

1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

1.1. HISTORIA DE LA SIDERURGIA

1.1.1. Los primeros acereros

Como el hierro se corroe (es decir, se oxida) fácilmente, no se conservan piezas muy antiguas que sirvan para localizar a los primeros fundidores que supieron explotar los primeros minerales ferrosos. Los minerales ferrosos son mucho más abundantes en la Tierra que el hierro meteórico; sin embargo las técnicas para aprovecharlos son mucho más complicadas.

Para aprovechar el hierro meteórico (procedente de aerolitos¹) solamente hay que conformarlo a base de martillazos; incluso en algunos casos no hay necesidad de calentarlo. Los minerales ferrosos, por el contrario, son una mezcla de óxidos de hierro (mena) y una cantidad variable de otros compuestos (ganga), generalmente sin interés, de donde la separación del hierro no es nada fácil. Es probable que de manera accidental los antiguos descubrieran pequeños trozos de hierro en residuos de fogatas donde se quemó leña en abundancia en contacto con rocas de alto contenido férrico. Esto es concebible porque el hierro es el elemento que ocupa el cuarto lugar en abundancia en la corteza terrestre después del oxígeno, el silicio y el aluminio.

La acción del monóxido de carbono producido durante la combustión de la leña pudo haber servido para retirar el oxígeno de los óxidos de hierro. Por este mecanismo, las rocas se convertirían en piezas de hierro poroso, lo que actualmente se conoce como hierro esponja. Cuando el hierro esponja se encuentra al rojo vivo en contacto con las brasas, en los poros se acumula una escoria líquida que los antiguos eliminaban martillando al hierro esponja en un yunque (forja). Como producto se obtenía un hierro forjado bastante puro. Se conocen piezas muy antiguas cuyo contenido aleante era inferior al 0,1% y con menos del 3% de escoria atrapada en los poros.

Hasta aquí los antiguos tenían hierro, pero no acero. Hay indicios de que alrededor del año 1200 a.C. ya se sabía cómo convertir la superficie del hierro forjado en acero. Una vez conformada un hacha de hierro forjado, por ejemplo, se empacaba en medio de carbón de leña molido. El conjunto se mantenía en un recipiente al rojo vivo durante varias horas para que el carbono de la leña se difundiera hacia el interior del hacha,

¹ Meteorito de carácter pétreo formado principalmente por silicatos de magnesio y hierro

formando una capa dura de acero (aleación hierro + carbono) alrededor de una matriz de hierro.

Evidentemente, si el hierro en los minerales está oxidado, debe eliminarse el oxígeno que contiene. Y qué mejor que el monóxido de carbono (CO), el cual presenta gran afinidad por el oxígeno debido a su estado semioxidado (lo que le confiere un carácter reductor) para convertirse en dióxido de carbono (CO₂). Sin embargo, para los antiguos, que no sabían de la existencia del oxígeno ni entendían el concepto de elementos o reacciones químicas, el asunto resultaba mágico.

Entre los antiguos, el hierro era considerado de origen celeste, sideral. Algunos pensaban que el cielo era una bóveda de donde se desprendían los meteoritos. Los herreros eran señores del fuego, brujos, chamanes, capaces de lograr una transmutación que hacía aparecer el material de los cielos en la Tierra.

¿Cómo localizar un mineral de hierro? Hoy en día, desde los satélites, se pueden rastrear a gran velocidad los recursos minerales de países enteros. Existen equipos de análisis que detectan los elementos presentes en las rocas, con precisión y velocidad sorprendentes. En ausencia de los equipos modernos, y de muchos que los precedieron, los antiguos estaban a merced del apoyo divino. Al mineral se le asociaba un comportamiento de animal, que se mueve, se esconde y siente atracción por algunos humanos y repulsión por otros, y se creía que el herrero estaba dotado de poderes mágicos que le permitían ir a la caza de minerales.

La extracción de los minerales era vista como una alteración a un proceso de gestación. La madre Tierra, en sus entrañas, contenía embriones que en un futuro lejano se convertirían en hierro. Sólo un brujo, un señor del fuego, podía extraer ese embrión y trasplantarlo a una nueva matriz, el horno, donde se aceleraría el nacimiento del hierro.

El hierro tuvo que librar una batalla importante antes de sustituir al bronce como material para la fabricación de herramientas y armas. Durante cerca de dos milenios, cerca del año 1200 a.C., las aleaciones basadas en el cobre, entre ellas el bronce, eran preferidas en lugar del hierro. De hecho, el bronce tenía propiedades superiores. Éste inicialmente se producía aleando cobre con arsénico, porque muchos minerales contenían estos dos elementos a la vez. El arsénico se agregaba al cobre, dando lugar a un material de resistencia superior que se ha caracterizado como "bronce natural". Más adelante, en lugar de arsénico se empleó el estaño para producir el bronce.

El bronce es bastante más duro que el hierro esponja, de modo que por mucho tiempo este último fue poco atractivo. Además el bronce se podía fundir y vaciar en moldes a temperaturas relativamente accesibles (alrededor de los 1 000° C). Esto era imposible con el hierro esponja, que funde a 1 537° C.

Algunos investigadores creen que el hierro sustituyó al bronce no debido a un avance en el proceso tecnológico, sino porque por alguna razón el bronce escaseó. Es concebible que el suministro europeo de estaño se haya interrumpido. De hecho, el cobre y el estaño son mucho menos abundantes en la corteza terrestre que el hierro y el carbono.

El proceso de "aceración" del hierro surgió por la necesidad de contar con un material tan fuerte como el bronce. El efecto del carbono en el endurecimiento del acero se compara con el efecto del estaño en el cobre en la figura 1. Para tener una ventaja notoria sobre el bronce, los herreros tuvieron que ingeniárselas para introducir un 0,4% de carbono en el hierro, proceso nada fácil.

Como ya se dijo antes, los herreros antiguos empacaban los objetos de hierro en polvo de carbón de leña y los metían en un horno para que el carbono se difundiera en el hierro. A temperaturas de 950° C se requerían nueve horas para formar una corteza de acero (con 0,5% de carbono) de 1,5 mm. de espesor alrededor de la pieza de hierro. Este proceso, con algunas variantes, todavía se emplea en la actualidad y se conoce como cementación.

Al emerger la civilización de la Edad Media, todavía la cementación era el método más generalizado para convertir la superficie del hierro forjado en acero. Para introducir las capas de acero en el interior de una espada, por ejemplo, se tomaba una barra de hierro y se cementaba; luego se martilleaba hasta alcanzar el doble de su longitud inicial; se doblaba de modo que una mitad quedara encima de la otra y se martilleaba al rojo vivo hasta que soldaran las dos mitades, quedando en el interior una capa de acero. El proceso se repetía las veces deseadas. En sables japoneses se han encontrado varios miles de capas. Esto no quiere decir que el proceso anterior se tenga que repetir miles de veces: como las capas se multiplican exponencialmente al aumentar el número de dobleces, bastan 12 dobleces para lograr más de 4000 capas (212). Pero 12 dobleces cuestan mucho trabajo y energía. Cada cementación puede tomar una jornada de trabajo y grandes cantidades de carbón de leña. Los herreros europeos hacían solamente una o dos dobleces.

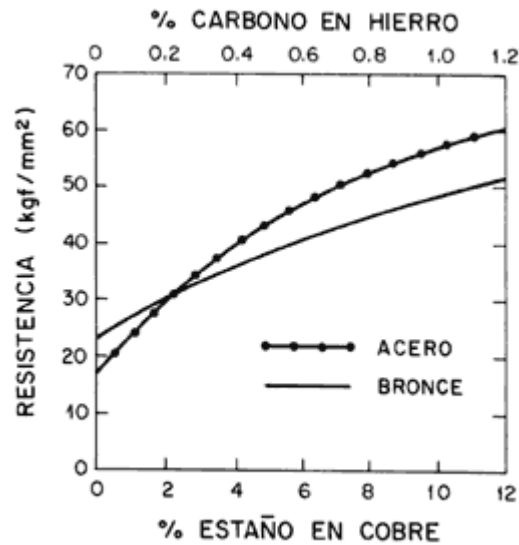


Figura 1. Curvas de la resistencia mecánica del bronce y del acero en función del contenido de estaño y de carbono respectivamente. Cuando el contenido de carbono en el acero supera el 0.4% se empieza a notar una ventaja sobre el bronce

No fue sino hasta 1740 que el mundo occidental redescubrió el método del crisol para producir acero. Por esas fechas, un relojero y cirujano llamado Benjamin Huntsman tenía asombrados a sus competidores por la textura tan uniforme de sus aceros. Huntsman se cuidaba muy bien de guardar el secreto de su método, para que nadie, con excepción de él y sus ayudantes, lo conociera.

Pero uno de sus competidores, vil y astuto, se valió del chantaje al espíritu humanitario. En una noche de tormenta fingió estar atrapado por la lluvia y pidió refugio en el taller de Huntsman. La tradición de la época imponía moralmente dar el refugio solicitado, de modo que Huntsman no se pudo negar. El espía se asombró de la simplicidad del proceso: Huntsman cementaba pequeños trozos de hierro y los fundía en un crisol. Al solidificar, el acero resultaba sumamente uniforme. La idea, sin embargo, era más vieja de lo que el espía creía; el método del crisol para producir acero se practicaba en varios lugares del mundo desde tiempo inmemorial.

Lo que entorpecía el avance de la tecnología en el acero era la oscuridad en la que se encontraba. En el siglo XVIII se desconocía el motivo por el cual el hierro forjado, el acero y el arrabio eran distintos. No fue sino 1820 cuando Kersten planteó que era el contenido de carbono la razón de sus diferencias. El primer método para determinar con precisión el contenido de carbono en el acero fue desarrollado en 1831 por Leibig.

1.1.2. La Revolución Industrial

Antes de la Revolución Industrial, el acero era un material caro que se producía a escala reducida para fabricar armas, principalmente. Los componentes estructurales de máquinas, puentes y edificios eran de hierro forjado o fundiciones. Las fundiciones son aleaciones de hierro con carbono entre 2,5% y 5%. La aleación que contiene el 4,3% se conoce como "eutéctica²" y es aquella donde el punto de fusión es mínimo, 1 130° C. Esta temperatura es mucho más accesible que la del punto de fusión del hierro puro, 1537° C (los chinos ya en el siglo VI de nuestra era, conocían y aprovechaban la composición eutéctica para producir fundiciones en hornos de leña. Eran hornos, mayores que los europeos y por su mayor escala podían alcanzar temperaturas superiores a los 1 150° C). El producto de estos hornos era una aleación líquida llamada arrabio que contenía abundantes impurezas. Por su baja temperatura de fusión, el arrabio servía como punto de partida para la fabricación de hierro fundido, al cual solamente se le debían eliminar las impurezas manteniendo un alto contenido de carbono.

El arrabio, ya en estado sólido, servía también para producir hierro forjado. Usualmente se introducía, en lingotes, en hornos de carbón de leña dotados de sopladores de aire. El oxígeno del aire reaccionaba con el carbono y otras impurezas del arrabio formándose así escoria líquida y una esponja de hierro. El hierro esponja, casi puro, se mantenía sólido y la escoria líquida se removía a martillazos.

La maquinaria básica para el conformado de piezas estructurales se desarrolló mucho antes que la aparición en escala masiva del acero. En Massachusetts, desde 1648, operaban molinos de laminación para producir alambrón y barras de hierro forjado. La laminación consiste en hacer pasar un trozo de metal maleable a través de un sistema de dos rodillos, como se indica en la figura 2. Al girar, los rodillos aplican presión y aplanan el metal. A veces los rodillos tienen acanalados que sirven para conformar barras, o arreglos más caprichosos para producir perfiles en forma de T o I, o alguna otra configuración.

² Se dice de aquella mezcla cuyo punto de fusión es menor que el de cualquiera de sus constituyentes por separado

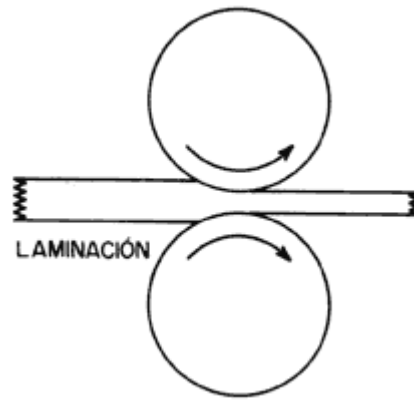


Figura 2. Proceso de laminación: una placa o una barra de acero, generalmente al rojo vivo, se pasa por unos rodillos donde se produce un cambio en la sección transversal con la geometría deseada

A principios del siglo XVIII ya había en Suecia y en Inglaterra laminadores movidos por molinos de agua. La máquina de vapor de Watt fue aplicada para este uso por primera vez en 1786.

A mediados del siglo XIX se producían por laminación rieles para ferrocarril de 40 metros de largo; se usaba de manera generalizada el martillo de vapor y se fabricó el primer buque interoceánico hecho a base de hierro forjado. El buque, llamado SS Great Britain, fue construido con doble capa de hierro y con cinco compartimentos. Su peso fue de 8 000 toneladas, cuatro de las cuales pertenecían a la hélice.

La torre Eiffel, inaugurada en París en 1889, se construyó con más de 7 000 toneladas de hierro forjado. Como el acero todavía era muy caro, los constructores Forges y Mendel optaron por el hierro forjado. La fabricación masiva y, por lo tanto económica, del acero estaba ya retrasada en relación con su demanda.

El primer paso para lograr la transformación masiva del arrabio en acero lo dio el inglés Henry Bessemer en 1856. La idea de Bessemer era simple: eliminar las impurezas del arrabio líquido y reducir su contenido de carbono mediante la inyección de aire en un convertidor de arrabio en acero. Se trata de una especie de crisol, como el que muestra en la figura 3, forrado de refractario de línea ácida o básica, y donde se inyecta aire a alta presión soplado desde la parte inferior, que a su paso a través del arrabio líquido logra la oxidación de carbono, además de elevar la temperatura por arriba del punto de fusión del hierro, haciéndolo hervir. Así, el contenido de carbono se reduce de un 4 o 5% a alrededor de un 0,5 %; además, el oxígeno reacciona con las impurezas del arrabio

produciendo una escoria menos densa que asciende y flota en la superficie del acero líquido, aumentando su calidad. Como la combinación de oxígeno con el carbono del arrabio es una combustión (reacción exotérmica), Bessemer sostenía que el proceso estaba exento de costes por energía, pues el calor desprendido los favorecía.

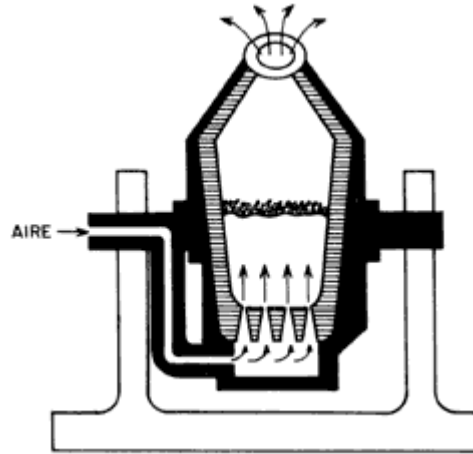


Figura 3. Convertidor de arrabio en acero inventado por Henry Bessemer. Un flujo de aire se inyecta por la parte inferior del horno para que elimine gran parte del carbono y otras impurezas del arrabio por oxidación. Este diseño fracasó inicialmente porque el refractario que cubría las paredes del horno era de tipo ácido

Bessemer logró convencer a los grandes empresarios del hierro de la época victoriana para que aplicaran industrialmente los procedimientos que él había desarrollado a escala de laboratorio. Se invirtieron enormes recursos en el proyecto, cuyo resultado fue un escandaloso fracaso. Bessemer fue obligado a reponer el dinero a los industriales y se hundió en el mayor descrédito. Pero Bessemer no se dio por vencido. Le costó mucho darse cuenta de que el arrabio que él había empleado en sus experimentos de laboratorio era distinto al que explotaban industrialmente los fundidores ingleses. Por alguna razón, Bessemer había empleado un arrabio de bajo contenido de fósforo que contrastaba con el arrabio obtenido de muchos minerales nativos de Inglaterra y Europa que eran muy ricos en este elemento.

La pared del convertidor de Bessemer estaba recubierta con ladrillos refractarios ricos en óxido de silicio o sílice (SiO_2), perteneciente al grupo de refractarios ácidos (en contraposición con los básicos, compuestos fundamentalmente por los óxidos alcalinos y alcalinotérreos). La experiencia del primer intento de Bessemer sirvió para demostrar que los refractarios ácidos entorpecen la eliminación del fósforo del arrabio. Más tarde

Thomas y Gilchrist, también ingleses, probaron que el convertidor de Bessemer transformaba exitosamente el arrabio en acero si la pared del horno se recubría con refractarios básicos (de óxido de magnesio, por ejemplo). Para eliminar el fósforo y la sílice del arrabio, añadieron trozos de piedra caliza que reacciona con ambos para producir compuestos que flotan en la escoria. Esto no se podía hacer en el convertidor ácido de Bessemer porque la piedra caliza podría reaccionar con los ladrillos de sílice de sus paredes, consumiéndolos progresivamente.

Bessemer instaló su propia acería en Sheffield, pagó sus deudas, pronto logró una producción de un millón de toneladas por año y amasó una gran fortuna. Lo que nunca pudo recuperar fue la confianza de los industriales ingleses. De muy mala manera fue rechazado su proyecto para sustituir los rieles de ferrocarril de "hierro" forjado de esa época por los de acero que ahora todo el mundo utiliza.

