

Evolución histórica del uso de elementos metálicos en la construcción con madera

Milagrosa Borrallo Jiménez

En mayor o menor medida el hierro se ha usado en construcción desde tiempos remotos; ha sido insustituible en carpintería para la fabricación de herramientas, utillaje y mecanismos y, generalmente, para cualquier elemento resistente que necesitara una elevada capacidad resistente (sobre todo a tracción) con reducida sección. Su empleo siempre ha planteado la necesidad de resolver cómo debía emplearse en elementos estructurales, desde el punto de vista técnico y arquitectónico, y con ello, solucionar problemas derivados tanto de la fabricación como de la puesta en obra y conservación en el tiempo. El problema de su degradación por corrosión ha sido siempre importante, puesto que implica un aumento de su volumen y rotura de los materiales con los que está en contacto.

Si hacemos un breve repaso del uso de elementos metálicos en la construcción en madera a lo largo de la historia (incluida la construcción naval) nos encontramos que hasta etapas muy avanzadas no fueron empleados masivamente. En la Antigüedad, la tecnología naval egipcia, de la que se tienen datos a partir del descubrimiento en 1954 del barco de Keops (edificio flotante) dentro de la gran pirámide, revela cómo los barcos se construían a base de piezas trabadas y tensadas por una cuerda que se ataban de proa a popa, con la particularidad de la ausencia de herrajes en su armado (fig. 1). Sin embargo, la construcción naval griega y romana introduce los metales para la protección de sus embarcaciones de madera, por debajo de la línea de flotación, colocando plan-

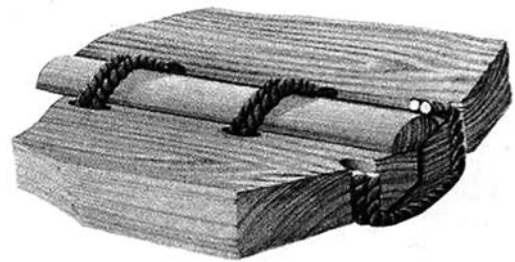


Figura 1
Cuerdas hechas de raíces que cosen gruesos tablones de roble en una embarcación primitiva (Johnson 1978)

chas de plomo sobre tela empapada en alquitrán y sujetas con clavos de cobre (Johnson 1978).

Muchas pinturas de la época nos muestran la forma y el aparejo de las embarcaciones del mundo clásico. Descubrimientos realizados en el siglo XX de barcos mercantes naufragados proporcionan datos de los métodos constructivos. En el Mediterráneo, la madera utilizada para la construcción de barcos era el abeto (por su resistencia a la pudrición), el abeto plateado (por su ligereza) y el cedro; incluso el pino fue utilizado en Chipre por ser de mejor calidad que el abeto del lugar. Las cuadernas, para rigidizar el casco, se hacían generalmente de roble y las espigas y lengüetas, de maderas elásticas, como la acacia, el olivo y el roble de veta recta bien seco. Las cuadernas se sostenían con pernos de madera a los que se



Figura 2
Casco de una embarcación perteneciente a la edad de bronce inglesa (Johnson 1978)

clavaban puntas de bronce por fuera del casco (fig. 2). Aunque, al parecer, no se empleaba la madera curada, tenía que estar suficientemente seca para que se expandiera y se apretaran todas las puntas al botar el casco al agua (Johnson 1978).

Entre las especies de madera utilizadas tradicionalmente para la construcción de barcos encontramos el roble, sin embargo, su escasez y las mejores condiciones de trabajabilidad de algunas maderas tropicales, como la teca y el iroko han provocado su sustitución por estas (AITIM nº 1-2, 1963 a 1968). La teca, concretamente, se caracteriza porque ofrece piezas de gran longitud, es muy duradera y muy estable a las variaciones de humedad, tiene fibra recta, es muy impermeable (debido a la oleoresina que contiene) y no ataca al hierro.

En edificación, los griegos no conocían la armadura triangulada,¹ por tanto, sólo se tiene referencias del uso del hierro (solo o recubierto de plomo) y el bronce² exclusivamente para trabar (con tijas, grapas y crampones) el aparejo de los muros de mampostería de piedra y también en los ejes de columnas, como recomendaba Rondelet (Adam 1996).

