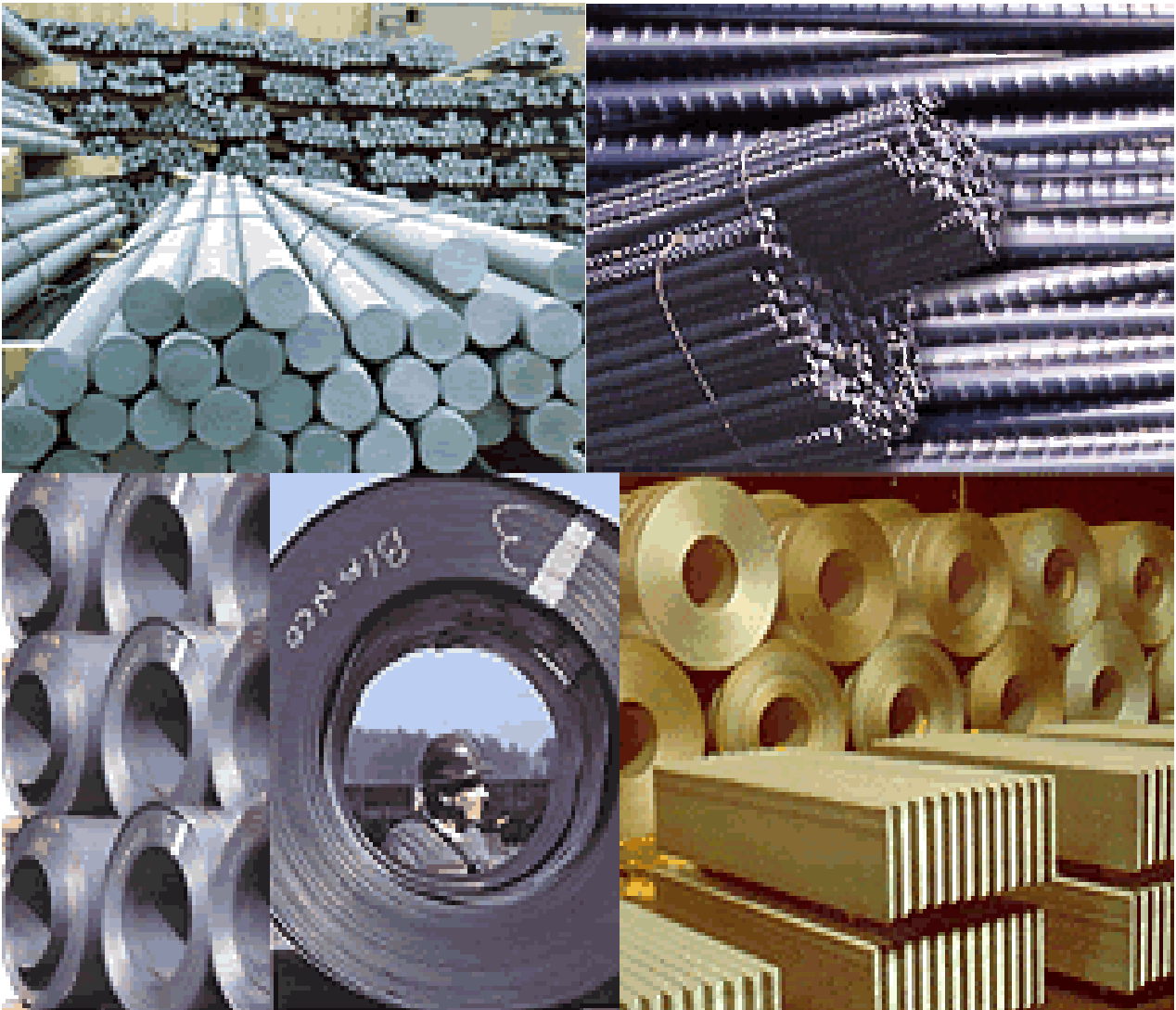


ACEROS



**DEPARTAMENTO DE INGENIERIA
MECANICA F.I.U.B.A.**

ING. GUILLERMO CASTRO

FEBRERO 2009

Historia y evolución del acero. Proceso de producción del acero. Aceros especiales.

P R E F A C I O

Es muy difícil concebir un escenario de la vida urbana o rural donde no haya al menos un objeto de acero. Hay piezas de acero en nuestra ropa, en nuestras casas, en las calles y en el campo. Y no son pocas. Si alguien me pidiera hacer un libro sobre los metales, donde el número de páginas asignado a cada aleación fuera proporcional al volumen total producido, más del 95% tendría que referirse a los aceros. Aun si se incluyera al resto de los materiales que empleamos, como los cerámicos, los polímeros, las maderas, etc., la presencia del acero tendría que ser grande.

La ciencia de los metales es muy especializada y suele alejar de los textos a los lectores que sólo buscan ampliar su cultura. Esto es una lástima porque la batalla que ha dado la humanidad por la producción y el aprovechamiento de los metales en su beneficio es una parte muy importante de nuestra reserva cultural.

Al escribir el presente libro hice un esfuerzo por presentar de una manera sencilla una visión sobre la cultura del acero. Para no caer en la superficialidad buscando la sencillez, traté de abarcar un número reducido de aspectos del acero profundizando lo más posible en ellos.

No distraigo más la atención del lector y le deseo que su esfuerzo de lectura sea provechoso.

I . E L H I E R R O D E L O S M E T E O R I T O S

Mucho antes de aprender a utilizar los minerales ferrosos terrestres, los antiguos trabajaron el hierro de los meteoritos. Según Mircea Eliade, cuando Hernán Cortés preguntó a los jefes aztecas de dónde obtenían el hierro de sus cuchillos, éstos le mostraron el cielo. Lo mismo que los mayas en Yucatán y los incas en Perú, los aztecas utilizaron únicamente el hierro de los meteoritos, que tenía un valor superior al del oro.

Los meteoritos tenían una carga mítica que asombraba a los antiguos. No eran rocas comunes, venían del cielo. Con ayuda del fuego, también mítico, los herreros forjaban las rocas meteóricas y las convertían en estatuillas o armas. Esto no se puede hacer con las rocas comunes porque se romperían con el impacto de los martillos. De hecho, no todos los meteoritos son forjables. Aparte de los meteoritos férricos, que si lo son, en la Tierra han caído muchos de los llamados meteoritos térreos que son como las rocas comunes.

Los guerreros dotados de armas de origen meteórico sentían el poder de los cielos en las batallas. Probablemente de allí viene la conexión entre la siderurgia —la industria del hierro— y lo sideral, que se relaciona con las estrellas. No muy lejos del Valle de México, cayó en las cercanías de Toluca, hace 60 000 años aproximadamente, una lluvia meteórica. Miles de fragmentos, con pesos que oscilaban entre décimas y decenas de kilogramos, cayeron en unas colinas en los alrededores del poblado de Xiquipilco. Se cree que un meteorito de cerca de 60 toneladas se rompió en muchos fragmentos al chocar con la atmósfera. No se sabe cuándo se inició el uso del hierro de

los meteoritos para la fabricación de cuchillos y hachas para los nativos mexicanos. Sin embargo, todavía en 1776 había dos herreros en Xiquipilco dedicados al trabajo del hierro de ese meteorito y lo conformaban para producir herrajes al gusto del cliente.

En 1984 los astrónomos Javier González y Eduardo Gastéllum fueron a Xiquipilco en busca de un trozo del meteorito. A pesar de que en el pueblo recibieron varias ofertas de venta de trozos del meteorito a un precio razonable, se pasaron el día en las colinas en una búsqueda que no los llevó a nada. Para encontrar ahora un trozo de ese meteorito se requiere mucha suerte. Ya en 1776 se decía que era necesario buscarlos al inicio de la temporada de lluvias, inmediatamente después de una lluvia fuerte. Lavados por la lluvia hacían un buen contraste con la tierra, cosa que no sucedía cuando estaban cubiertos de polvo con las piedras.

El trozo de meteorito que Javier y Eduardo compraron al regresar exhaustos al poblado de Xiquipilco también parecía una piedra. Sólo que se sentía más pesado que una piedra del mismo tamaño. En el laboratorio de metalurgia se pudo comprobar que efectivamente se trataba de un meteorito. El análisis químico, amablemente proporcionado por Aceros Solar, reveló la presencia de los siguientes elementos: hierro como base; níquel al 7.75%; algo de cobalto (0.5%) y otras impurezas.

La base de un análisis metalúrgico es la metalografía. La metalografía es una técnica que permite conocer la estructura microscópica de los metales. Consiste en cortar un trozo de metal (un centímetro cúbico es más que suficiente) y pulir a espejo una de sus caras. Esa cara se ataca químicamente con la solución en alcohol etílico de ácido nítrico conocida como nital.

La estructura microscópica del meteorito Toluca es como la de muchos metales producidos por el hombre y puede verse en la figura 1. Se parece a una barda de piedra. Las piedras de esa barda son los cristales que se conocen como los granos. Las uniones entre grano y grano, que parecen la mezcla con la que se unen las piedras en la barda, se llaman fronteras de grano. Son del mismo material que los granos, pero algo desordenado. Con ayuda de un detector de rayos X montado en un microscopio electrónico se pudo saber que no todos los granos son iguales. Unos tienen más níquel que otros.

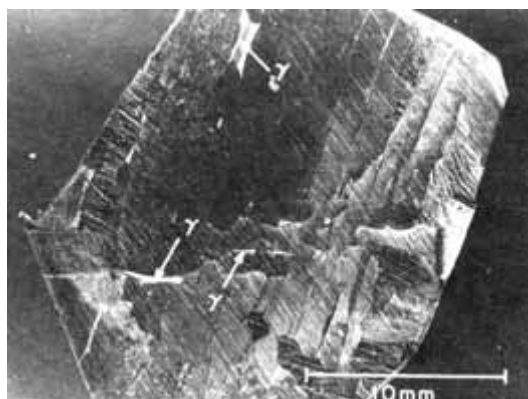


Figura 1. Metalografía de un fragmento de meteorito de Xiquipilco. Tiene una estructura formada por granos de ferrita (α) que llegan a tener mas de 10 milímetros de largo por uno o dos de ancho. Entre los granos de ferrita (α), que son la mayoría, hay unos granos marcados con una γ de otra fase más rica en níquel que se llama austenita.

Un grupo de granos, mayoritario, contiene el 7% de níquel. El otro grupo de granos, intercalados entre los anteriores, contienen el 32% de níquel y se indican en la figura 1 con la letra γ . No hay ningún grano fuera de las dos categorías anteriores.

La termodinámica establece que las aleaciones de dos elementos, binarias, pueden tener dos fases en equilibrio. En el caso del meteorito cada uno de los dos grupos de granos constituye una fase. En el estado sólido, una fase se caracteriza completamente diciendo cuál es su composición química y cuál es el arreglo cristalino de los elementos.

El grupo de granos mayoritario, que contiene el 7% de níquel, tiene un arreglo cristalino cúbico centrado en el cuerpo. Esto quiere decir que los átomos en cada grano se acomodan en una malla de cubos como se muestra en la figura 2. Los átomos de hierro se colocan en las esquinas y en el centro de los cubos. Los átomos de níquel se colocan sustituyendo al hierro de manera que aproximadamente 7 de cada 100 sitios están ocupados por níquel y el resto por hierro.

El grupo de granos con 32% de níquel tiene una red cristalina distinta a la red cúbica centrada en el cuerpo, propia de las aleaciones ricas en hierro y del hierro puro a temperatura ambiente. Este grupo de granos adopta la red cristalina que es propia de las aleaciones ricas en níquel y del níquel puro; o del hierro a altas temperaturas. Es la red cúbica centrada en las caras que se describe en la figura 2. Los átomos, de níquel o de hierro, se acomodan en las esquinas de los cubos y en los centros de sus caras. Aproximadamente 31 de cada 100 sitios se ocupan con níquel y el resto con hierro.

Toda la información acerca de las diferentes fases que pueden tener las aleaciones de hierro con níquel en un intervalo amplio de temperaturas que incluye los estados sólido y líquido se resume en el diagrama de fases que se presenta en la figura 2. En la escala horizontal inferior usualmente se indica el porcentaje en peso del níquel. En el extremo a la izquierda la aleación se reduce a hierro puro. Hacia la derecha se incrementa el níquel hasta que al extremo derecho hay puro níquel. En la escala vertical se indica la temperatura. Las curvas en el diagrama delimitan los campos donde pueden existir las fases. La fase líquida está limitada por una curva que en el extremo izquierdo parte de 1538°C , que corresponde a la temperatura de fusión del hierro puro, y en el extremo derecho toca en la temperatura de fusión del níquel que es 1455°C . Es notorio cómo un poco de níquel aleado al hierro baja su punto de fusión, y lo mismo ocurre cuando un poco de hierro se agrega al níquel.

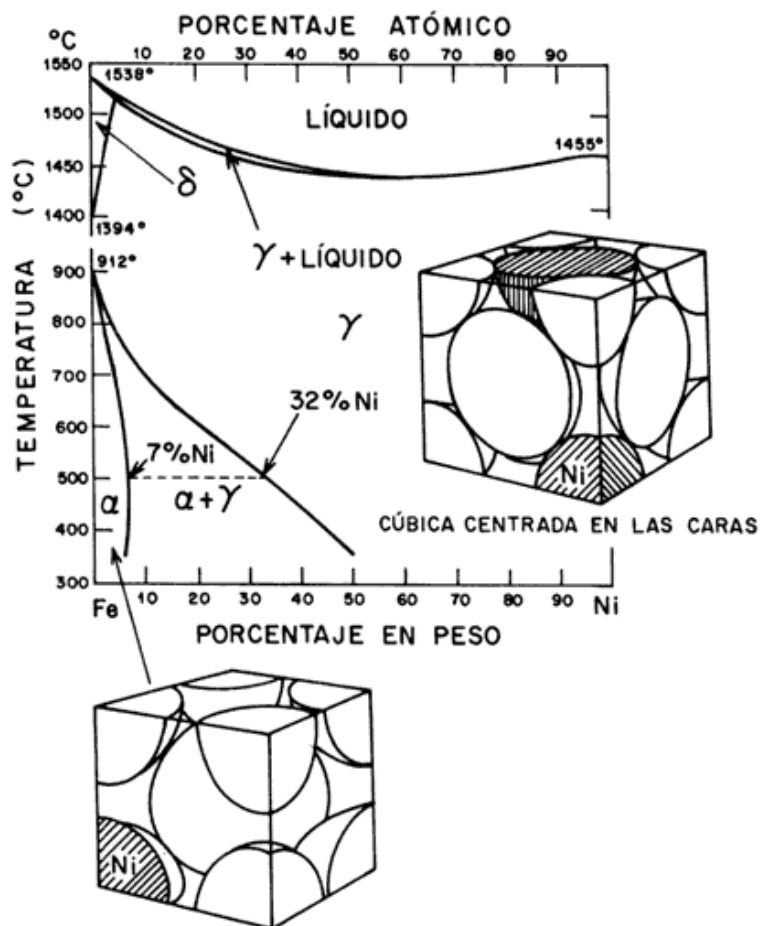


Figura 2. Diagrama de fases en equilibrio de la aleación hierro-níquel. En el estado sólido las redes cristalinas de las aleaciones hierro-níquel pueden ser de dos tipos: cúbica centrada en el cuerpo, marcada con una α , y cúbica centrada en las caras (γ). En el caso del hierro y el níquel conviene aclarar que la formación de estas fases de equilibrio que vienen del estado líquido requieren de velocidades de enfriamiento muy lentas. De otra manera se formarían con mucha facilidad otras fases del equilibrio.

