

HIERRO Y ACERO EN SISTEMAS CONSTRUCTIVOS. CARACTERIZACIÓN Y ALTERACIONES

JANNEN CONTRERAS VARGAS

ÁNGEL ERNESTO GARCÍA ABAJO

GABRIELA PEÑUELAS GUERRERO

ILSE MARCELA LÓPEZ ARRIAGA

ISBN: 978-607-484-648-5

INTRODUCCIÓN

Aunque durante siglos se han usado diferentes metales en la construcción de inmuebles, es indiscutible que el hierro y sus aleaciones —las fundiciones o hierro colado y el acero— son los elementos metálicos más útiles e importantes en la construcción desarrollada a partir del siglo XIX.

Este texto aborda de manera introductoria y general las características químicas y las propiedades mecánicas del hierro, las aleaciones ferrosas que se han empleado en los sistemas constructivos, así como su producción, su desarrollo y las principales causas y mecanismos de alteración cuando se encuentran unidos a los cementos para formar concreto armado.

OBTENCIÓN

Pese a su gran utilidad, los metales ferrosos se comenzaron a emplear de forma relativamente tardía, comparados con otros como el cobre o el oro, porque a diferencia de éstos el hierro casi siempre se encuentra en forma mineral, es decir, combinado con no metales, formando óxidos y sales. La

obtención del hierro a partir de los minerales requiere de la aplicación de una gran cantidad de energía, a través de una serie de procedimientos conocidos genéricamente con el término de siderurgia.

HIERRO, FUNDICIONES –HIERROS COLADOS– Y ACERO

Como casi todos los metales, al hierro es necesario añadirle otros elementos para mejorar sus características y aprovecharlos mejor según el uso que se les dará. Esta mezcla de elementos con metales se conoce como aleación¹. En el caso del hierro, se trata de un metal duro y resistente, sin embargo cuando se le añade cierta cantidad de carbono forma una aleación de tipo intersticial, esto quiere decir que los pequeños átomos de carbono se acomodan en la red tridimensional que forman los átomos más grandes del hierro, deformándola, pero mejorando su resistencia mecánica (Chandler 1998:21).

Los primeros materiales de hierro aleado con carbono estaban altamente carburados, es decir, contenían altas

cantidades de carbono, generando piezas más duras que las realizadas con hierro puro, pero no tenían la tenacidad, característica que hoy identificamos en el acero (Scott y Egger 2009:19). Esto se debe a que en la estructura del hierro sólo se puede disolver una cantidad limitada de carbono antes de que su red se deforme a tal punto que no pueda seguir conformado un material altamente cohesionado.

El hierro además presenta la característica de ser alotrópico o polimórfico, es decir, que tiene distintas estructuras cristalinas dependiendo de condiciones como la temperatura. Cada una es representada por las letras del alfabeto griego: α , β , χ , σ , etcétera. Estas diferencias producen propiedades particulares, como la capacidad de disolver una cantidad distinta de carbono, por ejemplo: el $\Gamma\Sigma\Lambda$ casi no disuelve carbono; el $Fe\beta$ lo disuelve hasta un 2%, y el Fex , lo disuelve hasta un 0.1% (Malishev 1975:46). Por lo tanto, a cada tipo de estructura le corresponden flexibilidad, resistencia mecánica y resistencia a la corrosión características.

¹ Una aleación es la mezcla de un metal con otro elemento, ya sea con uno o más metales (p.e. oro-plata, cobre-estaño, cobre-zinc-plomo), o bien con un no metal (como el carbono y el hierro para el caso del acero) (Selwyn 2004:7)

Dada la relevancia de los metales ferrosos se han otorgado nombres propios a formas cristalinas y composiciones empleadas frecuentemente, tales como la cementita, la perlita o la austenita, todas ellas estructuras precisamente del hierro mezclado con carbono. Dependiendo de la cantidad de carbono en la aleación, los metales ferrosos suelen clasificarse de la siguiente manera (Selwyn 2004:94-99):

- Hierro dulce. Tiene una cantidad de carbono inferior a 0.03 %.
- Acero. Su cantidad de carbono se encuentra entre 0.03 y 1.67 %.
- Fundiciones (o hierros colados). Su contenido de carbono oscila entre 1.67 y 6.67%.²
- Aceros inoxidable. Son aceros con un contenido de carbono usualmente entre 0.08% y 2%, que además tienen cantidades variables de otros aleantes, principalmente cromo y níquel, que al corroerse forman una capa

denominada pasiva, que protege de la corrosión. Estos aceros fueron desarrollados a principios del siglo xx.

Una herramienta relativamente sencilla que permite entender las aleaciones –o mezclas de cualquier tipo– en condiciones de equilibrio son los diagramas de fase, llamados así porque muestran las distintas fases o secciones que tienen composiciones definidas ligeramente distintas, según la cantidad y distribución de los aleantes en diferentes temperaturas. Son útiles porque permiten tener información sobre sus propiedades físicas y químicas, pero siempre debe considerarse que tienen limitaciones; en algunos casos, las condiciones de equilibrio duran sólo fracciones de segundo, o bien sólo se alcanzan después de tiempos muy largos (Groover 1997:116) (Figura 1).

PRODUCCIÓN

Durante siglos la producción del hierro y el acero fue lenta y costosa, consistía en mezclar el mineral de hierro con

² En general las aleaciones con un contenido de carbono superior no son útiles para aplicaciones prácticas, porque son extremadamente frágiles, por eso en los diagramas de fase sólo se expresa hasta 6.67% de carbono.