De la cultura romana, la mayoría de las armaduras han desaparecido (a excepción de las encontradas en Herculano y Pompeya, que son de dimensiones modestas). Se necesita por tanto recurrir a las fuentes literarias e iconográficas, que también son reducidas, y a las huellas de soportes dejadas en los monumentos, para poder estudiar la estructura de sus armaduras. El modo elemental de refuerzo de uniones utilizado por los romanos fue el de ligaduras a base de cuerdas. Esto se deduce de un texto de Vitruvio, en el que describe la construcción de bóvedas encamionadas a base de tirantillas atadas y suspendidas del entramado

por ligaduras de madera flexible. El mismo sistema vuelve a aparecer cuando Vitruvio explica la ejecución de cajones para hormigonar en el mar (Vitruvio, 5.12). Si bien Vitruvio nos habla largo y tendido de las diferentes maderas utilizables en carpintería (2, 9), no dice nada acerca de la manera de ensamblarlas (Adam 1996). Los romanos sólo admitían el hierro en sus armaduras como algo excepcional. Fueron ellos quienes empezaron a utilizar el hierro en la clavazón de estructuras de madera, y muestra de ello son espigas metálicas utilizadas en algunas de ellas, aunque en general las clavijas eran de madera (fig. 3).

Los romanos, aunque mantuvieron la tipología de las antiguas armaduras etruscas, quisieron enseguida sustituir la madera por un material menos alterable como el ladrillo, en disposición de arcos, o el «bronce», metal fácil de trabajar y cuyas uniones son muy sencillas de realizar. Inicialmente emplearon el bronce en elementos principales y, posteriormente, incluso en recubrimientos. Entre los ejemplos más significativos tenemos la cubierta de la basílica Ulpia, completamente realizada en bronce, una gran sala de

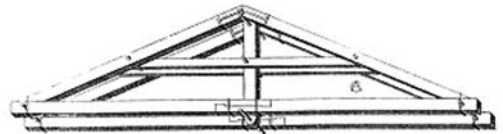


Figura 3
Armadura de la antigua basílica del Vaticano, según Fontana, con bridas de hierro (Choisy [1873] 1999)

las termas de Caracalla, con toda su carpintería en este metal y en el siglo primero antes de nuestra era, los romanos utilizan sólo el bronce para construir la armadura del pórtico que está delante de la rotonda de Agripa (Choisy 1999, 135) (fig. 4).

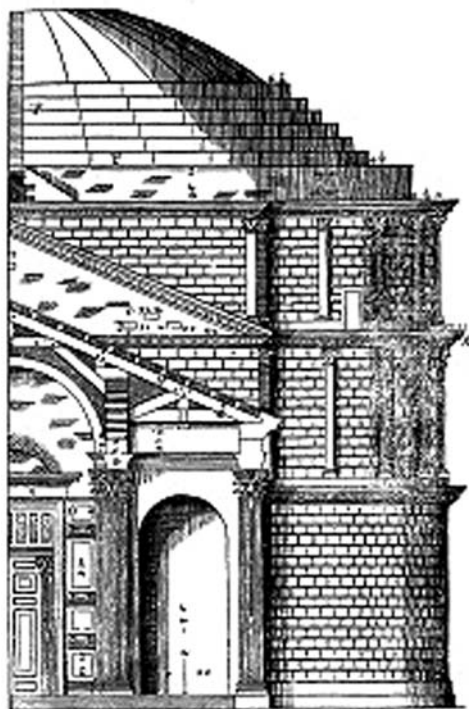


Figura 4
Sección del pórtico del Panteón, por A. Palladio (Adam 1996)

El pórtico del Panteón conservó durante quince siglos piezas de bronce. Las descripciones que se tienen hablan de planchas de bronce ensambladas en forma de U, lo que induciría a pensar que se trataba, no de elementos portantes, sino de revestimientos decorativos. No obstante, no queda descartado atribuirles una función portante, bien como refuerzo de las piezas de madera o, y sería la hipótesis más atrevida (según Adam), como vigas metálicas perfiladas. Palladio, que dibujó un alzado completo del monumento, nos da la sección del pórtico (Palladio [1570] 1968, 73–74).

También tiene el Panteón el privilegio de haber recibido una cubierta de tejas de bronce que tras múltiples saqueos fueron expoliadas por Constante II.

