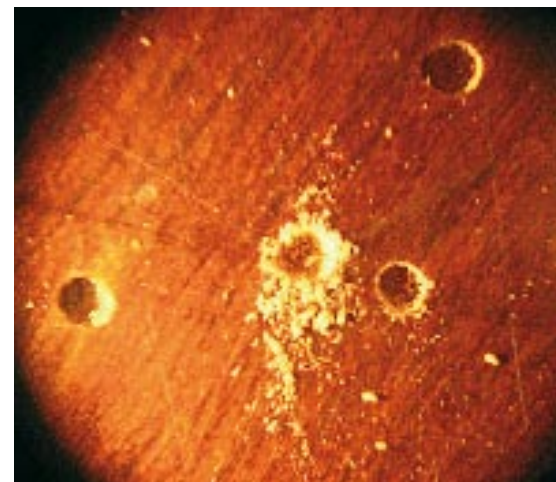
Forjado de madera, de conífera de 130 años de antigüedad, de la misma vivienda madrileña.



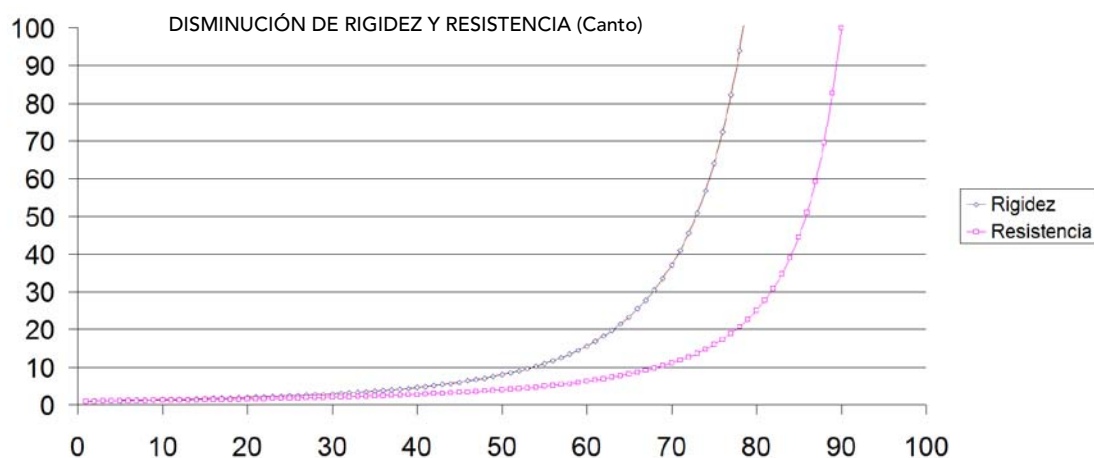
Ataque por hongos de pudrición parda.



Testa de vigueta de madera con ataque por insectos de ciclo larvario.



Detalle de orificios circulares de salida y restos de carcoma existentes en la galería.



Escuadría de madera con pérdida de sección y gráfica de la relación de pérdida de resistencia y rigidez relacionada con la pérdida de sección.

el que la madera fue sustituida por acero laminado hace unos 10 años, poseía un deterioro considerable, comparado con el forjado de madera de conífera, de 130 años de antigüedad, atacado por hongos de pudrición parda.

Por otro lado, es bien conocido el comportamiento de las estructuras de madera frente al fuego y cómo la capa de pirólisis tiene un retardamiento sobre su avance (0,7 mm/hora) en la carbonización de la sección estructural. Por tanto, la pregunta es por qué, a pesar de las buenas condiciones que posee la madera como material estructural, sufre una política social

de abandono y sustitución cuando se le detecta algún tipo de lesión.

