

5. Proceso de fabricación del acero

La finalidad de este apartado es recoger todos los datos necesarios para la realización posterior del Análisis de ciclo de vida de una estructura de hormigón armado.

En la comparación acero-hormigón hay que tener en cuenta que la media de densidades entre acero y hormigón son distintas y que, aunque los valores basados en la unidad de masa proporcionan una base común para la comparación, estos valores no son totalmente equiparables debido a la diferente cantidad de cada material necesaria en la estructura de la que será analizado el ciclo de vida.

5.1. Introducción

El acero se puede obtener a partir de dos materias primas fundamentales:

- el arrabio, obtenido a partir de mineral en instalaciones dotadas de alto horno (proceso integral);
- las chatarras tanto férricas como inoxidables,

El tipo de materia prima condiciona el proceso de fabricación. En líneas generales, para fabricar acero a partir de arrabio se utiliza el convertidor con oxígeno, mientras que partiendo de chatarra como única materia prima se utiliza exclusivamente el horno de arco eléctrico (proceso electro-siderúrgico). Los procesos en horno de arco eléctrico pueden usar casi un 100% de chatarra metálica como primera materia [Steel Recycling Institute; 2000], convirtiéndolo en un proceso más favorable desde un punto de vista ecológico. Aun así, la media de las estadísticas actuales calcula que el 85% de las materias primas utilizadas en los hornos de arco eléctrico son chatarra metálica [Wolf, B.; et al; 2001].

Las estimaciones del porcentaje mundial de industrias que utilizan el convertidor con oxígeno en 1995 eran del 59% y de un 33% para las que utilizaban horno de arco eléctrico [Wolf, B.; et al; 2001].

Las aleaciones de acero se realizan generalmente a través del horno de arco eléctrico, incluyendo el acero inoxidable. En algunos tipos de acero inoxidable se añade a su composición molibdeno, titanio, niobio u otro elemento con el fin de conferir a los aceros distintas propiedades.

Tras el proceso de reconversión industrial de la siderurgia en España se abandonó la vía del alto horno y se apostó de forma decidida por la obtención de acero a través de horno eléctrico. En este proceso, la materia prima es la chatarra, a la que se le presta una especial atención, con el fin de obtener un elevado grado de calidad de la misma. Para ello, la chatarra es sometida a unos severos controles e inspecciones por parte del fabricante de acero, tanto en su lugar de origen como en el momento de la recepción del material en fábrica. La calidad de la chatarra depende de tres factores:

- Su facilidad para ser cargada en el horno
- Su comportamiento de fusión (densidad de la chatarra, tamaño, espesor, forma)

- Su composición, siendo fundamental la presencia de elementos residuales que sean difíciles de eliminar en el proceso del horno

Atendiendo a su procedencia, la chatarra se puede clasificar en tres grandes grupos:

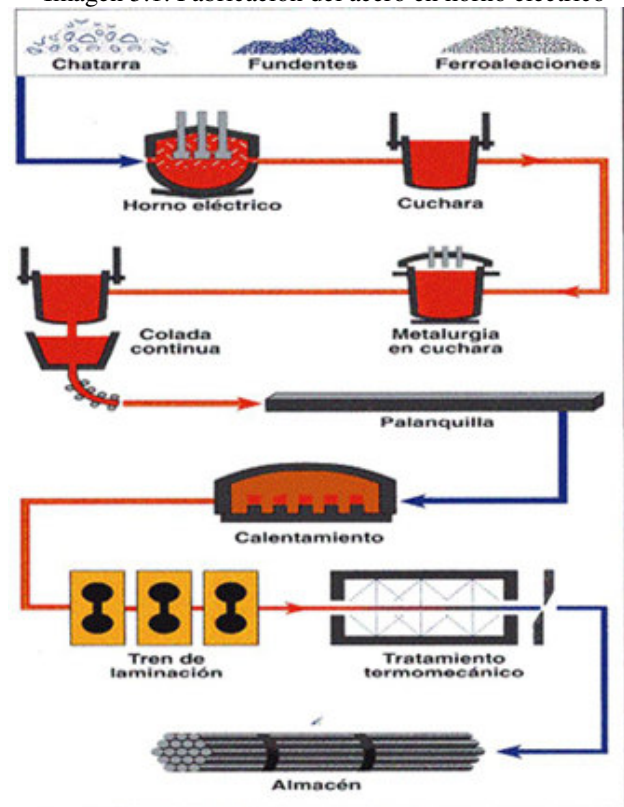
- a) Chatarra reciclada: formada por despuntes, rechazos, etc. originados en la propia fábrica. Se trata de una chatarra de excelente calidad.
- b) Chatarra de transformación: producida durante la fabricación de piezas y componentes de acero (virutas de máquinas herramientas, recortes de prensas y guillotinas, etc.).
- c) Chatarra de recuperación: suele ser la mayor parte de la chatarra que se emplea en la acería y procede del desguace de edificios con estructura de acero, plantas industriales, barcos, automóviles, electrodomésticos, etc.