Los bizantinos utilizaron el hierro para medios auxiliares, y a lo largo de toda la Edad Media, además de mantenerse los usos anteriores, las bóvedas fueron reforzadas por medio de tirantes metálicos, sobre todo en Italia.

En el Renacimiento, Leonardo da Vinci advierte que «el arco con cuerda (atirantado) poco dura», y Alberti, en su tratado, manifiesta ser cautos con el uso del hierro. Andrea Palladio describe en sus *I Quattro Libri dell'Architettura*, publicados por primera vez en 1570, cerchas de aspecto moderno para su uso en grandes luces. A ella pertenece la ilustración del puente sobre el río Cismote en Italia, con una luz de 30 metros (fig. 5) (Gómez Acosta y López Martínez 2002, 266).

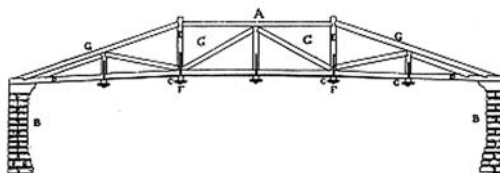


Figura 5
Cercha del puente de Cismote, ilustración de Palladio

Philibert de l'Orme, en el siglo XVII, desaconseja el uso del hierro en los empotramientos de las vigas de madera en los muros. En 1561 publica en París el libro *Nouvelles inventions pour bien bastir et á petit fraiz*, donde expone su invención del sistema de carpintería modular enclavijada (fig. 6). Es una obra técnica dedicada a la práctica de la construcción de tejados, bóvedas y techos de madera, de un modo económico y sencillo. Propone un sistema para la construcción de formas arqueadas mediante unas piezas curvadas de pequeñas dimensiones, que se ensamblan con unas tijas, también de madera. Sin embargo, las cubiertas no comenzaron hasta el final del siglo XVII a reflejar el cambio del uso casi universal de las juntas de madera a ensamblajes diseñados específicamente para las uniones de metal, que usaban tornillos y abrazaderas (Gómez Acosta y López Martínez 2002, 264).

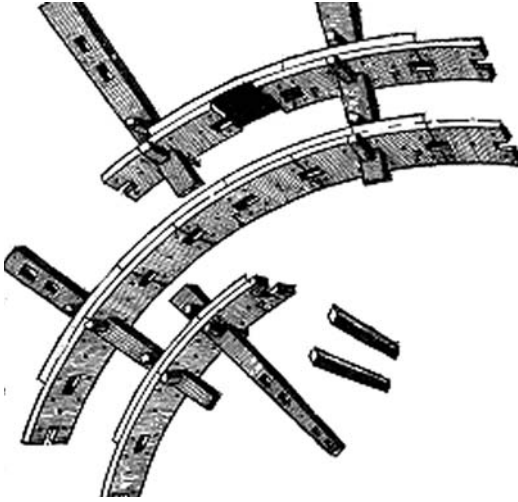


Figura 6
Sistema de carpintería modular enclavijada. Philibert de l'Orme, siglo XVII (Wiebenson, D)

La posterior utilización de bridas, bulones y clavos permitió la construcción de vigas curvas de madera constituidas por varias tablas delgadas enlazadas entre sí, precursoras de la futura madera laminada, con ejemplos como los indicados en la figura 7.

ELEMENTOS METÁLICOS EN LA CARPINTERÍA DE ARMAR TRADICIONAL ESPAÑOLA

Si bien la carpintería de armar española, cuyo esquema básico estructural ha sido la cubierta de par-nudi-

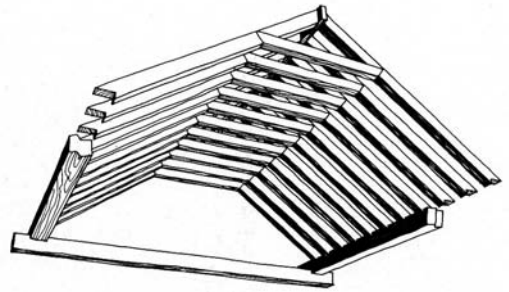


Figura 8
Armadura par-nudillo (Nuere, E)

llo (fig. 8), ha evitado la utilización de herrajes metálicos en las uniones, es habitual encontrarlos, ante esfuerzos de tracción, como elementos de fijación para evitar desmembramientos y roturas de los elementos de madera.