La tecnología para producir arrabio siempre estuvo inmersa en un proceso evolutivo. Un paso de una gran trascendencia se dio en el siglo XVIII, cuando el carbón mineral sustituyó al carbón de leña en los hornos. El uso del carbón de leña en las acerías dejó secuelas dramáticas en muchos países. En Inglaterra la devastación fue tan brutal que para mediados del siglo XVIII los bosques ya se habían agotado. Por más de un siglo Inglaterra tuvo que importar hierro o arrabio de Suecia, Rusia y de sus colonias americanas, debido a su insuficiencia de carbón de leña.

Para bien de los bosques, en el siglo XVIII se inició el uso del carbón mineral para producir arrabio. El carbón mineral usualmente contiene sustancias volátiles indeseables para la fabricación del arrabio. Se desarrolló entonces un método que consiste en triturar y calentar el carbón mineral en hornos para que las sustancias volátiles sean expelidas, dando lugar a un carbón más refinado llamado coque.

Cuando los convertidores básicos de arrabio en acero entraron en operación, ya se producía carbón mineral coquizado en plantas avanzada donde además de purificar el carbón, se aprovechaban los gases generados. Se obtenían como subproductos amoníaco, benceno, tolueno, nafta aromática y brea de alquitrán.

1.1.3. Los acereros clásicos

Una vez desatada la producción masiva de acero durante la Revolución Industrial, la producción mundial creció vertiginosamente, como se indica en la figura 4, impulsada

por una fiebre tecnológica sin precedentes y por una demanda industrial insatisfecha. El fenómeno nunca estuvo limitado al ámbito inglés. Diez años antes de registrarse la patente de Bessemer, William Kelly había desarrollado la misma idea en Estados Unidos. Asimismo los hermanos Siemens, alemanes, y posteriormente los hermanos Martin, franceses, dieron grandes pasos en el desarrollo de convertidores de arrabio en acero que antes de terminar el siglo XIX ya habían superado la producción a los de Bessemer (figura 3).

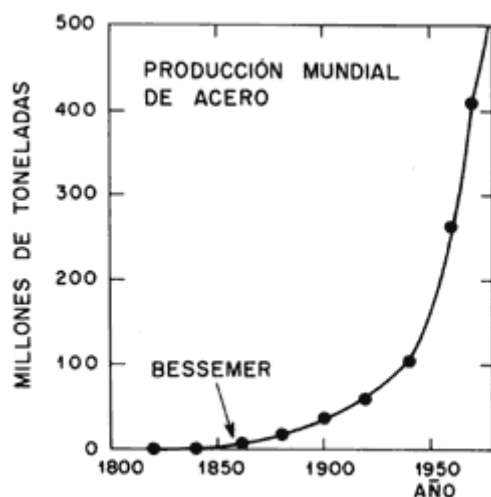


Figura 4. Gráfica de la producción mundial de acero en los últimos siglos. El invento de Bessemer fue el punto de partida del vertiginoso crecimiento

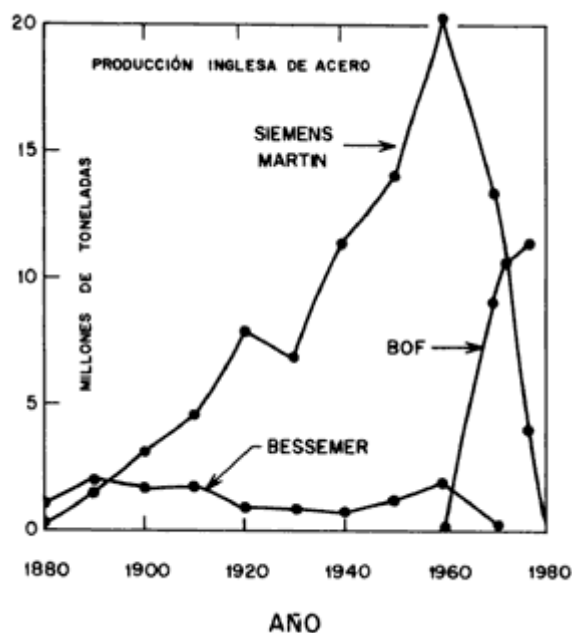


Figura 5. Producción de acero en Inglaterra. Los convertidores de Bessemer, "ácidos" o "básicos", dominaron inicialmente. El sistema Siemens – Martin fue el más utilizado en las primeras siete décadas

del siglo XX. Los convertidores BOF, sucesores de los Bessemer cobraron importancia en los últimos cuarenta años

La geografía de la producción de acero también evolucionó. A principios del siglo XVIII Suecia era el primer productor mundial de arrabio.

Posteriormente Inglaterra tomó su lugar, manteniendo su hegemonía hasta finales del siglo XIX. En 1890 Estados Unidos rebasó a Gran Bretaña y se mantuvo como líder hasta 1971, cuando fue superado por la Unión Soviética. En la figura 6 se presentan los diez primeros productores del mundo en 1983. La situación reciente dista de ser estable. De 1976 a 1983 China pasó del octavo al cuarto lugar, Japón desplazó a Estados Unidos del segundo lugar, Gran Bretaña pasó del séptimo al décimo y Corea del Sur se movió del lugar 25º y se puso en el 15º.

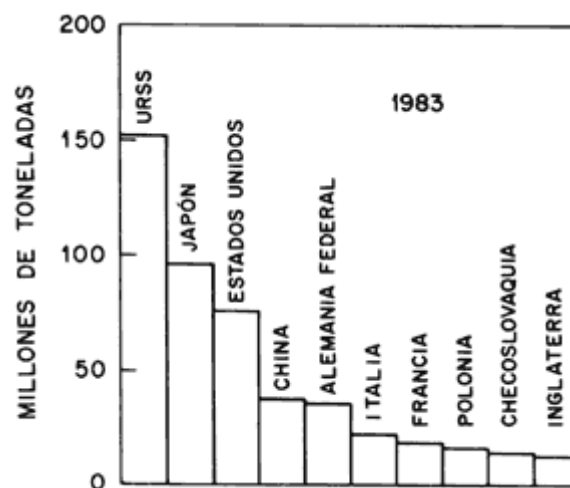


Figura 6. Los diez mayores productores de acero en el mundo en 1983

1.1.4. Los altos hornos

Es el mecanismo que ahora produce la mayor parte del acero del mundo. El proceso se puede dividir en dos grandes pasos: el primero consiste en transformar el mineral de hierro de las minas en arrabio y el segundo en convertir el arrabio en acero.

En un alto horno, cuyo esquema se presenta en la figura 7, se logra la transformación del mineral de hierro en arrabio.

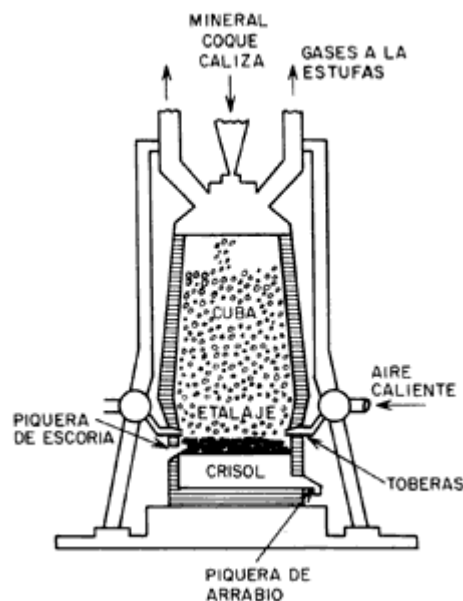


Figura 7. En el alto horno, el mineral de hierro, el coque y la caliza se cargan por la parte superior. Por las otras toberas se inyecta el aire caliente que enciende el coque y libera el monóxido de carbono necesario para reducir el óxido de hierro. El arrabio, producto final del alto horno, se colecta por una piqueta en la parte inferior

Los minerales de hierro contienen del 60 al 70% de hierro; el resto se compone de oxígeno, arena, arcilla y piedras, que a su vez contienen sílice (SiO_2). Es necesario deshacerse del sílice para evitar que una parte del hierro se desperdicie al formar compuestos con esta sustancia, lo cual se logra agregando piedra caliza. La caliza tiene la propiedad de que, a altas temperaturas, tiene gran afinidad por la sílice y por otras impurezas que vienen con el mineral, formando compuestos que flotan en el arrabio líquido como escoria.

El mineral, junto con la piedra caliza y el coque tienen en su conjunto el nombre de carga y se introducen en el alto horno por la parte superior. La forma y el tamaño de la carga están muy estudiados. Primero se muelen los minerales de hierro y la piedra caliza. Luego se producen aglomerados de uno a dos centímetros de diámetro, donde la caliza se incorpora junto con el mineral.

Con bandas transportadoras se lleva la carga, es decir las esferas del mineral y la caliza, y trozos de coque, hasta la parte superior del alto horno (Figura 7). Casi todo el alto horno se mantiene lleno de carga. Por la parte inferior, utilizando toberas, se introduce un soplo de aire caliente que fluye por los huecos que quedan entre las partículas de la carga. Desde los tiempos de los fundidores chinos del siglo VI hasta principios del siglo XIX el arrabio se produjo soplando con aire frío sobre la mezcla de minerales y carbón. Sin embargo, el proceso es mucho más eficiente tanto en rapidez como en consumo de coque si se sopla aire caliente adicionado con un poco de oxígeno y, eventualmente, con hidrocarburos. Cuando el soplo de aire caliente fue introducido por James Nielsen en 1828, se logró de inmediato un ahorro del 40% en el consumo de carbón.

En el alto horno, el aire caliente sirve para producir la combustión del coque y para elevar la temperatura. El oxígeno del aire se combina con el carbono para producir el monóxido de carbono que, a su vez, reacciona con el óxido de hierro para producir hierro y dióxido de carbono.

Al salir del alto horno, los gases producidos por la reacción del aire caliente con el coque y el mineral de hierro no están totalmente quemados. Es común que una cuarta parte de la mezcla de gases salientes sea monóxido de carbono. Este gas venenoso todavía puede quemarse, es decir, oxidarse, y el calor producido es aprovechable en el calentamiento del soplo de aire que entra. Con esto se logra además un beneficio para el ambiente al reducir las emisiones de monóxido de carbono.

Los gases que salen del alto horno son canalizados mediante conductos hacia enormes estufas donde se logra la combustión total de los mismos. En el camino, como se ilustra en la figura 8, los gases se hacen pasar por cámaras para separar el polvo que arrastran. De esas cámaras se conducen a una de las estufas (los altos hornos se acompañan al menos de dos estufas), cámaras de combustión revestidas con tabiques refractarios con alta capacidad de absorber calor. Después de algunas horas de quemado de los gases la estufa alcanza altas temperaturas y en ese momento los gases se canalizan a otra de las estufas. Es entonces cuando el soplo del aire, que deberá entrar al alto horno, se pasa por la estufa para que se caliente al hacer contacto con las paredes de tabique refractario incandescente, pudiendo alcanzar temperaturas superiores a los 1 000° C. En la figura 8, la estufa de la izquierda esta quemando gases y la de la derecha está calentando al soplo de aire.

La parte más caliente del alto horno se localiza justamente arriba de las toberas y se conoce como etalaje (Figura 7). Allí la temperatura alcanza los $1\ 800^{\circ}\text{C}$, alrededor de 550 grados más de los necesarios para fundir el arrabio. En estas condiciones las esferas de la carga, originalmente hechas de óxidos de hierro y caliza, lloran (gotean) arrabio y escoria que se depositan en el crisol de la parte inferior del alto horno.

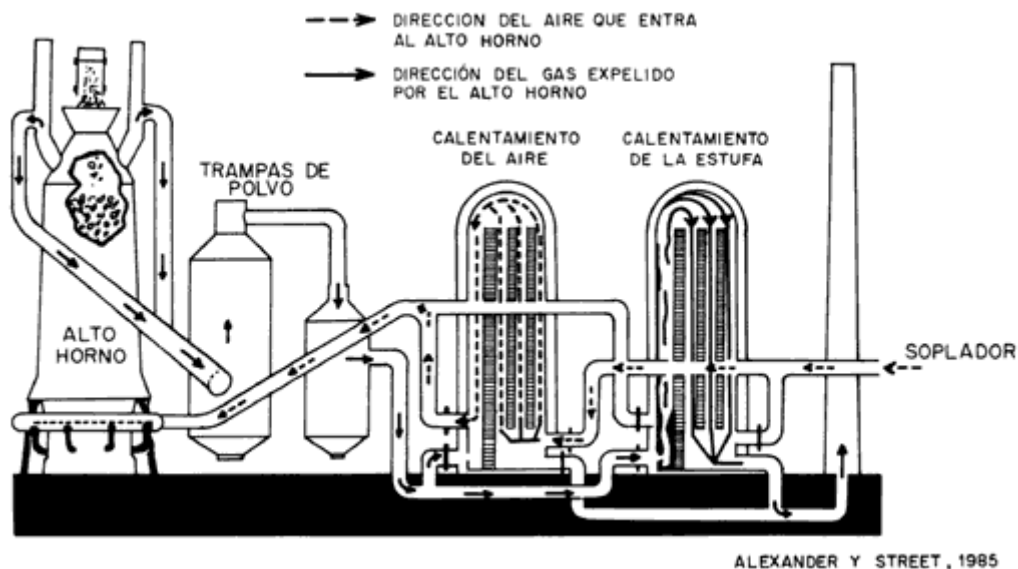


Figura 8. Los gases ricos en monóxido de carbono que salen del alto horno son aprovechados para calentar las estufas al completar su combustión. Mientras una de las estufas está en el proceso de combustión, la otra, previamente calentada, sirve para elevar la temperatura del aire por encima de los 1000°C

La escoria y el arrabio se sacan del crisol por unos conductos llamados piqueras. La piquera de escoria está colocada más arriba que la de arrabio porque la escoria flota. Frecuentemente el arrabio se traslada al convertidor en el estado líquido; sin embargo, en algunas plantas se vacía para formar lingotes. En Inglaterra, originalmente, los lingotes de arrabio tenían la forma de cerdos y por eso en inglés el arrabio es conocido como pig iron.

Los convertidores de arrabio en acero ya no son como los de Bessemer y sus contemporáneos. Conocidos generalmente por sus iniciales en inglés, los convertidores BOF (Basic Oxygen Furnace) logran la refinación del arrabio empleando la misma idea de Bessemer para eliminar las impurezas y el exceso de carbono por oxidación, además de aprovechar el calor de la oxidación como fuente de energía para la fusión. En lugar del soplo de aire que utilizaba Bessemer, en los BOF la oxidación se hace directamente

con oxígeno. Esta idea también la tuvo Bessemer porque el aire contiene solamente un 21%, de oxígeno contra un 78% de nitrógeno. Lo que pasó fue que en los tiempos de Bessemer el oxígeno puro era muy caro, de modo que no era accesible ni para hacer experimentos en el laboratorio. Cien años después la situación era otra porque se desarrollaron métodos baratos para producir oxígeno y en la escala necesaria para abastecer a las grandes siderúrgicas.

Un esquema del convertidor BOF se presenta en la figura 9. Consiste en una olla de acero recubierta en su interior con material refractario del tipo básico (óxido de magnesio o de calcio, por ejemplo). A diferencia del convertidor de Bessemer (Figura 3) donde se soplaba el aire por la parte inferior, en el BOF se inyecta el oxígeno por una lanza que entra por la parte superior. La lanza se enfría con serpentines de agua interiores para evitar que se funda. La carga y la descarga de la olla se hacen también por la parte superior y por eso la olla está montada en ejes laterales que le permiten girar.

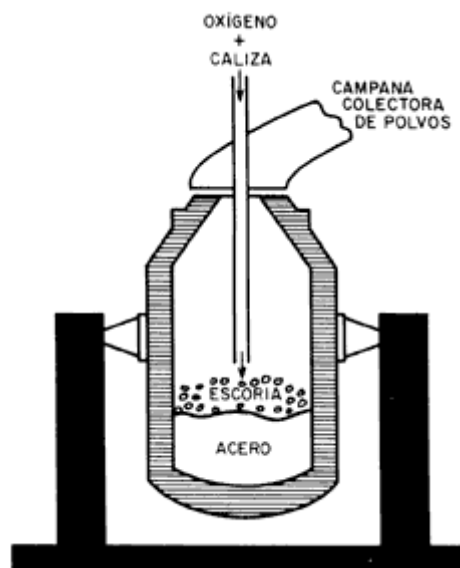


Figura 9. Mediante un chorro de oxígeno con polvo de piedra caliza el arrabio es convertido en acero en un BOF; el oxígeno reacciona con el carbono del arrabio y lo elimina en forma de dióxido (o monóxido) de carbono. La caliza sirve para eliminar impurezas, entre las que destaca el fósforo

Originalmente el proceso BOF fue desarrollado en Austria para convertir arrabio con bajo contenido de fósforo (alrededor del 0,3%), y en ese tiempo se bautizó con las iniciales LD, de Linz – Düsenverfahren (lanza de Linz). Luego la técnica se extendió, para arrabios de alto fósforo mediante la adición al chorro de oxígeno de polvo de

piedra caliza. Entonces se logró la producción de acero con arrabio de contenidos de fósforo tan altos que llegaban incluso al 2%.

Una de las grandes ventajas que desde un principio se observó en los convertidores BOF fue su capacidad para aceptar hasta un 20% de chatarra junto con la carga de arrabio líquido.