5.2. Fabricación en horno eléctrico

La fabricación del acero en horno eléctrico se basa en la fusión de las chatarras por medio de una corriente eléctrica, y al afino posterior del baño fundido.

El horno eléctrico consiste en un gran recipiente cilíndrico de chapa gruesa (15 a 30 mm de espesor) forrado de material refractario que forma la solera y alberga el baño de acero líquido y escoria. El resto del horno está formado por paneles refrigerados por agua. La bóveda es desplazable para permitir la carga de la chatarra a través de unas cestas adecuadas.

Imagen 5.1. Fabricación del acero en horno eléctrico



La bóveda está dotada de una serie de orificios por los que se introducen los electrodos, generalmente tres, que son gruesas barras de grafito de hasta 700 mm de diámetro. Los electrodos se desplazan de forma que se puede regular su distancia a la carga a medida que se van consumiendo.

Los electrodos están conectados a un transformador que proporciona unas condiciones de voltaje e intensidad adecuadas para hacer saltar el arco, con intensidad variable, en función de la fase de operación del horno.

Otro orificio practicado en la bóveda permite la captación de los gases de combustión, que son depurados convenientemente para evitar contaminar la atmósfera. El horno va montado sobre una estructura oscilante que le permite bascular para proceder al sangrado de la escoria y el vaciado del baño.

El proceso de fabricación se divide básicamente en dos fases: la fase de fusión y la fase de afino.

5.2.1. Fase de fusión

Una vez introducida la chatarra en el horno y los agentes reactivos y escorificantes (principalmente cal) se desplaza la bóveda hasta cerrar el horno y se bajan los electrodos hasta la distancia apropiada, haciéndose saltar el arco hasta fundir completamente los materiales cargados. El proceso se repite hasta completar la capacidad del horno, constituyendo este acero una colada.

5.2.2. Fase de afino

El afino se lleva a cabo en dos etapas. La primera en el propio horno y la segunda en un horno cuchara. En el primer afino se analiza la composición del baño fundido y se procede a la eliminación de impurezas y elementos indeseables (silicio, manganeso, fósforo, etc.) y realizar un primer ajuste de la composición química por medio de la adición de ferroaleaciones que contienen los elementos necesarios (cromo, níquel, molibdeno, vanadio o titanio).

El acero obtenido se vacía en una cuchara de colada, revestida de material refractario, que hace la función de cuba de un segundo horno de afino en el que termina de ajustarse la composición del acero y de dársele la temperatura adecuada para la siguiente fase en el proceso de fabricación.

5.2.3. La colada continua

Finalizado el afino, la cuchara de colada se lleva hasta la artesa receptora de la colada continua donde vacía su contenido en una artesa receptora dispuesta al efecto.

La colada continua es un procedimiento siderúrgico en el que el acero se vierte directamente en un molde de fondo desplazable, cuya sección transversal tiene la forma geométrica del semiproducto que se desea fabricar; en este caso la palanquilla.