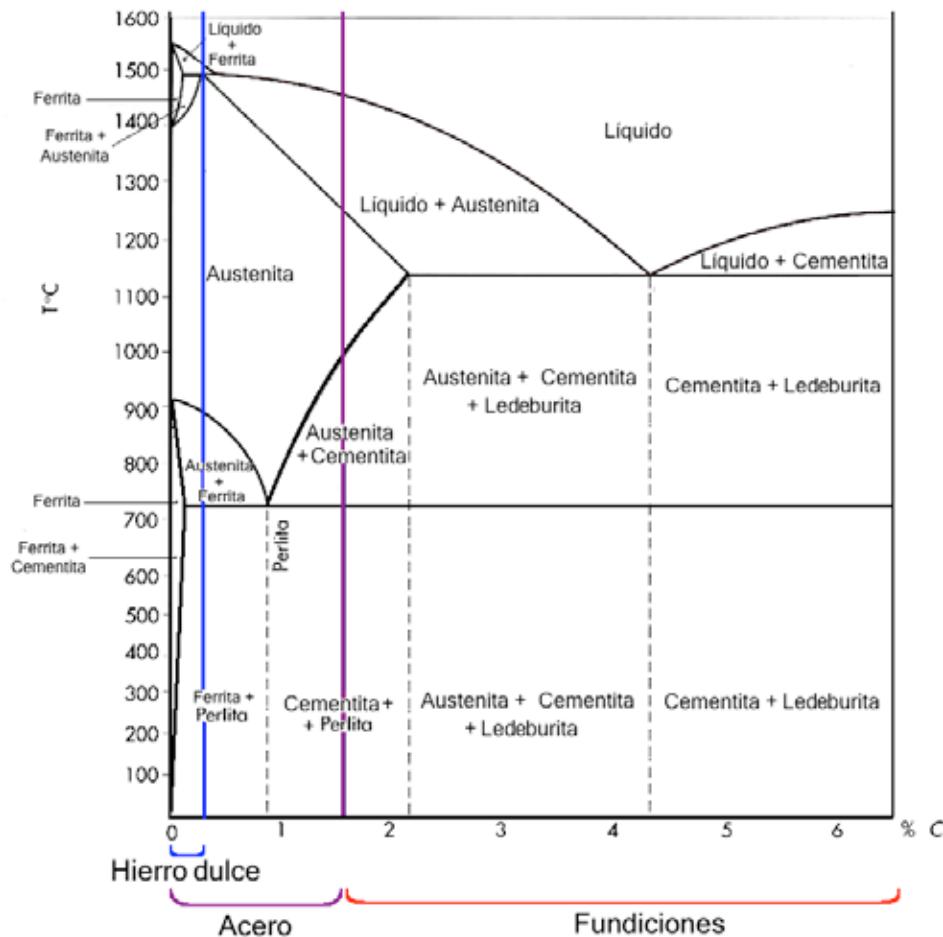


Figura 1. Diagrama de fases de la aleación Fe-C.

carbón vegetal en hornos relativamente rudimentarios, en los que se reducía el mineral hasta obtener una masa esponjosa del metal, que después debía ser modificada mediante golpes, por lo que sólo se obtenían piezas realizadas mediante forja.

Ya que la dureza del metal es muy alta, para su aprovechamiento fue necesario que la tecnología de la fragua se desarrollara para alcanzar temperaturas alrededor de los 1,000°C para deformarlo plásticamente.

Aunque durante la Edad Media se hicieron mejoras tecnológicas que permitieron lograr verdaderos aceros (como el aprovechamiento de la fuerza hidráulica para accionar grandes fuelles y martinets), el problema fundamental fue que mediante el uso del carbón vegetal los hornos no podían alcanzar la temperatura de fusión del hierro. En esas condiciones, un centro productor de acero promedio del siglo XVI obtenía menos de 300 toneladas por año (Martínez 1997).

Posteriormente, en Europa se empezó a utilizar carbón mineral, lo que propició un aumento tanto en la calidad como en la cantidad del acero producido. Sin embargo, el gran avance tecnológico se produjo hasta 1856, cuando Henry

Bessemer encontró, casi por error, una forma para obtener acero dulce que permitió la producción de grandes lotes. Sólo 20 años después, el acero dulce ya era más barato que el hierro forjado (Groover 1997:115; Wallis y Bussell 2008:125).

El proceso Bessemer es de una gran simpleza y consiste en:

- Reducir el mineral de hierro usando carbón. El resultado es un líquido con un contenido en carbono cercano al 2%, denominado arrabio. Si se observa el diagrama de fases Fe-C, se aprecia que para esta composición existe un “punto eutéctico”, es decir una composición de la mezcla en la que la temperatura de fusión es la mínima posible.
- Para “afinar” el acero (llevarlo a la composición deseada), se inyecta aire, con el fin de oxidar el exceso de carbono, consiguiendo así un acero o hierro dulce con la cantidad de carbono deseado (DeGarmo et. al. 1994:108)

Gracias al desarrollo de este proceso y del correspondiente equipo (conocido como Convertidor Bessemer, fue posible

disponer de grandes cantidades de hierro, acero y fundiciones de hierro a un precio accesible (Williams 1990:182). El hierro colado fue sustituyendo poco a poco al hierro forjado; no obstante, al ser más propenso a la corrosión, se mantuvo el uso del hierro forjado para su empleo en exteriores.

Por su alta resistencia mecánica, y por la posibilidad de contar con elementos estructurales prefabricados que reducían enormemente los tiempos de construcción y los costos, el hierro y sus aleaciones han sido los materiales más empleados en la construcción desde la segunda mitad del siglo XIX y hasta la actualidad (Misa 1995:XXI).

Propiedades mecánicas

La tecnología ha estado íntimamente ligada a la posibilidad de fabricar ciertas aleaciones con características específicas, entre las más apreciadas en construcción se encuentran las mecánicas.

La forma en que los materiales se comportan ante la aplicación de fuerzas externas describe sus propiedades mecánicas. Con la aplicación de fuerza los materiales cambian de forma: la deformación inicial es considerada defor-

mación elástica, que se caracteriza porque una vez retirado el estímulo el material vuelve a su estado y forma iniciales; con la aplicación de fuerzas mayores se produce una deformación plástica, que permanece aún después de eliminar la carga aplicada; un aumento de la fuerza mayor, finalmente provocará la rotura del material (Malishev et. al. 1975:54). La modificación dimensional de los materiales –elongación o compresión– es por lo general proporcional al esfuerzo ya que la forma que adquieren depende del tipo de fuerza aplicada: si son sometidos a un esfuerzo de tracción, se alargan; si son oprimidos o sometidos a esfuerzo de compresión, se aplastan.

Consecuentemente, un material es más resistente cuanto más fuerza, carga o energía pueda soportar sin romperse. La resistencia se puede clasificar dependiendo de cómo se aplique la fuerza, de la siguiente manera:

- Tensión: las cargas aplicadas son de tipo axial y en sentido opuesto.
- Compresión: las cargas son de tipo axial y en sentido coincidente.

- Flexión: las cargas no son axiales, es una combinación de tensión y compresión.

En general, la resistencia de un material depende de sus características intrínsecas, tales como estructura y composición, así como del tamaño y la forma de la sección que esté involucrada (también llamado perfil).

Los metales tienen excelente cohesión porque sus átomos se encuentran unidos fuertemente mediante el enlace metálico. En los metales ferrosos, ya se ha dicho que las diferentes composiciones y estructuras cristalinas causarán distintas características, incluyendo por supuesto las de resistencia mecánica, que depende también de la forma en que el metal haya sido trabajado, es decir, si se trata de un material colado o forjado, y también si recibió algún tipo de tratamiento térmico como el templado o el normalizado, por mencionar algunos.

Tamaño y forma de la sección

Es evidente que mientras mayor sea el tamaño de la sección de una pieza hecha con un determinado material,

mayor será la carga que pueda soportar, por eso se habla de carga aplicada, es decir, la fuerza aplicada por unidad de superficie (Valencia 2006:27). Sin embargo, el aumento de la sección repercute de manera negativa en el peso, lógicamente en los costos y en otros factores, por ello siempre se busca que los materiales tengan la mayor resistencia frente a la carga aplicada con la menor sección posible. Para lograr esto, la ingeniería se ha encargado de diseñar elementos estructurales en los que las cargas se distribuyen, desvían o incluso se anulan entre sí.