La diferencia de precios entre la chatarra fría y el arrabio líquido ha motivado la búsqueda de tecnologías para incrementar lo más posible la carga de chatarra. Algunos éxitos en esta dirección se han obtenido al adicionar al oxígeno que entra por la lanza combustibles diversos (fuel, gasoil) y carburos de silicio y calcio.

La entrada de los convertidores BOF al mercado mundial fue muy acelerada. En la figura 5 se muestra cómo los BOF marcaron el fin de los ya obsoletos convertidores de Bessemer y de los Siemens – Martin que habían dominado por décadas.

1.1.5. Los nuevos acereros

Todas las industrias deben examinarse a sí mismas con frecuencia. El escenario que compone el estado de la tecnología, las materias primas y la fuerza de trabajo evoluciona muy rápidamente. Suele ocurrir que las premisas que motivaron el establecimiento de industrias multimillonarias pierdan vigencia a los cinco o diez años. Y aunque esas industrias se resistan a aceptar su obsolescencia y sigan adelante, tarde o temprano sucumbirán ante las empresas más avanzadas.

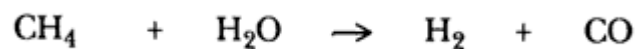
Todo parece indicar que el alto horno está viviendo su ocaso. La competencia ha forzado a las plantas acereras integradas a crecer, a buscar la producción en gran escala. Su tamaño, ahora con capacidad de producir de 5 000 a 10 000 toneladas de arrabio por día las ha hecho muy vulnerables. Estas plantas no pueden detener su operación so pena de sufrir enormes pérdidas económicas o daños irreversibles. En forma sumamente onerosa han tenido que enfrentar problemas de liquidez financiera, de abastecimiento confiable, de materias primas y de continuidad en la relación laboral.

El suministro de coque es un problema mayor. Durante más de 250 años la industria siderúrgica ha consumido cantidades colosales de carbón mineral. Naturalmente, los mejores yacimientos de carbón se han agotado. El coque es ahora escaso, caro y de baja calidad.

Durante muchos años los metalurgistas han cuestionado la forma indirecta de obtener el acero produciendo primero el arrabio en los altos hornos. ¿Por qué no sacar directamente el oxígeno del mineral de hierro y obtener el hierro esponja como en la antigüedad?

En el siglo pasado se propusieron y patentaron muchos métodos para reducir (desoxidar) los minerales de hierro directamente en el estado sólido. Se sugería el uso de mezclas de gases de hidrógeno, monóxido de carbono o hidrocarburos, por su alto poder desoxidante. Varios de esos métodos eran técnicamente muy razonables pero ninguno de ellos fue capaz de competir económicamente con el alto horno. En los años cincuenta de este siglo resurgió el interés en muchos países por el desarrollo de tecnologías para producir hierro esponja. Un gran impulso salió de México, donde la compañía HYLSA fue pionera de un proceso de reducción directa muy revolucionario. En 1957 HYLSA abrió su primera planta en Monterrey. Veinte años después el proceso HYL se había extendido por todo el mundo y se habían construido plantas en Venezuela, Brasil, Zambia, Irak, Irán e Indonesia, aparte de las seis plantas en México, con capacidad superior a diez millones de toneladas anuales.

El proceso HYL utiliza una mezcla de gases rica en hidrógeno y monóxido de carbono para extraer el oxígeno del mineral de hierro. La mezcla de gases se produce a partir de gas natural y vapor de agua en un dispositivo llamado reformador, que se representa en la figura 10. El gas natural y el vapor se inyectan a una tubería de acero inoxidable que se calienta con unos quemadores. A altas temperaturas, y con ayuda de catalizadores que se ponen en el interior de los tubos, ocurre la reacción química:



Gas natural + vapor de agua → hidrógeno + monóxido de carbono.

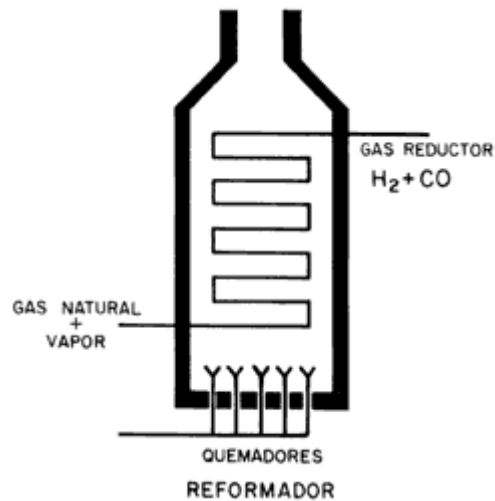


Figura 10. El reformador es un reactor químico que a altas temperaturas convierte una mezcla de gas natural y vapor en un gas de alto poder reductor formado de hidrógeno y monóxido de carbono

El hidrógeno y el monóxido de carbono, agentes reductores (desoxidantes) sumamente efectivos, salen del reformador acompañados de pequeñas cantidades de gas natural y dióxido de carbono. La tubería se conecta con los reactores reductores, que no son otra cosa que enormes vasijas metálicas donde se carga el mineral de hierro en forma de pequeñas esferas (de 2 cm. de diámetro), como se indica en la figura 11.

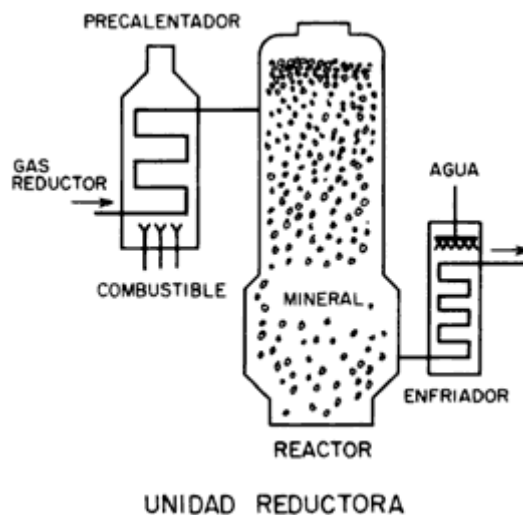


Figura 11. La unidad reductora consta de una enorme vasija donde se deposita un aglomerado de esferas del mineral por donde pasa el gas reductor previamente calentado a altas temperaturas. Posteriormente el gas residual es enfriado en una tubería bañada con agua

Antecedentes históricos

El mineral de hierro que se emplea en las plantas de HYL generalmente tiene la composición del cuadro 1. Alrededor del 30% del mineral es oxígeno asociado con el hierro que debe removerse al reaccionar con el hidrógeno o con el monóxido de carbono. Este objetivo se logra en un 85 o un 90% además de añadir al producto hierro esponja, un 2% de carbono.

La economía de los recursos energéticos consumidos y generados en el proceso es muy importante para obtener precios competitivos. Por esta razón, las plantas HYL se componen de cuatro unidades reductoras para aprovechar al máximo la energía y el potencial de reducción de los gases. En la figura 12 se ilustra cómo mientras una de las unidades reductoras se está descargando del hierro esponja y cargando de mineral, el flujo de gases reductores está pasando a través de las otras tres unidades. El gas reductor que sale al final todavía se aprovecha para quemarse en el reformador y en otras etapas de proceso.

SUSTANCIA	PORCENTAJE EN MASA
Hierro	67%
Oxígeno (en el hierro)	67%
Fósforo	0.05%
Azufre	0.02%
Óxido de calcio	1.8%
Óxido de magnesio	0.75%
Óxido de aluminio	1.03%
Óxido de silicio	1.3%
Impurezas	1.1%

Tabla 1. Composición del mineral de hierro empleado en el proceso HYL

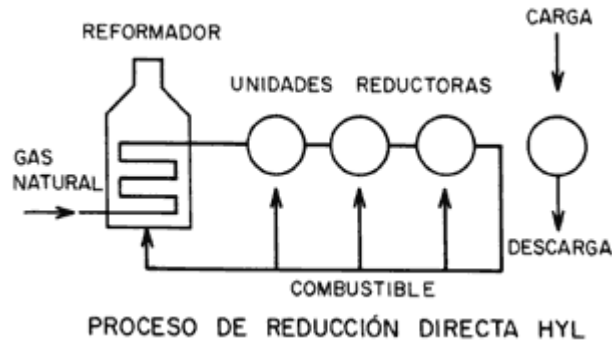


Figura 12. Una planta de reducción directa es un ensamble de un reformador y varias unidades reductoras. Las materias primas y los minerales en el proceso HYL son aprovechados al máximo al emplear el gas reductor residual como combustible para las unidades calefactoras.

De hecho las plantas, en realidad, son una maraña de tubos y válvulas que llevan muchas horas de ingeniería, y cuyo único objetivo es exprimir al máximo los recursos de las materias primas y de los combustibles.

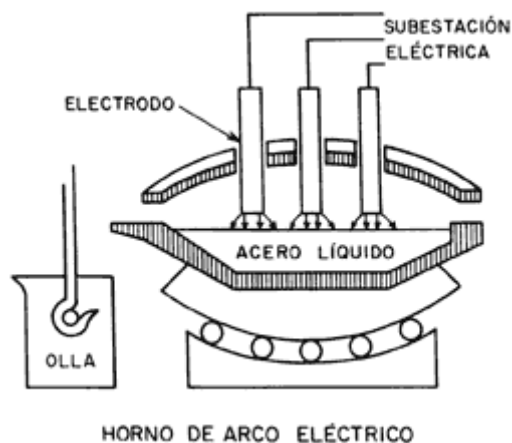


Figura 13. El horno de arco consta de una vasija recubierta con refractarios donde se coloca chatarra y/o hierro esponja, que se funden con el paso de una corriente eléctrica introducida con electrodos de grafito

El hierro esponja se convierte en acero líquido en un horno de arco eléctrico. El horno eléctrico funde al hierro esponja, y a la chatarra que usualmente se agrega, haciendo pasar por ellos enormes cantidades de corriente eléctrica. El horno eléctrico se muestra en la figura 13. El acero fundido, en ocasiones, se pasa a un horno – cuchara donde se hace el ajuste final de la aleación (metalurgia secundaria). Finalmente, el acero se vacía en moldes adecuados a cada proceso de fabricación posterior.

Otro tipo de hornos muy en auge actualmente son los hornos de inducción. Se caracterizan por utilizar una corriente eléctrica inducida que circula por una bobina que rodea a un crisol en el cual se funde la carga. La corriente es de alta frecuencia (aproximadamente 1000Hz), la cual es suministrada por un sistema de generador, mientras que la bobina es refrigerada por agua. Se cargan con piezas sólidas de metal, chatarra de alta calidad o virutas metálicas, dando lugar a tiempos de fusión de entre 50 y 90 min, pudiendo tratar una carga de hasta 3,6 toneladas por fusión. Los productos que pueden obtenerse son aceros de alta calidad o con aleaciones especiales.

1.1.6. Miniaceras

Un competidor implacable de las grandes plantas integradas (que parten del mineral de hierro y terminan con productos acabados de acero) ha surgido de los miles de millones de toneladas de acero que ellas mismas han producido. La chatarra es hoy una materia prima nada despreciable para la fabricación de acero, que suele aprovecharse en plantas pequeñas conocidas como miniaceras, donde la chatarra se funde en hornos de arco eléctrico. Técnicamente, su sistema de operación es muy sencillo. La materia prima se consigue con un buen comprador de chatarra capaz de asegurar un suministro regular. Esto no es nada fácil porque las fuentes de chatarra son muy irregulares. Un buen chatarrero debe además distinguir entre los distintos tipos de chatarra disponible. La chatarra de primera es aquella, que viene en trozos chicos en relación con el tamaño del horno, de buen grosor con pocos elementos indeseables como el cinc de los galvanizados, por ejemplo. Las piezas de acero grandes no son tan atractivas para los chatarreros porque su manejo es difícil y porque dejan mucho espacio vacío entre una y otra pieza.

La chatarra se carga al horno de arco eléctrico y se funde al exponerse al paso de una enorme corriente eléctrica. La corriente eléctrica llega a la chatarra a través de electrodos de grafito. Cuando la chatarra se pasa al estado líquido, lo cual ocurre en algunos minutos, los operadores toman una muestra y la llevan al laboratorio de análisis. En cuestión de segundos, con la ayuda de espectrómetros modernos, se determina la composición química del acero. En particular, son de interés los siguientes elementos: carbono, manganeso, fósforo, azufre, silicio, cromo y bronce, entre otros. El hierro, la base de la aleación, se determina por balance. Generalmente es necesario

hacer algún ajuste a la aleación mediante la adición de otros elementos necesarios o de formadores de escoria para retirar elementos indeseables como el fósforo o el azufre.

Del horno eléctrico, el acero líquido se pasa a una olla donde en ocasiones se pasa a una máquina de colada continua para producir barras de acero de sección cuadrada de 10 a 15 centímetros por lado y de 6 a 8 metros de longitud, llamadas palanquillas.

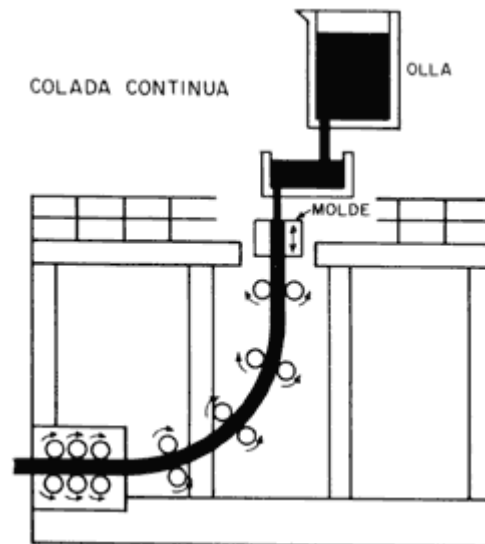


Figura 14. En el proceso de colada continua se producen barras de sección cuadrada (palanquillas) en un molde, directamente a partir de acero líquido. La colada continua produce un ahorro considerable de trabajo y energía con respecto a los procesos menos recientes que producen lingotes con el acero líquido, los cuales se calientan posteriormente al rojo vivo y se laminan para formar las palanquillas

El proceso de colada continua se desarrolló en Europa en los años cincuenta para producir secciones de acero directamente a partir de acero líquido. Anteriormente se producían lingotes que, más tarde, se laminaron en rodillos para formar las palanquillas. La colada continua, con la cual se procesa más de un tercio de la producción mundial de acero, se ilustra en la figura 14. El acero líquido de la olla se vacía en un recipiente (artesa) de donde, a velocidad controlada, pasa a un molde de sección cuadrada. Las paredes del molde se lubrican para que el acero no se adhiera y se mantienen "frías" refrigerándolas con serpentines de agua. El molde además, se hace vibrar para ayudar a que el acero se deslice. El molde no tiene tapa inferior porque el acero que ha solidificado en el extremo inferior, sirve como tapa. Después de pasar por el molde, el acero, ya sólido pero al rojo vivo, pasa por una serie de rodillos que lo jalan hasta llegar

a una plancha donde, con sopletes, la sección cuadrada se corta en tramos de la longitud deseada.

La palanquilla es la materia prima para los molinos de laminación donde, a base de rodillos, se conforman productos como varillas corrugadas, alambrones y barras de secciones cuadradas, hexagonales o redondas.

Debido a la sencillez de su proceso, las miniacerías tienen un coste de inversión considerablemente bajo comparado con el de las plantas integradas: no están técnicamente obligadas a mantenerse en operación permanentemente, es decir, pueden apagar sus instalaciones e irse una semana de vacaciones sin ningún problema, y su tamaño permite ubicarlas cerca de los grandes centros de consumo de acero y producción de chatarra para lograr un ahorro importante en materia de transportes.

Como las acerías suelen ser un problema para el medio ambiente, muchas miniacerías están equipadas con dispositivos para el control de emisiones contaminantes. En general, los hornos eléctricos de arco disponen de sistemas muy efectivos para la captura y precipitación de polvos contaminantes. Estos polvos, muy atractivos para las industrias cementeras por ejemplo, se recolectan en una campana colocada arriba del horno eléctrico y son llevados por conductos hasta unos depósitos donde se precipitan.

1.2. EL ACERO A LO LARGO DE LA HISTORIA

Hasta el siglo XIX, la producción de acero iba unida a la presencia de mineral de hierro, y los productores importaban leña como combustible, en una escala que llegó a deforestar grandes superficies boscosas de Europa. A partir de entonces, la producción hullera británica, con la capitalización consiguiente, atrajo el mineral de hierro del Atlántico europeo. Ya en el siglo XX, EE.UU en primer lugar, y sucesivamente Alemania, la URSS y el Japón han dado al traste con aquella hegemonía inicial, y es previsible el acceso de Francia y de China a niveles similares. Aunque en algunos casos (Suecia, Luxemburgo, Francia, España) el mineral de hierro haya atraído el carbón, generalmente el transporte ha seguido un sentido inverso, hasta el punto que ningún productor importante de hulla coquizable carece de industria siderúrgica, mientras que productores importantes de mineral de hierro (Malasia, Liberia, Canadá, Venezuela o Chile) no la tienen. Únicamente la fabricación de aceros especiales o a base de chatarra, que suele utilizar la electricidad como fuente de energía, puede localizarse en zonas

carentes de carbón y de hierro (Escandinavia, Italia, Barcelona o Santander). Puede darse el caso de que, agotadas las minas, la industria persista aprovechando los capitales, técnicos y mano de obra especializada (Birmingham, tendencia de Vizcaya). La concentración de capitales y la competencia es tan grande en la industria del acero (nexo imprescindible entre el mineral de hierro y la variadísima gama de las manufacturas mecánicas), que la primera unión económica de importancia mundial, el Mercado Común Europeo, empezó como CECA (Comunidad Europea del Carbón y del Acero).