En el estado sólido hay tres campos donde existe una sola fase. Típicamente estas fases se designan con letras griegas. La zona marcada con una α incluye las aleaciones que contienen entre 0 y 7% de níquel en el intervalo de temperatura entre 0 y 900 grados aproximadamente. En esta región las aleaciones tienen una red cristalina cúbica centrada en el cuerpo conocida como α . La zona central del diagrama se encuentra cubierta por la fase γ ; las aleaciones en este campo de composiciones y temperaturas tienen una red cristalina cúbica centrada en las caras.

La fase δ en el extremo superior izquierdo es también cúbica centrada en el cuerpo, pero se distingue de la fase α porque el cubo es un poco más grande. El resto del espacio en el diagrama está cubierto por mezclas de dos fases. El espacio entre la fase líquida y la fase γ corresponde a aleaciones donde coexisten la fase líquida y granos en la fase γ . El espacio entre la fase α y γ corresponde a aleaciones donde coexisten una mezcla de granos de α y de γ , como es el caso del meteorito de Xiquipilco.

La composición química de los granos de α y de γ se establece en el diagrama de fases y depende de la temperatura. A una temperatura dada se marca una línea horizontal. La abscisa donde la horizontal cruza la curva que limita al campo de la fase α marca el porcentaje de níquel de esta fase. El porcentaje de níquel en la fase γ se obtiene también en el cruce de la horizontal con la curva que limita este campo. Por ejemplo, a 700°C existen granos de fase α con 4% de níquel y γ con 10% del mismo elemento. Como en el meteorito de Xiquipilco existen granos α con 7% de níquel y granos γ con

32% puede decirse que corresponden a una temperatura de equilibrio de aproximadamente 500°C. Esto quiere decir que durante mucho tiempo el meteorito se mantuvo a 500°C. ¿En dónde? No pudo ser en la Tierra, porque sobre su superficie la temperatura ha sido inferior a 500°C durante la estancia terrestre del meteorito, que se estima en 60 000 años. No pudo ser durante la entrada a la atmósfera de la Tierra porque la caída ocurre en algunos segundos y no hay tiempo suficiente para producir una transformación sensible en el interior del meteorito. Tampoco pudo ser durante su viaje en el espacio exterior porque la temperatura interplanetaria es muy baja, algo así como -270°C, muy cerca del cero absoluto.

La clave podría estar en los granos. Usualmente el tamaño de los granos en las aleaciones es de unas cuantas micras (milésimas de milímetro). En cambio, los granos de este meteorito, como puede estimarse en la figura 1, llegan a medir varios milímetros.

Con un enfoque experimental se pueden conseguir hierro y níquel puros; fundir el hierro en el crisol; agregar el 7.75% de níquel; agitar el líquido para que se convierta en una mezcla homogénea; enfriar muy lentamente y depositar la aleación líquida en un molde que se mantenga en un horno a 500°C durante algún tiempo, una semana por ejemplo. El enfriamiento desde el estado líquido hasta los 500°C debe ser muy lento para evitar la formación de fases fuera de equilibrio. Por eso a Goldstein le tomó mucho tiempo elaborar el diagrama de fases de la figura 2, que terminó en 1965.

Con el procedimiento anterior efectivamente se obtiene una aleación con una composición igual a la del meteorito (en un primer análisis se puede suponer que el cobalto no cambiaría mucho las conclusiones). Los granos de las fases α y γ tendrían también las mismas composiciones. Lo único diferente es que los granos, especialmente los de la fase γ , serían mucho más chicos. En el meteorito los granos de la fase γ llegan a rebasar un milímetro y los de α son de más de 2 milímetros de ancho y llegan a medir 10 milímetros de largo, ambos distinguibles a simple vista.

Se sabe que si la aleación de laboratorio se mete de nuevo al horno a 500°C, los granos efectivamente crecerán; pero aunque se dejen semanas o años nunca alcanzarán un tamaño comparable a los del meteorito. Un cálculo metalúrgico, que no vale la pena reproducir aquí, permite estimar que se requieren cientos de millones de años a 500°C para lograr los tamaños de grano que tiene el meteorito de Xiquipilco.

Se ha calculado que el Sistema Solar tiene una edad de siete mil millones de años aproximadamente. Entre Marte y Júpiter existe la zona de los asteroides. Se cree que muchos de los meteoritos que llegan a la Tierra vienen de esa zona. El origen de los asteroides se desconoce pero se supone que son restos de un planeta desintegrado.

El meteorito de Xiquipilco pudo haberse formado en el interior de ese planeta: Si ese planeta, como la Tierra, tenía un núcleo metálico líquido, es posible concebir que a cierta profundidad la temperatura fuera de 500°C. En la Tierra no habría que ir muy adentro. A 30 km de profundidad se alcanza esta temperatura. Así, el meteorito pudo haber sido parte de ese supuesto planeta durante cientos de millones de años. Posiblemente después se rompió en pedazos enfriándose rápidamente en el espacio interplanetario (de -270°C) y mucho tiempo después cayó sobre nuestro planeta.

Por supuesto que esta posible explicación no excluye a muchas otras, porque en este terreno el campo para la especulación es vastísimo.

II. ESPADAS DE DAMASCO

LAS CRUZADAS

CUENTA la leyenda de un encuentro entre Ricardo Corazón de León y el sultán Saladino, que ocurrió en Palestina a finales del siglo XII. Los dos enemigos en la guerra de las Cruzadas cristianas se jactaban del poder de sus respectivas espadas. Ricardo tomó su enorme espada, la levantó con sus dos manos y la dejó caer con toda su fuerza sobre una maza de acero. El impacto de la espada hizo saltar a la maza hecha pedazos. Saladino fue más sutil. Colocó su espada encima de un mullido cojín de pluma y la jaló suavemente. Sin ningún esfuerzo ni resistencia la espada se hundió en el cojín hasta cortarlo completamente como si fuera mantequilla. Ricardo y sus acompañantes europeos se miraron unos a otros con incredulidad. Las dudas se disiparon cuando Saladino arrojó un velo hacia arriba y, cuando flotaba en el aire, lo cortó suavemente con su espada.

La espada de Ricardo Corazón de León era tosca, pesada, recta y brillante. La de Saladino, por el contrario, era esbelta, ligera y de un azul opaco que, visto más de cerca, era producido por una textura compuesta de millones de curvas oscuras en un fondo blanco que caracterizan a los aceros de Damasco. Era tan dura que se podría afilar como navaja de afeitar y a la vez era sumamente tenaz, de manera que podía absorber los golpes del combate sin romperse. Era difícil para los europeos aceptar que la dureza y la tenacidad se podían conjugar de una manera tan extraordinaria. Todavía más difícil de aceptar resultó el entender y dominar la técnica de fabricación de los aceros de Damasco en las herrerías de Occidente. La cosa no duró años, ni décadas: tomó siglos.

Muchos eminentes científicos europeos fueron atraídos por el misterio de los aceros de Damasco. Antes de inventar el motor y el generador eléctricos, Michael Faraday gastó algún tiempo tratando de revelar este misterio.

Faraday era hijo de herrero, de modo que estaba familiarizado con el oficio; además, tenía la ventaja de trabajar en 1819 cuando la jerga de los acereros ya había decantado muchos conceptos que no se tenían en el siglo XII. Pero "en casa de herrero, cuchara de palo". Después de sesudos análisis, Faraday salió con que el secreto podría estar en la adición de pequeñas cantidades de sílice y alúmina al acero. Erróneo. Para lo único que sirvió el artículo de Faraday fue para que Jean Robert Breant, un metalúrgico de la imprenta de París, se motivara a estudiar el tema y descubriera la esencia del misterio: los aceros de Damasco tenían un contenido altísimo de carbono.

EL PAPEL DEL CARBONO EN EL ACERO

El acero es, básicamente, una aleación de hierro y de carbono. El contenido del carbono en el acero es relativamente bajo. La mayoría de los aceros tienen menos de 9 átomos de carbono por cada 100 de hierro en el acero. 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 por el porcentaje de la masa total con que cada uno contribuye.

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 3, si el contenido de

carbono llega al 1%, la resistencia casi se triplica con respecto al nivel de referencia del 0.1%.

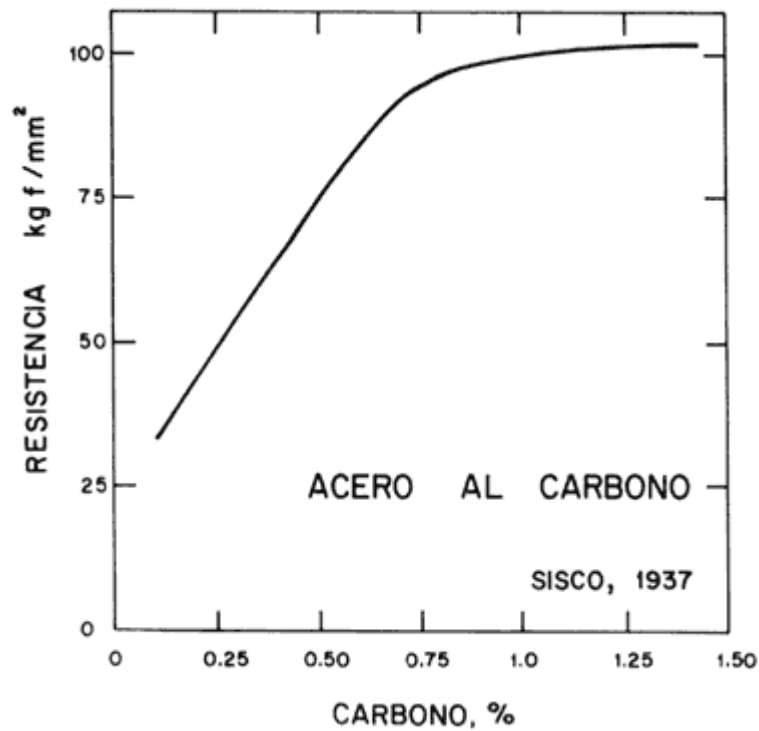


Figura 3. Efecto del contenido del carbono en la resistencia de los aceros.

El carbono, sin embargo, generalmente reduce la ductilidad del acero. La ductilidad es una medida de la capacidad de un material para deformarse, en forma permanente, sin llegar a la ruptura. Por ejemplo, el vidrio de las ventanas no es nada dúctil. Cualquier intento por deformarlo, estirándolo o doblándolo, conduce inmediatamente a la fractura. El aluminio, por el contrario, es sumamente dúctil. Por ejemplo, de un solo golpe una rondana de aluminio se convierte en el tubo donde se guarda la pasta de dientes, como se muestra en la figura 4.

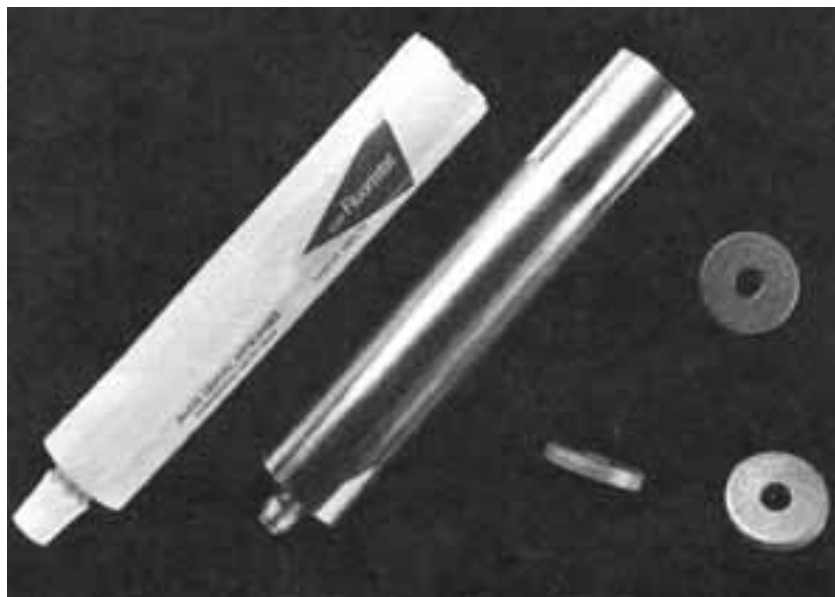


Figura 4. Tubo de pasta de dientes fabricado mediante la deformación de una rondana de aluminio. El aluminio es muy dúctil porque es capaz de soportar grandes deformaciones sin fracturarse.

Un acero de 0.1% de 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 5. En esta gráfica, a la ductilidad se le 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.

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, maquinables, soldables; en una palabra, son muy "trabajables". Por eso, con estos aceros los herreros hacen puertas y ventanas. Además, con ellos se fabrican las mejores varillas para refuerzo de concreto, las estructuras de edificios y puentes, la carrocería de los automóviles y las corazas de los barcos.

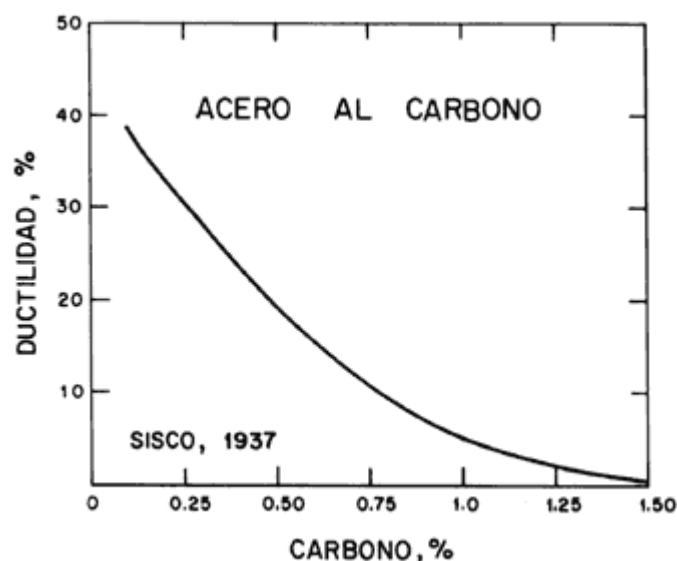


Figura 5. Efecto del contenido del carbono en la ductilidad de los aceros comunes. En 1938 Sisco publicó esta gráfica y se ha reproducido en muchos libros de texto todavía vigentes.

Los aceros de medio carbono, entre 0.25% y 0.6%, se emplean cuando se quiere 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 engranes. 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.

ACEROS DE ULTRA ALTO CARBONO

¿Y los aceros de Damasco? Resulta que no caben en la clasificación. No han entrado a los libros de texto. Como contienen alrededor de 1.5% de carbono, muchos creen que son tan frágiles que no vale la pena ni siquiera estudiarlos. Lo bueno fue que los herreros de Saladino no aprendieron la fabricación de sus espadas leyendo los textos de metalurgia que ahora tenemos en las bibliotecas. La enseñanza la obtuvieron de sus padres y abuelos a lo largo de muchos años de compartir el trabajo en la herrería.