Un ejemplo de lo que actualmente se aplica en la construcción se encuentra en lo que se conoce como “concreto pretensado”, en el que la resistencia a la carga de una estructura es aumentada mediante el estiramiento de la varilla de acero antes de hacer el colado de cemento. Una vez que el colado ha fraguado, el acero tiende a ejercer una fuerza de compresión sobre la estructura que se compensa con la carga de tracción que se ejerce sobre la misma (Gonzales 1984:197).

Técnicas de factura

Las diversas técnicas de factura tienen influencia directa

en la forma, tamaño y distribución de los granos o cristales constitutivos del metal que, a su vez, tienen una importante consecuencia en la resistencia mecánica y respuesta a la corrosión del producto. A continuación se exponen la forja y el vaciado.

Forja

La factura del hierro comenzó, como en los otros metales, mediante trabajo mecánico o forjado, es decir, mediante golpes (Groover 1997:10).

Con el trabajo mecánico además de deformar plásticamente, se eliminan poros y cavidades interiores, se aplanan y se reduce el tamaño de sus cristales o granos constitutivos. Esto mejora el anclaje entre los cristales, lo que tiene una importante influencia en el aumento de la dureza y resistencia a la tensión y al impacto, aunque también disminuye la flexibilidad de la pieza a trabajar. Si un elemento debe resistir fuertes esfuerzos o impactos debe ser facturado por martillado o forja (Appold et. al. 1985:131-133). Sin embargo, la capacidad de cada metal para recibir golpes sin sufrir deformaciones o romperse depende de su estructura cristalina.

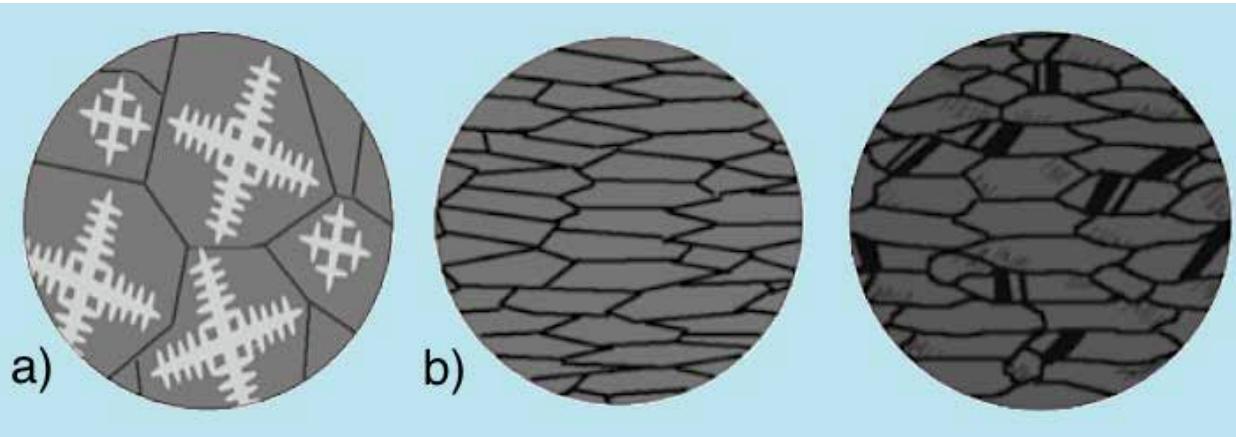


Figura 2. Estructura de metales. a) Obtenidos por colado o fundición, b) Obtenidos por trabajo mecánico, como la forja.

Colados

Se le llama así a los objetos de metales ferrosos obtenidos mediante la fundición del metal hasta llegar a su estado líquido y posterior vaciado en moldes.

Cuando un metal en estado líquido se comienza a enfriar y llega a la temperatura de cristalización –solidificación– se forman pequeños núcleos sólidos cristalinos, alrededor de los cuales el resto del metal se solidifica dendríticamente (en forma de ramas de árbol) y adquiere la estructura cristalina que le corresponde de acuerdo a su composición (Groover 1997:250). Gracias a esta configuración, los elementos estructurales de fundiciones son muy resistentes

a la compresión pero no a la tensión o a la flexión, en otras palabras, son más frágiles que los obtenidos mediante forja. (Figura 2). Esta es la razón por la que los cuchillos y espadas siempre son hechos por forjado.

En este punto, cabe subrayar que la técnica de factura está relacionada con la finalidad de los objetos a realizar. Así, hay piezas que se comienzan con una técnica y se dan acabados con otra para favorecer ciertas propiedades mecánicas. Por ejemplo, los cañones, incluso cuando fueron inicialmente vaciados, deben recibir trabajo mecánico en su interior (maquinado) para que su estructura pueda soportar los impactos de las explosiones; de otra forma, estallarían

también. Del mismo modo, los elementos estructurales de acero son logrados por vaciado, aun cuando después deben ser trabajados mecánicamente y recibir algún tratamiento térmico (como el normalizado) para resistir una mayor cantidad y variedad de esfuerzos (Appold et. al. 1985:133).

Los elementos constructivos de metales ferrosos obtenidos por colado, gracias a su resistencia a la compresión, fueron principalmente columnas y otros elementos de carga. Sin embargo, su alto contenido de carbono hacía que su punto de fusión fuera considerablemente más bajo que el del hierro o del acero, lo que provocaba que, durante los incendios, edificios que contaban con estos elementos estructurales se colapsaran con facilidad (Misa 1995:87). Después de varios eventos desafortunados se restringió su uso en la construcción.

El caso del acero, en China fue un tanto distinto a Occidente ya que se combinaron varios factores, entre ellos, que agregaron grandes cantidades de carbón mineral, lo que permitió reducir³ los minerales de hierro con tempe-

raturas más bajas, además de la implementación de gas natural en sus hornos. Esto permitió la obtención del hierro colado y su utilización en la construcción en épocas tan tempranas como el siglo VI a.C. (Derui y Haiping 2011:130).

Como ya se mencionó, en Occidente el hierro se pudo fundir sólo en pequeñas cantidades hasta el siglo XVI, siendo útil sólo para la producción de objetos pequeños, como municiones y ollas de cocina, y no fue sino hasta la segunda mitad del siglo XVIII que se pudo contar con elementos de hierro colado de mayor tamaño.

INICIOS DEL USO DEL HIERRO Y ACERO EN LA CONSTRUCCIÓN MODERNA

La arquitectura del hierro, nacida de las innovaciones tecnológicas del siglo XIX trajo importantes cambios en el mundo de la construcción. El hierro colado brindó la posibilidad de contar con elementos producidos en grandes cantidades con características muy similares, cuya venta era promovida por catálogo, a los que recurrían arquitectos y constructores alre-

³ Se le llama reducir al proceso de obtener metal a partir de un mineral.

dedor del mundo para adquirir elementos estructurales y ornamentales (Chaslin 2004:58). Fue así, que piezas fabricadas en Francia fueron mandadas a distintas ciudades del mundo, por ejemplo el kiosco de la Plaza de la Armas de Chihuahua es muy similar a uno en la ciudad de Manaus, en Brasil.