1.3. ANTECEDENTES EN EL TRATAMIENTO DE LOS ACEROS

1.3.1. Aceros especiales

La fabricación de piezas, equipos y estructuras se hace con herramientas. Se necesitan guillotinas para cizallar; dados para forjar; brocas para perforar; moldes para conformar; martillos y cinceles para golpear. Hay un acero para cada uso.

A un contemporáneo y colaborador de Bessemer en Inglaterra, llamado Robert Mushet, se le atribuye la paternidad de los aceros especiales para fabricar herramientas.

Mushet fue lo que hoy en día se conoce como un diseñador de aleaciones. En realidad, los diseñadores de aleaciones son metalurgistas con "intuición educada": se la pasan con uno o más problemas en mente, generando nuevas aleaciones a base de prueba y error. La intuición educada les sirve para proponer los elementos de aleación que van a considerar ante un problema dado y los intervalos de composiciones donde se van a mover. Habiendo tantos elementos en la naturaleza y siendo infinitas las combinaciones posibles, los diseñadores de aleaciones dependen de su suerte, de su "intuición educada" y de su capacidad para producir y caracterizar el máximo número de combinaciones posibles.

Robert Mushet se basaba en el sistema hierro-carbono y experimentaba con adiciones de aleantes. Su primer gran éxito fue adicionar manganeso durante la aceración en los convertidores de arrabio en acero de Bessemer. El manganeso ayuda en el proceso de fabricación de acero y repercute positivamente en sus propiedades finales. Cuando el acero está procesándose en el estado líquido, el manganeso ayuda a desoxidarlo y captura al azufre, formando inclusiones alargadas que hacen al acero más maquinable,

además de incrementar su resistencia. Hoy en día casi todos los aceros comerciales, incluyendo los aceros simples al carbono, se fabrican con adiciones de manganeso.

En uno de sus múltiples experimentos, Mushet detectó que una barra de acero se templó cuando la extrajo del horno al rojo vivo y la dejó enfriar al aire lentamente. Esto llamó mucho su atención porque normalmente los aceros requieren de un enfriamiento muy rápido (sumergiéndose al rojo vivo en agua) para templarse. Mushet verificó la composición química de la barra de acero y encontró que, además de hierro, carbono y manganeso, había tungsteno.

De inmediato Mushet se dedicó a explorar cientos de combinaciones alrededor de la composición de su barra inicial, hasta que decidió salir al mercado con un acero con 2% de carbono, 2,5% de manganeso y 7% de tungsteno, aproximadamente. La primera compañía que comercializó el "acero especial de Robert Mushet" fracasó. Algunos años después otra compañía inglesa logró establecerse con este producto. Transcurrían entonces los años setenta del siglo XIX.

Fue necesario esperar varias décadas para que se descubrieran las propiedades más interesantes del acero de Mushet. Inicialmente, la atención se centró en la gran dureza de este acero y en su extraordinaria capacidad de resistir al desgaste. Se hicieron muchas herramientas para maquinar aceros que podían trabajar por horas sin necesidad de aliarse con frecuencia. Muchos años después se descubrió que la velocidad de corte de las herramientas podía incrementarse notablemente. El acero de Mushet es el antecedente de los modernos aceros de alta velocidad.

Hoy las herramientas para maquinar, llamadas herramientas de corte, se fabrican con aceros de alta velocidad. A principios del siglo XX, los aceros de alta velocidad llevaban un alto porcentaje de tungsteno (alrededor del 18%). Contenían cromo, en un 4%; además carbono, manganeso y silicio. Durante la segunda Guerra Mundial y la Guerra de Corea hubo una tremenda escasez de tungsteno. Como no era fácil en esos días pasar enfrente de Japón con el tungsteno de las minas de China y de Corea hacia América, se financiaron muchas investigaciones para sustituirlo. El molibdeno pronto destacó como sustituto y, para cuando los conflictos bélicos se habían apaciguado, el molibdeno era firme en el mercado. En la actualidad, la mayoría de los aceros de alta velocidad emplean al molibdeno en lugar del tungsteno.

Los aceros de alta velocidad a base de tungsteno se designaban con una letra "T" y uno o dos dígitos. Por ejemplo, los aceros T1 y T2 fueron muy populares en los años veinte y treinta. Ahora, las brocas y los cortadores de los talleres mecánicos se hacen con aceros de la serie "M", llamada así por el molibdeno.

Aparte de los aceros para herramientas de corte existen aceros especiales para el conformado de piezas en forjas y troqueles donde, además de la resistencia al desgaste por fricción, se logra una gran tenacidad para absorber muchísimos golpes. Propiedades similares se esperan de las herramientas para cizallar y agujerar, las cuales, además, deben tener una gran estabilidad dimensional en los tratamientos térmicos.

La selección del acero apropiado para cada tipo de herramienta es considerablemente difícil. No es nada fácil establecer una relación directa entre la adición de un aleante específico y la característica del acero que se modifica.

Además, hay que considerar variables como el procesado y los tratamientos térmicos, que suelen tener gran influencia. Sin embargo, en términos generales, puede decirse que las características enunciadas en la columna izquierda del cuadro 2 se ven afectadas, en orden decreciente, por los elementos que se enlistan en la columna derecha.

El dominio de los elementos que aparecen en la tabla 2 ha sido causa de conquistas, colonizaciones, guerras y golpes de Estado. El control de estos yacimientos se ha vuelto estratégico para muchos países. No son estratégicos por su cantidad, pues el volumen de acero fabricado con estos aleantes es inferior al 1% del total. Lo estratégico reside en que la transformación del total de acero fabricado, en equipos y estructuras, requiere de herramientas hechas a base de aceros especiales. Todavía más estratégico es el uso de aceros especiales en la manufactura de instrumental bélico.

CARACTERÍSTICAS	ELEMENTO
<i>Dureza a alta temperatura</i>	Tungsteno, molibdeno, cobalto, vanadio, cromo, manganeso.
<i>Resistencia al desgaste por fricción</i>	Vanadio, tungsteno, molibdeno, cromo, manganeso.
<i>Endurecimiento profundo</i>	Manganeso, molibdeno, cromo, silicio, níquel, vanadio.
<i>Distorsión mínima en el temple</i>	Molibdeno, cromo, manganeso.
<i>Resistencia al impacto</i>	Vanadio, tungsteno, molibdeno, manganeso, cromo.

Tabla 2. Efecto de los elementos aleantes en las características de los aceros para herramientas

El cromo, que influye en todas las propiedades que se mencionan en la tabla 2, está sumamente concentrado. El 88% de la producción mundial se localiza en la URSS (33%), Sudáfrica (23%), Filipinas (9%), Turquía (9%) y Zimbawe (7%). Otro ejemplo es el cobalto, pues solamente Zaire, Finlandia y Cuba concentran el 64% del total. Una idea global de la distribución de estos elementos aleantes se presenta en la figura 15.

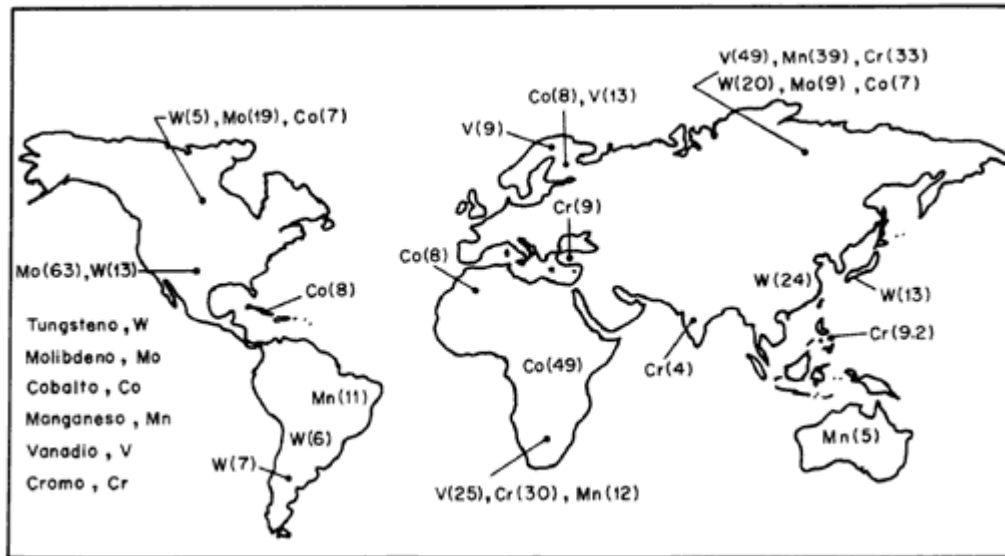


Figura 15. Principales zonas geográficas de extracción de minerales que contienen los elementos aleantes más importantes para la fabricación de aceros especiales. Su distribución sobre la corteza terrestre está sumamente concentrada en unos cuantos países. El número entre paréntesis que sigue al símbolo de cada elemento representa al porcentaje de la producción mundial localizada en la zona

1.3.2. El endurecimiento superficial

Existe una competencia entre la dureza de los aceros y su tenacidad. Es fácil conseguir que un acero sea duro aunque frágil, o que un acero sea dúctil y tenaz, pero blando. Pero incluir ambas propiedades en un mismo acero (es decir, que sea duro, dúctil y tenaz) no resulta fácil. Siempre se tiene que llegar a un compromiso porque, de lo contrario, una propiedad contrarresta a la otra.

Muchas herramientas dependen de su filo para poder trabajar en forma continua. Al perforar un acero, la broca sufre desgaste en sus filos. Como la resistencia al desgaste de los aceros es casi siempre proporcional a su dureza, cuanto más dura sea la broca, mayor duración tendrá su filo. No sería difícil conseguir aceros y otros materiales durísimos con los cuales fabricar las brocas; el problema sería enfrentar su fragilidad. Por un lado hay que fabricar la broca misma, lo que impone al acero la necesidad de dejarse cortar y maquinarse. Luego, la broca debe ser capaz mientras opera, de transmitir la energía de movimiento del taladro hacia el material que se perfora. La broca debe ser tenaz para soportar esfuerzos de flexión y torsión de manera permanente, además de impactos ocasionales.

Los metalurgistas han intentado encontrar una solución a este problema, teniendo en cuenta que las herramientas de corte solamente necesitan enfrentar el problema del desgaste en la superficie y no en su interior. Desde este punto de vista, el problema se simplifica: puede endurecerse considerablemente una capa de una a dos décimas de milímetro de espesor en el exterior de una herramienta mientras se mantiene su interior menos duro pero sumamente tenaz.

Hay técnicas de endurecimiento superficial de los aceros que se han practicado desde tiempo inmemorial. Se han localizado vestigios que indican los intentos de los antiguos por lograr superficies duras para sus herramientas y armas. Los herreros antiguos empleaban el carbono y el nitrógeno para endurecer la superficie de sus aceros. Al carbono lo tomaban de la leña y lo metían al acero al rojo vivo por contacto. También por contacto con la orina de animales, o la sangre de los esclavos, se lograba la penetración de nitrógeno en el acero candente.

En la segunda mitad del siglo XX, la metalurgia ha recurrido a la física de los plasmas para lograr el endurecimiento termoquímico (a temperaturas elevadas y mediante el empleo de agentes químicos endurecedores) de la superficie de los aceros.

El plasma se refiere a un cuarto estado de la materia constituido por un gas ionizado. Para que un gas se convierta en plasma se requiere de algún agente que rompa la neutralidad de los átomos o moléculas. Por ejemplo, en una lámpara de gas es el flujo de una corriente eléctrica a través del gas lo que mantiene el estado de plasma. En este caso, parte de la energía eléctrica se convierte en energía luminosa.

El paso de una corriente eléctrica a través del nitrógeno en estado gaseoso produce muchos cationes de nitrógeno, los cuales son atraídos hacia el acero conectando al acero a un polo eléctrico negativo.

El esquema de una cámara de plasma para la nitruración iónica de aceros se presenta en la figura 16. Es una cámara muy bien sellada que se somete a vacío extrayendo el aire que contiene con una bomba. Cuando la presión de aire es bajísima en la cámara (algo así como una millonésima de la presión atmosférica) se introduce, a través de una válvula bien regulada, una mezcla de nitrógeno e hidrógeno gaseosos. El flujo de N_2 y H_2 debe ser muy reducido para que, con la bomba de vacío en operación, la presión en la cámara se mantenga en una milésima de la presión atmosférica. La pieza de acero cuya superficie se desea nitrurar se instala sobre un portamuestras que tiene una

conexión eléctrica al exterior pero a la vez está aislada de la cámara. Esta instalación permite conectar la pieza de acero por el polo negativo, y al cuerpo de la cámara por el polo positivo, a los polos de una fuente eléctrica de alto voltaje. Usualmente el polo positivo se conecta también a tierra para dar seguridad al sistema.

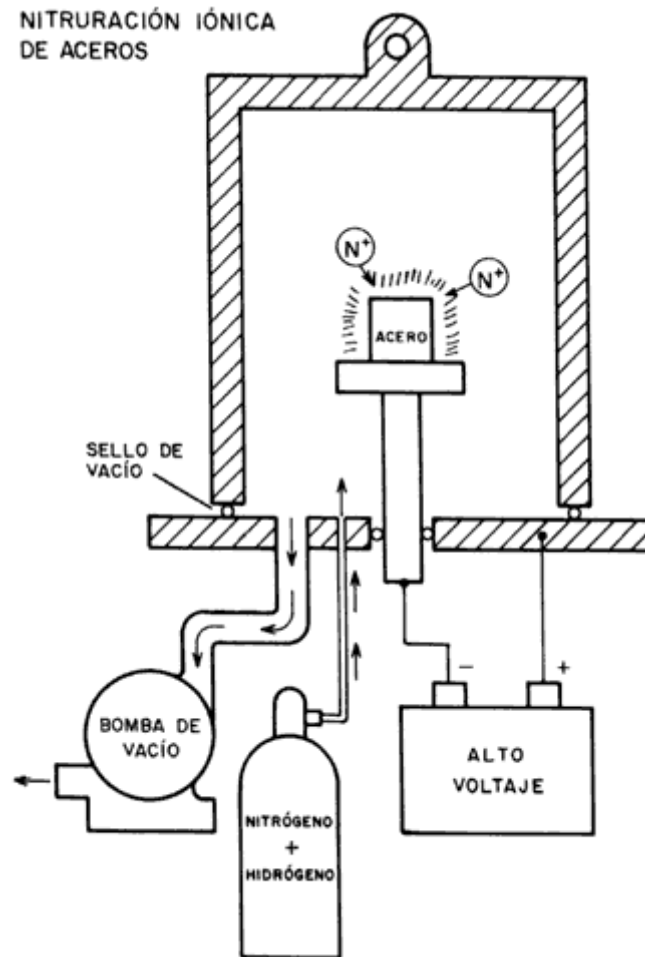


Figura 16. Diagrama de un sistema de plasmas para la nitruración iónica de los aceros

La pieza de acero se coloca sobre un portamuestra adentro de una cámara sellada herméticamente. Con una bomba de vacío se extrae el aire y, posteriormente, se inyecta un flujo muy pequeño de una mezcla de gases de nitrógeno e hidrógeno. La pieza de acero, a través del portamuestras, se conecta al polo negativo de una fuente eléctrica de alto voltaje. El flujo de corriente eléctrica a través de la mezcla de gases enciende un plasma luminoso con alto contenido de iones positivos de nitrógeno que son atraídos hacia la pieza de acero conectada al polo negativo.

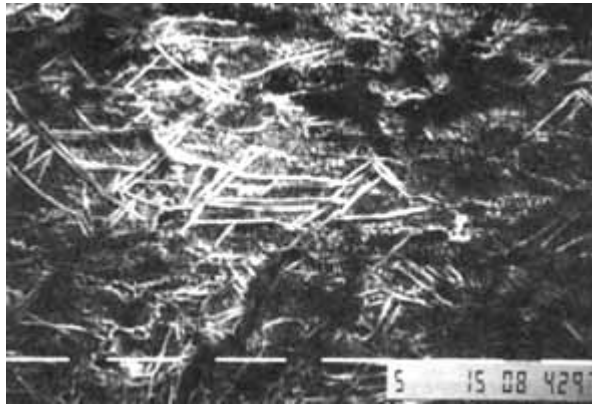


Figura 17. Metalografía de una superficie de un acero de ultra alto carbono endurecida con nitruración iónica. Las partículas en forma de fibras son nitruros de hierro

Cuando el voltaje de la fuente eléctrica se eleva hasta los 300 voltios, se forma una aureola luminosa alrededor de la pieza de acero, que indica que la mezcla gaseosa se encuentra en el estado de plasma. Al subir hasta los 500 voltios, la luminosidad del plasma aumenta y se produce una mayor concentración de iones de nitrógeno.

Aparte de producir iones, la descarga eléctrica libera energía térmica capaz de elevar la temperatura del acero hasta 500° C o más. A estas temperaturas, los iones de nitrógeno, que constantemente golpean la superficie del acero, encuentran condiciones muy favorables para penetrar al interior del acero por difusión. Es factible que en cosa de horas el nitrógeno se haya difundido y formado una corteza nitrurada de varias décimas de milímetro.

El nitrógeno, al entrar al acero, tiende a formar, con el hierro y con los elementos que contenga en su aleación, inclusiones de varias composiciones, tamaños y formas. Es común que se formen nitruros de hierro en forma de fibras, como se muestra en la micrografía de la figura 17.