Se conocen desde tiempos antiguos, ensambles realizados por estereotomía que permiten absorber esfuerzos de tracción, como la cola de milano o el empalme de llave (fig. 9), ajustados, en general con cuñas y clavijas de madera³ y reforzados en todo caso con colas y ligaduras con cordaje.

Con posterioridad, se diseñaron soluciones de enlances en las que la presencia del hierro era totalmente necesaria para el funcionamiento de la unión. El elemento o herraje metálico que se ha empleado usualmente con este fin es el clavo (figs.10 y 11).

Aunque el diseño de los encuentros entre las distintas piezas de la armadura estaba pensado para que la estructura fuese estable sin necesidad de clavo al-

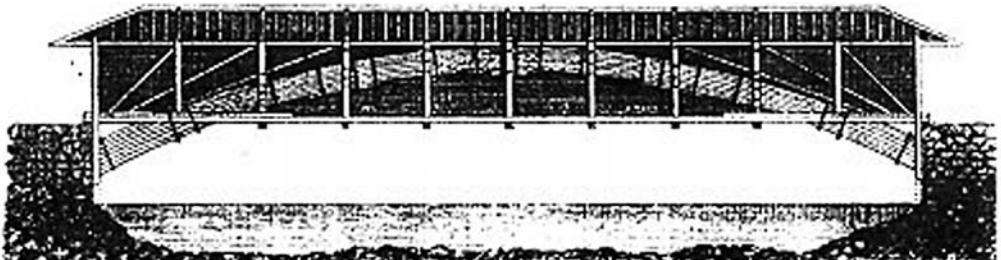


Figura 7
Puente de Wettingen sobre el río Lammat. Suiza 1778 (H.U. y J. Grubenmann)

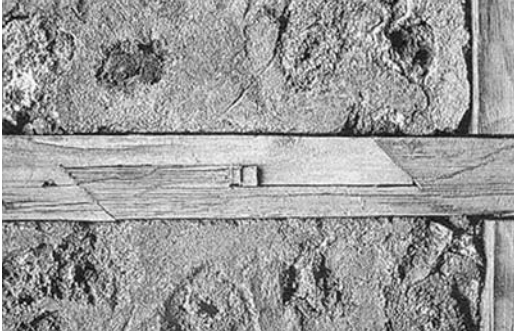


Figura 9
Empalme de llave. (Adam 1996)



Figura 10
Clavija de refuerzo en un ejemplo de carpintería de armar española (Candelas Gutiérrez 2001)

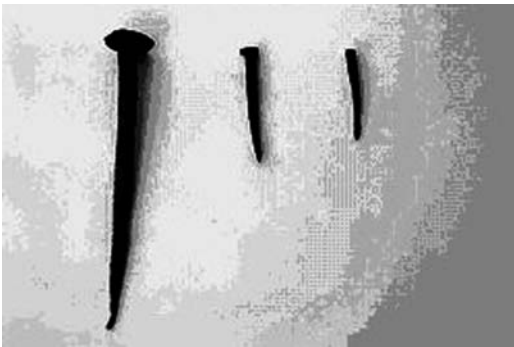


Figura 11
Clavos y clavija obtenidos de armaduras del siglo XVI de la provincia de Huelva

guno, ya que los clavos eran caros y de difícil suministro – la utilización de los mismos, al menos en los elementos estructurales importantes, proporcionaba un afianzamiento ante posibles movimientos y deformaciones. A veces los clavos se utilizaban no para asegurar la estabilidad de las piezas sino para evitar los movimientos de deformación típicos de la madera poco seca colocada en obra (Fernández Cabo 1997, 68).

Los materiales metálicos utilizados a lo largo de la historia para estos elementos metálicos de refuerzo han sido de diversa naturaleza de acuerdo a los avances de la técnica de cada época, desde el tradicional hierro forjado,⁴ hasta los inoxidables de cobre o de bronce.

Aunque en el Mundo Oriental se conoció el hierro fundido o colado⁵ algunos siglos antes de nuestra Era, en Europa no se desarrollaría esta tecnología hasta fechas muy posteriores, en torno al siglo XIV (Almunia 1953, 45).