Los procesos patológicos en forjados de madera son habituales, pero también adolecen de cierta exageración. Un examen de la capacidad mecánica residual de la estructura, es decir, rigidez y resistencia, es paso previo imprescindible antes de plantear cualquier tipo de intervención en este tipo de estructuras. Los datos que se suelen recoger dependen de varios parámetros, como la clasificación estructural, deformación diferida, luz, etcétera. Desde hace algún tiempo se están ensayando *in situ* técnicas no destructivas

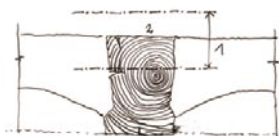
(TND) como el resistógrafo, ultrasonidos, etcétera, con resultados bastante aceptables, y que establecen clases resistentes acordes con los ensayos destructivos realizados en laboratorio. La mayoría de las intervenciones en forjados de madera pasan por su demolición y sustitución indiscriminada, empleando en esta última acero laminado, en la mayoría de los casos.

TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS

En los ensayos y estudios llevados a cabo sobre estructuras de madera, se han comprobado valores resistentes de este material considerables, incluso en el caso de



Zonas de trabajo por encima de la cara superior del forjado.

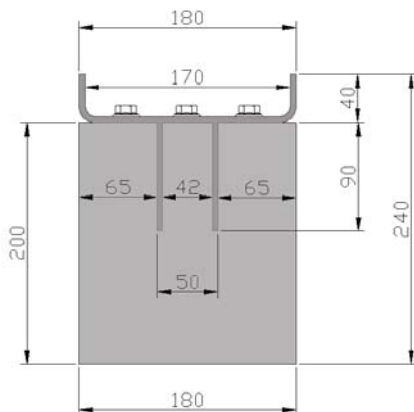


Zona de aplicación de refuerzo sobre el forjado.

ataques por hongos y/o insectos de ciclo larvario, como los anóbidos.

Si consideramos el daño sufrido por la sección de madera, ya sea perimetral o con pérdida de canto, se puede llegar a estimar la disminución de rigidez y resistencia de dicha sección. En el gráfico de la página anterior, se observa la variación de la capacidad mecánica al disminuir la escuadría. La problemática de la intervención, por la cara superior, en elementos de patrimonio histórico artístico (como los artesanados de madera) o en edificios de viviendas, constituyó el punto de partida para este sistema constructivo.

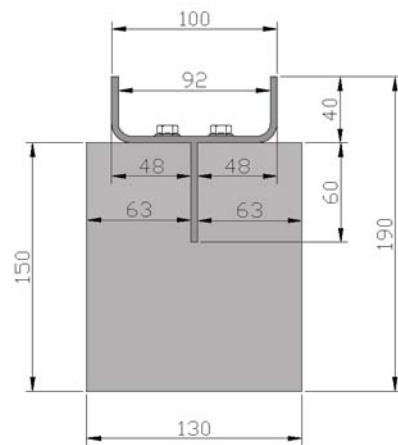
La idea consistió en partir de una serie de premisas y parámetros con la voluntad de marcar una metodología de trabajo sistemático y de mejora de la capacidad mecánica de forjados de madera preexistente. Los parámetros de trabajo fueron los siguientes: la aplicación, tanto a piezas dañadas como a aquellas que, estando sanas, son objeto de incremento de su capacidad (por ejemplo por cambio de uso); la intervención con mínima incisión, por la cara superior del forjado, y sin apeo inferior del forjado; la economía de materiales y mano de obra (en especialización y horas/operario), así como la facilidad de manipulación y montaje; aumento significativo de la rigidez y resistencia del forjado, además de la reducción significativa de la demolición y de la producción de residuos urbanos (en determinados casos, aumento significativo del aislamiento acústico y de la vibra-



Solución de refuerzo con doble pletina inferior.



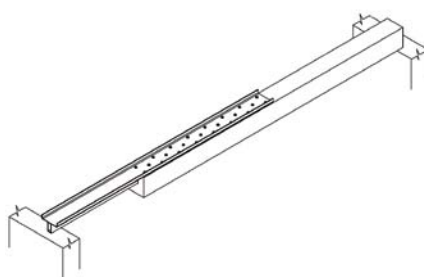
Refuerzo de acero de doble pletina inferior sobre la madera.