2. CONCEPTOS GENERALES

2.1. DEFINICIÓN DE ACERO:

Según la norma UNE 36-004, el acero puede definirse como:

"Material en el que el hierro es predominante y cuyo contenido en carbono es, generalmente, inferior al 2%, conteniendo además otros elementos en diversas proporciones. Aunque un limitado número de aceros puede tener contenidos en carbono superiores al 2% este es el límite habitual que separa el acero de la fundición".

2.2. EL PAPEL DEL CARBONO EN EL ACERO

El acero es, básicamente, una aleación de hierro y de carbono. El contenido de carbono en el acero es relativamente bajo. La mayoría de los aceros tienen menos de 9 átomos de carbono por cada 100 de hierro. Como el carbono es más ligero que el hierro, el porcentaje de masa de carbono en el acero es casi siempre menos del 2%. La forma convencional de expresar el contenido de los elementos en las aleaciones es mediante el porcentaje con que cada uno contribuye a la masa total.

El carbono tiene una gran influencia en el comportamiento mecánico de los aceros. La resistencia de un acero simple con 0,5% de carbono es más de dos veces superior a la de otro con 0,1%. Además, como puede apreciarse en la figura 18, si el contenido de carbono llega al 1%, la resistencia casi se triplica con respecto al nivel de referencia del 0,1%.

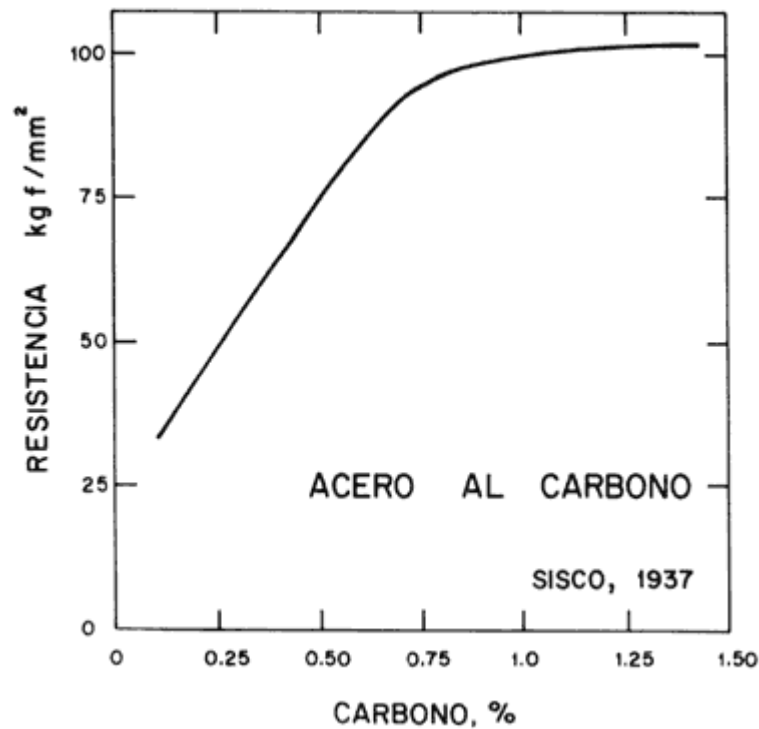


Figura 18. Efecto del contenido del carbono en la resistencia de los aceros

El carbono, sin embargo, generalmente reduce la ductilidad del acero. La ductilidad es una medida de la capacidad de un material para deformarse de forma permanente, sin llegar a la ruptura. Por ejemplo, el vidrio no es nada dúctil: cualquier intento por deformarlo, estirándolo o doblándolo, conduce inmediatamente a su fractura. El aluminio, por el contrario, es sumamente dúctil. Por ejemplo, de un solo golpe una rondana de aluminio se convierte en, por ejemplo, un tubo, como se muestra en la figura 19.

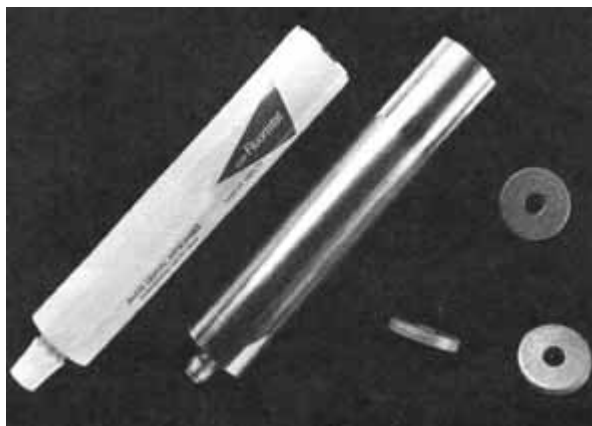


Figura 19. Tubo de pasta de dientes fabricado mediante la deformación de una rondana de aluminio. El aluminio es muy dúctil porque es capaz de soportar grandes deformaciones sin fracturarse

Un acero del 0,1% en carbono es más de cuatro veces más dúctil que otro con 1% de carbono y dos veces más que un tercero con 0,5% de carbono, como se indica en la figura 20. En esta gráfica, la ductilidad se expresa como un porcentaje. Éste se determina estirando una barra de acero hasta llevarla a la fractura para después calcular el incremento porcentual de su longitud.

2.2.1. Aceros de bajo, medio y alto carbono

Por su contenido de carbono, los aceros se clasifican como de bajo, medio y alto carbono. Las fronteras que separan a estos tipos de acero no están claramente definidas, aunque se entiende que los aceros de bajo carbono tienen menos del 0,25% de carbono en su aleación. Ellos son fácilmente deformables, cortables, mecanizables y soldables; en una palabra, son muy "trabajables". Además, con ellos se fabrican las mejores varillas para refuerzo de concreto, estructuras de edificios y puentes, la carrocería de automóviles y las corazas de los barcos.

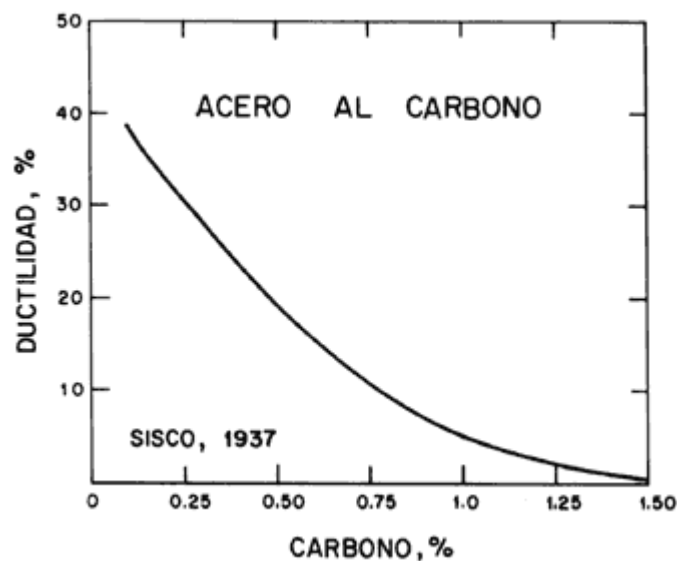


Figura 20. Efecto del contenido del carbono en la ductilidad de los aceros comunes

Los aceros de medio carbono, entre 0,25% y 0,6%, se emplean cuando se desea obtener mayor resistencia, pues siguen manteniendo un buen comportamiento dúctil aunque su soldadura ya requiere cuidados especiales. Con estos aceros se hacen piezas para maquinarias como ejes y engranajes.

Los aceros de alto carbono, entre 0,6% y 1,2%, son de muy alta resistencia, pero su fragilidad ya es notoria y son difíciles de soldar. Muchas herramientas son de acero de alto carbono: picos, palas, hachas, martillos, cinceles, sierras, etc. Los rieles de ferrocarril también se fabrican con aceros de ese tipo.

2.2.2. Aceros de ultra alto carbono

En cuanto a los aceros que contienen alrededor del 1,5% de carbono, puede creerse que son tan frágiles que no vale la pena ni siquiera estudiarlos. Pero metalurgistas de la Universidad de Stanford, Sheiby y Wadsworth se dedicaron a estudiarlos, abriendo un campo de investigación en lo que ahora se llama aceros de "ultra alto carbono".

Se desentrañaron las peculiares características de estos aceros: gran tenacidad y resistencia, lo que permite fabricar infinidad de piezas donde la resistencia al esfuerzo, al impacto o a la fatiga son de vital importancia.

2.3. CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS

Con el fin de estandarizar la composición de los diferentes tipos de aceros que hay en el mercado, la Society of Automotive Engineers (SAE) y el American Iron and Steel Institute (AISI) han establecido métodos para identificar los diferentes tipos de acero que se fabrican. Ambos sistemas de clasificación son muy similares.

En ambos sistemas se utilizan cuatro o cinco dígitos para designar al tipo de acero. En el sistema AISI también se indica el proceso de producción con una letra antes del número. La nomenclatura es como sigue:

- Primer dígito: es un número con el que se indica el elemento predominante de aleación. 1 = carbono, 2 = níquel, 3 = níquel – cromo, 4 = molibdeno, 5 = cromo, 6 = cromo – vanadio, 8 = triple aleación, 9 = silicio magnesio.
- Segundo dígito: es un número que indica el porcentaje aproximado en peso del elemento de aleación señalado en el primer dígito. Por ejemplo un acero 2540, indica que tiene aleación de níquel y que esta es del 5%.

Conceptos generales

- Tercer y cuarto dígito: indican el contenido promedio de carbono en centésimas; así en el ejemplo anterior se tendría que un acero 2540 es un acero con 5% de níquel y 4% de carbono.
- Cuando en las clasificaciones hay presente una letra al principio, ésta indica el proceso que se utilizó para elaborar el acero, siendo los prefijo los siguientes:
 - A = acero básico de hogar abierto
 - B = acero ácido de Bessemer al carbono
 - C = acero básico de convertidor de oxígeno (BOF)
 - D = acero ácido al carbono de hogar abierto
 - E = acero de horno eléctrico

Así pues, la nomenclatura puede resumirse mediante el siguiente ejemplo:

A10XYY

donde A = proceso de fabricación
 10 = tipo de acero
 X = % de la aleación del tipo de acero
 YY = % de contenido de carbono en centésimas.

3. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL ACERO

Tal y como se ha indicado anteriormente, el acero es una aleación de hierro y carbono, con un contenido variable en este último elemento. A continuación se comentan algunas de las propiedades físicas que presenta.

3.1. ESTRUCTURA CRISTALINA

Cuando un material cristalino cambia la forma de ordenar sus átomos en el espacio al alcanzar una determinada temperatura, se dice que ha sufrido una transformación *alotrópica*, y a dicha temperatura se le denomina temperatura de transformación alotrópica.

El hierro es un material muy dúctil y maleable (permite elongaciones del 40%), motivo por el cual no es demasiado útil para determinados usos. Se caracteriza por ser fácilmente oxidable y por tener temperaturas de fusión entre 1 536 y 1 539° C. Al aumentar su temperatura se reblandece, facilitando su procesado. Si lo fundimos, hecho que sucederá al sobrepasar la temperatura de fusión, será posible obtener piezas por moldeo (conformación por moldeo). Es un buen conductor de la electricidad y posee propiedades magnéticas. Pero el principal inconveniente que presenta el hierro como material industrial es su elevada densidad, es decir, posee una gran masa por unidad de volumen. Esto implica que las piezas obtenidas son de un gran peso.

3.1.1. Fases alotrópicas del acero y sus características

El acero presenta tres variedades alotrópicas:

- Cuando funde a 1 539° C y posteriormente solidifica, su sistema cristalográfico es BCC (Cúbico Centrado en el Cuerpo o Body Cubic Centered). A esta fase se le denomina fase δ (delta), la de máxima temperatura.
- Cuando reducimos la temperatura a entre 1 400° C y 900° C, su sistema cristalográfico cambia a FCC (Cúbico Centrado en las Caras o Face Cubic Centered). Ésta es la denominada fase γ (gamma).

- Cuando se enfría desde 900° C hasta temperatura ambiente, su estructura cristalográfica cambia nuevamente a BCC. Esta fase recibe el nombre de fase α (alfa), y es la de mínima temperatura.

Características de cada fase alotrópica:

- Fase α : presenta dos átomos por celda, y no disuelve el carbono. La máxima cantidad de carbono que puede contener es de un 0,008% a temperatura ambiente. A 723° C la máxima solubilidad del carbono aumenta al 0,025%.
- Fase γ : posee cuatro átomos de carbono por celda. Presenta mayor volumen por celda o cubo que la fase α , es decir, que sus parámetros de red son mayores. Pero el número de átomos por unidad de volumen se mantiene constante. La solubilidad del carbono es del 2% alrededor de los 1 130° C.
- Fase δ : el volumen por celda es semejante al del hierro en fase α , y la solubilidad del carbono vuelve a ser limitada. Hacia 1 487° C sólo admite un 0,07%.

3.1.2. Aleaciones binarias

En el caso de las aleaciones binarias, es importante determinar dos parámetros fundamentales:

1. La estructura, es decir, qué fases están presentes en la aleación.
2. La composición, es decir la cantidad de carbono que contiene. En general a temperatura ambiente el carbono se encuentra en forma de cementita o Fe_3C (carburo de hierro). A altas temperaturas, el Fe_3C se disocia, y el carbono forma una solución sólida con el hierro en la fase γ .

3.1.3. Aleaciones binarias Fe – C

Según la cantidad de carbono que contiene el hierro podemos hablar de las siguientes estructuras:

- a. Aceros, o aleaciones Fe – C que contienen un 2% en carbono
- b. Fundiciones, o aleaciones Fe – C con más del 2% de carbono.

Además, es posible incorporar otros elementos al hierro, en lugar de o además del carbono como por ejemplo el cromo, el níquel, el vanadio, etc., usados primordialmente para mejorar o potenciar determinadas propiedades.

Dentro de los aceros encontramos tres tipos principales, según su % de carbono:

- a. Aceros hipoeutectoides, con un contenido en carbono inferior al 0,89%.
- b. Aceros eutectoides, con un contenido en carbono igual al 0,89%.
- c. Aceros hipereutectoides, con un % en carbono superior al 0,89%.

Dentro de las fundiciones existen también tres tipos:

- a. Fundiciones hipoeutécticas, con un contenido en carbono comprendido entre un 2 y un 4,3%.
- b. Fundiciones eutécticas, con un 4,3% de carbono.
- c. Fundiciones hipereutécticas, con más de un 4,3% de carbono.

Eutética	$L \rightarrow \alpha + \beta$	
Peritética	$\alpha + L \rightarrow \beta$	
Monotética	$L_1 \rightarrow L_2 + \alpha$	
Eutectoide	$\gamma \rightarrow \alpha + \beta$	
Peritectoide	$\alpha + \beta \rightarrow \gamma$	

Figura 21. Tipos de reacciones invariantes

El máximo contenido en carbono que admite un hierro es de un 6,67%, que corresponde a la proporción de carbono en la cementita o Fe_3C .

Los aceros pueden trabajarse por forja: se calienta y se trabaja cuando está al rojo vivo, manteniendo el estado sólido.

Las fundiciones sólo permiten la conformación en estado líquido. Acostumbran, además, a contener impurezas de fósforo, azufre, silicio y otros elementos.

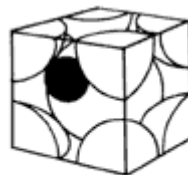
3.1.4. Diagrama de equilibrio de las aleaciones Fe – C

3.1.4.1. Constituyentes de equilibrio y no equilibrio de las aleaciones Fe – C

Las fases destacadas del diagrama de fases de las aleaciones binarias hierro – carbono son:

- Ferrita

Aleación sólida intersticial en hierro α donde se sitúan algunos átomos de carbono. La solubilidad del carbono es del 0,008%, mientras que a 723° C presenta una solubilidad del 0,025%. Esta fase se mantiene hasta los 900° C. En este caso, aunque permanece en estado sólido, la dureza es de 90 HB (baja), la elongación del orden del 30 – 40% y la resistencia a la rotura es de unos 28 kg/mm². Presenta propiedades magnéticas.



FERRITA

- Cementita

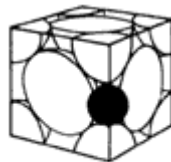
Es el constituyente más duro. Las proporciones de Fe₃C son siempre constantes e iguales al 6,67% de carbono, y el resto de hierro. Es el más frágil, pues se rompe con mayor facilidad que el resto cuando se le aplica fuerza de choque. Su dureza es de 700 HB, y cristaliza en el sistema ortorrómbico. Las tres dimensiones del paralelepípedo son diferentes ($a \neq b \neq c$). Posee propiedades magnéticas a temperatura ambiente, pero las pierde a entre 210 – 220° C. Tiene gran resistencia a la compresión.

- Perlita

Es una mezcla eutectoide de ferrita y cementita. Se forma cuando la proporción de carbono es del 0,89%. Las capas alternas presentan un 13,5% de cementita (componente de alto contenido en carbono) y un 46,5% de ferrita (componente de bajo contenido en carbono). Dicha proporción se mantiene constante. La perlita aparece cuando un acero o aleación Fe – C se enfría lentamente, desde que se encuentra a temperatura superior a la crítica hasta la temperatura ambiente. Sus propiedades básicas son una mayor dureza que la ferrita pero menor que la cementita (aproximadamente 200 HB); es muy deformable pero no permite elevadas elongaciones (máximo un 15% de deformación). Presenta una resistencia a la rotura de 80 kg/mm².