Recientemente dos metalurgistas de la Universidad de Stanford, Sheiby y Wadsworth, retomaron el tema de las espadas de Damasco y han abierto todo un campo de

investigación en lo que se llama ahora aceros de "ultra alto carbono". Con toda paciencia empezaron por desentrañar de nuevo las misteriosas características de estos aceros, para luego reproducir en el laboratorio su legendaria belleza y su singular resistencia y tenacidad. En pocos años estuvieron en condiciones de ofrecer a la industria aleaciones de acero de ultra alto carbono con las que se pueden fabricar infinidad de piezas donde la resistencia al esfuerzo, al impacto o a la fatiga son de vital importancia.

EL WOOTZ DE LA INDIA

La materia prima para fabricar las espadas de Damasco venía de la India y se llamaba "wootz". El wootz era un acero muy rico en carbono que producían los herreros indios con la forma y el tamaño de un queso fresco chico que se comercializaba intensamente en el Oriente. El procedimiento de la fabricación del wootz se muestra en la figura 6. En un horno de piedra se introducían una mezcla de mineral muy rico en óxido de hierro y carbón de leña. Mediante un sistema de fuelles se soplabá aire hacia la base del horno. El oxígeno del aire produce la combustión del carbono de la leña, dando lugar a la formación de abundante monóxido de carbono.

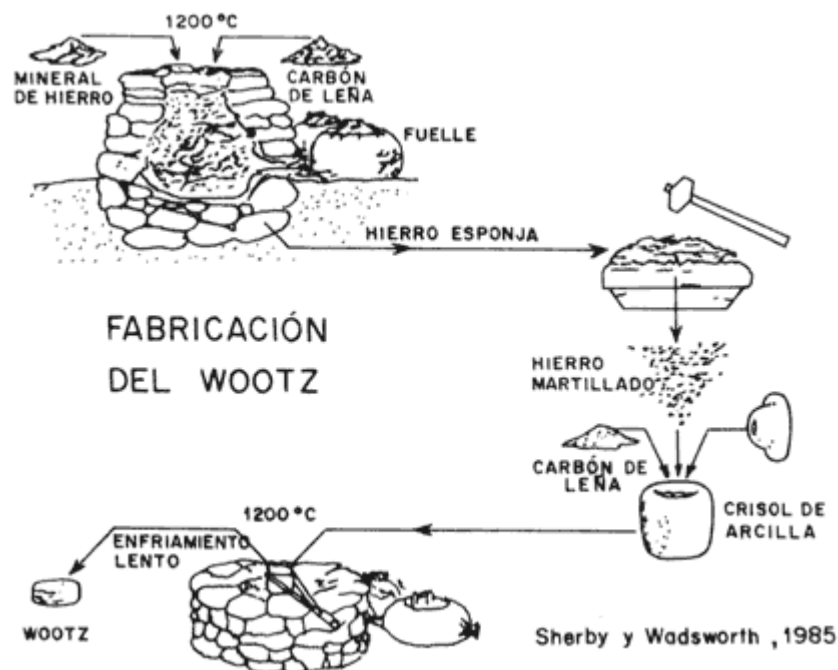


Figura 6. Proceso de fabricación del wootz en la India. El mineral del hierro y el carbón de leña se ponían en un horno de piedra donde el monóxido de carbono, producido por la combustión de la leña reaccionaba con el óxido de hierro para formar el hierro esponja. El hierro esponja se martillaba y se metía en un crisol cerrado junto con polvo de carbón de leña. El crisol se metía de nuevo al horno y, cuando la temperatura subía hasta 1 200° C, se formaba el wootz, parcialmente en el estado líquido, por la aleación del hierro y el carbono. Al enfriarse lentamente, el wootz se solidificaba en su forma final.

El contacto del, monóxido de carbono con el mineral de hierro sirve para reducirlo (desoxidarlo), dando lugar a la formación de hierro metálico de acuerdo con la reacción química:



Los hornos antiguos de piedra podían alcanzar temperaturas cercanas a los 1 200°C, que son inferiores a la temperatura de fusión del hierro, que es de 1 537°C. Por eso el hierro que se formaba a partir del mineral no era líquido sino un sólido poroso que ahora se conoce como hierro esponja. En los poros de la esponja se acumulaban muchas de las impurezas que inevitablemente acompañan a los minerales y que usualmente se encuentran en forma de escoria líquida al salir del horno. Esta escoria líquida era removida del hierro esponja a golpe de martillo. El hierro esponja martillado se mezclaba de nuevo con el carbón de leña y se colocaba en un crisol de arcilla cerrado que a su vez se introducía de nuevo a un horno de piedra. En unas horas, el hierro esponja y el carbono se fundían parcialmente para dar origen al acero de ultra alto carbono conocido como wootz.

LA FORJA EN EL MEDIO ORIENTE

Los herreros del Medio Oriente que compraban el wootz de la India seguían, para producir las hojas de espada, un proceso de forja como el indicado en la figura 7. La forja es el conformado de una pieza de acero caliente a golpe de martillo. La diferencia entre el éxito de los sirios y el fracaso de los europeos en el manejo del wootz radicaba en la temperatura de la forja. Los herreros sirios forjaban sus aceros a temperaturas entre 650 y 850 grados centígrados, algo así como al rojo púrpura, cuando el Wootz se vuelve extraordinariamente dúctil. De hecho, en ese intervalo de temperaturas, el wootz ingresa a un club muy selecto de aleaciones conocidas como superplásticas por su gran capacidad de deformarse sin romperse. En el libro de récords de Guinness está registrada la marca mundial de superplasticidad correspondiente a una aleación que pudo alargarse más de veinte veces su tamaño original antes de romperse. Además del wootz, el club de superplasticidad incluye a otras aleaciones basadas en el plomo, el cinc o el aluminio.

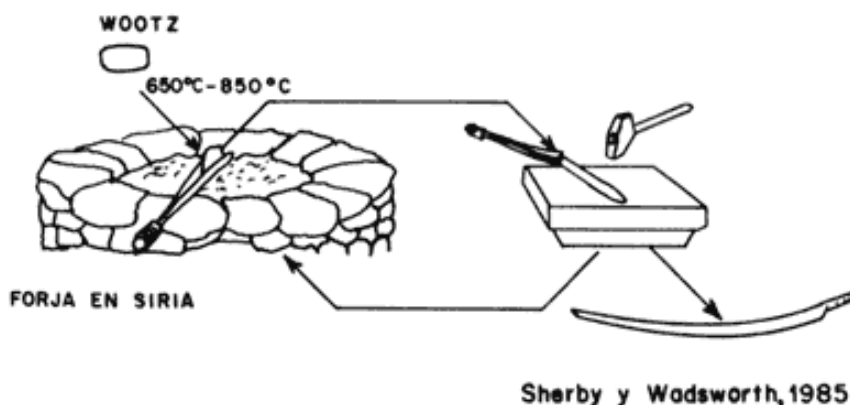


Figura 7. La forja en Siria se hacía calentando el wootz a temperatura de entre 650 y 850° C. A esta temperatura el wootz era sumamente plástico y se podía conformar a martillazos.

Aunque los herreros sirios no manejaron el concepto de la superplasticidad que se puso de moda hasta los años setenta de nuestro siglo, la aprovechaban para darle forma a sus espadas. Los europeos, por su parte, estaban acostumbrados a forjar sus espadas a 1 200°C, cuando el acero se pone de un amarillo claro. El wootz, a esta temperatura, ya es otra cosa porque se desmorona al primer martillazo. A diferencia de los aceros de bajo contenido de carbono que forjaban los europeos sin ningún problema a 1 200 grados centígrados, el wootz forma en su interior una cierta cantidad de material líquido que propicia su desmoronamiento cuando se martilla.

La conversión del wootz en aceros de Damasco mediante la forja y el temple se debe a cambios muy sustanciales en la estructura interna de estos materiales. Los aceros tienen una estructura interna formada principalmente por dos componentes, mas conocidos como fases, que se ilustra en la figura 8(a). La fotografía fue tomada con un

microscopio electrónico de barrido, donde el segmento en la parte inferior derecha ayuda a tener una idea de la escala. Antes de tomar la fotografía fue necesario tomar un trozo pequeño de acero (en este caso no fue de wootz sino de bajo carbono), y pulirlo en una serie de lijas, cada vez más finas, hasta lograr una superficie lisa y brillante como un espejo. Luego se ataca ligeramente con una solución de ácido nítrico en alcohol para que las dos fases se distingan.

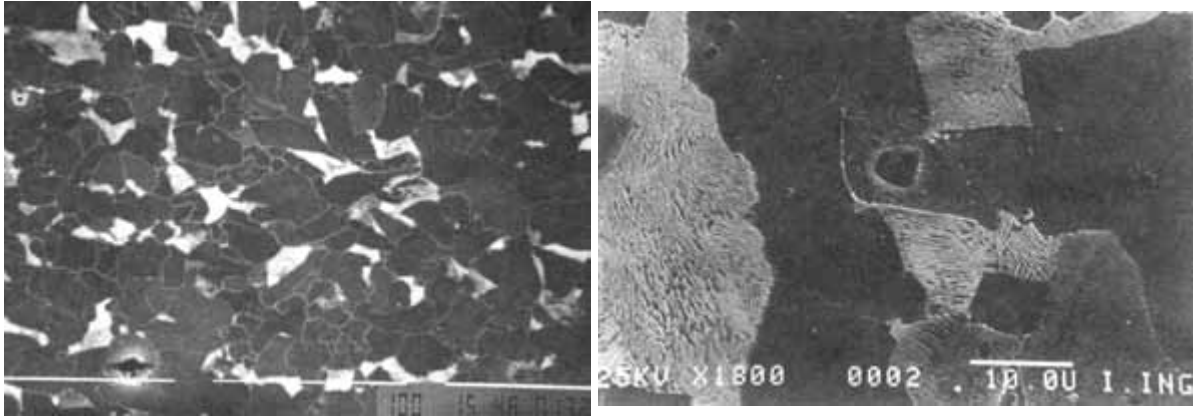
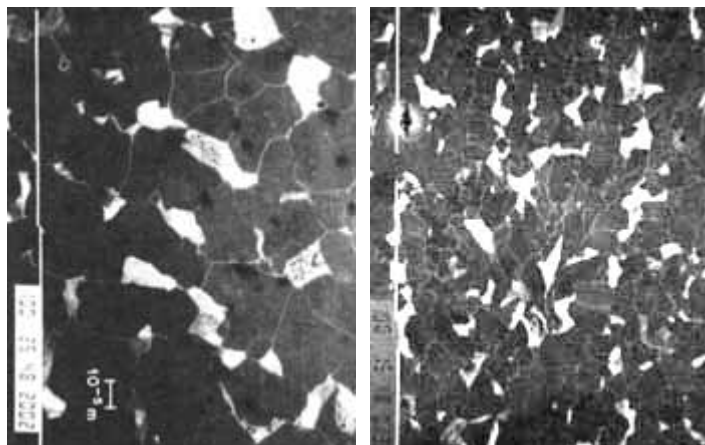


Figura 8. (a) Metalografía de un acero de bajo carbono (0.18%). Los granos oscuros son de ferrita (α) y los granos claros son de perlita. (b) Detalle de los granos de perlita formados por laminillas blancas (cementita) y oscuras (ferrita).

Volviendo a la figura 8, uno puede darse cuenta de que los aceros, al igual que muchos otros metales y cerámicos, están estructurados a base de cristales, también llamados granos, con fronteras claramente definidas, semejantes a las piedras que integran una barda. En la fotografía, muchos de los granos son oscuros. Son granos de hierro metálico, frecuentemente de una pureza superior al 99.95%, conocidos como la fase ferrita del acero. La fase ferrita casi no admite el carbono en su interior, a lo más acepta un 0.05%, y eso cuando la temperatura es alrededor de 700°C. A temperaturas inferiores se vuelve mucho más intolerante al carbono y aumenta su tendencia a expulsarlo. El carbono que no cabe en la ferrita forma el compuesto llamado carburo de hierro, Fe_3C , que aparece en forma de laminillas blancas en los granos más claros de la figura 8(b). (Lo negro y lo blanco en las metalografías depende del instrumento que se use para observar. En el microscopio electrónico de barrido se observa lo que aquí se presenta; en un microscopio óptico lo negro se ve blanco y viceversa.) Las laminillas blancas de carburo de hierro, conocidas también como cementita, se alternan con laminillas oscuras de ferrita.



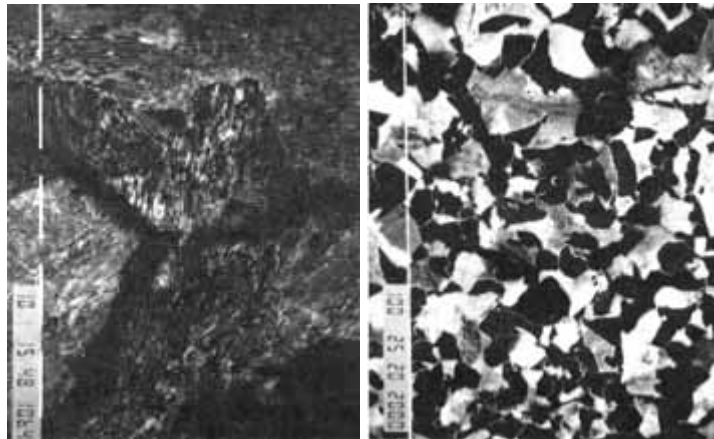


Figura 9. Cuatro metalografías de acero de bajo, medio y alto carbono. La perlita es escasa en los aceros de bajo carbono y aumenta hasta ocupar casi todo el espacio en los aceros de alto carbono.

A los granos formados de laminillas blancas y oscuras se les conoce como la fase perlita del acero, aunque en realidad no es una fase sino dos, repetimos: la ferrita y el carburo de hierro o cementita. La fase perlita tiene la peculiaridad de contener siempre el mismo contenido de carbono, que es 0.77%.

Por la proporción relativa de la ferrita y cementita en los aceros se puede saber su contenido de carbono. En la figura 9 se muestran cuatro micrografías de acero con contenidos de carbono de 0.18, 0.25, 0.35 y 0.65%, respectivamente. Cuando el contenido total de carbono es bajo, abundan los granos de ferrita. Los granos de perlita son escasos y dispersos. A medida que el contenido de carbono aumenta, la población de cementita sube. En los aceros de alto carbono, la perlita, formada por laminillas de ferrita y cementita, prácticamente ocupa todo el espacio.

El wootz de la India, siendo un acero de ultra alto carbono, tenía una estructura de granos de perlita embebidos en una base de cementita como se muestra en la figura 10.



Figura 10. Simulación de una metalografía de un acero con estructura de granos de perlita embebidos en una matriz de cementita.

Con esta estructura el material es sumamente frágil porque la base de cementita es muy quebradiza. Ni los europeos ni los sirios sabían que, a temperaturas de entre 650 y 850 grados, la base de cementita podía transformarse a golpe de martillo para formar partículas dispersas en una base de perlita, como se indica en la figura 11. La diferencia era que los sirios lo hacían y los europeos no. Cuando la base de cementita se dispersa en una multitud de partículas, el wootz ya no es wootz, sino acero de Damasco. De hecho las texturas que se observan en las espadas de Damasco son

residuos de la base de cementita que no alcanzaron su transformación a pequeñas partículas, probablemente debido a que se interrumpía el martillado. Lo irónico es que si se logra eliminar completamente la textura clásica del acero de Damasco al transformarla en pequeñas partículas de cementita se obtiene un acero todavía superior. Claro que a ningún herrero sirio se le ocurría hacer esto, porque todo mundo creía que la fuerza de los aceros de Damasco venía de su textura.