Los nuevos métodos industriales permitieron la producción de barras por forja y laminado, con sección constante, alta resistencia a la tensión, útiles para el desarrollo de láminas, trabes y celosías con formas nuevas, como los ángulos y “T”, para la construcción de puentes y en general para estructuras más grandes, pero también para ferrocarriles y buques que permitían abarcar mayores distancias y llevar cargas más pesadas (Drougas 2009:11; Giedion 1982:181).

Desde la segunda mitad del siglo XIX se comenzó a experimentar con el acero en la construcción. En la Exposición Internacional de París de 1900 se mostraron sistemas mixtos de hierro colado y acero (Drougas 2009:20), y paulatinamente se fueron construyendo estructuras solamente de acero, aprovechando su resistencia mecánica superior (Giedion 1982:181-189).

Un buen ejemplo de la diferencia de resistencia provista por ambos materiales lo encontramos en los puentes. El primer puente construido de hierro colado es el Coalbrook, inaugurado en 1781 para cruzar el río Severn en Inglaterra. Su extensión es de 30 m y representó un gran avance tecnológico para la época, pero poco menos de un siglo después, en 1874, fue inaugurado el puente Eads, construido totalmente en acero con una extensión de 1,964 m para atravesar por primera vez el río Mississippi, en Estados Unidos (Drougas 2009:14; Misa 1995:133-135).

Elementos de unión

Los nuevos elementos constructivos de hierro y acero requirieron ser unidos para formar los sistemas constructivos. Los primeros sistemas de unión fueron los remaches y tornillos, más tarde se desarrollaron equipos que permitieron lograr soldaduras.

Remaches

Este tipo de unión consiste en solapar las piezas a unir, perforarlas e introducir un perno metálico –remache– que

al ser deformado en sus extremos inmoviliza las partes, quedando firmemente anclado (Picazo 2011:2-3). Este tipo de uniones se volvió común en las estructuras de muchos edificios; entre los más emblemáticos encontramos el Empire State, en Nueva York (Aaseng 2000:127), y la Torre Latinoamericana, en la Ciudad de México.

Sin embargo, los remaches tienen algunas desventajas, ya que los pernos de acero sólo pueden ser lo suficientemente plásticos cuando se encuentran al rojo vivo o al rojo blanco, lo que hacía la construcción con remaches más compleja y peligrosa, y a las quemaduras en los constructores en un asunto común. Otra desventaja es que la carga aplicada a la estructura se concentra en los remaches, y finalmente que constituyen un sistema de unión permanente, pues para quitar un remache es necesario destruirlo (Picazo 2011:2-3; Aaseng 2000:127). Por estas razones en la actualidad se prefieren los tornillos.

Tornillos

Este sistema de unión es muy similar en su concepto y funcionamiento a los remaches, sin embargo presenta la ven-

taja de no tratarse de un sistema de unión permanente, ya que funciona mediante una cuerda en el perno y una tuerca roscada que permite asegurar las partes, permitiendo su remoción. Sus ventajas son que se trabajan a temperatura ambiente, que es posible realizar correcciones con facilidad y que, a diferencia de la soldadura, no genera tensiones diferenciales debido a la temperatura, siendo un sistema de unión más seguro (Picazo 2007:2-4).

Soldadura

La soldadura es un sistema de unión permanente en un sentido físico y químico, a través del empleo de temperatura. Existen diferentes métodos, uno de los primeros fue la soldadura por forja, en la que el metal se hacía plástico por el calor en la fragua y ya al rojo, se unía mediante golpes; esta técnica fue usada desde la antigüedad, principalmente en rejas o lo que conocemos como herrería. Posteriormente se desarrolló la soldadura con metal de aporte, en ésta los metales a unir y el de aporte se calientan hasta el punto de fusión del segundo, permitiendo la unión de los elementos metálicos (Valencia 2006:53-54).

La soldadura para hierro y acero ya existía desde mediados del siglo XIX pero tomó algunas décadas que se pudiera integrar a los procesos comunes de construcción, principalmente por la imposibilidad de contar con fuentes de calor y electricidad suficientemente potentes para lograr las temperaturas necesarias para unir a los metales en el lugar deseado (Drougas 2009:35).

El arco eléctrico, por ejemplo, inventado en 1881, tuvo varios años de experimentación (Picazo 2007), y no logró su popularización sino hasta la primera década del siglo XX. En este método, las terminales separadas de un circuito eléctrico generan una chispa que genera calor tan intenso que permite la unión de los metales.

La ventaja de la soldadura es que crea una unión continua en la que la carga se distribuye a lo largo de toda la sección soldada de manera uniforme. La principal desventaja es el calor, ya que altera la estructura del metal creando una zona afectada por el calor (ZAC), lo que puede originar sensibilización, es decir, tensiones en las zonas aledañas al cordón de la soldadura. Además, este tipo de unión puede favorecer también fenómenos de corrosión por

aireación diferencial (Valencia 2006:53-54). Por lo tanto, lo recomendable sería someter a la estructura a un tratamiento térmico de recocido posterior a la soldadura, que alivie tensiones y elimine las zonas sensibles a la corrosión, aunque pocas veces se hace por razones de tiempo y costo.

Las estructuras de hierro colado se unían con remaches y tornillos, porque corría riesgo por el calor necesario para la soldadura sin generarle daños (González 1984:288).

PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN

El hierro y el acero son muy susceptibles a la corrosión –excepto el acero inoxidable–, por lo que elementos y estructuras requieren de protección. Actualmente hay una amplia variedad de técnicas de protección contra la corrosión, entre las que se incluyen las eléctricas, pero en el periodo que nos ocupa se emplearon principalmente los recubrimientos anticorrosivos y pinturas, así como los recubrimientos metálicos. Ambos métodos protegen al metal de la corrosión al aislar la superficie metálica del electrolito, es decir, del medio, rompiendo así el circuito electroquímico que requiere el proceso de corrosión.

Recubrimientos orgánicos

Desde la antigüedad se han utilizado pinturas para proteger superficies metálicas. La sustancia favorita durante algún tiempo fue el minio de plomo o tetraóxido de plomo, por su efectividad (Wallis y Bussell 2008:153; CAMEO, 2013). El minio era mezclado, al principio, con aceites secantes como el de linaza, y posteriormente con otros polímeros. Debido a su color naranja era empleado como una primera capa protectora para el hierro y sobre éste se aplicaban otras pinturas (Appold 1985:85). Su uso se prohibió en Estados Unidos en 1969 por su alta toxicidad, y fue sustituido por pigmentos de titanio, cromo y zinc (Warren 2000:208). En México no existe legislación que prohíba su uso y producción por lo que no se puede señalar con precisión hasta cuando se siguió empleando e incluso se sospecha que su uso continúa en algunos lugares, lo que sí ha sucedido es que las normas de PEMEX y CFE solicitan el uso de otros materiales anticorrosivos.