- Austenita

Se trata de una solución sólida intersticial de carbono en hierro γ . La solubilidad máxima de carbono es del 2% a 1 130° C, pero en función de la temperatura dicha solubilidad podrá variar hasta un mínimo de 0,008%. Es estable a temperaturas superiores a 723° C (temperatura crítica), mientras que por debajo no existe por no ser estable. Es muy dúctil, pues permite elongaciones del 30%; también es blando (300 HB) y su resistencia a la rotura es de 100 kg/mm². No presenta propiedades magnéticas. En especial, tiene gran resistencia al desgaste.



AUSTENITA

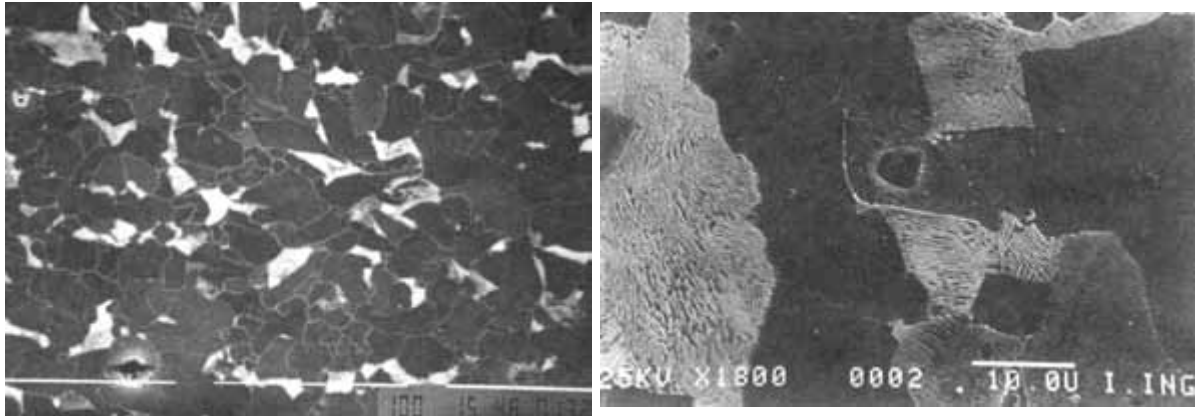


Figura 21. (a) Metalografía de un acero de bajo carbono (0,18%). Los granos oscuros son de ferrita y los granos claros son de perlita. (b) Detalle de los granos de perlita formados por láminas claras (cementita) y oscuras (ferrita)

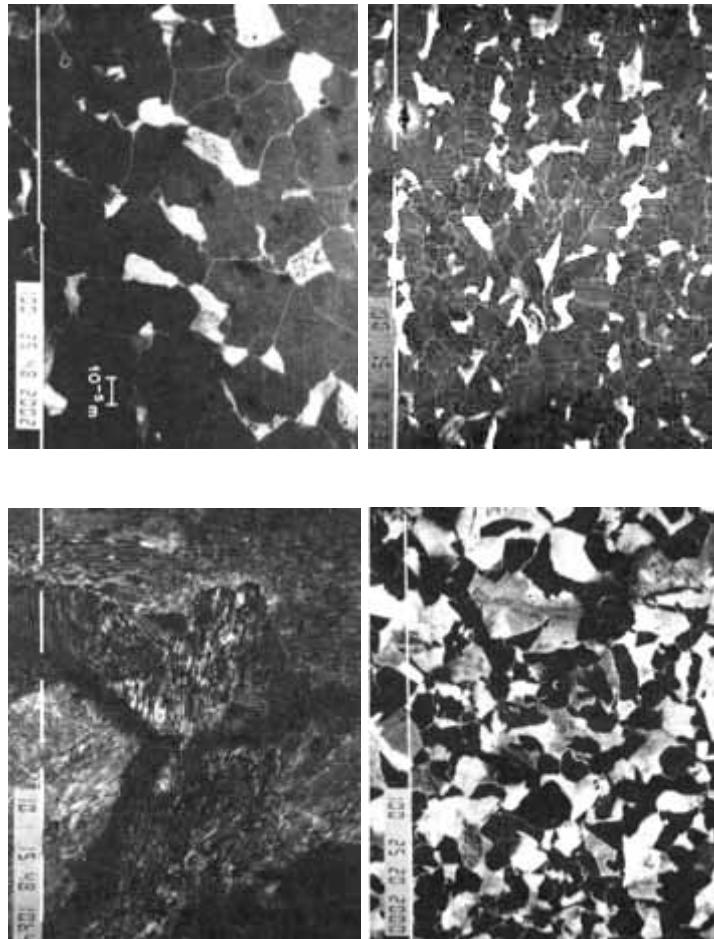
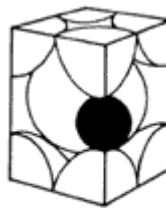


Figura 22. Cuatro metalografías de acero de bajo, medio y alto carbono. La perlita es escasa en los aceros de bajo carbono y aumenta hasta ocupar casi todo el espacio en los aceros de alto carbono

Constituyentes que no son de equilibrio:

- Martensita

Solución intersticial sobresaturada de carbono en hierro α . Se obtiene por enfriamiento rápido desde una estructura austenítica. La estructura cristalina se deforma, es decir, no es un cubo, sino un paralelepípedo de base cuadrada. El % de carbono es variable, pudiendo llegar al 1%, y dependerá del contenido en carbono que posea antes del enfriamiento. Las propiedades físicas varían con el contenido en carbono: la dureza, la fragilidad y la resistencia mecánica aumentan al incrementar el % en carbono, teniendo su punto máximo en un 0,9%. Presenta poca elongación (no se deforma fácilmente) y propiedades magnéticas. Tiene gran dureza debido a las tensiones internas que se crean en la estructura por la presencia del carbono.



MARTENSITA

- Troostita

Es un agregado fino de cementita y hierro α o ferrita. Es una variante de la perlita. Se puede obtener mediante dos procedimientos diferentes:

- Enfriando a una velocidad ligeramente inferior a la crítica de temple (velocidad de enfriamiento necesaria para pasar de estructura austenítica a martensita, y por tanto, velocidad elevada).
- Por transformación isotérmica, manteniendo al acero en forma austenítica a entre 500 y 600° C durante varias horas.

- Sorbita

Agregado fino de cementita y hierro α ; se trata de una variante de la perlita. Se obtiene mediante dos modificaciones:

- Enfriamiento desde el estado austenítico a velocidad inferior a la crítica de temple.

- Por transformación isotérmica, manteniendo la temperatura entre 600 – 650° C durante un cierto tiempo.

Estas tres estructuras (perlita, troostita y sorbita) son constituyentes laminares que se forman variando la velocidad de enfriamiento.

- Bainita

Se obtiene sólo por transformación isotérmica desde austenita a una temperatura de entre 250 – 550° C. Según el intervalo de temperaturas se pueden producir dos tipos de bainita.

- Superior: cuando la temperatura está entre 500 y 550° C (en la zona alta).
- Inferior: cuando la temperatura oscila entre 250 y 400° C.

Está formada por capas delgadas de Fe₃C o cementita en una matriz de ferrita (por lo tanto, posee una estructura similar a la de la perlita). Las dos bainitas presentan aspectos diferentes:

- La bainita superior tiene dichas capas más paralelizadas.
- La bainita inferior presenta un aspecto más acicular (forma de agujas).

Constituyentes de equilibrio:

- Ledeburita

Es el constituyente eutéctico de las aleaciones Fe – C. Pertenece al grupo de las fundiciones, con una proporción fija de carbono del 4,3%, aunque no es un compuesto químico. La encontramos a temperaturas inferiores o iguales a 1 130° C, hasta un mínimo de 723° C. A partir de aquí se convierte en ferrita y cementita (es decir, perlita). Está formada por un 45% de austenita con un 2% de carbono aproximadamente y un 52% de cementita.

- Steadita

Se trata de una aleación ternaria. Es un constituyente eutéctico de las aleaciones Fe - C, y más de un 0,15% de fósforo, es muy común. Contiene aproximadamente un 10% del fósforo que lleva una aleación.

- Grafito

Reduce la dureza de la aleación en la que se encuentra. Le otorga menor plasticidad y elasticidad. Se reduce también la resistencia mecánica, pero se incrementa la resistencia al desgaste y a la corrosión. Actúa como lubricante y se puede presentar en forma laminar o nodular.

3.1.4.2. Diagrama de equilibrio de las aleaciones Fe-C

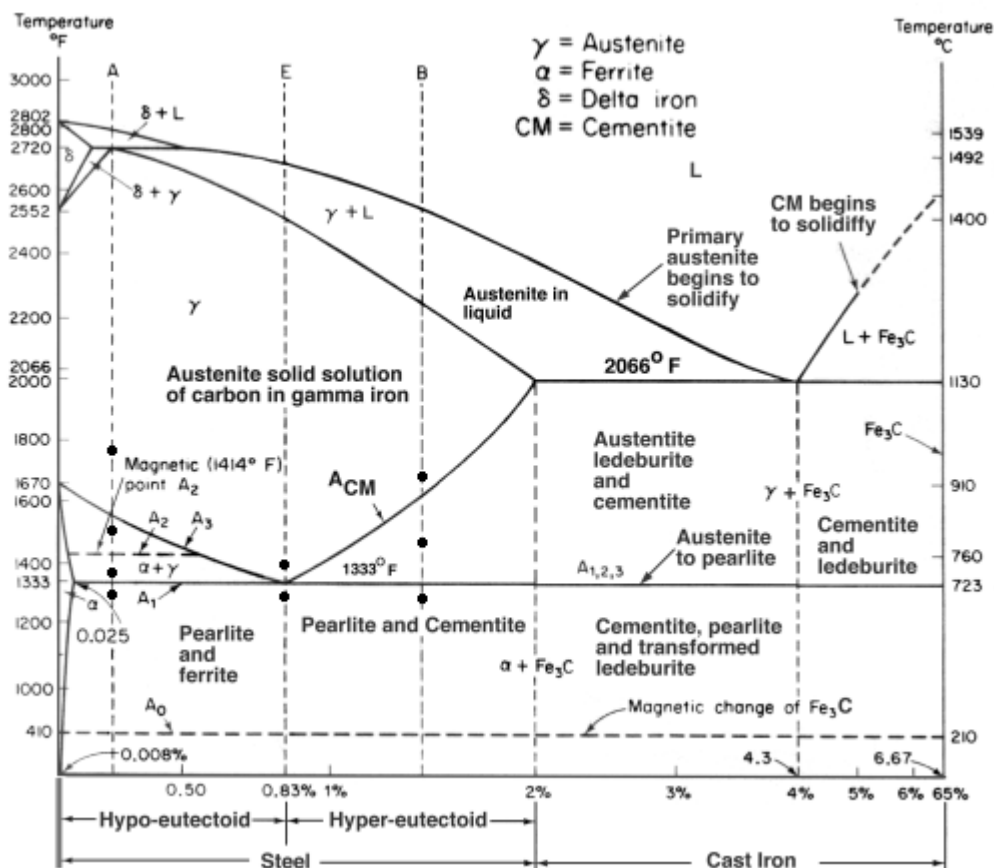


Figura 23. Diagrama de fases de las aleaciones hierro-carbono

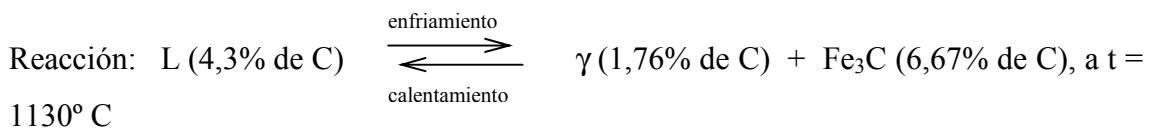
Presenta dos equilibrios:

- Estable: aleación que consta de hierro y carbono en forma de grafito.
- Metaestable: aleación de hierro y cementita.

Fundamentalmente, se habla de equilibrio estable en el caso de fundiciones, pues en ellas el contenido en carbono es muy elevado, por lo que se formará grafito más fácilmente; por su parte, el equilibrio que rige a los aceros es el metaestable.

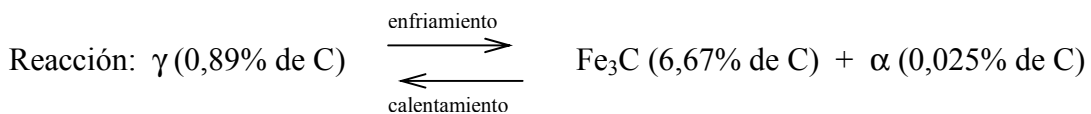
3.1.4.2.1. Puntos y líneas a destacar en el diagrama de equilibrio Fe – C

- Punto C (4,3% de C, 1130° C): punto eutéctico. Marca el límite entre la forma de líquido y la ledeburita: por encima de estas condiciones tendremos líquido. Si se deja que llegue al equilibrio a 1130° C, se obtendrá ledeburita.

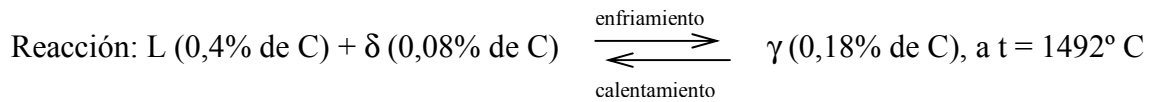


La ledeburita contiene el 48% en austenita más un 52% en cementita.

- Punto S (0,89% de C, 723° C): punto eutectoide. En este caso, marca el equilibrio entre austenita y perlita (mezcla de un 13,5% de cementita y un 86,5% de ferrita).



- Punto E: marca la máxima solubilidad del carbono en la austenita o hierro γ .
- Punto J (0,18% de C, 1492° C): punto peritéctico, en el que la solidificación de la aleación tiene lugar a una temperatura intermedia entre los puntos de fusión de cada uno de los elementos que componen la aleación. La transformación entre líquido y hierro δ da lugar a hierro en fase γ .



- Punto P: es la máxima solubilidad del carbono en hierro α . La proporción de carbono en la ferrita oscila entre 0,008 y 0,025%.
- Línea GS: es la línea límite de mínima existencia de austenita pura. Por debajo de dicha línea existe una mezcla de austenita + ferrita.
- El cambio magnético de la ferrita se produce a 768° C . Por debajo de esta temperatura, la ferrita es magnética, mientras que por encima pierde esas propiedades.
- Línea SE: es la línea superior de existencia de cementita en los aceros.
- Línea A_0 (210° C): indica el cambio magnético de la cementita. Por debajo de 210° C presenta propiedades magnéticas, mientras que por encima las pierde.
- Punto D ($6,67\% \text{ de C}$, 1536° C): es el punto de fusión de la cementita pura
- Punto N: punto de transformación alotrópica de hierro δ a hierro α .

3.1.5. Inclusiones

Pueden encontrarse otros compuestos o elementos en las aleaciones Fe – C. Estos constituyentes se denominan inclusiones. Se trata de defectos del material a nivel microscópico. Pueden ser metálicas o no metálicas.

- Metálicas: elementos de aleación de carácter metálico que se añaden. Por ejemplo cromo, níquel, molibdeno, manganeso, wolframio, vanadio, cobre, etc.

Estos elementos dan lugar a los llamados aceros especiales. Algunos de los elementos se disuelven en hierro α , como es el caso del níquel, el cromo, el aluminio el manganeso o el cobre, mientras que otros forman carburos (es decir, se combinan con el carbono que forma parte del acero), cosa que provoca un incremento de la dureza de la fundición o el acero y su resistencia al desgaste. Dentro de este segundo tipo tenemos:

- Carburos simples: unión de carbono + elemento
- Carburos dobles: unión de hierro + elemento + carbono
- Carburos mixtos: carburo simple + carburo doble

A temperaturas altas los carburos se disuelven en el hierro, formando una solución sólida en la austenita.

- Metálicas con no metálicas: al añadir silicio (silicatos o silicoaluminatos de hierro, manganeso o cromo), aluminio (óxido de aluminio o alúmina, Al_2O_3), titanio (óxidos, nitruros, cianonitruros), manganeso (silicatos y sulfatos).

Los elementos metálicos también se pueden encontrar emulsionados o dispersos en la masa de acero.

- No metálicas: compuestos extraños al metal que suelen provocar reducción de las propiedades mecánicas. Son perjudiciales, y provienen de las reacciones de oxidación y desoxidación que tienen lugar durante los procesos de siderurgia y metalurgia.

Ejemplo: sulfuros (especialmente de manganeso), óxidos (de aluminio, compuesto muy duro y frágil que se va desintegrando dando lugar a pequeños gránulos), silicatos (de aluminio, de manganeso, de hierro, de cromo, que son duros pero no tan frágiles).

Añadiendo carbono a la matriz de hierro obtenemos un nuevo material, denominado acero. Una de sus principales diferencias es que el acero es más duro que el hierro. Por lo tanto, podríamos definir al acero como una aleación de hierro y carbono.

La metalurgia es todo el conjunto de procesos físico – químicos que van orientados a separar el hierro de las impurezas que puede contener (de silicio, fósforo, azufre, y carbono principalmente). Consistiría, por tanto, en la separación, respecto del mineral bruto de partida, entre mena (elemento de nuestro interés) y ganga (el conjunto de

impurezas o elementos indeseables que es preciso eliminar para aumentar el valor de la mena y permitir o facilitar su procesado posterior). El hierro hasta con un contenido del 0,0208% de C se considera puro.