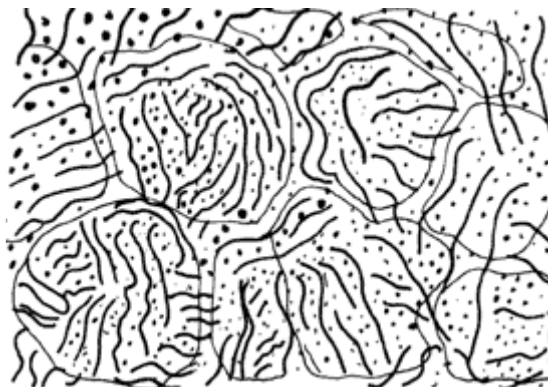


Figura 11. Simulación de una metalografía de acero forjado que presenta una gran cantidad de carburos esféricos dispersos en una matriz de perlita.

EL TEMPLE DEL ACERO

Los herreros sirios incrementaban todavía más la resistencia y la elasticidad de las espadas mediante el temple. El temple, ejemplificado en la figura 12, se consigue al calentar las espadas al rojo vivo, alrededor de 800°C y enfriarla súbitamente por inmersión en un fluido (agua, por ejemplo). El temple se debe a una importante transformación de la estructura atómica del acero.

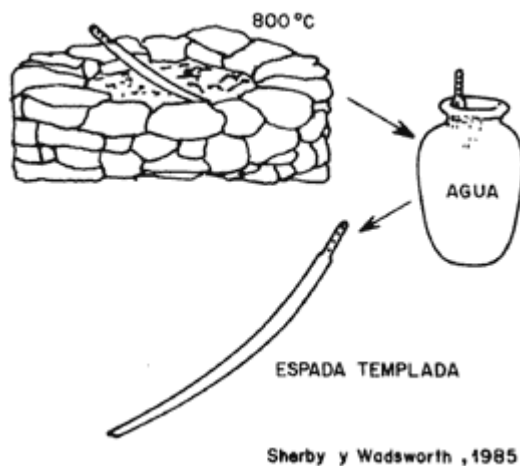
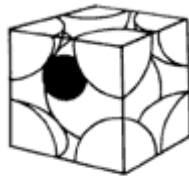


Figura 12. Temple de acero. Los sirios calentaban su acero a temperaturas un poco arriba del rojo púrpura (más o menos 800°C) para luego sumergirlo en el agua.

Cuando el acero, después de estar al rojo vivo, se deja enfriar lentamente, los átomos de hierro se acomodan formando la red cristalina llamada ferrita. Los átomos que no acepta la ferrita se segregan formando laminillas de carburo de hierro (Fe_3C). Los átomos en los metales se comportan como esferas duras de un diámetro característico en contacto unas con otras. El hierro tiene un diámetro de 2.5 Å, un cuarto de millonésima de milímetro, el carbono es ligeramente menor que 1.1Å. Un corte ilustrativo de la ferrita se indica en la figura 13, donde los átomos de hierro ocupan las esquinas y el centro del cubo. En las esquinas se dibuja un octavo de esfera solamente. Esta red es conocida en cristalografía como cúbica centrada en el cuerpo. Los pocos átomos que acepta la ferrita encuentran acomodo en los huecos que quedan entre las

esferas de hierro. De acuerdo con el tamaño de las esferas de carbono, éstas caben en la ferrita, solamente, en sitios como el que se señala en la figura 13.



FERRITA

Figura 13. Red cristalina cúbica centrada en el cuerpo de la fase ferrita del acero. Para mayor claridad solamente se dibuja un octavo de esfera en cada esquina. El átomo negro representa al carbono, el cual se ubica en los huecos más grandes que quedan entre los átomos de hierro. La ferrita acepta muy poco carbono en su interior.

Cuando el acero se calienta al rojo vivo la estructura atómica del acero cambia. Arriba de 727°C empiezan a desaparecer las fases ferrita y cementita para dar lugar a la formación de otra fase llamada austenita. Los cambios de fase de las aleaciones se ilustran en los llamados diagramas de fases. En la figura 14 se muestra el de las aleaciones de hierro y carbono. En la abscisa se indica el contenido de carbono que va desde cero, para el hierro puro, hasta 4.8%. En la ordenada se marca la temperatura. Las fases presentes en el acero dependen tanto de su contenido de carbono como de su temperatura.

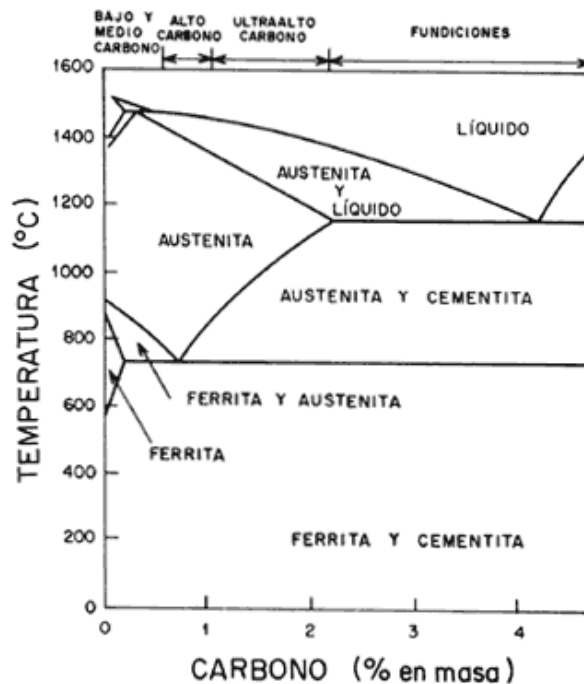
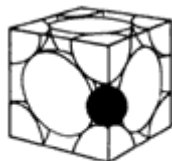


Figura 14. Diagrama de fases de equilibrio de las aleaciones más importantes de hierro y carbono. Las líneas en el diagrama delimitan las áreas de temperaturas y composición donde existen o coexisten las diferentes fases de acero.

Como se decía antes, abajo de 727°C los aceros contienen las fases ferrita y cementita ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$). Sin embargo, arriba de esta temperatura pueden existir la ferrita y la austenita ($\alpha + \gamma$) y si el contenido de carbono es mayor que 0.8%, la austenita y la cementita. En cualquier caso siempre hay austenita a temperaturas arriba de 727°C.

Los átomos de hierro en la fase austenita asumen las posiciones en una red cristalina cúbica centrada en las caras, como se indica en la figura 15. Los átomos de hierro se acomodan ocupando las esquinas y el centro de cada cara en una estructura cúbica. En este caso, los átomos de carbono caben en el centro de cada una de las aristas de los

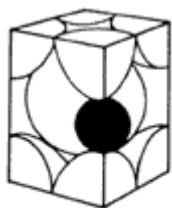
cubos. La fase austenita puede admitir dentro de su red cristalina hasta un 2% de carbono a una temperatura de 1 150°C, como puede verse en el diagrama de fases de la figura 14. Nótese que la austenita tiene una capacidad para aceptar carbono que es del orden de 40 veces superior a la ferrita.



AUSTENITA

Figura 15. Red cristalina cúbica centrada en las caras de la fase austenita del acero. En este caso los átomos de carbono se acomodan en el centro de las aristas del cubo. La austenita puede aceptar hasta el 2% en masa, de carbono.

En la etapa inicial del temple del acero de Damasco, cuando se pasa de una estructura de ferrita y cementita a una de austenita y de mentita, es decir al calentar al rojo vivo, una parte de la cernentita se descompone para enriquecer de carbono las zonas donde debe formarse la austenita. Cuando el acero de Damasco se estabiliza al rojo vivo su fase austenita contiene alrededor del 1% de carbono, mientras que la cementita que no se disuelve sigue siendo Fe_3C . En estas condiciones, si el acero fuera enfriado lentamente hasta la temperatura ambiente, el carbono se difundiría en el acero para acomodarse en las posiciones y proporciones adecuadas formando de nuevo la estructura de ferrita y cementita. ¿Y qué pasa si el enfriamiento es súbito? ¿Qué hace el carbono cuando de ser ampliamente aceptado en la red cristalina de la austenita se encuentra en una situación de inquilino indeseado en la ferrita? Pues pasa lo de siempre: el ambiente se pone tenso, el acero se ha templado. El carbono queda atrapado en el mismo sitio donde se encontraba en la austenita y al tratar de acomodarse los átomos de hierro en la red cristalina de la ferrita, el espacio del carbono se vuelve insuficiente. Lo que se produce es una fase llamada martensita, con la red cristalina distorsionada que se describe en la figura 16. La martensita no es una fase de equilibrio, existe sólo porque "agarraron al carbono fuera de base". Es una fase muy dura y muy elástica, que es lo que se necesita a la hora de los espadazos.



MARTENSITA

Figura 16. Red cristalina de la fase martensita del acero. El carbono queda atrapado en una posición donde no cabe en la red cúbica centrada en el cuerpo, produciéndose así una distorsión elástica.

Claro que los herreros sirios ni los europeos entendían toda esta historia de las redes cristalinas, los átomos y los carbonos atrapados. Todo esto es asunto del presente siglo, especialmente desde que se dispuso del equipo de rayos X para medir las distancias interatómicas. En la antigüedad, el temple era un misterio y llegó a convertirse en un rito macabro. Cuentan las leyendas de Asia Menor que el acero se calentaba hasta alcanzar el calor del Sol naciente en el desierto, se dejaba enfriar hasta el purpúreo real, y se hundía en el cuerpo de un esclavo musculoso. Entonces la fuerza del esclavo se transfería a la espada.

III. LA PRODUCCIÓN DEL ACERO

LOS PRIMEROS ACEREROS

COMO el hierro se corroe fácilmente, no se conservan piezas muy antiguas que sirvan de pista para localizar a los primeros fundidores de hierro 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 solamente hay que conformarlo a base de martillazos, inclusive en algunos casos no hay necesidad de calentarlo. Los minerales ferrosos, por el contrario, son una mezcla de óxidos de hierro y una cantidad variable de otros compuestos de donde la separación del hierro no es nada fácil. Es probable que de manera accidental los antiguos hayan descubierto 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 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 que ahora 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. 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, 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 una hacha de hierro forjado, por ejemplo, se empacaba en medio de carbón de leña molido. El paquete se mantenía en un recipiente al rojo vivo por varias horas para que el carbono de la leña se difundiera hacia el interior del hacha, formando una capa dura de acero (hierro + carbono) alrededor de una matriz de hierro.

A la luz de lo que ahora se enseña desde la secundaria, los procedimientos que empleaban los antiguos eran muy claros. Si el hierro en los minerales está oxidado, hay que sacarle el oxígeno, y que mejor que el monóxido de carbono, al cual le gusta el oxígeno para convertirse en dióxido de carbono. Sin embargo, para los antiguos, que no sabían que existía el oxígeno, que no tenían el concepto de elementos o reacciones químicas, el asunto era sumamente oscuro. La magia y la metalurgia no tenían frontera.

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.

Claro que los principales responsables de la nube mitológica que oscurecía la metalúrgica eran los propios herreros. Ellos mismos, en su condición de nómadas en búsqueda de nuevos minerales, se encargaron de difundir sus ritos y misterios.

El hierro tuvo que dar 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 1 200 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. El bronce inicialmente se producía aleando el cobre con el 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 se funde a los 1 537°C.

Algunos investigadores creen que el hierro no sustituyó al bronce 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, se dice, 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 17. Para tener una ventaja notoria sobre el bronce, los herreros tuvieron que ingeniárselas para introducir un 0.4% de carbono en el hierro. Esto no es nada fácil. Como ya se dijo antes, los herreros antiguos empacaban a 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 tan altas como 950°C, toma nueve horas formar una corteza de acero (con 0.5% de carbono) de 1.5 mm de grueso alrededor de la pieza de hierro. Este proceso, con algunas variantes, todavía se emplea en la actualidad y se conoce como cementación.

A emerger la civilización de la oscuridad 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, se tomaba una barra de hierro y se cementaba; luego se martillaba hasta alcanzar el doble, de su longitud inicial; se doblaba de modo que una mitad quedara encima de la otra y se martillaba al rojo vivo hasta que soldaran las dos mitades, quedando en el interior una capa de acero. El proceso se repetía hasta que la hoja de espada tuviera una textura similar a la de un pastel de mil hojas. En sables japoneses se han encontrado, efectivamente, 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 (2^{12}). 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 uno o dos dobleces.

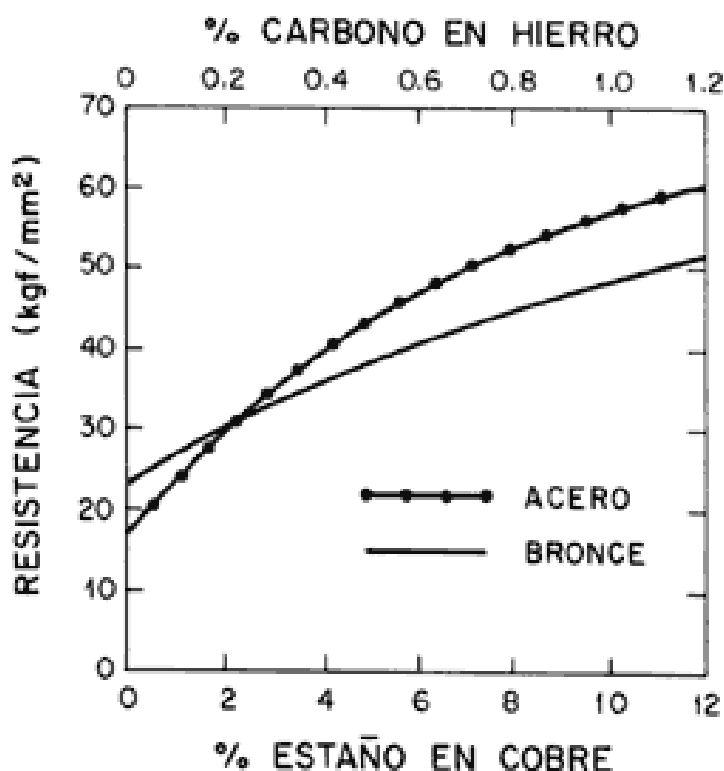


Figura 17. Curvas de la resistencia del bronce y del acero como función del contenido de estaño y de carbono respectivamente. Cuando el contenido de carbono en el acero supera el 0.4% se empieza a notar una ventaja sobre el bronce.

No fue sino hasta 1740 que el mundo occidental redescubrió el método del crisol para producir acero. Por esas fechas, un relojero y cirujano amateur llamado Benjamín 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. A solidificar, desde luego, el acero resultaba sumamente uniforme. El espía se lamentó de no haber trabajado esta idea tan simple desde mucho antes. 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, incluyendo entre éstos, desde luego, a los talleres indios productores de wootz.

Lo que entorpecía el avance de la tecnología en el acero era la obscuridad 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 hasta 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.