En materia de restauración es necesario mencionar que el color naranja del minio se relacionó con su efectividad anticorrosiva, por lo que aún tras el desuso del minio real numerosos primarios y pinturas imitaron el color, pese a

no contener pigmentos de plomo en su formulación. Por ello es necesario que al intervenir obras que pudieran tener este pigmento entre sus capas de recubrimientos se realicen análisis de identificación que permitan tomar todas las medidas de seguridad necesarias, ya sea para conservar la capa intacta y evitar su remoción, o para hacerla en condiciones adecuadas de seguridad para los trabajadores, los usuarios y el medio ambiente.

Recubrimientos metálicos

El proceso de recubrir el hierro con otro metal más resistente a la corrosión es antiguo. Tras la popularización de el hierro y el acero en la construcción se emplearon elementos de hojalata, es decir, láminas de hierro recubiertas de estaño, como elementos decorativos o bajadas de agua, aunque su uso no fue extensivo, principalmente por razones de costo. En cambio, el recubrimiento de zinc, conocido como galvanizado, es el más aplicado en elementos de construcción en la actualidad.

En el primer caso se aprovecha la mayor resistencia a la corrosión del estaño, mientras que en el segundo caso se aprovecha la formación de capas pasivas del zinc.

El galvanizado con zinc existe desde 1742, cuando el químico francés Paul Jacques Malouin descubrió el método por inmersión, y se popularizó en 1836 cuando otro químico francés, Stanislas Sorel, registró una patente haciendo más eficiente el proceso (Carpio 2013:9-11). La protección lograda por el zinc se debe a tres mecanismos que precisa Carpio (2013:7-9):

- Protección de barrera: la capa de zinc impide que el oxígeno y la humedad entren en contacto con el acero.
- Protección catódica: en caso de formación de pares galvánicos por daño en la capa de recubrimiento, será el zinc el que se oxidará y no el acero.
- Reparación de defectos: si hay fallos pequeños en la superficie, los productos de corrosión del zinc los repararán impidiendo nueva corrosión.

Es muy importante el mantenimiento de estos recubrimientos ya que aun en los de zinc las pérdidas de mayores

dimensiones favorecerán la corrosión, que será acelerada por el fenómeno de aireación diferencial⁴.

USO DEL HIERRO Y ACERO EN CONCRETO

Desde la época de los romanos, la gran resistencia a la compresión del concreto ha sido conocida y aprovechada, pero la incorporación de la estructura de acero incrementó sustancialmente su resistencia a la tensión y posibilitó el diseño y construcción de estructuras cada vez más complejas y de mayores dimensiones (Lozano 1999:7). Por ejemplo, la inclusión de estructuras de acero propició construcciones más ligeras; consiguiendo efectos escultóricos en los edificios, como en las conocidas obras de Le Corbusier y Antoni Gaudí.

A continuación describiremos brevemente los principales factores que afectan la conservación de las estructuras metálicas en el concreto, aunque para ello es preciso definir los procesos y tipos de corrosión que afectan en particular al hierro y sus aleaciones, así como las principales manifestaciones de la afectación del metal en el concreto.

⁴ Diferencia de reactividad a la corrosión entra la zona que conserva el recubrimiento y las que no.

CORROSIÓN

Como se dijo al principio, el hierro suele aparecer en la naturaleza en forma mineral como óxidos, sulfuros, etcétera, por lo cual es necesario aportarles mucha energía para obtener el hierro en su forma metálica, el cual, al no ser muy estable, tiende naturalmente a volver a un estado mineral de mínima energía a través de reacciones de corrosión (Figura 3).

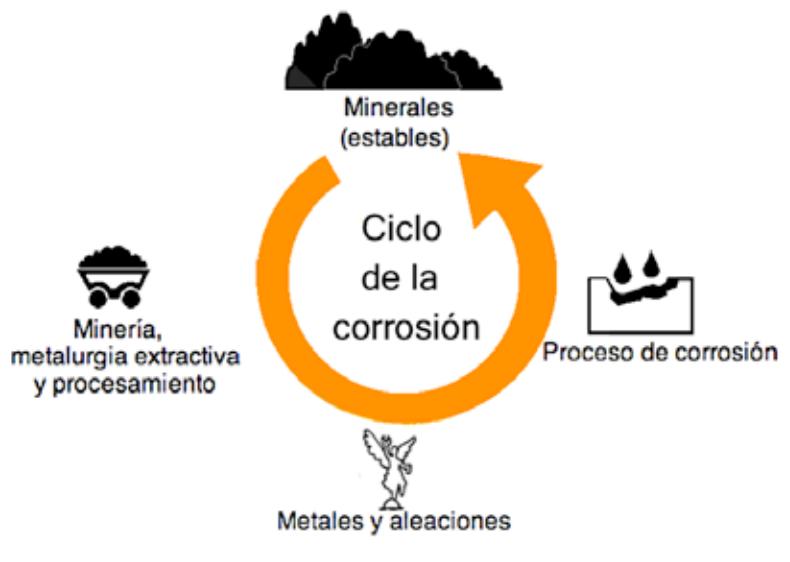


Figura 3. Ciclo de la corrosión.

Los fenómenos de corrosión son reacciones de tipo electroquímico, en las que los elementos se oxidan (donan electrones) o se reducen (ganan electrones) en función de su potencial electroquímico (medido en voltios). Al tratarse de un fenómeno electroquímico, la corrosión se puede pensar como un proceso análogo al que se da en cualquier pila o batería que produce electricidad.

Para que un fenómeno de corrosión electroquímica se dé, se requiere de un elemento que done electrones y funcione como ánodo, un elemento que los reciba y funcione como cátodo, y un electrolito que permita el flujo de electrones entre los dos anteriores. De este modo, casi siempre durante la corrosión se transfieren electrones de los metales a elementos no metálicos en su entorno (Selwyn 2004).



La corrosión es, además, producto de un proceso termodinámico. La termodinámica estudia los sistemas y

su equilibrio así como la energía que se requiere para que una reacción suceda, o la que se emite cuando la reacción tiene lugar. El equilibrio de un sistema puede describirse mediante propiedades medibles, como temperatura, presión y volumen, conocidas como variables termodinámicas.

A mediados del siglo xx, el metalúrgico Marcel Pourbaix desarrolló los diagramas para contar con una herramienta que le permitiera explicar los fenómenos de corrosión de cada metal, según el medio en el que se encuentre. Los diagramas Pourbaix representan el potencial eléctrico frente al pH, definiendo tres campos de estabilidad:

- *Campo de inmunidad.* De estabilidad del metal como tal, es decir, en forma metálica. Se ubica en la parte inferior del diagrama.
- *Campo de corrosión.* En él las diferentes formas iónicas se encuentran estables, el metal tiende a estar en disolución y por lo tanto en esta área la corrosión se da en forma activa.
- *Campo de pasividad.* En éste, el metal se encuentra en forma combinada, precipitado como un compuesto

químico (óxido, hidróxido, etcétera), donde las formas combinadas tienden a ser insolubles en el medio y formar capas protectoras que pasivan el metal e impiden nueva corrosión (Ávila y Genescá 2002:63).