Solución de refuerzo con una pletina inferior.



Refuerzo de acero de una pletina inferior sobre la madera.



Prótesis para ataque en punta de viguetas de madera.



Prótesis de madera con doble pletina inferior.

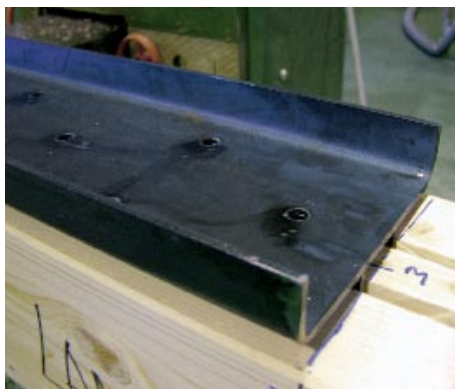
ción), y dotar a los entramados horizontales preexistentes de una losa superior de forjado que homogenice el reparto de tensiones sobre la misma, acodalando los elementos de carga vertical.

La madera estructural posee capacidad mecánica residual muy aprovechable, a pesar de los ataques y posible reducción

de su sección. Por tanto, y de cara a que este aprovechamiento del material sea adecuado, se planteó un trabajo conjunto entre acero y madera. Esta sinergia de materiales se plasma en la respuesta tensional del acero y la madera unidos (combinación de compresiones y tracciones). La intervención se efectúa por la cara su-



Acanaladuras en la madera practicada con sierra motorizada.



Ensamble del refuerzo de doble pletina inferior.



Atornillado manual en las últimas vueltas de rosca.

perior, una vez descubierta la madera del forjado. La eliminación de la capa de agarre supone una reducción de peso para la estructura de madera ya deformada (flecha diferida). En el espacio que antes ocupaba el solado y su capa de agarre, se puede disponer el refuerzo y una losa superior de forjado.

Dado que los forjados de madera antiguos carecen de la hoy preceptiva losa superior de forjado, las deformaciones de los elementos lineales sometidos a flexión son diferentes entre unas piezas y otras. Las ondulaciones convierten al forjado en una superficie, a veces de gran complejidad y con curvaturas en varios planos diferentes. Con el refuerzo y la prótesis planteados se produce una homogenización, no sólo en la superficie del forjado, sino en su comportamiento estructural. Se trata de piezas de acero laminado plegadas y soldadas.

INTERVENCIÓN POR LA CARA SUPERIOR

Con este tipo de refuerzo o prótesis (según sea la lesión) se pretenden realizar actuaciones de "mínima incisión", en las que no existe trabajo por debajo del forjado (como apeos o puntales). Esta posibilidad de intervenir sólo por una de las caras facilita el régimen de programación de las obras, la ausencia de desalojo en viviendas o la influencia en zonas delicadas de obras de patrimonio histórico artístico.

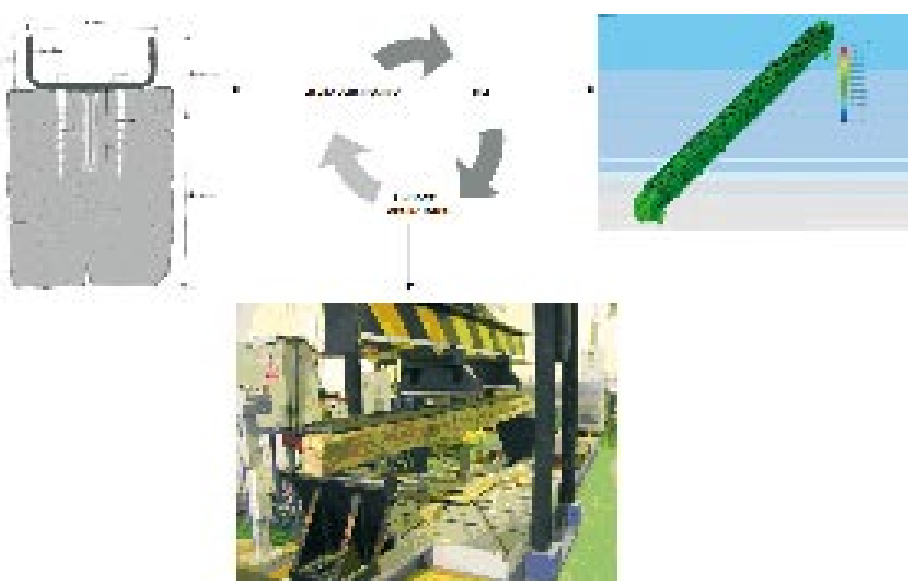
Los materiales empleados en la rehabilitación integral del forjado, siguiendo