La artesa receptora tiene un orificio de fondo, o buza, por el que distribuye el acero líquido en varias líneas de colada, cada una de las cuales dispone de su lingotera o molde, generalmente de cobre y paredes huecas para permitir su refrigeración con agua, que sirve para dar forma al producto. Durante el proceso la lingotera se mueve

alternativamente hacia arriba y hacia abajo, con el fin de despegar la costra sólida que se va formando durante el enfriamiento.

Posteriormente se aplica un sistema de enfriamiento controlado por medio de duchas de agua fría primero, y al aire después, cortándose el semiproducto en las longitudes deseadas mediante sopletes que se desplazan durante el corte.

En todo momento el semiproducto se encuentra en movimiento continuo gracias a los rodillos de arrastre dispuestos a lo largo de todo el sistema.

Finalmente, se identifican todas las palanquillas con el número de referencia de la colada a la que pertenecen, como parte del sistema implantado para determinar la trazabilidad del producto, vigilándose la cuadratura de su sección, la sanidad interna, la ausencia de defectos externos y la longitud obtenida.

5.2.4. La laminación

Las palanquillas no son utilizables directamente, debiendo transformarse en productos comerciales por medio de la laminación o forja en caliente.

De forma simple, podríamos describir la laminación como un proceso en el que se hace pasar al semiproducto (palanquilla) entre dos rodillos o cilindros, que giran a la misma velocidad y en sentidos contrarios, reduciendo su sección transversal gracias a la presión ejercida por éstos. En este proceso se aprovecha la ductilidad del acero, es decir, su capacidad de deformarse, tanto mayor cuanto mayor es su temperatura. De ahí que la laminación en caliente se realice a temperaturas comprendidas entre 1.250°C, al inicio del proceso, y 800°C al final del mismo.

La laminación sólo permite obtener productos de sección constante, como es el caso de las barras corrugadas.

El proceso comienza elevando la temperatura de las palanquillas mediante hornos de recalentamiento hasta un valor óptimo para ser introducidas en el tren de laminación. Generalmente estos hornos son de gas y en ellos se distinguen tres zonas: de precalentamiento, de calentamiento y de homogeneización. El paso de las palanquillas de una zona a otra se realiza por medio de distintos dispositivos de avance. La atmósfera en el interior del horno es oxidante, con el fin de reducir al máximo la formación de cascarilla.

Alcanzada la temperatura deseada en toda la masa de la palanquilla, ésta es conducida a través de un camino de rodillos hasta el tren de laminación. Este tren está formado por parejas de cilindros que van reduciendo la sección de la palanquilla. Primero de la forma cuadrada a forma de óvalo, y después de forma de óvalo a forma redonda. A medida que disminuye la sección, aumenta la longitud del producto transformado y, por tanto, la velocidad de laminación. El tren se controla de forma automática, de forma que la velocidad de las distintas cajas que lo componen va aumentando en la misma proporción en la que se redujo la sección en la anterior.

El tren de laminación se divide en tres partes:

- Tren de desbaste: donde la palanquilla sufre una primera pasada muy ligera para romper y eliminar la posible capa de cascarilla formada durante su permanencia en el horno.
- Tren intermedio: formado por distintas cajas en las que se va conformando por medio de sucesivas pasadas la sección.
- Tren acabador: donde el producto experimenta su última pasada y obtiene su geometría de corrugado.

Las barras ya laminadas se depositan en una gran placa o lecho de enfriamiento. De ahí, son trasladadas a las líneas de corte a medida y empaquetado y posteriormente pasan a la zona de almacenamiento y expedición.

En el caso de la laminación de rollos, éstos salen del tren acabador en forma de espira, siendo transportados por una cinta enfriadora, desde la que las espiras van siendo depositadas en un huso, donde se compacta y se ata para su expedición, o bien se lleva a una zona de encarretado, donde se forman bobinas en carrete.