Por lo anterior, los productos de corrosión se clasifican en:

- *Activos.* Compuestos “inestables”, es decir, que requieren sufrir nuevas reacciones de corrosión para lograr estabilidad (en un medio determinado).
- *Pasivos.* Compuestos que han alcanzado estabilidad y no reaccionan, o lo hacen de forma muy lenta (en un medio determinado).

Estos diagramas son muy útiles para predecir el comportamiento de un metal en determinadas condiciones, si una condición de pH o la presencia de un ion en específico causarán corrosión, o si el metal permanecerá estable. Sin embargo, siempre hay que considerar que los diagramas tienen limitaciones, pues el mundo real no se encuentra en condiciones de equilibrio teórico (Figura 4).

Efectos de la corrosión

Los daños causados por la corrosión del metal en las estructuras se pueden clasificar por sus manifestaciones:

- Manchado
- Expansión volumétrica
- Fractura de concretos y piedras

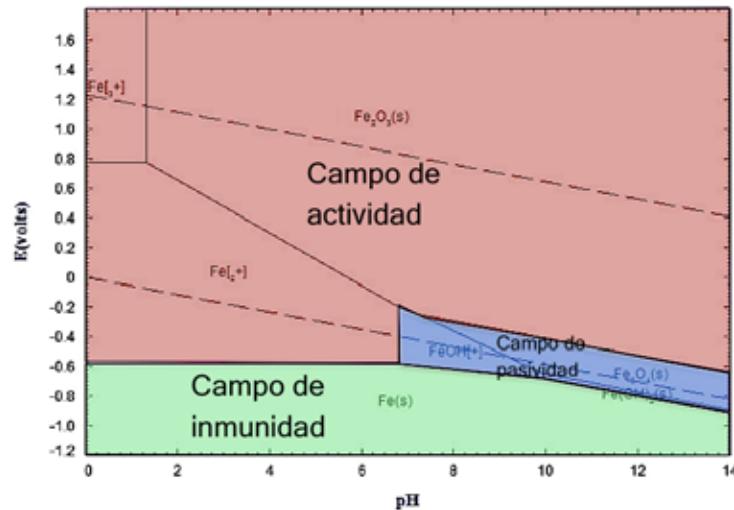


Figura 4. Diferentes zonas del diagrama de potencial vs. pH o diagrama de Pourbaix del Fe en H_2O , 25°C. Se aprecia que el campo de actividad, es decir, en el que se corroe es muy amplio, en tanto el de pasividad muy pequeño y ubicado en el rango alcalino.

Lo más común es que estos efectos pasen desapercibidos hasta que las superficies externas comiencen a fracturarse. Las grietas o fracturas en superficie coinciden, generalmente, con las áreas afectadas con mayor corrosión en los elementos metálicos en la estructura.

Los principales efectos de deterioro causados por la corrosión en estructuras de concreto armado se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Cambios de coloración y manchado en el concreto
- Exfoliación del material metálico y con ello disminución de su sección
- Fractura de los revestimientos
- Disminución de resistencia mecánica de la estructura
- Aumento de la tensión ante la carga
- Falla del metal

Neff (et al. 2007) lo han descrito como un proceso que ocurre en dos fases. En la primera, la alta alcalinidad del concreto pasiva al hierro; pero conforme se modifica el pH de los morteros, si hay suficiente oxígeno y agua, el hierro

se corroerá activamente. Por supuesto cabe señalar que si existen daños en el mortero por cualquier causa externa –golpes, vibraciones, etcétera– las afectaciones de la estructura metálica serán más rápidas (Figura 5).

1. Corresponde a una capa de alteración original que aparece antes de que el hierro se sumerja en concreto y que puede ser protectora en el ambiente alcalino.
2. Desarrollo de una capa más gruesa formada principalmente de óxidos de hierro que comienza a causar expansión volumétrica, causada por el cambio de pH del concreto.

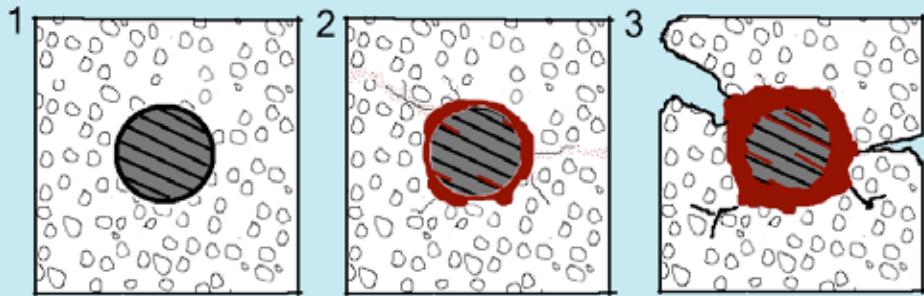


Figura 5. Esquema de la alteración del hierro en concreto

3. Fractura del recubrimiento de concreto debido al aumento dimensional de la corrosión del hierro.

Fenómenos de corrosión

Las manifestaciones descritas tendrán su origen en diversas causas y por lo general las formas de corrosión que las producen se pueden clasificar dentro de los siguientes fenómenos:

- Corrosión por aireación diferencial. Cuando un recubrimiento, ya sea una pintura, un recubrimiento metálico –como el zinc o el galvanizado–, el mortero de concreto o una capa de corrosión estable, se rompe o se pierde parcialmente, el metal expuesto al medio corrosivo se convierte en una zona anódica que reacciona más rápidamente ante el medio, corroyéndose a una velocidad mayor que si el metal estuviera completamente descubierto, debido a la relación de áreas anódicas y catódicas (Ávila y Genescá 2003:113).
- Corrosión por tensión. Éste es uno de los problemas metalúrgicos más serios en estructuras, ya que se produce

por la acción conjunta de un esfuerzo de tensión y un medio ambiente corrosivo, como un concreto carbonatado, incluso puede causar la fractura del material. Los esfuerzos que causan las fracturas provienen de trabajos en frío, soldadura, o son producto de la operación de la estructura.

- Corrosión por corrientes vagabundas. Las corrientes vagabundas o parásitas son corrientes eléctricas que abandonan el conductor (cables e instalaciones eléctricas en mal estado) por el que se tenía previsto que circularan y fluyeran; sin embargo, toman otro sendero (terreno, agua, construcción) ya sea total o parcialmente. Una vez que se ha producido la fuga, la corriente tiende a retornar a la fuente de partida por el camino que le ofrezca menor resistencia, que suelen ser las estructuras metálicas. Los problemas de corrosión se producirán en aquellos puntos en que la corriente eléctrica abandona la estructura para regresar a la fuente de partida. Allí la superficie del metal se polarizará, generando zonas anódicas y catódicas (Ávila y Genescá 2003:114-115).

El daño causado por este tipo de corrosión dependerá mucho de la relación entre la cantidad de superficie de la zona anódica y de la catódica. Una relación muy alta que haga que el área anódica sea muy pequeña acelerará mucho el proceso de corrosión.