LA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL

Antes de la revolución industrial, el acero era un material caro que se producía en 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 "eutéctica" 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 (1 537°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 eliminaban 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 a 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 alambres 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 18. Al girar los rodillos aplanan al 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.

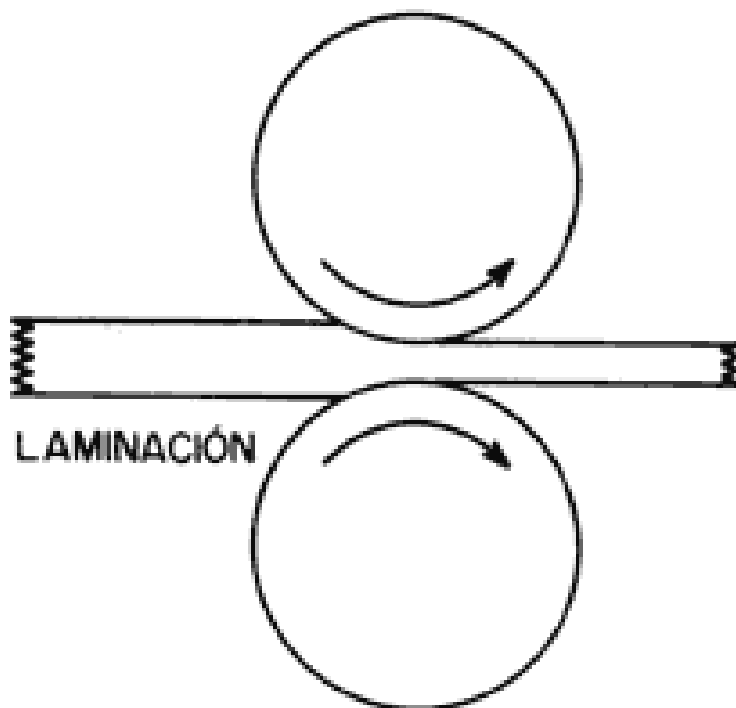


Figura 18. Proceso de laminación. Una placa o una barra de acero, generalmente al rojo vivo, se pasa por unos rodillos donde se produce un cambio en la sección transversal con la geometría deseada.

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 m 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 fueron de la hélice. El casco se construyó traslapando placas unidas con remaches a un poderoso marco de vigas.

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 19, donde se inyecta aire soplado desde la parte inferior, que a su paso a través del arrabio líquido logra la oxidación de carbono. Así, el contenido de carbono se reduce al 4 o 5% a alrededor de un 0.5 %. Además el oxígeno reacciona con las impurezas del arrabio produciendo escoria que sube y flota en la superficie del acero líquido. Como la combinación del oxígeno con el carbono del arrabio es una combustión que genera calor; Bessemer acertadamente sostenía que su proceso estaba exento de costos por energía. La idea era fantástica.

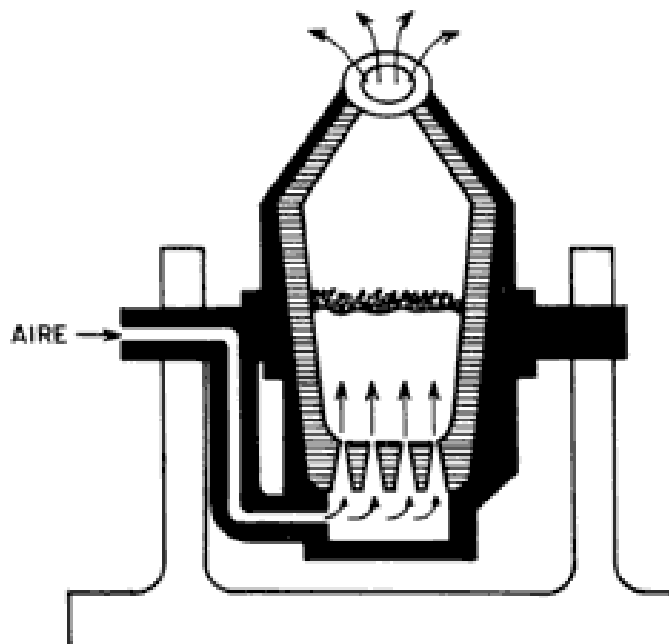


Figura 19. Convertidor de arrabio en acero inventado por Henry Bessemer. Un flujo de aire se inyecta por la parte inferior del horno para que elimine gran parte del carbono y otras impurezas del arrabio por oxidación. Este diseño fracasó inicialmente porque el refractario que cubría las paredes del horno era de tipo "ácido".

Bessemer logró convencer a los grandes señores 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: sílice. En la jerga de los refractarios a éstos se les llama "ácidos" para distinguirlos de los óxidos metálicos, que se denominan "básicos". La triste 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 quitar el fósforo y el 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 sílica de sus paredes.

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 al carbón se, aprovechaban los gases expelidos. Se obtenían como subproductos amoniaco, benceno, tolueno, nafta aromática y brea de alquitrán.

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 20, 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 21).

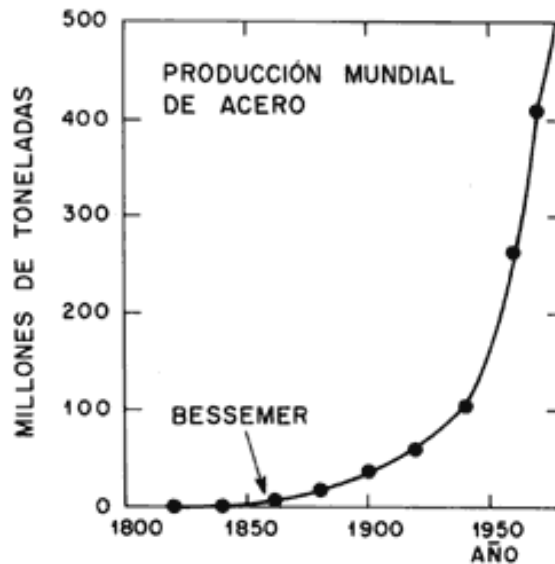


Figura 20. Gráfica de la producción mundial de acero en los últimos siglos. El invento de Bessemer fue el punto de partida del vertiginoso crecimiento.

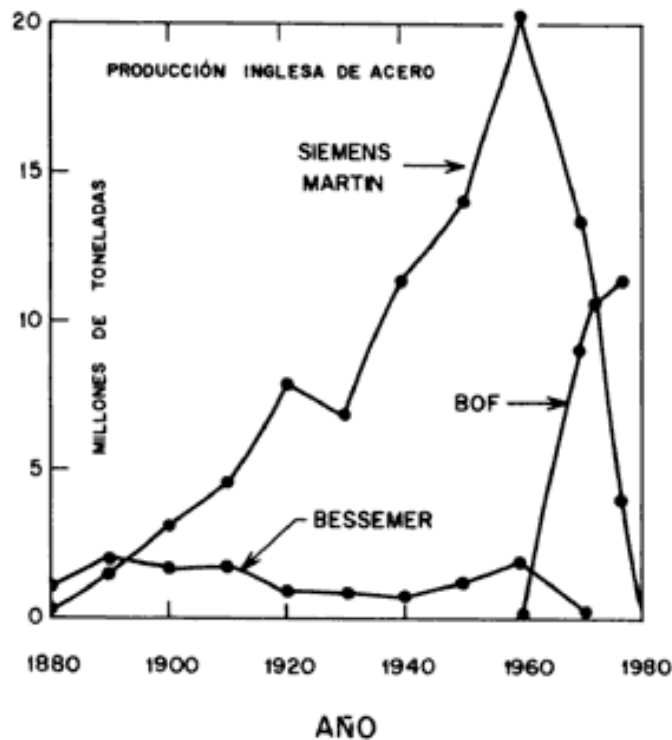


Figura 21. Producción de acero en Inglaterra. Los convertidores de Bessemer, "ácidos" o "básicos", dominaron inicialmente. El sistema Siemens-Martin fue el más utilizado en las primeras siete décadas del presente siglo. Los convertidores BOF cobraron importancia en los últimos treinta años.

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 22 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, la Gran Bretaña pasó del séptimo al décimo y Corea del Sur se movió del lugar 25 y se puso en el 15.

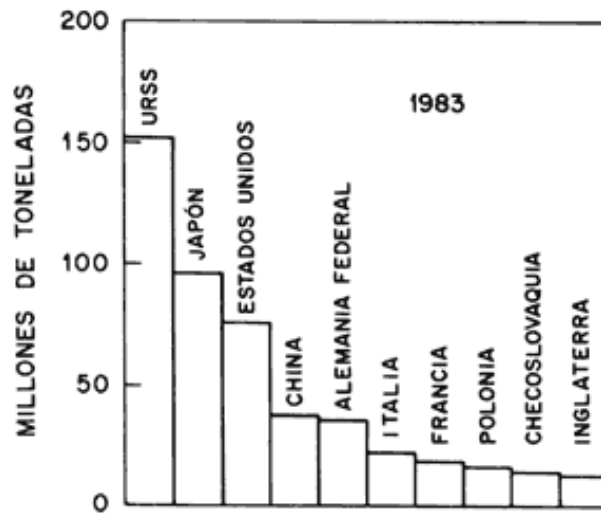


Figura 22. Los diez mayores productores de acero en el mundo en 1983.

LOS ALTOS HORNOS

Antes de que desaparezcan de la faz de la Tierra, vale la pena describir a los modernos dinosaurios que ahora producen 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 23, se logra la transformación del mineral de hierro en arrabio. Este tipo de horno es el que tienen actualmente la Siderúrgica Lázaro Cárdenas-Las Truchas, en la costa del Pacífico de Michoacán; Altos Hornos de México, en Coahuila; y el que tenía la Fundidora de Monterrey que cerró hace algunos años. También este tipo de hornos fueron los que, abatidos por las recientes sacudidas tecnológicas, cayeron dinamitados a principios de 1986 en la Bethlehem Steel Corporation de Pennsylvania.

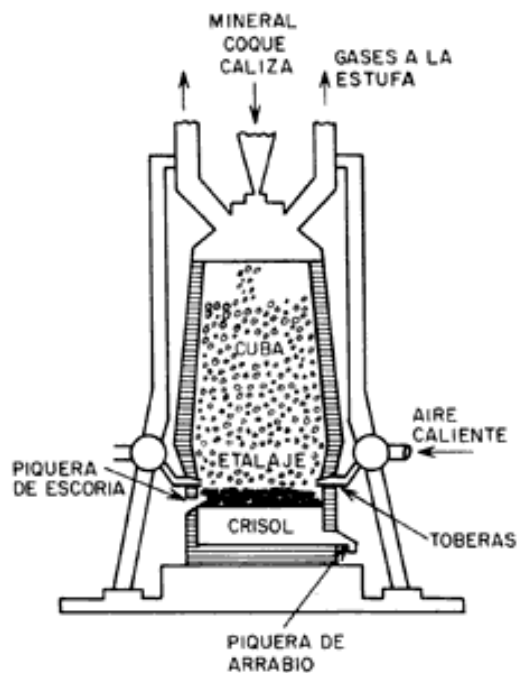


Figura 23. En el alto horno, el mineral de hierro, el coque y la caliza se cargan por la parte superior. Por las otras toberas se inyecta el aire caliente que enciende el coque y libera el monóxido de carbono necesario para reducir al óxido de hierro. El arrabio, producto final del alto horno, se colecta 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 (óxido de silicio) Es necesario deshacerse del sílice para evitar que una parte del hierro se desperdicie al formar compuestos con esta sustancia. Lo anterior se logra agregando piedra caliza. La caliza tiene la propiedad de que, a altas temperaturas, tiene mucha afinidad por el 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 ya 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 23). Casi todo el alto horno se mantiene lleno de carga. Por la parte inferior, utilizando ductos llamados 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.

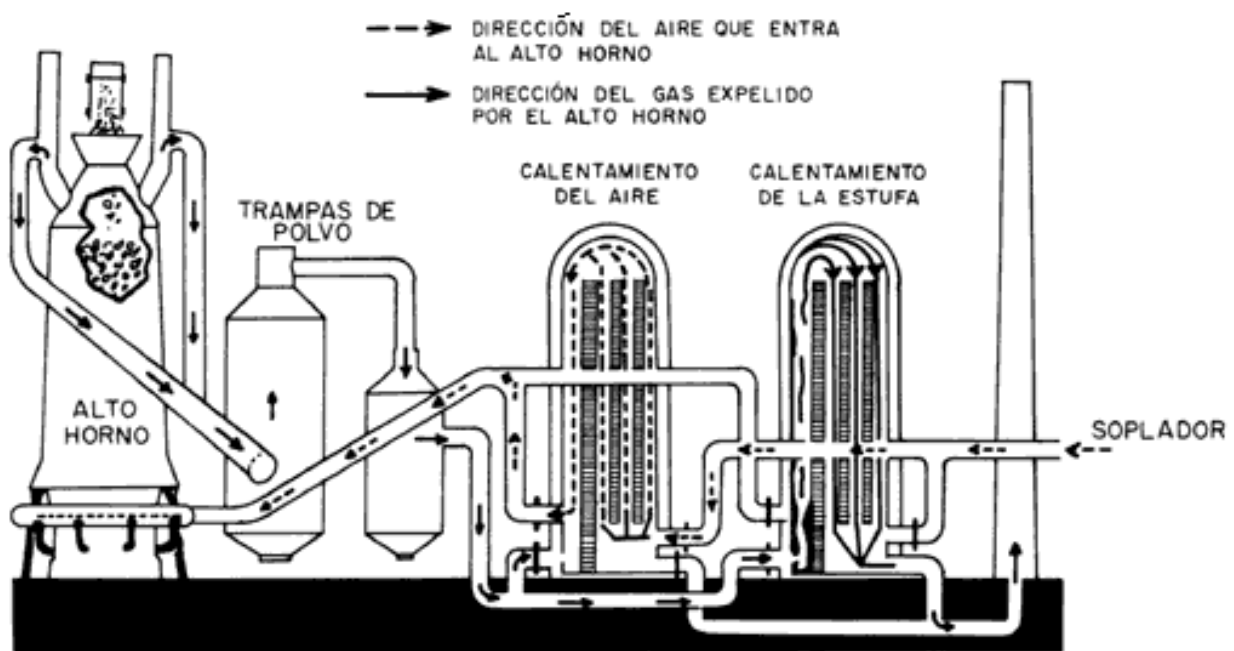
En el alto horno, el aire caliente sirve para producir la combustión del coque y para elevar la temperatura. El oxígeno del aire se combina con el carbono para producir el monóxido de carbono que, a su vez, reacciona con el óxido de hierro para producir hierro y bióxido de carbono.

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 del 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 ductos hacia enormes estufas donde se logra la combustión total de los mismos. En el camino, como se ilustra en la figura 24, 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). Las estufas son 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, y alcanza temperaturas superiores a los 1 000°C. En la figura 24, la estufa de la izquierda está 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 23). Allí la temperatura alcanza los 1800°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 que está en la parte inferior del alto horno.



ALEXANDER Y STREET, 1985

Figura 24. 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 1 000°C.

La escoria y el arrabio se sacan del crisol por unos ductos 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 25. Consiste en una olla de acero recubierta en su interior con material refractario del tipo básico, óxido de magnesio o algo así. A diferencia del convertidor de Bessemer (Figura 19) donde se soplabla 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 chumaceras que le permiten girar.