este sistema constructivo, se limitan al acero y a los elementos de conexión con la madera de las viguetas. Por otro lado, y al no intervenir sistemas sofisticados de unión (resinas epoxi, fibra de carbono, etcétera), no es necesario el empleo de mano de obra especializada.

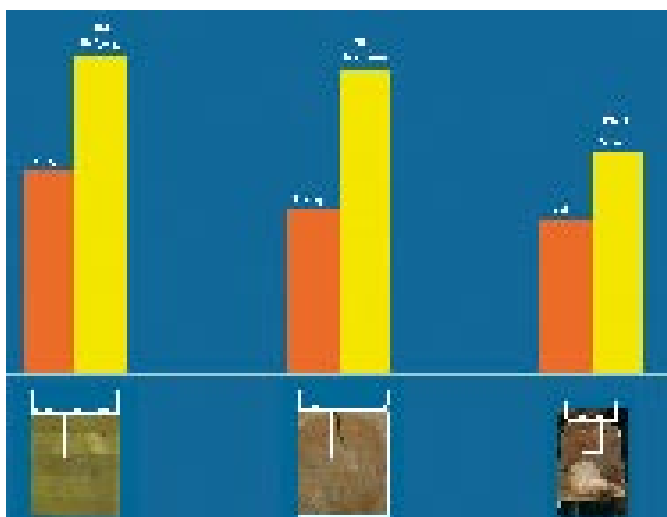
El caso particular de la prótesis está pensado para las pudriciones y deterioros en punta de viguetas, en los que se precisa llegar al apoyo para estabilidad del conjunto. Sobre la misma base de concepción del perfil de refuerzo la prótesis se refuerza mediante el empleo de un tubo estructural en la zona de ataque en punta. El refuerzo se coloca sobre toda la vi-

gueta incrementando su respuesta resistente y rígida. La prótesis, aplicada sobre piezas atacadas en la punta, se empotra en la madera sana una longitud previamente calculada. El refuerzo y/o la prótesis, según corresponda, se colocan atornillando sobre la madera, previa incisión en la misma de una acanaladura que aloja la pletina o pletinas verticales inferiores. La pieza se acopla desde arriba sobre la madera.

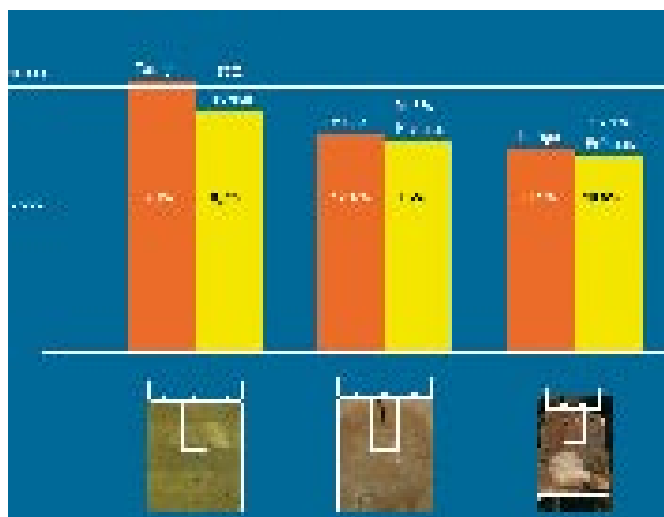
La completa unión acero-madera se lleva a cabo mediante el atornillado del metal, que hace que los dos materiales queden adheridos. Los tirafondos (DIN 571) poseen longitud y sección diferente según



Proceso cíclico de diseño y validación del sistema constructivo.