- *Regent Street disease*. Hoy en día los edificios de concreto armado son los más comunes en todo el mundo. El que la estructura metálica estuviera embebida en concreto parecía una buena idea. Sobretudo por la combinación de resistencia a la compresión y a la tensión, pero también porque el pH del mortero recién hecho provee al metal de un medio en el que se encuentra protegido frente a la corrosión (pH=12.5), es decir pasivo. Desafortunadamente, esta condición no prevalece debido a la entrada de humedad y de oxígeno o la presencia de lluvia ácida, entre otros factores, por lo que el concreto modifica su pH acidificándose y causando la corrosión del metal (Scott y Eggert 2009:121-122). El tipo de daños relacionados con la corrosión, expansión volumétrica y fractura de los morteros y recubrimientos de materiales porosos de construcción recibió el nombre de *Regent*

Street Disease (“síndrome de la calle Regent”) (Scott y Eggert 2009:150 Wallis y Busell 2008:138) debido a que uno de los primeros lugares donde se identificaron esos daños fue en la calle Regent, en Londres, aunque no fue exclusivo; en Manchester, por ejemplo, se conoce como “síndrome de Deansgate”. No es raro que fuera el Reino Unido el primero en tipificar estos daños al haber sido también uno de los primeros que empleó la técnica de construcción con concreto armado, al ser un lugar famoso por sus abundantes precipitaciones fluviales y alta contaminación durante el siglo XX.

CAUSAS DE DETERIORO DE LOS CONCRETOS

En el deterioro del metal embebido en concreto armado hay varios puntos que considerar, incluyendo las causas intrínsecas a la formulación de los materiales, las técnicas y calidad de la factura y los factores externos, como la agresividad del medio ambiente, pH, presencia de oxígeno, etcétera. En este texto seguimos la clasificación de causas de deterioro hecha

por el Laboratorio de Investigación de Monumentos Históricos, de Francia (LRMH): carbonatación, daño por cloruros, daño por sulfatos, ciclos de congelación-descongelación y reacciones de álcali (LRMH)⁵. Para el caso mexicano descartamos los ciclos de congelación-descongelación y por experiencia en monumentos de concreto armado hemos decidido agregar otro factor: la presencia de material orgánico en descomposición.

Hacemos una breve descripción de estas alteraciones, sin embargo en el texto del Dr. Tezozomoc Pérez se abordan con mayor profundidad.

- Carbonatación. La carbonatación es un proceso natural que afecta a todos los concretos. Los morteros antiguos consistían principalmente de portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), que se transforma progresivamente en calcita por efecto de la humedad y el dióxido de carbono (Bussell, 2008: 98). Con esta transformación hay una disminución en el pH desde aproximadamente 13 hasta alrededor de 8. En el pH de 13 el acero forma una capa de óxido pasiva y esta-

⁵ Considerando las condiciones de México, los ciclos de congelación resultan poco relevantes y sólo mencionaremos los cuatro restantes.

ble, mientras que en condiciones más ácidas esta película protectora se disuelve y causa que el metal se corroa.

Ésta es una de las principales causas del desarrollo de la corrosión de las estructuras metálicas.

- Cloruros. Los cloruros son graves agentes de deterioro para los metales ferrosos. En presencia de agua llevan al desarrollo de solución de ácido clorhídrico y, obviamente, a la rápida acidificación del concreto. Algunas de las fuentes de cloruros pueden ser el uso de agua de mar en la preparación de los morteros, o a la cercanía de ambientes ricos en estos iones –p. e. edificios en las zonas costeras– (Gonzales 1984:185).
- Sulfatos. Puede haber sulfatos en las estructuras de concreto, ya sea porque entre los materiales de construcción se incluyó yeso, o bien, porque en medios urbanos los gases producto de la combustión de combustibles fósiles depositan iones sulfato que penetran en los morteros. Éstos reaccionan con compuestos del concreto, incluyendo aluminatos, para producir etringita secundaria, misma que aumenta de volumen, causando agrietamiento del concreto (Romero 2012).

- Reacción del álcali. Con este término se incluyen todas las reacciones que suceden entre los álcalis solubles en los morteros. Hay tres tipos de reacción alcalina: álcali-carbonato, álcali-sílice y álcali-silicato. Cuando la humedad relativa supera el 80% y hay gran cantidad de estos compuestos, se producen agrietamientos y exfoliación en los morteros que exponen a los metales de la estructura (Neff et al, 2007:31).
- Material orgánico acumulado. Señalamos este punto debido a una experiencia en el Monumento a la Revolución en la Ciudad de México, en el cual algunas partes habían sido ocupadas por un enorme número de palomas que habían causado la acumulación de una gran cantidad de guano, plumas y cuerpos en descomposición de estos animales. El concreto y las varillas eran las zonas evidentemente más afectadas (Figura 6).

COMENTARIOS FINALES

Como se señaló al inicio, este texto busca introducir a la temática del hierro y sus aleaciones en los sistemas constructivos. El tratamiento aparentemente superficial de la



Figura 6. Materia orgánica acumulada sobre una de las secciones de la estructura del domo del Monumento a la Revolución, previo a la intervención, 2007. Fotografía. J. Contreras.

información obedece a que los diferentes profesionales que pueden involucrarse en su conservación cuentan con conocimientos y lenguajes muy heterogéneos, y el objetivo fue sentar una base mínima de conocimiento para que puedan dirigirse a otras fuentes que cuenten con información más profunda y especializada; por ejemplo, sobre los diversos tipos de aceros empleados en la construcción, las técnicas de unión, los mecanismos de corrosión o la reacción ante la carbonatación de los concretos, según lo requiera el caso.

El conocimiento del conjunto de las características de los materiales, las técnicas de factura, las obras formadas y la identificación de las alteraciones es imprescindible pero no es tarea sencilla, e invariablemente requiere de comprometido trabajo interdisciplinario.