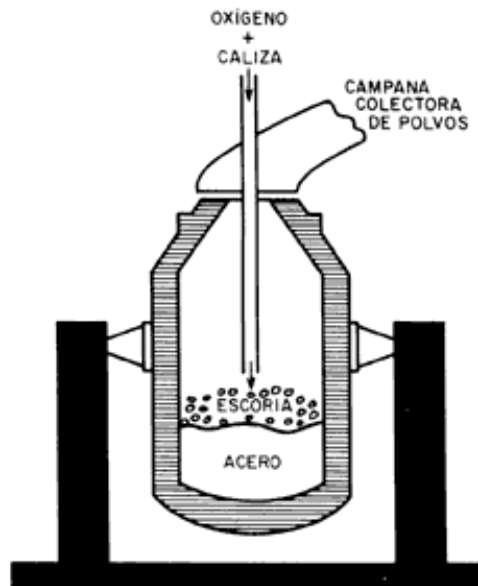


Figura 25. Mediante un chorro de oxígeno con polvo de piedra caliza el arrabio es convertido en acero en un BOF, El oxígeno reacciona con el carbono del arrabio y lo elimina en forma de bióxido (o monóxido) de carbono. La caliza sirve para eliminar impurezas, entre las que destaca el fósforo.

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 combustóleo y carburos de silicio y calcio.

La entrada de los convertidores BOF al mercado mundial fue muy acelerada. En la figura 21 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.

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 la vuelta de 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

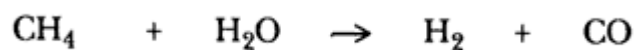
forma sumamente onerosa han tenido que enfrentar problemas de liquidez financiera, de abastecimiento confiable, de materias primas y de continuidad en la relación laboral.

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) a 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 26. 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.

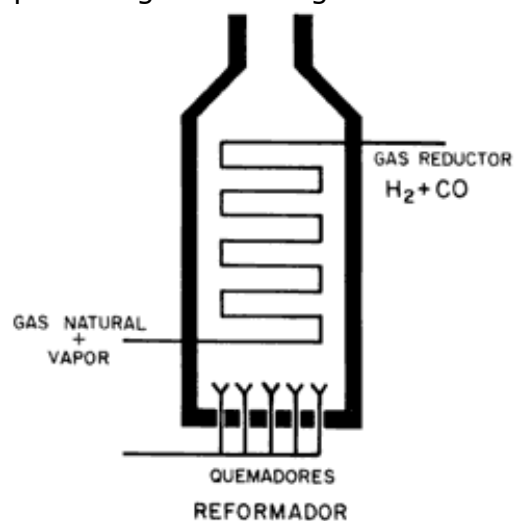


Figura 26. El reformador es un reactor químico que a altas temperaturas convierte una mezcla de gas natural y vapor en un gas de alto poder reductor formado de hidrógeno y monóxido de carbono.

El hidrógeno y el monóxido de carbono, agentes reductores (desoxidantes) sumamente, efectivos, salen del reformador acompañados de pequeñas cantidades de gas natural y bióxido 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 del tamaño de una canica (a 2 cm, de diámetro), cómo se indica en la figura 27.

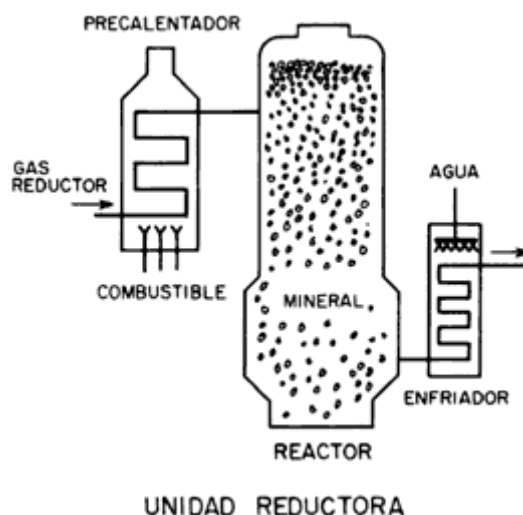


Figura 27. La unidad reductora consta de una enorme vasija donde se deposita un aglomerado de esferas del mineral por donde pasa el gas reductor previamente calentado a altas temperaturas. Posteriormente el gas residual es enfriado en una tubería bañada con agua.

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 28 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.

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

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%

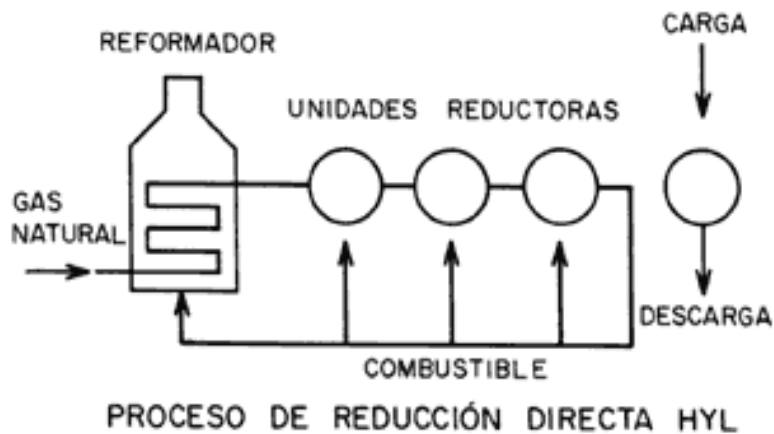


Figura 28. Una planta de reducción directa es un ensamble de un reformador y varias unidades reductoras. Las materias primas y los minerales en el proceso HYL son aprovechados al máximo al emplear el gas reductor residual como combustible para las unidades calefactoras.

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.

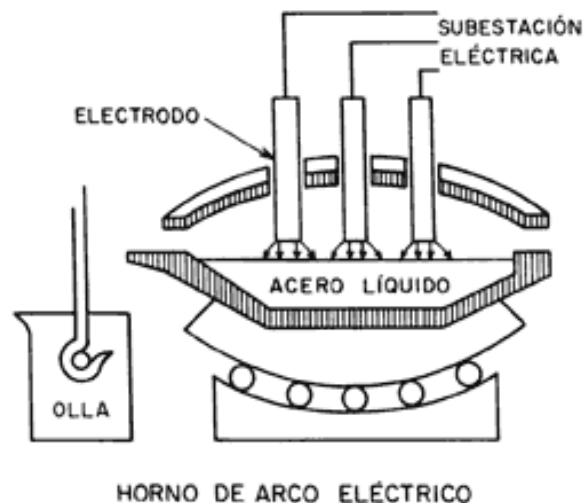


Figura 29. El horno de arco consta de una vasija recubierta con refractarios donde se coloca chatarra y/o hierro esponja, que se funden con el paso de una corriente eléctrica introducida con electrodos de grafito.

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 29. El acero fundido se pasa a una olla donde, en ocasiones, se hace el ajuste final de la aleación. Finalmente, el acero se vacía en moldes adecuados a cada proceso de fabricación posterior.

MINIACERÍAS

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 miniacerías, 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 carbono (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. 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.

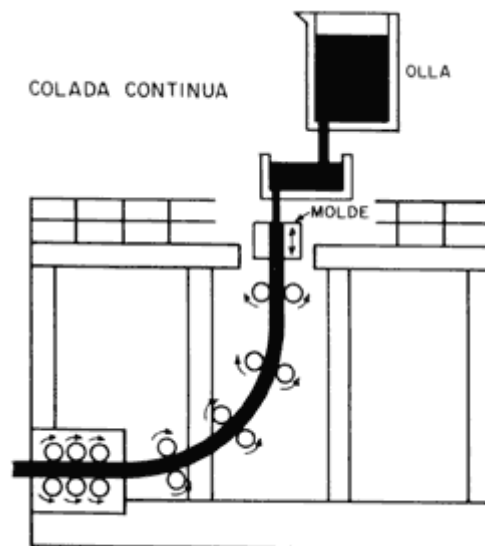


Figura 30. En el proceso de colada continua se producen barras de sección cuadrada (palanquillas) en un molde, directamente a partir de acero líquido. La colada continua produce un ahorro considerable de trabajo y energía con respecto a los procesos menos recientes que producen lingotes con el acero 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 30. El acero líquido de la olla se vacía en un recipiente 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 costo de inversión bajísimo 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.

Ubicada a un lado de la carretera que une a las ciudades de Saltillo y Monterrey hay una miniacería de la compañía "De Acero". En esa zona del país el cielo es muy azul y transparente casi todo el año. El azul del cielo, la tierra clara y la escasa vegetación confirman el bello paisaje del semidesierto mexicano. La presencia de cualquier fuente emisora de humos se delata a distancias de kilómetros. Sin embargo, a menos de cien metros del horno de arco eléctrico de la miniacería, el cielo se ve siempre azul y transparente. Al entrar, oportunidad que he tenido en un par de ocasiones, pude observar el horno de arco eléctrico en plena operación. Tiene un sistema muy efectivo para captura y precipitación de polvos contaminantes. Estos polvos, que por cierto son muy atractivos para las industrias cementeras, se colectan en una campana colocada arriba del horno eléctrico y son llevados por ductos hasta unos depósitos donde se precipitan. "Una parte fundamental de nuestra rutina de trabajo" —me dijo, orgulloso, un ingeniero amigo que labora allí—, "es mantener en operación el sistema de control de contaminantes." La mancha café y gris que frecuentemente se observa alrededor de muchas acerías en México debería ya ser cosa del pasado.

IV. 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, de nombre Robert Mushet, se le suele atribuir la paternidad de los aceros especiales para fabricar herramientas. Esto, obviamente, es injusto, porque la búsqueda de mejores herramientas ha sido tarea de la humanidad por siglos. Tres décadas antes de los desarrollos de Mushet, el ingeniero ruso Pavel Anosof había publicado, en dos tomos, su redescubrimiento del arte legendario de la producción del acero de Damasco y propuso su aplicación para fabricar una gran variedad de herramientas. Sin embargo, lo cierto es que Mushet tuvo mejor suerte porque las ideas de Anosof nunca se aplicaron.

Robert 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" o colmillo largo. Se la pasan con uno o más problemas en mente, generando nuevas aleaciones a base de prueba y error. Eso de 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 (exactamente en ese orden, dirían los maliciosos) 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 la sugerencia de adicionar manganeso durante la aceración en los convertidores de arrabio en acero de Bessemer. En el plano comercial, esto representó uno de los mayores impulsos al desarrollo tecnológico 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 partículas alargadas que hacen al acero más maquinable. El manganeso, además, incrementa la resistencia del acero. 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 barra de acero se templó cuando la extrajo del horno al rojo vivo y la dejó enfriar en el aire lentamente. Esto llamó mucho su atención porque normalmente los aceros requieren de un enfriamiento muy rápido para templarse, cuando al rojo vivo se sumergen en agua. 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 al flamante "acero especial de Robert Mushet" fracasó. Algunos años después otra compañía inglesa logró establecerse con este producto. Transcurrían entonces los años setenta del siglo pasado.

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 hacen con aceros de alta velocidad. A principios del presente siglo los aceros de alta velocidad llevaban un alto porcentaje de tungsteno, alrededor del 18%. Contenían cromo, en un 4%; además del carbono, el manganeso y el 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 estaba completamente 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 todo un arte. 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 tomar en cuenta 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 el cuadro 2 ha sido causa de conquistas, colonizaciones, guerras y golpes de Estado. Lamentablemente la madre naturaleza distribuyó de manera muy desigual estos elementos, que se han vuelto estratégicos 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.

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

Características	Elemento*
Dureza a alta temperatura	tungsteno, molibdeno, cobalto, vanadio, cromo, manganeso.
Resistencia al desgaste por fricción	vanadio, tungsteno, molibdeno, cromo, manganeso.
Endurecimiento profundo	manganeso, molibdeno, cromo, silicio, níquel, vanadio.
Distorsión mínima en el temple	molibdeno, Cromo, manganeso.
Resistencia al impacto	vanadio, tungsteno, molibdeno, manganeso, cromo.

El cromo, que influye en todos los renglones que se mencionan en el cuadro 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 31.

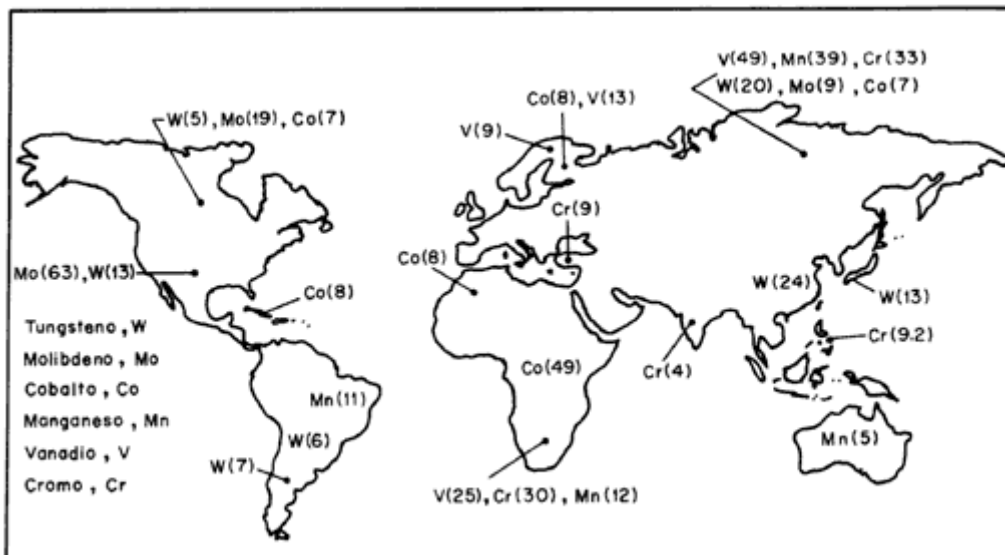


Figura 31. Principales zonas geográficas de extracción de minerales que contienen los elementos aleantes más importantes para la fabricación de aceros especiales. Su distribución sobre la corteza terrestre está sumamente concentrada en unos cuantos países. El número entre paréntesis que sigue al símbolo de cada elemento representa al porcentaje de la producción mundial localizada en la zona.

Los datos empleados para construir el mapa de la figura 31 corresponden a los centros más importantes de producción a finales de la década de los sesenta. En los últimos años se han abierto grandes expectativas debido a los descubrimientos de enormes yacimientos localizados en los lechos marinos y en la Antártida. Es probable que el mapa geoeconómico de los minerales estratégicos sufra cambios importantes en un futuro no muy lejano.

EL ENDURECIMIENTO SUPERFICIAL

La competencia entre la dureza de los aceros y su tenacidad es casi tan vieja como el acero mismo. Es fácil hacer que un acero sea duro aunque frágil, o que un acero sea dúctil y tenaz, pero blando. Que sea duro, dúctil y tenaz ya no es tan fácil. Siempre se tiene que llegar a un compromiso porque, de lo contrario, una propiedad se come a la otra.

Muchas herramientas dependen de su filo para poder trabajar en forma continua. Al perforar un acero, la broca sufre el desgaste de sus filos. Como la resistencia al desgaste de los aceros es casi siempre proporcional a su dureza, entre 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 maquinar. 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.