Resultados del incremento de resistencia en refuerzos en la campaña de ensayos de laboratorio.



Resultados del incremento de resistencia en prótesis en la campaña de ensayos de laboratorio.

el tipo de refuerzo que se emplea, y éste depende de la capacidad mecánica que se desea adquirir y de la escuadría de la pieza de madera a reforzar. Los tornillos (con pretaladro), que poseen una separación de 100 mm, siempre al tresbolillo en torno a las pletinas, se introducen de forma mecánica, aunque las últimas vueltas se realizan manualmente con una llave para evitar la rotura a torsión de los tirafondos.

AUMENTO DE LA RESISTENCIA

Uno de los objetivos de este sistema constructivo es el incremento de resistencia y rigidez en la estructura lignaria. Para conseguir esto, los valores de trabajo de las piezas se ensayaron previamente me-

dante el método de elementos finitos (MEF), a través de programas informáticos que permitían simular los tres componentes del sistema, el refuerzo, los conectores y la madera. El proceso se encuadró en un sistema cíclico para optimizar las distintas etapas del diseño y el proceso de experimentación. Los ensayos se llevaron a cabo sobre piezas a escala real de distinta tipología y constitución (madera laminada, madera maciza y madera antigua), y se establecieron patrones de comparación con elementos que servían de testigo (sin reforzar).

Las pruebas tuvieron lugar en el Instituto Nacional de Investigación Agraria (INIA), que posee instrumental de ensayo para grandes probetas (en este caso, vigas de

madera de hasta 4 metros de longitud), similares a las piezas que se pueden encontrar en un forjado convencional. En los ensayos se obtuvieron valores de deformación y tensión en distintas fases de la carga, aunque lo que primó es el ensayo a rotura de las piezas según la UNE EN 408. En las gráficas de resultados, se comprobaron los incrementos de resistencia, en los casos estudiados respecto de las piezas sin reforzar. Un dato interesante es la reducción de los Coeficientes de Variación (CoV) de las distintas muestras, al emplear el refuerzo y la prótesis, comprobándose que actúan homogeneizando las piezas.

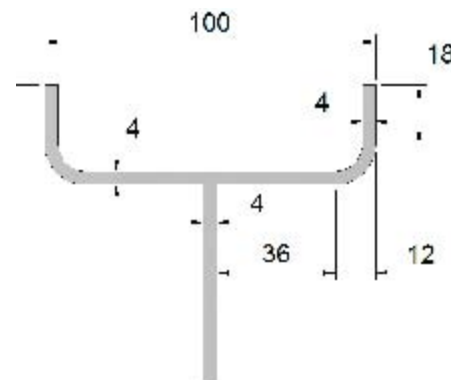
A pesar de la problemática de la deformación diferencial entre madera y acero, el



Forjado de madera tras retirada de solado.



Vigueta con ataque por hongos de pudrición.



Modelo de refuerzo empleado en el ensayo de campo.

ensamble de los materiales en el sistema constructivo, demostró que la madera posee una capacidad mecánica residual a tracción considerable y que ésta se ve complementada con el acero, tras la ascensión experimentada por la fibra neutra, dentro de la sección reforzada.

Se posibilita así que la línea estructural de madera, ahora reforzada, funcione en la franja óptima de esfuerzos, recuperándose su función portante en el caso de piezas con cierto grado de ataque e incrementándose notablemente su capacidad de absorber nuevas cargas para las que el forjado antiguo no estaba preparado.