Hasta ese siglo, e incluso hasta finales del siglo XVIII, la mayor parte del hierro que se obtenía, en las fargas y ferrerías,⁶ era «hierro forjado», para el que no se requiere temperaturas muy elevadas (del orden de 750°), pero son necesarios poderosos sistemas de inyección de aire para poder reducirlo. El producto obtenido del horno (mezcla esponjosa de metal, óxidos y silicatos) era purificado por el procedimiento de forja, consistente en un calentamiento y martilleado hasta separar las escorias y darle forma.

El hierro forjado español fue muy apreciado en Europa hasta el año 1500 aproximadamente, en que apareció el hierro fundido. Tal circunstancia se debía, en gran parte, a que el material producido en nuestro país «no se corroía» o «se corroía menos» debido a ciertas técnicas empíricas empleadas en su fabricación.⁷

Este material era moneda de cambio en algunos contratos de obras, pues al mismo tiempo que era un material reutilizable, aprovechándose de los restos de otras armaduras colapsadas, era también un material caro, ya que hasta bien entrado el siglo XVIII su producción estaba limitada a los medios artesanales de fundición y forja.

Por regla general, la clavazón no se especificaba de una manera expresa en la memoria y condiciones de los contratos, sino que la iglesia o promotor aportaba a pie de obra todos los materiales necesarios, incluida la clavazón, salvo referencia expresa en contra (Fernández Cabo 1997).

Hay datos de cartas de pago de las obras de algunas iglesias, como la capilla mayor del monasterio de la Concepción en Ponferrada, León, donde se realiza una descripción detallada de todas las piezas de madera, así como de los elementos auxiliares tales como clavijas y resto de la clavazón necesaria, siendo esta la cuarta parte aproximadamente de la primera (Fernández Cabo 1997):

Precio de la madera aserrada y escuadrada: 15.000 maravedíes

Precio de las «clavijas, forcales y clavazón»: 3.600 maravedíes

Al ser los clavos metálicos costosos, los carpinteros eran escrupulosos en su uso. De hecho, en las Ordenanzas de Sevilla⁸ se regula la compra de clavos castigando, al igual que ocurre con la madera, su compra o reventa fuera de los cauces establecidos:

Que ninguno de los dichos carpinteros, ni otra persona alguna, no sea osado de yr, ni embiar a la dicha villa de Sant Lucar de Barrameda, ni menos de comprar en esta dicha cibdad (Sevilla), ninguna clavazón perteneciente al dicho su oficio de carpintería, para la aver de revender.

Si repasamos lo especificado por los tratadistas españoles: Diego López de Arenas,⁹ Fray Andrés de San Miguel, Fray Lorenzo de San Nicolás,¹⁰ Rodrigo Álvarez¹¹ y García Verruguilla, encontramos que aconsejan el recurrir al refuerzo de las diferentes uniones en carpintería de armar mediante elementos metálicos, la mayoría de tipo clavija. Así, Fray Lorenzo de San Nicolás recomienda asegurar las uniones de las piezas mediante llantas o cuchilleros, o sea pletinas de acero clavadas en el grueso de las piezas. La decadencia en el uso de los cartabones para resolver la estereotomía de la madera produce una falta de confianza en el proceso constructivo que hace que intervengan elementos ajenos a él (Duclós Bautista 1992, 10).

Rodrigo Álvarez, en su manuscrito (1640), propone la sustitución de los tirantes de madera, que obligatoriamente había que colocar en las armaduras de planta alargada, por tirantes de hierro y lo justifica por su liviandad visual frente a la madera.

y A estos (los tirantes) con que se fortalecen el estribo, Dizen y llaman tirantes que por ser odiosas a la vista con su cuerpo entre los ojos y la labor de la obra en

Armadura, No pudiendo negar su necesidad y el Bien que de su asiento Resulta a la perpetuidad de la obra, en armadura las labran Muchas veces y a sientan los Arquitectos No de vigas de madera sino de fierro por ser material porque con menos cuerpo se hace el efecto, que de el mucho cuerpo de las vigas hazen las tales tirantes ser odiosas a la vista, y las de fierro no ynpiden a la vista para la labor de la obra en las tales Armaduras, de su con Partición Y asiento se dijo en el capítulo 14 (R. Alvarez, h. 28v y 29).