Durante cientos de años los metalurgistas le han dado vueltas a este problema y también desde hace cientos de años han sabido que las herramientas de corte solamente necesitan enfrentar el problema del desgaste en la superficie y no en su interior. Visto así, el problema se simplifica un poco porque se puede endurecer considerablemente una capa de una a dos décimas de milímetro 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. Aquí y allá, en el espacio y en el tiempo, se han localizado vestigios que indican los esfuerzos 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 las cabras, 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 de la superficie de los aceros. El endurecimiento es termoquímico porque el proceso ocurre a temperaturas elevadas y porque se emplean agentes químicos como endurecedores.

La física de los plasmas no se refiere al plasma de la sangre que se empleaba para nitrurar a los aceros en la antigüedad. El plasma, en la física, se refiere, a un cuarto estado de la materia constituido por un gas ionizado. Aquí, ionizado quiere decir que los átomos o las moléculas que constituyen al gas no tienen carga eléctrica neutra: son iones. Normalmente los átomos en el estado gaseoso tienen carga neutra porque el número de electrones negativos que rodean al núcleo del átomo es igual al número de protones positivos que tiene dicho núcleo. Los átomos se convierten en iones cuando sueltan uno o más electrones, desequilibrando así su carga.

El gas en el interior de la flama de un cerillo está en el estado de plasma y lo mismo ocurre con el gas de una lámpara de neón que está encendida. En ambos casos los gases contienen una gran cantidad de iones, aunque no necesariamente todos los átomos o moléculas están ionizados en el interior de un plasma.

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, en luz.

El paso de una corriente eléctrica a través del nitrógeno en estado gaseoso produce muchos iones positivos de nitrógeno. Son iones positivos porque la descarga eléctrica induce la separación de electrones, que tienen carga negativa, de las capas exteriores de los átomos. Este fenómeno se aprovecha para atraer a los iones positivos de nitrógeno hacia el acero, por la vía de conectar 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 32. Es una cámara muy bien sellada que se evacua, es decir, se le saca el aire con una bomba de vacío, una especie de aspiradora muy efectiva. Cuando la presión de aire es bajísima en la cámara (algo así como una millonésima de la presión atmosférica), se introduce, por una válvula muy bien regulada, una mezcla de gases de nitrógeno e hidrógeno. El flujo de nitrógeno e hidrógeno 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 a la pieza de acero por el lado negativo, y al cuerpo de la cámara por el lado 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.

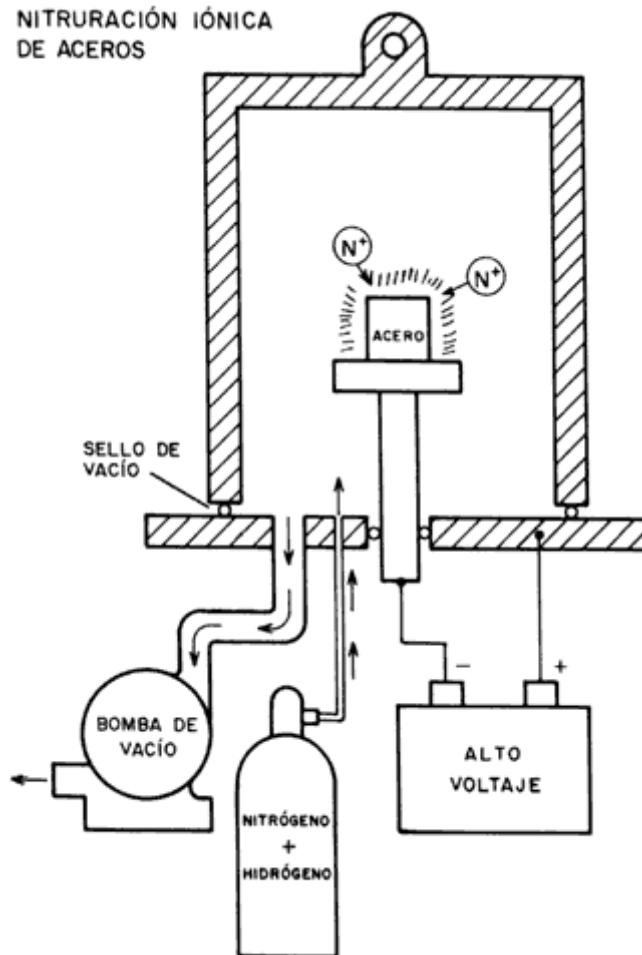


Figura 32. Diagrama de un sistema de plasmas para la nitruración iónica de los aceros. La pieza de acero se coloca sobre un portamuestra adentro de una cámara sellada herméticamente. Con una bomba de vacío se extrae el aire y, posteriormente, se inyecta un flujo muy pequeño de una mezcla de gases de 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.

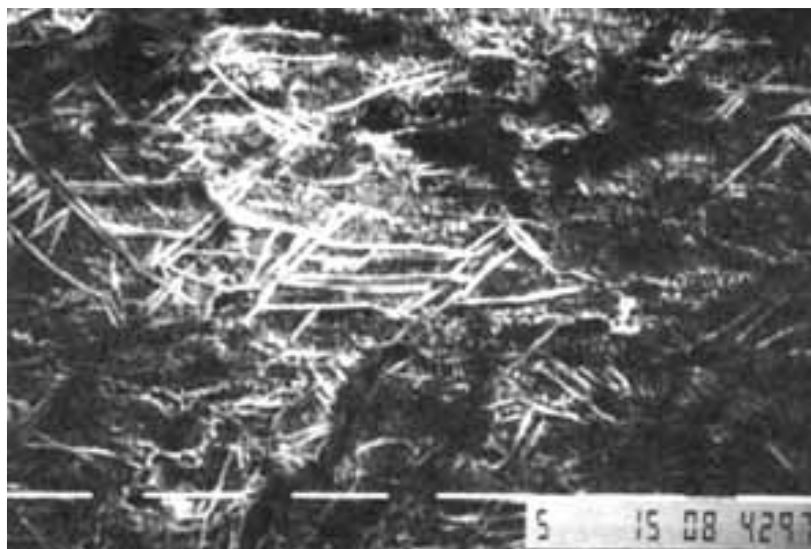


Figura 33. Metalografía de una superficie de un acero de ultra alto carbono endurecida con nitruración iónica. Las partículas en forma de fibras son nitruros de hierro.

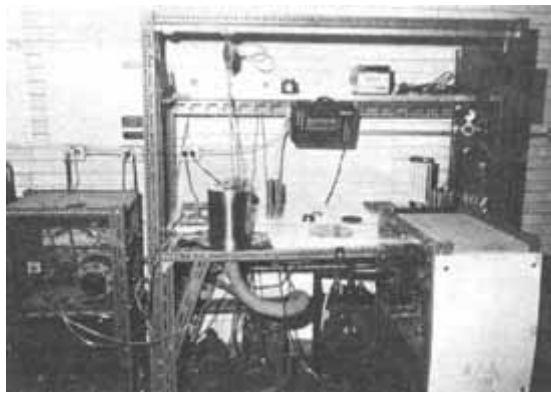


Figura 34. Fotografía del sistema de plasmas para nitruración iónica.

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, partículas 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 33. Ésta corresponde a la superficie de un acero de ultra alto que fue nitrurado en la cámara que se muestra en al figura 34.

El incremento de la dureza superficial de los aceros puede medirse empleando un instrumento llamado microdurómetro. Es un microscopio óptico que tiene como aditamento una punta de diamante en forma de pirámide que se ilustra en la figura 35. Al aplicar una carga definida, la punta de diamante se hace incidir sobre una superficie de acero. Luego se retira la punta y se mide, con la ampliación del microscopio, la diagonal de la huella que se dejó sobre la superficie. La dureza del acero se calcula con la siguiente fórmula:

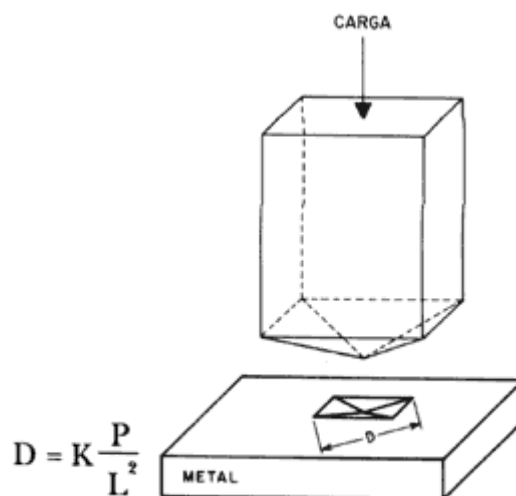


Figura 35. Puntas de pirámide de diamante y la huella que deja en un metal. Si la carga se mantiene invariable la punta de diamante hará una huella grande en un metal blando. En un metal más duro, por el contrario, la punta penetrará menos y la huella será menor.

donde P es la carga que se aplicó sobre la punta de diamante, L es la diagonal y K es una constante propia del equipo de medición. Si la carga aplicada no se cambia, la dureza de un material es inversamente proporcional al cuadrado de la diagonal de la huella. Si la huella es grande, la dureza es pequeña porque se trata de un material blando. Por el contrario, un material duro deja penetrar poco al diamante y sólo se forma una huella pequeña.

Usualmente la muestra de acero se corta en la dirección perpendicular a la superficie nitrurada y se pule con abrasivos muy finos hasta quedar como espejo. La punta de diamante se aplica en puntos cercanos a la cara nitrurada hasta puntos en el interior del material, y deja el tipo de huellas como las que se muestran en la figura 36. Abajo, en la misma figura, se presentan los resultados de una determinación de dureza en un acero de alta velocidad, M2, nitrurado iónicamente.

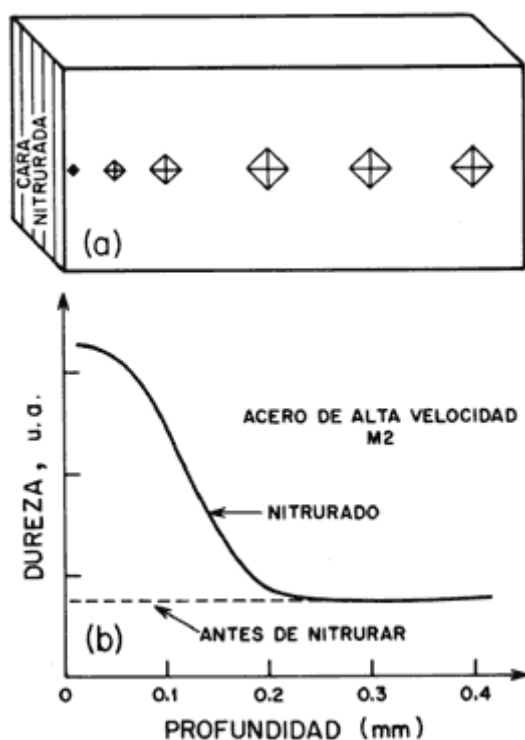


Figura 36. (a) Corte de una muestra para medir el incremento de dureza que se logra con la nitruración iónica de los aceros. Las huellas del microdurómetro serán más pequeñas cerca de la superficie nitrurada y mayores en el interior del acero. (b) Perfil de dureza de un acero de alta velocidad nitrurado iónicamente. En la capa exterior la dureza se incrementó notablemente.

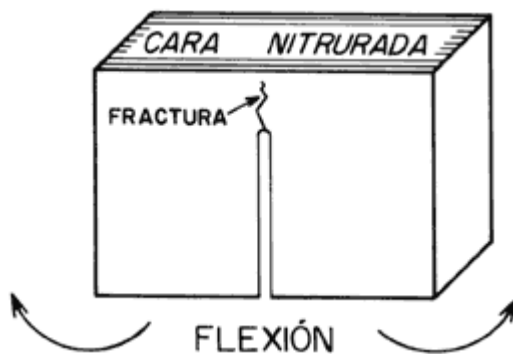


Figura 37. Muestra preparada para hacer una fractografía de un acero endurecido superficialmente.

El endurecimiento superficial de los aceros también puede observarse en una "fractografía". La forma de la superficie que deja una fractura de un acero endurecido superficialmente es muy peculiar. Para hacer esta observación se corta una muestra en forma de paralelepípedo ranurado, como se indica en la figura 37. La superficie opuesta a la ranura es la que se expone a la nitruración iónica por varias horas. Cuando la muestra se extrae de la cámara se moja en nitrógeno líquido para que su temperatura baje hasta 196°C bajo cero. La ranura de la muestra se aprovecha para inducir la fractura, aplicando un esfuerzo de flexión (Figura 37). La superficie, de la fractura se examina después en un microscopio electrónico de barrido donde se obtiene la "fractografía" de la figura 38. Cerca de la superficie nitrurada la fractura es más brillante porque el acero no se deformó mucho. Más adentro, el material se fracturó de una manera más dúctil porque se observa mayor desgarramiento. La frontera, no muy bien definida, entre la zona endurecida y aquella que se mantiene dúctil se señala en la figura 38.

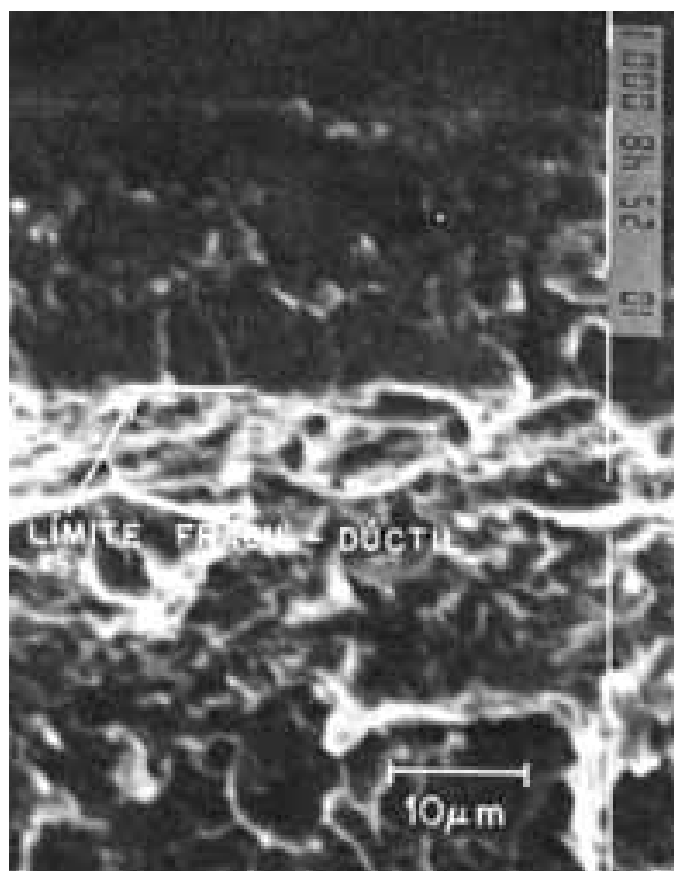


Figura 38. Vista de la fractura de un acero nitrurado iónicamente. Cerca de la superficie nitrurada la fractura se ve más brillante, porque es poco profunda y frágil. En el interior del acero hay mayor desgarramiento porque el acero es más dúctil. Fotografía de José Luis Albarrán y Alfredo Sánchez Ariza.