3.1.6. Efecto de las impurezas en las aleaciones Fe – C

Es muy difícil eliminar al 100% las impurezas. Siempre se encontrarán determinadas cantidades de silicio, manganeso, azufre, fósforo, oxígeno, nitrógeno e hidrógeno.

Veamos los efectos de cada elemento sobre la aleación:

- Silicio y manganeso

Durante el proceso de obtención de una aleación Fe – C, se debe realizar una desoxidación: eliminar los óxidos de la masa aleada, presentes en forma de inclusiones, como por ejemplo el óxido férrico, Fe_2O_3 . El silicio y el manganeso evitan la existencia de dichos óxidos. El silicio, por su parte, debe estar presente entre el 0,35 y el 0,40%. Con su presencia se incrementa el límite de fluencia, pero disminuye la capacidad de deformación del material en frío, lo cual implica una fragilización del material.

El manganeso, por otro lado, debe estar presente en proporciones comprendidas entre el 0,5 y el 0,8%. Su presencia incrementa la resistencia a altas temperaturas del acero o fundición en el que se encuentra, además de su dureza y templabilidad (capacidad del acero de profundizar en su espesor el efecto del temple (aumento de la dureza).

- Azufre

Su presencia da lugar a la formación de sulfuros, especialmente de sulfuro de hierro, FeS . No es soluble en la red cristalina, y forma inclusiones. El FeS , a $988^\circ C$ forma una mezcla eutéctica: se coloca en los límites de grano y se reblandece posteriormente, haciendo que el acero pierda sus propiedades mecánicas. Es la llamada fragilidad al rojo. Para evitar este efecto, se debe adicionar manganeso, de forma que se impedirá la formación de FeS por la formación de MnS . Pero es conveniente regular la cantidad de Mn adicionada, pues si se genera demasiado MnS puede dar lugar a los mismos efectos negativos del sulfuro de hierro.

- Fósforo

Se disuelve en el hierro α y en el hierro γ , pero si se encuentra en grandes cantidades, puede formarse fosfuro de hierro (Fe_3P), compuesto que puede provocar una deformación en la red cristalina, incrementando el límite de tracción y de fluencia, pero reduciendo a su vez la plasticidad y la viscosidad del acero. En general, se recomienda que el contenido de fósforo en el acero sea de entre 0,025 y 0,25%.

- Hidrógeno, oxígeno y nitrógeno

Facilitan la formación de Fe_2O_3 , Fe_3N_2 , Al_2O_3 y SiO_3 .

4. TRATAMIENTOS TÉRMICOS Y TERMOQUÍMICOS DEL ACERO

Estos tratamientos se emplean fundamentalmente para incrementar superficialmente la dureza del acero y su tenacidad o resistencia al choque, pero al mismo tiempo, mantener su capacidad de deformación a nivel interno.

4.1. TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Consisten en calentar el acero a elevadas temperaturas (por encima de la temperatura eutectoide, 723° C) para conseguir la formación de austenita y después mantener esa temperatura durante tiempo suficiente para que la transformación sea completa. Después, se enfría a temperaturas diferentes para que la austenita no se transforme en perlita, sino en otro constituyente con unas propiedades de dureza mejores.

Estos tratamientos modifican la constitución (forma alotrópica del hierro y el estado del carbono), pero no la composición. También modifican la estructura, tanto el tamaño de grano como el repartimiento de los constituyentes que se obtienen en la masa).

4.1.1. Introducción

Para conocer cuál es el tratamiento más indicado a aplicar, debe conocerse el diagrama de las “transformaciones isotérmicas de la austenita” (diagrama TTT: temperatura, tiempo y transformación, o diagrama de la S).

Estas curvas son diferentes para cada tipo de acero.

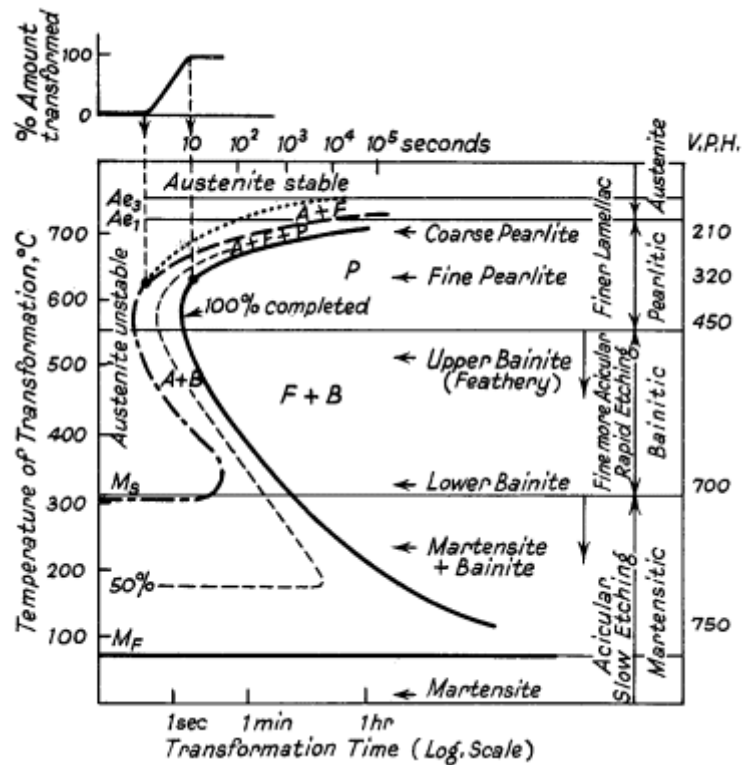


Figura 24. Diagrama TTT (temperatura-tiempo-transformación)

En el diagrama, M_s indica la temperatura inicial de la transformación de la austenita. Se verá modificada según cuál sea el % en carbono.

M_f acostumbra a ser una temperatura 250°C inferior a la de M_s , e indica la temperatura final de la transformación de la austenita.

La presencia de níquel, manganeso y cobalto acostumbra a rebajar la temperatura crítica (723°C).

Factores que influyen en el gráfico:

- a. Concentración de carbono en el acero
- b. Tamaño de grano: cuanto más grande, menor será la velocidad necesaria para conseguir el temple (o velocidad crítica de temple). La curva TTT, en este caso, se desplazará hacia la derecha.

4.1.2. Temple

4.1.2.1. Tipos de temple

4.1.2.1.1. Temple estructural

Incrementa las propiedades mecánicas. Se suele aplicar sobre piezas con una forma ya determinada.

El procedimiento es como sigue: primero debe calentarse la pieza hasta una temperatura por encima de la crítica. Llegado el momento, cuando toda la masa de acero se haya transformado en austenita, debe enfriarse rápidamente. De esta manera, se impide que el carbono difunda fuera de la red austenítica, formándose martensita (e forma tetragonal). Este fenómeno produce tensiones en la zona del material donde ha tenido lugar el enfriamiento, las cuales contribuyen a aumentar la dureza del material y su resistencia a la tracción.

Si se somete a temple toda la pieza, aumentará la dureza, pero se reduce su tenacidad y su deformabilidad, con lo que se incrementa su fragilidad. Para evitar este efecto, sólo debe templarse la parte superficial de la pieza, a fin de endurecerla, manteniendo así el núcleo en las condiciones iniciales de tenacidad.

4.1.2.1.2. Temple de precipitación

Se usa sobre cobre, manganeso, aluminio... Su finalidad es la misma que en casos anteriores: endurecer el material.

En ocasiones, es posible que no interese que toda la austenita se transforme en martensita.

Cuanto más grande sea el nivel de calentamiento, mayor será el tamaño de grano.

Etapa de enfriamiento: la velocidad de enfriamiento o velocidad crítica de temple es la velocidad mínima de enfriamiento necesaria para obtener martensita. En el acero puede ser de $600^{\circ}\text{C}/\text{min}$ o de $150^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

Si la velocidad aplicada es superior a la crítica de temple, garantizaremos que toda la masa de austenita pasa a martensita.

La velocidad crítica de temple se determina mediante el diagrama TTT: es la tangente a la nariz en el momento en que empieza la transformación.

Ante diferentes narices, cogeremos la tangente de mayor pendiente.

4.1.2.1.3. Temples normales

Se procede de forma similar a los casos anteriores. Con un buen enfriamiento, se consigue martensita.

4.1.2.1.4. Temples interrumpidos

El calentamiento tiene lugar de la misma manera, pero el enfriamiento es el que sufre la variación. Éste consiste en que, primeramente, empieza en un medio enérgico, y a mitad del proceso, se cambia a otro medio más suave. Por ejemplo, agua-aceite, agua-aire, aceite-aire son los medios más utilizados, y su uso dependerá del tipo de acero.

4.1.2.1.5. Temples isotérmicos

Para llegar a la austenización debe mantenerse la temperatura constante en algún punto del proceso, que será durante el enfriamiento. En este caso, se usa el baño de sales fundidas. Dos variantes:

- Austempering, por el cual se obtiene bainita
- Martempering, obteniéndose martensita

4.1.2.1.6. Temples superficiales

Debe calentarse un cierto espesor de la superficie de la pieza, y posteriormente el enfriamiento se lleva a cabo de la misma forma, con lo cual conseguimos afectar sólo a la superficie. El calentamiento puede desarrollarse mediante soplete (temple oxeacetilénico) o por inducción (mediante campos eléctricos y magnéticos).

4.1.2.2. Factores que influyen en el temple

- a. Composición: según cuál sea, variará la forma del diagrama TTT, y por tanto, la velocidad. Cuanto mayor sea el % en carbono, menor será la velocidad de

temple necesaria. La presencia de elementos de aleación también contribuyen a reducir la velocidad crítica de temple.

- b. Tamaño de grano: si es grueso, la velocidad crítica de temple será menor que si el grano es fino.
- c. Tamaño de las piezas: si la pieza es pequeña en cuanto a espesor, la variación de temperatura entre la superficie y el centro de la pieza será menor, por lo que la velocidad crítica de temple no será tan elevada como si el espesor fuera mayor.
- d. Medio de enfriamiento: cuando se enfría el material, se forma una capa de vapor alrededor de la pieza. Este vapor evacua el calor de forma peor que el agua en estado líquido. Pasado un cierto tiempo, una cierta porción de líquido en contacto con la pieza empieza a hervir. En ese momento, el intercambio de calor está muy favorecido debido a la formación de corrientes de convección. Una vez que el metal está más frío y el agua más caliente (debido al intercambio de calor por convección), las temperaturas empiezan a aproximarse mutuamente, hasta alcanzar el equilibrio térmico. En este estado, el intercambio de calor es nulo, y a medida que nos aproximamos a él va reduciéndose.

Medios de enfriamiento

- Agua: es el fluido que mayor entalpía de transformación de fase tiene, y que mayor cantidad de calor es capaz de disipar.
- Aceites minerales: deben ser de baja viscosidad, no volátiles y resistentes a la oxidación a altas temperaturas. Presentan una capacidad de evacuación del calor inferior a la del agua, motivo por el cual se usa en piezas con un pequeño espesor, así como para aceros de alta aleación.
- Plomo fundido: con un punto de fusión de aproximadamente 300° C. Posee una buena conductividad térmica y eléctrica. Evacua rápidamente el calor.
- Mercurio: se usa en casos muy específicos, controlando mucho su temperatura, pues puede vaporizar, pudiendo producir problemas de seguridad.
- Sales fundidas

4.1.2.3. Templabilidad

Es la capacidad o facilidad que muestra una pieza a ser penetrada por el temple. Depende de la composición del acero de partida. A mayor espesor, mejor templabilidad.

Depende de estos factores:

- Medio de enfriamiento, que provocará un cambio en la velocidad crítica de temple
- Propiedades del acero tratado (composición, tamaño de grano, estructura, estado superficial)
- Elementos de aleación

4.1.2.2.1. Valoración de la templabilidad

La templabilidad se valora mediante el “ensayo de las fracturas”, método cuantitativo, simple y fácil de llevar a cabo, empleado sobre aceros de baja aleación.

El método es como sigue:

Se toman probetas cilíndricas del acero a ensayar. Se someten a temple y se enfrían posteriormente en agua. Una vez enfriadas, se someten a un impacto que provoca su rotura. Observando microscópicamente la fractura puede apreciarse la zona que ha sufrido temple (reconocible por la presencia de granos finos) y la que no (grano grueso).

Así, puede apreciarse la profundidad del temple. Podemos encontrarnos con tres casos:

- Templabilidad baja: mayor proporción de grano grueso que de grano fino
- Templabilidad moderada: igual o semejante proporción de grano fino y grueso
- Templabilidad alta: mayor proporción de grano fino que de grano grueso

Existen muchos otros métodos, de entre los cuales destacan los siguientes:

- Método de las curvas en U

Se fabrican piezas cilíndricas de diversos diámetros, se someten a temple, se rompen posteriormente, y sobre la sección de rotura se llevan a cabo ensayos de dureza, siempre siguiendo una línea radial o un diámetro de la pieza. Los

resultados se grafican, dando lugar a un diagrama en forma de U, donde se representan las durezas en ordenadas frente a la distancia respecto al centro de la pieza a la que se realiza ese ensayo en concreto. Cuanto más plana sea la curva en U, mayor será la templabilidad, pues representa que el acero ensayado presenta una dureza muy similar en todos los puntos de su interior, tanto a nivel superficial como a nivel interno.

- Otro método cuantitativo utilizado para valorar la templabilidad de un acero es el que consiste en determinar el contenido en martensita, mediante diversos procedimientos:
 - Por metalografía: debe observarse la zona que ha sufrido el temple por microscopía electrónica (mediante la comparación entre grano fino y grueso). Para permitir la observación debe hacerse un ataque químico previo.
 - Por determinación de la dureza de la sección transversal
 - Buscando los puntos de inflexión de las curvas en U, pues la separación entre ellas indica directamente la zona del 50% de martensita.

Es aconsejable que el contenido de martensita esté comprendido entre el 50 y el 90%.

- Método del diámetro crítico de Grossman

Este diámetro es el máximo que puede tener una barra cilíndrica de acero en cuyo centro se consigue un 50% de martensita tras un temple cuyo enfriamiento se realice en un medio teórico o ideal con una capacidad de absorción del calor infinita.

Es independiente del medio de enfriamiento considerado, así como de las condiciones generales del ensayo, pero depende de la composición del acero y del tamaño de grano.

Se determina a partir de diversos parámetros, entre los cuales el más importante es la severidad de temple (H, tabla 3).

También es importante el diámetro crítico práctico, que es la distancia entre los puntos de inflexión de las curvas en U (es el valor colocado en la ordenada del gráfico).

- Ensayo de Jominy

Debe conocerse para ello la forma de la probeta (cilíndrica pero con un cabezal en uno de sus extremos). El ensayo tiene lugar en un depósito especial, el cual permitirá valorar cómo varía la dureza de la pieza a medida que nos alejamos del extremo sometido a temple. Este temple se lleva a cabo con el procedimiento habitual: calentar hasta una temperatura de 50 o 60° C por encima de la crítica (723° C).

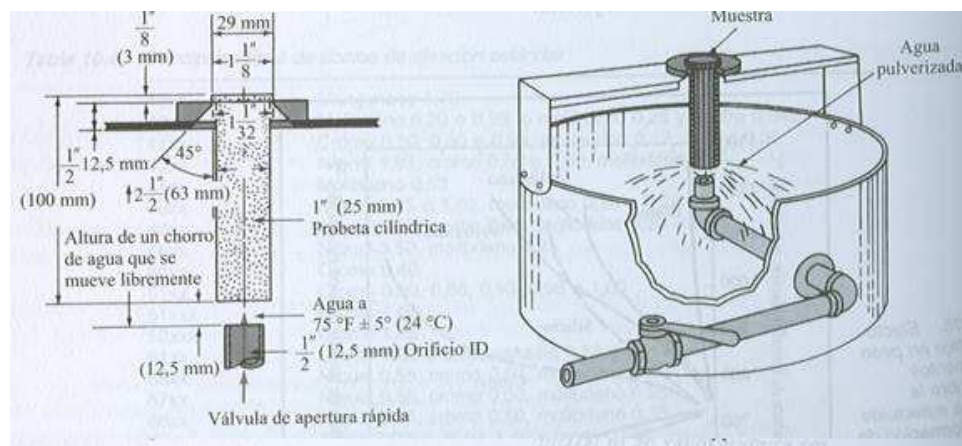
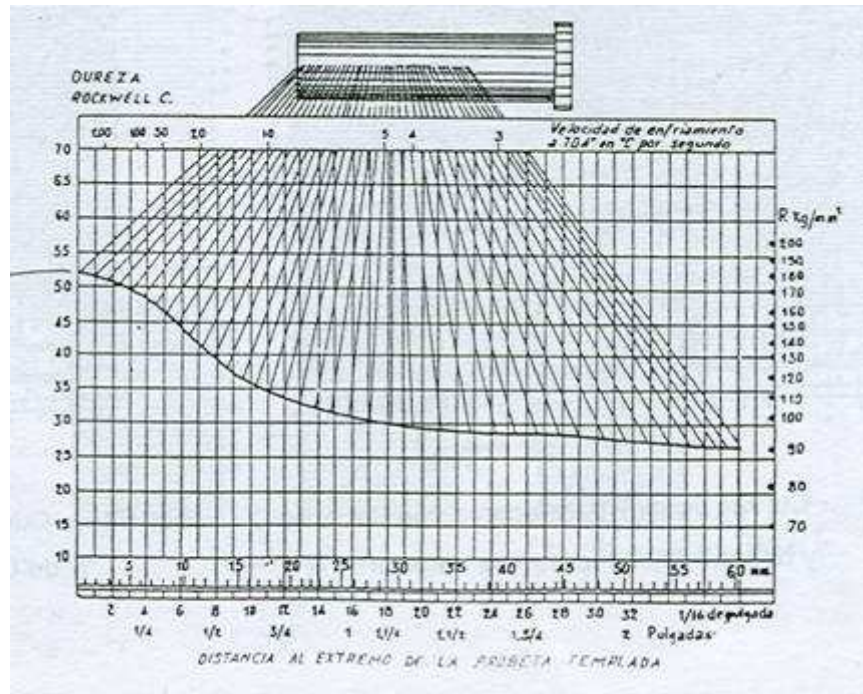


Figura 25. Instalación de la probeta (izquierda) y montaje realizado para realizar el ensayo Jominy (derecha)

Para evitar que se oxide la probeta, pues a altas temperaturas la oxidación es mucho más probable que a temperatura ambiente, se acostumbra a cubrir con virutas de acero o grafito. Una vez enfriada la pieza, se realizan ensayos de



dureza del tipo Rockwell a lo largo de dos generatrices. Los datos los representamos en un gráfico bidimensional (curva de Jominy). Cuanto más planas sean las curvas, mayor será la templabilidad del acero ensayado.