Conviene recalcar que muchos de los diseños de las uniones manifiestan claramente que han sido concebidos para que puedan cumplir sus funciones constructivas y estructurales sin necesidad de clavos o clavijas supletorios, lo cual debía encarecer notablemente la ejecución de las armaduras realizadas en época medieval. Más tarde, se diseñarían soluciones de enlaces en las que la presencia del hierro era totalmente necesaria para el funcionamiento de la unión. Son soluciones constructivas con menor labor carpintera y que necesitan de clavos o herrajes para su correcto funcionamiento (fig. 12).

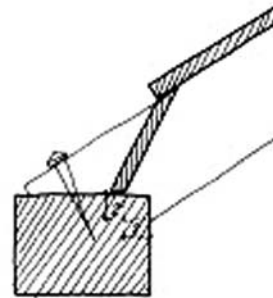


Figura 12

Apoyo de pares sobre estribo con solución de encastre y clavo. Este clavo evita el desplazamiento horizontal en caso de no resistir la patilla (Fernández Cabo 1997)

La Revolución Industrial en Europa coincidió también con la disminución de los recursos madereros por lo que el sistema constructivo de entramado de madera fue sustituido por el sistema de fábrica de ladrillo, reservándose la madera para puertas, ventanas, escaleras, revestimientos y artesonados. La revolución se produjo principalmente en América donde el

metal era abundante a principios del siglo XIX, de manera que en las primeras décadas del siglo XIX los americanos dominan la fabricación mecanizada de clavos, hasta entonces de elaboración absolutamente artesanal (se hacían a mano, uno a uno).

En las últimas décadas del siglo XX, las uniones entre elementos de madera experimentaron una fuerte evolución que permitió tanto la optimización de sistemas constructivos tradicionales como la ejecución en madera de cualquier tipo de sistema estructural (láminas, pórticos, arcos, . . .). En ello ha contribuido la utilización mayoritariamente de herrajes metálicos para la resolución de uniones (fig. 13), con una gran variedad tipológica: tornillos o tirafondos, grapas, pernos, placas auxiliares, placas clavos estampadas, conectores o anillos, herrajes de cuelgue, etc.

Si bien esto ha supuesto un aumento de resistencia

de los sistemas estructurales fundamentalmente, desde el punto de vista constructivo, la combinación de los dos materiales, metal y madera, ha ocasionado una serie de defectos y daños que no se producían cuando las uniones se realizaban de forma tradicional, mediante estereotomía. Entre ellos:

- Peor comportamiento ante el fuego, por la debilidad de los herrajes metálicos a altas temperaturas
- Peor comportamiento en lugares con importantes cambios térmicos entre el día y la noche (como cubiertas), por la diferente conductividad de ambos materiales y los cambios dimensionales derivados.
- Vulnerabilidad de la unión por el deterioro de ambos materiales: la mayor conductividad del acero hace que se puedan producir condensaciones en la superficie metálica al bajar la temperatura, la madera, debido a su higroscopicidad, absorberá esa humedad. Por un lado el elemento metálico podrá corroerse, si no tiene una eficaz protección para ello, pero, por otra parte, la madera humedecida favorece la colonización de hongos, que preparan la madera para otros daños. Es un debilitamiento combinado de las uniones que a la larga provocará su posible rotura.



Figura 13
Detalle de unión en la construcción actual en madera



Figura 14
Pabellón de Checoslovaquia Expo'92. Estado de las fijaciones de acero galvanizado. Fuente: E. Morales. AITIM 220

Un ejemplo de estos defectos se pone de manifiesto en el Pabellón de Checoslovaquia en la Expo '92 de Sevilla, que presentó la ruina de las bandas horizontales, de roble europeo fijadas con tirafondos galvanizados, a los cinco años desde su construcción (fig. 14). La causa estuvo en la agresividad por acidez del roble y la consecuente corrosión de los elementos metálicos, así como defectos de construcción. La intervención consistió en sustituir la madera de roble por iroko y el acero galvanizado por acero inoxidable (fig. 15).