Durante la laminación se controlan los distintos parámetros que determinarán la calidad del producto final: la temperatura inicial de las palanquillas, el grado de deformación de cada pasada —para evitar que una deformación excesiva dé lugar a roturas o agrietamientos del material—, así como el grado de reducción final, que define el grado de forja, y sobre todo el sistema de enfriamiento controlado.

5.3. Flujos de materia del proceso de fabricación del acero

Para producir una tonelada de acero virgen se necesitan 1500kg de ganga de hierro, 225kg de piedra caliza y 750kg de carbón (en forma de coque) [Lawson, B.; 1996]

La obtención del acero pasa por la eliminación de las impurezas que se encuentran en el arrabio o en las chatarras, y por el control, dentro de unos límites especificados según el tipo de acero, de los contenidos de los elementos que influyen en sus propiedades.

Las reacciones químicas que se producen durante el proceso de fabricación del acero requieren temperaturas superiores a los 1000°C para poder eliminar las sustancias perjudiciales, bien en forma gaseosa o bien trasladándolas del baño a la escoria (ver tabla 5.1).

Tabla 5.1. Principales reacciones químicas en el afino

Elemento	Forma de eliminación	Reacción química
Carbono	Al combinarse con el oxígeno se quema dando lugar a CO y CO ₂ gaseoso que se elimina a través de los humos.	$2 C + O_2 \rightarrow 2 CO$ $2 CO + O_2 \rightarrow 2 CO_2$
Manganeso	Se oxida y pasa a la escoria. Combinado con sílice da lugar a silicatos.	$2 Mn + O_2 \rightarrow 2 MnO$ $MnO + SiO_2 \rightarrow \text{silicatos}$
Silicio	Se oxida y pasa a la escoria. Forma silicatos	$Si + O_2 \rightarrow SiO_2$ $SiO_2 + \text{óxidos} \rightarrow \text{silicatos}$
Fósforo	En una primera fase se oxida y pasa a la escoria. En presencia de carbono y altas temperaturas puede revertir al baño. Para fijarlo a la escoria se añade cal formándose fosfato de calcio.	$4 P + 5 O_2 \rightarrow 2 P_2O_5$ $P_2O_5 + 5 C \rightarrow 2 P + 5 CO$ $2 P + 5 FeO + 3 CaO \rightarrow P_2O_5 \cdot 3 CaO + 5 Fe$
Azufre	Su eliminación debe realizarse mediante el aporte de cal, pasando a la escoria en forma de sulfuro de calcio. La presencia de manganeso favorece la desulfuración.	$S + Fe + CaO \rightarrow FeO + SCa$ $S + Fe + MnO \rightarrow SMn + FeO$ $S + Fe + Mn \rightarrow SMn + Fe$

Por cada tonelada de bloque de acero fabricado se generan: 145kg de escoria, 230kg de escoria granulada, aproximadamente 150 000 litros de agua residual y alrededor de 2 toneladas de emisiones gaseosas (incluyendo CO₂, óxidos sulfurados y óxidos de nitrógeno) [Lawson, B.; 1996] (Ver tabla 5.2).

Tabla 5.2. Perfil medioambiental del acero [Lawson, B.; 1996] [World Bank Group, 1998]:

<u>Energía</u>	19	MJ / kg producto
<u>Materias primas</u>		
Ganga de hierro	1500	kg / t producto
Piedra caliza	225	kg / t producto
Carbón (en forma de coque)	750	kg / t producto
<u>Emisiones</u>		
Escoria	145	kg / t producto
Escoria granulada	230	kg / t producto
Agua residual	150000	l / t producto
Emisiones gaseosas (incluyendo dióxido de carbono, óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno)	2	t / t producto
[DESGLOSE] :		
Dióxido de carbono (CO ₂)	1,950	t / t producto
Óxido de nitrógeno (NO _x)	0,003	t / t producto
Óxido de sulfúrico (SO ₂)	0,004	t / t producto
Metano (CH ₄)	0,626	kg / t producto
Componentes orgánicos volátiles (COV _{tot})	0,234	kg / t producto
Polvo	15,000	kg / t producto
Metales pesados (Pb,Cd,Hg,As,Cr,Cu,Ni,Se,Zn,V)	0,037	kg / t producto

Los valores del desglose de las emisiones gaseosas de la tabla 5.2 han sido obtenidos a partir de las estadísticas de emisiones de la industria de hierro y acero del Reino Unido en el año 1997 y la producción de acero de dicha industria ese año (datos publicados por el gobierno del Reino Unido y actualizados según los factores de conversión indicados por el mismo).