Finalmente, y tras la campaña de ensayos, se decidió aplicar el sistema en un ensayo de campo con lesiones por hongos de pudrición.

CASO REAL

En una vivienda del casco antiguo de Madrid se levantó todo el solado y se aplicó el refuerzo en su conjunto y la prótesis en una zona puntual del perímetro. Dado que la escuadría de las piezas de madera era pequeña (10 cm x 15 cm), se empleó un refuerzo de una sola pletina inferior, y con unos valores de rigidez acomodados a la franja de recuperación que se pretendía en función de la capacidad mecánica del forjado de la vivienda.

En los distintos paños del forjado, se comprobó la capacidad mecánica residual, registrándose algunos casos por encima del 120%. Las flechas (inicial y final) de los paños eran altas, lo que demostraba la desviación de la flecha diferida en la madera. Tras los cálculos de capacidad residual realizados sobre los distintos paños, se eligió un perfil que recuperaba la capacidad mecánica de las piezas hasta el 60%.

Para el montaje se practicó una acanaladura con sierra de disco para posteriormente realizar la perforación con sierra motorizada. El atornillado del refuerzo se llevó a cabo desde los apoyos hacia el centro, y la deformación de la pieza fue reduciéndose, levantándose literalmente la madera a medida que acero y madera se atornillaban.

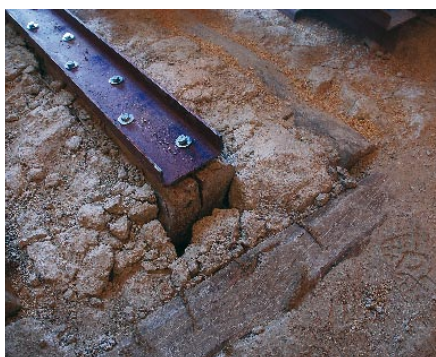
Los refuerzos ensamblados en los paños del forjado sólo quedan a la espera del relleno de los entrevigados. En el caso del



Corte de la madera con sierra motorizada.



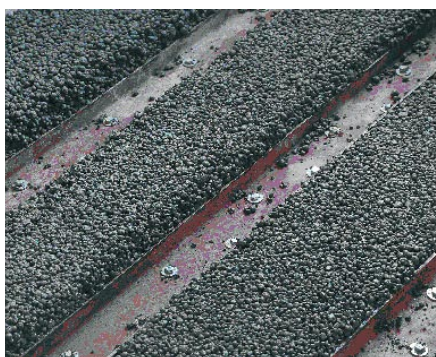
Atornillado de tirafondos de forma mecánica.



Forjado con la pieza de refuerzo ensamblada.



Vigueta con ataque en punta reforzada con prótesis.



Forjado con la pieza de refuerzo ensamblada.



Relleno de la zona de entrevigado con mortero aligerado.

ataque en punta, se resolvió en un perfil, de las mismas dimensiones, fijándose a la madera. El empleo de morteros aligerados posibilita regularizar el plano del forjado antes de la capa de compresión. Dicha capa funciona como una losa superior de forjado cuya función, aparte de la estipulada por el Código Técnico de la Edificación y el Eurocódigo, complementa a través de una estructura compuesta de tres materiales (madera, acero y hormigón) el refuerzo y/o la prótesis.

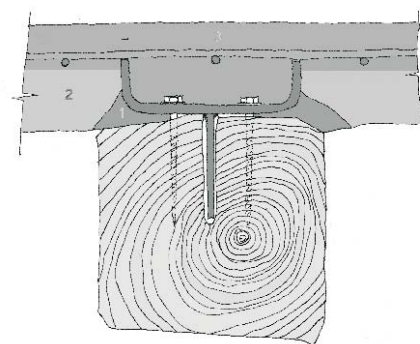


Imagen de la sección compuesta madera-acero-hormigón armado.