Figura 15. Pabellón de Checoslovaquia Expo '92. Tablas de madera de iroko y fijaciones de acero inoxidable. Fuente: E. Morales. AITIM 220

Existen otros muchos casos de edificaciones actuales en madera en las que se observa el deterioro de los herrajes metálicos utilizados en ambientes agresivos sin haber tomado las medidas constructivas apropiadas por el proyectista para garantizar la durabilidad de los mismos. Y es que, aún hoy en día, existe un desconocimiento generalizado de cuáles son los agentes o factores que pueden intervenir en el deterioro de herrajes en contacto con madera y viceversa.

NOTAS

1. La única obra exclusivamente dedicada a la armadura griega es la de A. T. Hodge 1960. *The woodwork of greek roofs*, Cambridge.
2. Según A. Choisy nunca utilizaron bronce.

3. Estas solían hacerse de maderas más resistentes como el Fresno o la Acacia
4. También llamado hierro maleable o dulce. Es un material ferroso formado a partir de una masa solidificada de partículas pastosas de hierro metálico altamente refinado que, sin una fusión subsecuente, contiene una cantidad de escoria (silicato ferroso) que varía entre un 1 a un 3% del producto final. Pese a su alta resistencia a la corrosión y al impacto, actualmente se produce muy poco. Fuente: Enciclopedia McGraw Hill de ciencia y tecnología.
5. Nombre genérico que describe las aleaciones del hierro que contienen entre 1,8 y 4,5 % de carbono. Es duro y frágil.
6. Fueron unas instalaciones, fábricas o artefactos destinados a la elaboración de hierro forjado que, más tarde, era transformado en clavazón, aperos de labranza o armas de fraguas, mazos o martinets por artesanos herreros, armeros o cerrajeros. Su tecnología se inicia hacia el siglo XI y con muy pocas modificaciones llegó hasta finales del siglo XIX, en el que la producción industrial en hornos altos al cok acabó con ellas.
7. Las rejas utilizadas en hierro forjado de muchas catedrales europeas, incluida la de Notre Dame de París, fueron realizadas por forjadores catalanes.
8. ([1527, 1632] 1975, 147).
9. López De Arenas, D. *Breve Compendio de la Carpintería de lo Blanco y Tratado de Alarifes, . . . otras cosas tocantes a la ieometría y puntas del compás*. Edición facsímil de la primera edición de Sevilla de Luis Estupiñán. Valencia: Albatros.
10. San Nicolás, Fray Lorenzo de. 1665. *Segunda parte del Arte y Uso de Arquitectura*. Madrid.
11. Alvarez, R. 1699. *Breve compendio de la carpintería y trazado de lo blanco, con algunas cosas tocantes a la ieometría y puntas del compás*. Salamanca.

LISTA DE REFERENCIAS

- Adam, Jean Pierre. 1996. *La construcción romana: materiales y técnicas*. León: Editorial de los Oficios.
- Almunia, J. 1953. *Orígenes de la fabricación de arrabio en España*.
- Balboa de Paz, J. A. 1990. *Hierro y herrerías en el Bierzo preindustrial*. León: Diputación Provincial de León.
- Candelas Gutierrez, A. L. 2001. *Carpintería de lo blanco onubense*. Huelva: Diputación de Huelva.
- Choisy, Auguste. [1873] 1999. *El arte de construir en Roma*. Edición a cargo de Santiago Huerta Fernández; Francisco J. Girón Sierra; traducción de Manuel Manzano-Monís López-Chicheri. Madrid: Instituto Juan de Herrera.

- Fernández Cabo, Miguel. 1997. *Armaduras de cubiertas*. Valladolid: Ámbito.
- Gómez Acosta, José M. y D. López Martínez. 2002. *Tecnología arquitectónica hasta la revolución científica: arte y estructura de las grandes construcciones*. Robert Mark, ed. Revisión de la traducción: Juan Calatrava. Madrid: Akal.
- Johnson Hugh. 1978. *La Madera* (Título original: *The International Book of Wood*). Barcelona: Blume (Traducción: Concepción Rigau).
- Nuere Matauco, E. 2000. *La carpintería de armar española*. 2ª ed. Madrid: Munilla- Lería, D.L.
- Palladio, A. [1570] 1968. *I quattro libri dell'architettura*, libro cuarto, 20, 73-74 y lámina 77. Reedición de Milán. *Boletín de información técnica AITIM* (Asociación para la Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho) 1963 a 1968, nº 1 y 2.
- Boletín de información técnica AITIM* (Asociación para la Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho) 1963 a 1968, nº 220.