FUENTES CONSULTADAS

- Aaseng, Nathan. 2000. *Construction: building the impossible*, The Oliver Press, Minneapolis.
- Appold, Hans; Feiler, Kurt; Reinhard, Alfred y Paul Schmidt. 1985. *Tecnología de los metales*, Editorial Reverté, Barcelona.
- Ávila, Javier y Joan. Genescá. 2002. *Más allá de la herrumbre*, 3ª ed. SEP – Fondo de Cultura Económica, México.
- Ávila, Javier y Joan. Genescá. 2003. *Más allá de la herrumbre II La lucha contra la corrosión*, 3ª ed. SEP – Fondo de Cultura Económica, México.
- Bussel, Michael. 2008. “Concrete and reinforced concrete”, en *Materials and skills for historic building conservation*, Forsyth Michael (ed), Blackwell Publishing, California, 111-139
- CAMEO. 2013. *Lead tetraoxide*, <http://cameo.mfa.org/wiki/Minium>, consultado en junio de 2013
- Carpio García, Jaime. 2013. *Mecanismo de Fallo de Aceros estructurales durante la galvanización en caliente*. Tesis doctoral, Universidad de Cantabria, Santander.
- Chandler, Harry. 1998. *Metallurgy for the nonmetallurgist*. ASM International, Materials Park Ohio.
- Chaslin, Francois. 2004. “El arte del catálogo”, en *El arte del hierro Fundido*. Artes de México, Número 72, México. 54-65.
- DeGarmo, Paul; Black, Temple y Ronald Kohser. 1994. *Materiales y procesos de fabricación*, Vol 1, Segunda edición. Editorial Reverté, Barcelona.
- Derui, Tan y Lian Haiping. 2011. “The ancient chinese casting techniques”, en *The 69th WFC Paper, Hangzhou China 2010*, Vol 8, No 11. Febrero, 127-133.
- Drougas, Anastasios. 2009. *Investigation of the Use of Iron in Construction from Antiquity to the Technical Revolution*. Tesis de Maestría, Universitat Politecnica de Catalunya, Barcelona.
- Giedion, Sigfried. 1982. *Space, Time and Architecture: The Growth of a New Tradition*, Quinta Edición. Harvard University Press, Chicago.
- Gónzales Fernández, José. 1984. *Teoría y práctica de la lucha contra la corrosión*. Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas-CSIC, Madrid.
- Groover, Mikell. 1997. *Fundamentos de Manufactura Moderna, Materiales, Procesos y Sistemas*, Primera Edición. Prentice Hall, México.
- Lozano Alanís, Guadalupe. 1999. “El desarrollo de las obras de Construcción”, en *Ingenierías*, Enero-Abril, Vol II, No. 3. México, disponible en: ingenierarias.uanl.mx/3/pdf/3_Guadalupe_Lozano_el_Desarrollo_Obras.pdf, consultado en septiembre 2013.
- Martínez Gómez, Lorenzo. 1997 *Acero*. Segunda edición. La ciencia

- para todos. México. en: <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/080/htm/acero.html>, consultado en Julio 2013.
- Malishev, Anton Nicolaiev, G. y Shuvalov, Y. 1975. *Tecnología de los metales*. Editorial Mir Moscú, Moscú.
- Misa, Thomas. 1995. *A Nation of Steel, The Making of Modern America 1865-1925*. The Johns Hopkins University Press, Baltimore.
- Neff, Delfine; Marie Victorie, Elisabeth; L'Hostis, Valerie; Cailleux, Emmanuel; Vincent, Laurent; Texier, Annick; Bellot-Gurlet, Ludovic y Dilman, Phillipe. 2007. "Preservation of historical buildings: understanding of corrosion mechanisms of metallic rebars in concrete", en *Metal 07; Interim Meeting of the ICOM CC Metal Working Group*, Volumen 4. Study and Conservation of Composite Artifacts, Septiembre de 2007, Amsterdam. 30-35.
- Picazo Iranzo, Álvaro. 2007. "Medios de Unión de Estructuras Metálicas", en I Jornada Nacional de Investigación en Edificación, E.U Arquitectura Técnica, Universidad Politécnica de Madrid, 10-11 Mayo 2007. Disponible en: <http://oa.upm.es/3786/1/Picazo-E15.pdf>, consultado en agosto de 2013.
- Romero Robles, Laura Eugenia. 2012. "Evaluación de factores que afectan la aparición de etringita secundaria como simulación del envejecimiento de mezclas de concreto y su papel dentro de procesos de expansión y agrietamiento", en *Tenth LACCEI Latin American and Caribbean Conference (LACCEI '2012), Megaprojects: Building Infrastructure by fostering engineering collaboration, efficient and effective integration and innovative planning*. Panama City, Panama. Disponible en <http://www.laccei.org/LACCEI2012-Panama/RefereedPapers/RP037.pdf>, consultado en agosto de 2013.
- Scott David y Gerhard Eggert. 2009. *Iron and Steel in art, corrosion, colorants, conservation*. Archetype Publications, Londres.
- Selwyn, Lyndsie. 2004. *Metals and Corrosion, A handbook for the conservation Professional*. Canadian Conservation Institute, Ottawa.
- LRMH. Disponible en: <http://www.lrmh.fr/lrmh/html/articles.htm#-metal>, consultado junio 2013
- Valencia Clement, Gabriel. 2006. *Estructuras de Acero, Introducción al Diseño*. Universidad Nacional de Colombia.
- Wallis, Geoff, y Michael Bussell. 2008. "Cast iron, wrought iron and Steel", en *Materials and skills for historic building conservation*. Forsyth Michael, ed, Blackwell Publishing Ltd.
- Warren, Christian. 2000. *Brush with death. A social history of lead poisoning*. The Johns Hopkins University Press, Baltimore.
- Williams, Trevor. 1990. *Historia de la tecnología*, Desde 1900 hasta 1950 (I). Siglo Veintiuno de España Editores, Madrid.

JANNEN CONTRERAS VARGAS

Licenciada en Restauración de Bienes Muebles (ENCRYM-INAH, México); Maestra en Ciencias, Conservación Forense (Universidad de Lincoln, Reino Unido). Acreedora al Premio Nacional INAH Paul Coremans en dos ocasiones. Titular del Área de Conservación de Patrimonio Cultural Metálico y participante en asignaturas de ciencia aplicada a la restauración del patrimonio cultural, en la ENCRYM desde 2001. Su actividad se centra en el estudio del patrimonio cultural metálico, sus mecanismos de alteración, posibilidades para su tratamiento y evaluación. Participa en proyectos de investigación CONACYT, PAPIIT y PROMEP-SEP.

GABRIELA PEÑUELAS GUERRERO

Maestra en Comunicación y Estudios de Cultura (Iconos Instituto de Investigación en Comunicación y Cultura). Licenciada en Restauración de Bienes Muebles (ENCRYM-INAH). Profesor-investigador de la ENCRYM, miembro del Área de Conservación de Patrimonio Cultural Metálico y asignaturas de teoría de la restauración. Participa en distintos proyectos de investigación para CONACYT y PROMEP-SEP como parte del cuerpo académico ENCRM-CA-04. Ha participado en distintos foros nacionales e internacionales sobre conservación de patrimonio metálico, Arqueometría y Restauración.

ILSE MARCELA LÓPEZ ARRIAGA

Egresada de la Licenciatura en Restauración de la ENCRYM-INAH. Se ha desarrollado en el ámbito de manejo de colecciones, conservación preventiva de museos y conservación de patrimonio metálico. Formó parte del CENCROPAM-INBA en Servicios a museos. Profesor-investigador de la ENCRYM en el Área de Conservación de Patrimonio Cultural Metálico y asignaturas de manejo de colecciones y conservación preventiva. Ha impartido ponencias en distintos foros nacionales e internacionales sobre conservación de patrimonio metálico.

ÁNGEL ERNESTO GARCÍA ABAJO

Químico metalúrgico licenciado en Ciencias Químicas (Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Complutense de Madrid), con la especialidad de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica. Se ha desarrollado en diferentes ámbitos de la industria metalúrgica. En la investigación ha desarrollado trabajos en áreas de arqueometalurgia y corrosión, en la Universidad Complutense de Madrid. Desde 2007 labora en la ENCRYM-INAH, donde también participa en diversos proyectos de investigación sobre de técnicas de manufactura y procesos de alteración del patrimonio cultural.