Figura 26. Curva de Jominy: distancia al extremo templado vs. dureza Rockwell C

La templabilidad depende del contenido en carbono (cuanto más grande sea, mayor templabilidad), así como de las pequeñas cantidades de elementos de aleación que contenga el acero. En general, la templabilidad aumenta en mayor medida se añaden pequeñas cantidades de elementos variados que si añadimos un mayor porcentaje de un único elemento.

Es posible transformar los datos del ensayo Grossman a datos del ensayo Jominy mediante un gráfico de conversión.

4.1.3. Revenido

Debido a que las variaciones de temperatura suelen ser muy grandes, se producen tensiones o alteraciones en los procesos de dilatación y contracción, con lo que puede darse la aparición de grietas. Para evitarlo, suele aplicarse otro tratamiento térmico complementario: el revenido.

Este tratamiento consiste en calentar la pieza hasta una temperatura inferior a la crítica, y posteriormente enfriar en aceite, aire o agua.

La martensita resultante del temple es muy dura y frágil, por lo tanto, es inservible para la mayoría de aplicaciones, además del efecto fragilizante que provocan las tensiones internas.

En estas transformaciones, la martensita pierde carbono, lo cual provoca una reducción de la dureza. Además de eliminar las tensiones internas que produce el temple, se produce una disminución del límite elástico y de la resistencia máxima a la tracción. Pero aumenta la tenacidad y deformabilidad.

En función de la temperatura a la que se lleve a cabo en revenido, y según el tipo de acero, se produce un incremento de la fragilidad. Para contrarrestar el efecto, debemos aumentar el contenido en silicio.

Factores que influyen en el revenido

- a. Estado inicial de la pieza, es decir, su estado después de realizado el temple.
- b. La temperatura a la que se lleva a cabo el proceso.
- c. Duración del calentamiento: debe combinarse la temperatura máxima aplicada con el tiempo (entre 400-650° C durante 30 minutos-3 horas)
- d. Tamaño de la pieza: cuanto mayor sea la pieza, más tensiones se producen en el interior.

4.1.4. Normalizado

Para llevarlo a cabo, debemos calentar a entre 40 y 50° C por encima de la temperatura de la línea SG. El enfriamiento posterior se realiza en aire sin corriente. Por lo tanto, se trata de un enfriamiento de no equilibrio, pero tampoco permite obtener martensita. Lo

que verdaderamente se obtiene es perlita y cementita proeutectoide (en el caso de aceros hipereutectoides) o bien perlita y ferrita proeutectoide (para aceros hipoeutectoides).

Puede refinarse la estructura granular en aceros defectuosos, aumentar la resistencia y la dureza respecto a un acero que haya sufrido recocido, pretende mantener la uniformidad estructural eliminando la agregación, reduce los efectos de los tratamientos defectuosos aplicados y elimina las tensiones internas.

Para que sus efectos sean más importantes, se acostumbra a aplicar sobre aceros hipoeutectoides con un contenido en carbono del 0,15%, y en los aceros hipereutectoides se aplica después del recocido. Para aceros aleados se aplica tras el revenido.

4.1.5. Recocido

Pretende ablandar el acero, facilitar su mecanizado, regenerar el estado cristalino (modificar la forma de los granos), estabilizar las tensiones internas, aumentar la ductilidad y homogeneizar la estructura.

Etapas:

1. Calentamiento: por encima o por debajo de la temperatura crítica, pudiendo oscilar alrededor suyo en el tiempo o mantenerse constante.
2. Enfriamiento lento.

Tipos de recocido

- a) Recocido supercrítico: la temperatura de calentamiento está por encima de la crítica
- b) Recocido subcrítico: la temperatura de calentamiento está por debajo de la crítica
- c) Recocido isotérmico: se mantiene la temperatura constante

Recocido supercrítico posee estas etapas:

- Recocido supercrítico de austenización completa: se usa sobre aceros hipoeutectoides. Se calienta a 50°C por encima de la temperatura crítica, se enfría hasta 500°C y posteriormente se acaba de enfriar al aire.
- Recocido supercrítico de austenización incompleta: calentar a una temperatura entre 723°C y la de la línea SE. Después, se enfría hasta 500°C dentro del mismo horno y finalmente al aire hasta temperatura ambiente.

Tipos de recocido subcrítico:

- Globular subcrítico: se aplica sobre aceros de baja cantidad de carbono.
- Ablandamiento: se emplea sobre aceros aleados de gran resistencia
- Acritud: supone una reducción de la plasticidad y la tenacidad, pero se incrementa la dureza y la resistencia a la tracción. Se lleva a cabo cuando se ha deformado el material repetidamente en frío. Debe calentarse la pieza a entre $550-700^{\circ}\text{C}$, y posteriormente se enfría en el propio horno. Se aplica en aceros hipoeutectoides.
- Recocido de estabilización: permite estabilizar las tensiones internas mediante un calentamiento a entre $100-200^{\circ}\text{C}$.

Recocidos isotérmicos:

- Austenización completa: debe subirse la temperatura por encima de la crítica. Posteriormente se enfría hasta los $600-700^{\circ}\text{C}$, manteniéndose esta temperatura durante un cierto tiempo. Finalmente, se acaba de enfriar al aire. Se aplica en aceros hipoeutectoides.

4.2. TRATAMIENTOS TERMOQUÍMICOS

Son todos aquéllos que modifican la composición química de la superficie de las piezas. Esto se consigue saturando superficialmente el acero con átomos de diversos elementos, tanto metálicos como no metálicos. Dicha saturación se consigue por difusión; para difundir un átomo en una red deben aplicarse elevadas temperaturas.

Estos métodos permiten incrementar la dureza superficial sin alterar la ductilidad y la resistencia al choque del núcleo de la pieza, a la vez que se reduce la fricción en el rozamiento de las piezas y se incrementa la resistencia al desgaste, la resistencia a la fatiga (debido a las tensiones residuales generadas por la adición de átomos extraños) y la resistencia a la corrosión.

Etapas:

- a. Separación del medio que rodea a la pieza del elemento químico que se difundirá
- b. Contacto entre los átomos del elemento y los del acero mediante enlaces de absorción
- c. Difusión propiamente dicha de los átomos hacia el interior del acero

La velocidad del proceso depende del tipo de solución sólida que se forme. Si se forma una solución sólida intersticial, el procedimiento es más rápido que si se tratara de soluciones sustitucionales.

La concentración del elemento difundido en la matriz del acero depende de la velocidad de difusión y de lo activo que sea el medio que rodea la pieza.

La profundidad de penetración depende de la temperatura, del tiempo y de la concentración del elemento a difundir en el medio que rodea a la pieza.

Tipos de tratamientos termoquímicos: cementación, nitruración, cianuración, sulfinización, carbonización.

- Cementación: consiste en saturar el medio que rodea la pieza con un compuesto que cederá átomos de carbono. Todo el conjunto debe mantener una temperatura elevada durante un cierto tiempo. Posteriormente, debe completarse el proceso con un temple y un revenido.

Permite aumentar la dureza y la resistencia al desgaste, al mismo tiempo que incrementa la resiliencia, la ductilidad y la alta tenacidad en el núcleo de la pieza.

Etapas que tiene lugar simultáneamente en el proceso:

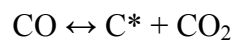
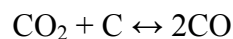
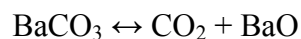
- a. Reacción química del compuesto cementante que da lugar al carbono necesario para que tenga lugar el proceso.
- b. Difusión del carbono formado en la anterior etapa hacia la red del acero, que normalmente está en forma de austenita (pues es la solución que más carbono permite en solución en su interior), formándose una solución sólida intersticial.

La cantidad de carbono que penetra y el espesor de la capa cementada dependen de factores como la composición del acero de partida, la naturaleza del componente cementante (determinará su actividad), el tiempo y la temperatura del proceso.

La proporción de carbono con la que se obtiene mejores resultados de dureza está entre el 0,5 y el 0,9%. Los espesores obtenidos acostumbran a ser de entre 0,5 y 1,5 mm., pudiéndose incluso llegar a los 3 o 4 mm. La temperatura necesaria es de 850-900° C.

La cementación puede realizarse de diversas maneras:

- o Cementación con agente cementante sólido: deben mezclarse carbón vegetal o semicok (obtenido por la media pirólisis del carbono) con compuestos activadores (generalmente carbonatos alcalinos o alcalinotérreos). La mezcla más clásica es la mezcla de Caron (60% de carbón vegetal y 40% de carbonato de bario, BaCO₃). Toda la mezcla se lleva a alta temperatura (900-1000° C) en un horno. Reacciones:

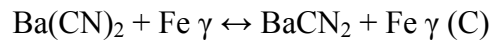
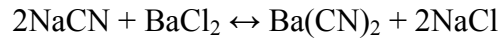


A medida que el carbono naciente C* se va agotando, se va modificando la mezcla cementante. De ahí que sea necesario renovarla constantemente. Posteriormente se enfría hasta los 400° C y se sacan las piezas del horno.

- o Cementación por agentes cementantes líquidos: consisten en baños de sales fundidas que contienen cianuro sódico (NaCN), cloruro sódico

(NaCl), carbonato sódico (Na_2CO_3) y sales catalizadoras (cloruro de bario, calcio y estroncio, BaCl_2 , CaCl_2 , SrCl_2).

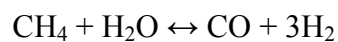
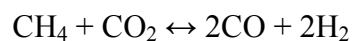
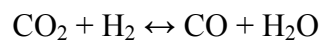
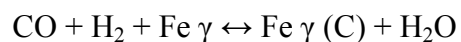
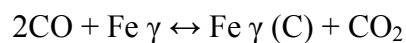
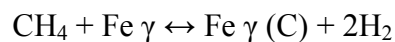
Durante el proceso, los cianuros se oxidan a cianatos. El efecto puede anularse recubriendo la pieza con escamas de grafito. Reacciones:



El espesor de la capa cementante depende de la temperatura, lka composición del baño y la duración del tratamiento.

Tras obtener la capa, se realiza un temple en agua o aceite. Las sales van cambiando su composición a lo largo de toso el proceso, por lo que es necesario añadir sales frescas a medida que avanza.

- Cementación por agentes cementantes gaseosos: debe introducirse la pieza en un horno cerrado herméticamente para evitar la fuga de la mezcla gaseosa que se dosificará a continuación en su interior: metano (CH_4), propano (CH_3CH_3), butano ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_3$) y un gas portador (gas natural o gas de gasógeno, los cuales contiene CO , H_2 , N_2 , vapor de agua, pequeñas cantidades de CH_4 y CO_2), el cual se quema y proporciona el calor y la temperatura necesaria. Reacciones:



El gas portador se introduce para reducir la tendencia a la formación de hollín (que se deposita sobre la superficie del metal), para reducir el coste (son gases combustibles) y para asegurar que dentro del horno se establece la composición adecuada y la presión necesaria para favorecer las reacciones de equilibrio.

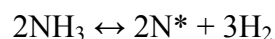
COMPARACIONES: los cementantes gaseosos son más limpios que los líquidos y los sólidos, pues no dejan residuos. También son más económicos para grandes producciones, pero para pequeñas producciones no resultan rentables. Además, puede utilizarse el mismo horno para realizar un recocido o un revenido posterior. Los cementantes sólidos requieren temperaturas muy elevadas, es decir, gran cantidad de energía, y por tanto, aumenta el coste. La mano de obra para cargar y retirar las piezas del horno también implica costes. El proceso es mucho más largo, y los tratamientos posteriores deben realizarse en otras instalaciones.

Con cementantes líquidos debe destacarse la elevada toxicidad de las sustancias utilizadas, por lo que se requiere una buena ventilación de la zona y una correcta protección de los obreros.

Los tratamientos posteriores se realizan a fin de corregir la estructura que se origina tras la cementación y para afinar los granos e incrementar la dureza.

- Nitruración: consiste en la difusión de átomos de nitrógeno en la red del acero. Con ello, conseguimos su endurecimiento, la mejora de la resistencia a la corrosión y el incremento de la resistencia al desgaste y el límite de fatiga.

Con este proceso, el incremento de la dureza es mayor que el conseguido con la cementación. Para ello, deben introducirse las piezas en un horno que contenga una atmósfera de amoníaco (NH₃) a 500° C durante 20-80 horas, con lo que se obtienen espesores de entre 0,2-0,7 mm., menores que los conseguidos por cementación. Reacciones:



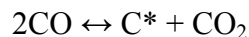
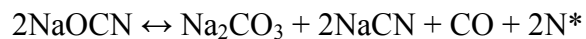
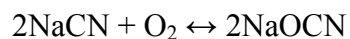
El nitrógeno tiene un tamaño atómico inferior al del carbono, lo cual implica una mayor facilidad de penetración en la red. Acostumbra a formar soluciones intersticiales. Con un contenido del 0,6% de nitrógeno, la dureza alcanzada puede ser de aproximadamente 1000 HV (equivalente a 78 HR C); además, da lugar a un elevado grado de pulido en la superficie, por lo que facilita la reducción del coeficiente de fricción, y por tanto, un aumento de la resistencia al desgaste.

Produce poca dilatación en la pieza final (es decir, no distorsiona la red) debido a su tamaño y buena resistencia a la corrosión en agua dulce, salada y vapor de agua.

El proceso no tiene buenos efectos sobre cualquier acero. Sólo se aplica sobre aceros aleados, pues el origen del endurecimiento es debido a la formación de nitruros con los elementos de aleación, los cuales precipitan fuera y dan lugar a tensiones de compresión. Estos compuestos se caracterizan por su elevada dureza y por ser insolubles en la red de hierro.

No deben superarse los 500° C, pues por encima de esta temperatura los nitruros se descomponen. También debe procurarse que el tiempo de aplicación sea el más largo posible, pues mayores serán los espesores obtenidos. Es un método caro.

- Cianuración y carbonitruración: consiste en saturar la capa superficial con nitrógeno y carbono para conseguir el endurecimiento. La cianuración se realiza mediante un baño de sales fundidas (conteniendo cianuros, carbonatos, y cloruros). La temperatura que debe alcanzarse es de entre 750 y 950° C, y los tiempos de aplicación de entre 15 y 60 minutos. Reacciones:



La cantidad de cianato debe controlarse, pues establece una competencia con el cianuro. De la temperatura y el tiempo dependerá el % de carbono y de nitrógeno que difundirá.

- Nitrocementación: se realiza en una atmósfera que lleva amoníaco o trietanolamina y un gas carburante o portador (se obtiene con la quema de gas natural o gasógeno). Con estos dos gases, aplicando temperaturas de entre 650 y 900° C y durante 4-5 horas, se consiguen espesores de 0,8 mm.

La dureza conseguida es semejante a la alcanzada por cementación (del orden de 65 HR C).

- Sulfinuzación: proceso que consiste en introducir átomos de azufre en la red. Ocasiona un incremento de la resistencia al desgaste. Se lleva a cabo en un baño de sales fundidas (mezcla de sales portadoras de azufre, sulfito sódico, sales protectoras (NaCN) que evitan la oxidación de sulfito a sulfato, y sales de soporte que bajan el punto de fusión de la mezcla).

El espesor máximo obtenido es de 0,3 mm. Aplicando el proceso durante 3 horas a 565° C. La superficie del acero es como una piel de gallina. De ese modo, cuando se somete a fricción, esa rugosidad desaparece, obteniéndose un pulido por el desgaste de los picos y porque los valles van rellenándose con los depósitos procedentes del desgaste de los picos.

La resistencia al desgaste viene dada por el espesor de la capa sulfinuzada siempre se mantiene constante. Si la pieza trabaja a temperaturas del orden de los 1000° C, se mantiene la resistencia a la fricción, pudiéndose producir gripado (unión de las piezas por las altas temperaturas alcanzadas).

Pueden también introducirse átomos de elementos metálicos y no metálicos en la superficie del acero. Dos métodos:

- Metalización por difusión: introducimos hasta saturación otros elementos metálicos: aluminio (aluminización), cromo (cromización) y zinc (sherardización).
- Difusión de elementos no metálicos minoritarios: boro (boración), silicio (siliciuración).

Estos átomos penetran por difusión. Al introducir elementos metálicos, obtenemos una aleación entre el elemento en cuestión y el hierro.