5.4. El reciclado de los materiales de construcción

Es importante estudiar las posibilidades de cada material constructivo para mejorar su impacto ambiental a través del reciclaje. Especialmente teniendo en cuenta la limitación de oportunidades para depositar los residuos y la creciente necesidad de preservar nuestros recursos naturales.

Los datos del Plan Nacional de Residuos de construcción y demolición para el periodo 2001-2006 reflejan la situación del reciclado de residuos en España:

- El volumen de residuos de construcción y demolición oscila entre los 2 y 3 kilogramos por habitante y día (tasa superior a la de la basura domiciliaria).
- El porcentaje de este tipo de residuos que actualmente son reutilizados o reciclados en España es inferior al 5%, muy lejos de países como Holanda (90%), Bélgica (87%), Dinamarca (81%) o del Reino Unido (45%).
- El Plan Nacional se fija como objetivo una tasa de reutilización o reciclado de, al menos, el 60% en el año 2.006.
- Las Administraciones Públicas fomentarán e incentivarán la creación de infraestructuras de reciclaje por parte de la iniciativa privada.
- El coste de la adecuada gestión de los residuos de construcción y demolición habrá de ser asumido por los productores de los mismos, en aplicación del principio "quién contamina paga", debiendo articularse los instrumentos legales que posibiliten su cumplimiento.

Así pues, la posibilidad de reciclado estimada de los residuos de la construcción es de alrededor del 90% mientras que, actualmente, sólo un 5% es reciclado. Con un porcentaje tan pequeño, pero con tanto margen para la superación, se hace necesario estudiar cómo cada material puede ser reciclado y convertirse así en más eficiente energéticamente.

5.4.1. Opciones de reciclado del acero.

Este apartado se centra en el tratamiento de los residuos de construcción, en las opciones de reciclado posibles y en su inclusión en el análisis de ciclo de vida.

Al ser un material de alta intensidad energética, el acero tiene un alto potencial para ser reciclado. El acero, se puede reciclar técnicamente un número indefinido de veces, casi sin degradación en la calidad.

Aún así, la oxidación reduce la cantidad de material no oxidado. Mientras que prácticamente el 100% de los desechos de acero podrían ser re-introducidos en la industria, el porcentaje de acero reciclado se estima del 46%. Considerando la relativa facilidad con la que el acero puede ser reciclado y las ventajas obtenidas cuando se utiliza acero reciclado (requiere cuatro veces más energía producir acero de mineral virgen que reciclarlo [Green Network, 1999]), resulta claro que hay muchas posibilidades de mejora. Las propiedades metálicas del acero son ventajosas ya que permiten que la separación del acero sea físicamente viable tanto en flujos de desecho como en plantas de construcción o demolición usando imanes para separar el metal del resto de residuos. La naturaleza magnética de los metales férricos facilita la separación y manejo durante el reciclado.

Además, la escoria generada en el proceso de producción del acero, también puede ser reciclada, y se usa actualmente como sustituto de cemento o áridos en la construcción de carreteras y muros. Esta utilización es enormemente beneficiosa debido, por un lado, a la significativa reducción en la emisión de dióxido de carbono que de otra forma sería generado debido a la calcinación del mineral calcáreo, y por otro lado, a la reducción de escoria residual. Se estima que la creación de una tonelada de escoria (durante la producción de 3,5 toneladas de metal fundido) ahorra entre 3 y 5 GJ de energía y puede evitar la cocción de 1000 kg de calcárea, que tiene el potencial de generar entre 900 y 1200 kg de dióxido de carbono [Emi, T.; Seetharaman, S.; 2000].