V. EL ACERO Y LOS SISMOS

DOS SEMANAS después del sismo del 19 de septiembre de 1985, el director del Instituto de Física, convocó a los investigadores a una reunión. Dijo lo siguiente: "La reconstrucción de la ciudad de México ha comenzado. Los investigadores tenemos la obligación de recopilar y procesar al máximo la información que está en las ruinas y creo que podemos proponer ideas que sirvan para mitigar los efectos de los sismos que seguramente vendrán en el futuro".

Jorge Flores, Octavio Novaro y Thomas Seligman físicos teóricos, se propusieron estudiar el fenómeno de propagación de ondas sísmicas, que un año más tarde se publicaría en *Nature*, una de las revistas científicas más prestigiadas del mundo. Otros se ofrecieron a estudiar el cemento, el agua, las radiaciones, etc. A los metalurgistas nos encargaron analizar el acero de las construcciones. Después de que la sesión hubo terminado, fuimos por seguetas, cizallas, guantes, cascos, batas y conseguimos las llaves de una de las camionetas de la UNAM. Esa misma tarde recorrimos la colonia Roma y sus alrededores. El panorama era desolador y el ambiente tenso. Mientras tomábamos muestras de varillas, discutíamos sobre las posibilidades de generar líneas de investigación que pudieran llevar a la proposición de acciones relevantes. La opción de investigación más obvia —investigar la resistencia mecánica del acero— difícilmente podría conducir a conclusiones claras. Por un lado las varillas en las últimas décadas se han producido en varios niveles de resistencia, de modo que los resultados tendrían que ser muy variables. A esto se sumaba que los trozos de varilla expuestos al aire en las ruinas, accesibles para nosotros, estaban severamente deformados y consecuentemente sus propiedades mecánicas ya no eran las mismas que las de la varilla recién salida de la fábrica. La deformación puede endurecer el acero y hacerlo parecer menos dúctil. Además, el acero puede ser menos resistente si tiene grietas en su interior.

También se nos ocurrió explorar la forma de la fractura de las varillas. En un edificio en la calle de Fray Servando había muchas varillas fracturadas. El edificio había sufrido un colapso completo. Todos los pisos, doce aproximadamente, estaban empalmados uno encima del otro. Las columnas que sostenían a los pisos quedaron erguidas y las varillas que amarraban a los pisos con las columnas estaban expuestas y fracturadas. Pero el colapso no era necesariamente atribuible a las varillas rotas. Las varillas tenían la función de sostener la carga del piso que les correspondía. Si sobre un piso cae el de arriba el impacto puede superar cualquier previsión. ¿Por qué se desprendió el piso de arriba que seguramente inició el colapso? Pudo haber sido que las varillas, no hayan resistido lo debido; o que la cantidad de varilla fuese insuficiente; o que el cemento no desempeñó su papel; o que el sismo en ese lugar fue de una intensidad superior a la prevista en el diseño; en fin, puede haber muchas causas. Nada claro se podía decir allí en relación con la varilla.

Días después formamos las brigadas nuevamente. Esa vez fuimos al centro de la ciudad de México. Vimos al conjunto Pino Suárez en ruinas. Dos edificios quedaron en pie, algo inclinados, y uno se colapsó. Eran edificios de acero estructural, a diferencia de los de concreto reforzado, de donde habíamos obtenido muestras anteriormente. Estaban sostenidos por enormes columnas, de sección cuadrangular, que fueron construidas con placas de acero soldadas, de modo que a lo largo de las aristas subían los cordones de soldadura. En el edificio colapsado, las columnas se doblaron en zonas donde los cordones de la soldadura se abrieron. En este lugar no pudimos tomar muestras porque estaban fuera de nuestro alcance. Se necesitaba equipo mayor para lograrlo.

De allí nos fuimos al edificio del Hospital Juárez que se derrumbó. La parte colonial del conjunto quedó en pie y se colapsó la unidad de doce pisos que se inauguró en 1970. A dos, semanas del sismo todavía había mucha actividad de rescate. Había por lo menos 300 petroleros de PEMEX, bien equipados, apoyados por muchos voluntarios, entre los que destacaban un grupo de Arquitectura de la UNAM. "Fíjense en las varillas de alto calibre, de diámetro grande" —sugirió uno de ellos. Efectivamente, la primera muestra que tomamos era de 38 mm de diámetro, la más gruesa que se fabrica, regularmente, en México. Un tramo de la varilla estaba expuesta, es decir, el concreto que había alrededor se había desmoronado.



Figura 39. Fractura de una varilla de grueso calibre en soldadura. La regla de oro de los buenos soldadores indica que la unión de dos piezas debe resultar más resistente que las piezas mismas. Si alguna fuerza de magnitud inesperada provocara la ruptura, la línea de fractura debería quedar fuera del área de la soldadura.

En un extremo la varilla estaba rota precisamente en una unión soldada (Figura 39). Esto nos llamó mucho la atención porque no debía ser. Cuando la estábamos examinando, uno de los rescatistas comentó que él había visto varias como ésta y nos dimos a la tarea de tratar de encontrarlas. No fue fácil encontrar uniones soldadas en aquel mar de escombros.

Regresamos al Instituto de Física entrada ya la noche y para entonces teníamos por fin el hilo conductor de nuestro trabajo: la soldadura de los aceros de refuerzo. El tema es crítico. Las soldaduras de los aceros de refuerzo son de alta relevancia para los especialistas. En su diseño, las estructuras de concreto se consideran como un monolito. El análisis estructural parte de la premisa de que la resistencia a las cargas y a las fuerzas externas de todos los elementos, columnas y trabes, actúa como una unidad. Claro que, por razones prácticas, la estructura real de un edificio se construye por partes. Sin embargo, un aspecto importantísimo de la técnica de construcción es lograr el comportamiento monolítico de la estructura acabada. Así como es imposible colar toda la estructura de concreto de manera continua, así las uniones de las varillas son inevitables.

La unión de varillas puede hacerse de manera mecánica, con varios tipos de traslapes o abrazaderas, o por soldadura. Cuando se unen varillas delgadas se recurre frecuentemente al traslape, que usan mucho los albañiles en construcciones pequeñas. En edificios grandes se emplean las varillas más gruesas que, como la técnica indica, ya no pueden traslaparse y se unen con mucha frecuencia mediante la soldadura de arco eléctrico.

La soldadura de arco eléctrico consiste en unir dos piezas de acero con acero fundido producido por el flujo de una enorme corriente eléctrica a través de una varilla llamada electrodo, como se indica en, la figura 40. El paso de la corriente eléctrica por las piezas que se sueldan produce la fusión de varios milímetros de la superficie.

Al enfriarse y solidificarse el material de aporte y de la superficie de las piezas, éstas quedan unidas.

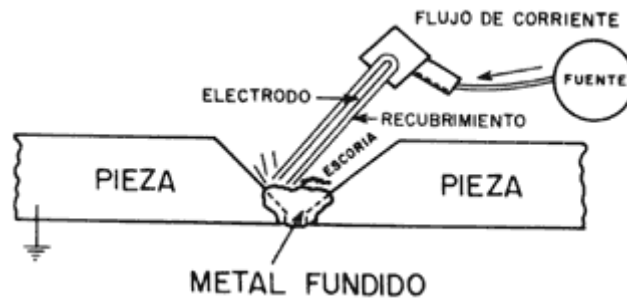


Figura 40. Proceso de soldadura con acero eléctrico. El flujo de una enorme corriente eléctrica produce la fusión de la punta del electrodo y de la superficie de las piezas. El recubrimiento del electrodo ayuda a generar una atmósfera y una escoria que protegen al metal líquido de la oxidación y de otros agentes externos.

Los electrodos consisten en una varilla delgada de acero de bajo carbono recubierta con una mezcla de compuestos que sirven para estabilizar el arco eléctrico, generar una atmósfera protectora que evite la formación de óxidos y nitruros, promover la formación de una escoria también protectora y, en algunos casos, proveer de elementos de aleación. Entre los materiales que se utilizan para fabricar el recubrimiento destacan el rutilo (que es el óxido de titanio), el carbonato de calcio, la fluorita, el acetato de celulosa, algunos silicatos, arcillas, polvos de hierro y manganeso, y la mica.

Durante la elaboración de una soldadura ocurren muchas reacciones químicas y transformaciones en la estructura del acero, cuya combinación determina el éxito o fracaso de una soldadura. La experiencia acumulada de muchos años y la síntesis de muchas investigaciones han conducido al establecimiento de rutinas que deben observarse:

a) Conocer la composición química de los aceros que se van a soldar. La soldabilidad del acero es muy susceptible al contenido de carbono. Los aceros de bajo carbono, (con menos del 0.25%) se sueldan con alta probabilidad de éxito. Los aceros de medio carbono (0.3 a 0.45%, C) y alto carbono (0.5 a 1.4% C) tienen alto riesgo de agrietamiento y requieren cuidados especiales. La formación de estructuras frágiles como la martensita, causada por los cambios de temperatura al soldar, son más probables en la medida en que el contenido de carbono aumenta.

b) Las piezas que se van a soldar deben tener, cortes (como los que se indican en la figura 41). Además, en el momento de la soldadura, las superficies deben estar limpias y libres de óxidos.

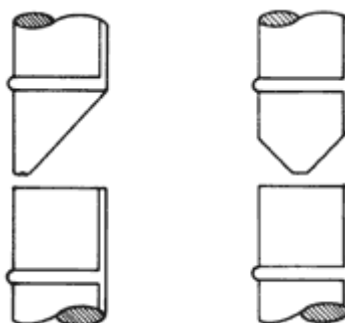


Figura 41. Cortes de bisel en varillas de grueso calibre que sirven para ampliar la superficie de amarre durante la soldadura.

c) Los electrodos deben seleccionarse adecuadamente para que la resistencia de la soldadura concuerde con la de la varilla. Además, deben utilizarse con mucho cuidado. La humedad penetra fácilmente en el recubrimiento de los electrodos y propicia la

entrada del hidrógeno durante la soldadura. El hidrógeno fragiliza el acero. Para evitar este problema los electrodos vienen de fábrica empacados en bolsas de plástico selladas. Cuando la bolsa se abre, los electrodos se exponen a la humedad ambiente y se deben utilizar en las próximas dos o tres horas. Si no es así, los electrodos se deben llevar a un horno secador. Las manchas de grasa y las despostilladuras también degradan los electrodos.

d) Certificar la calificación profesional de los soldadores. La soldadura requiere de una gran destreza, visual y manual, y de un cúmulo de conocimientos. Es además una actividad de alto riesgo profesional donde el deterioro de órganos como los ojos y los pulmones debe evitarse al máximo. Los ojos se dañan severamente con la radiación luminosa que produce el arco eléctrico y por eso se usa el filtro de luz que lleva el casco del soldador en la mirilla. Los pulmones se exponen a los gases tóxicos que se desprenden, el bióxido de nitrógeno y el ozono, entre otros.

e) Supervisar continuamente el proceso de soldadura. Al inicio de cada obra conviene que se hagan varias soldaduras de ensayo que se verifiquen con pruebas de tensión hasta la ruptura. La soldadura tiene que ser de resistencia suficiente para que la ruptura de dos varillas soldadas ocurra fuera de una zona de unos diez centímetros alrededor de la unión. También debe ser posible hacer un dobléz de 180° en la zona soldada sin que se rompa o se agriete. Cuando se sueldan varillas de diámetro mayor, lo mejor es hacer una radiografía de cada soldadura para asegurar la calidad.

LAS GRIETAS

La resistencia a la fractura de los materiales se reduce dramáticamente cuando existen grietas previamente formadas. Un ejemplo típico de la vida diaria es el corte de un lienzo de tela. La forma más fácil de cortarlo consiste en inducir el punto de ruptura en un extremo del lienzo con un pequeño corte con unas tijeras. Después, al estirar, la ruptura avanza en dirección perpendicular como se indica en la figura 42. Si se estira la tela sin antes inducir la ruptura se requiere aplicar un esfuerzo mucho mayor.

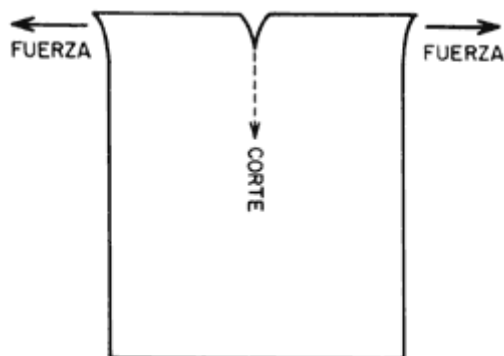


Figura 42. El corte de un lienzo de tela se facilita cuando previamente se hace una incisión. La línea de ruptura avanza, a partir de la incisión, en la dirección perpendicular a la fuerza aplicada.

Lo mismo ocurre con los demás materiales. Una grieta de dos milímetros en el interior de una barra de acero puede reducir su resistencia a la fractura a sólo una tercera parte. Algunas de las grietas que se dejaron en la soldadura que encontramos en las ruinas del Hospital Juárez se muestran en la figura 43 (a, b, c y d). Son demasiado grandes y por eso la ruptura ocurrió en las soldaduras. Por ejemplo, la que se muestra en la figura 43(a) debió haber tenido una resistencia menor al 10% de la esperada, encontramos otros problemas muy graves: no se hicieron los cortes de biselés, algunos electrodos no fueron apropiados, etcétera.

Se hizo un cálculo estadístico basado en las observaciones que hicimos en las muestras del Hospital Juárez. La probabilidad de que se haya contratado a un equipo calificado de soldadores durante la construcción resultó ser bajísima. Lo más probable (9 999 probabilidades de 10 000), es que haya sido un grupo de soldadores improvisados.

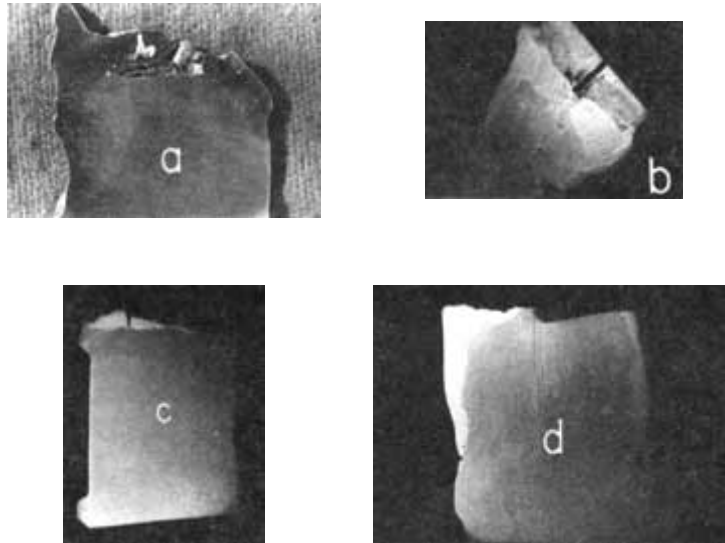


Figura 43. Metalografía de cuatro soldaduras causantes de una fractura. Puede apreciarse que ninguna tuvo corte de biselés. En (a) se observa una enorme grieta rellena de escoria y en (b) se formó una grieta en la zona reblandecida por el calor de la soldadura. En (c) y (d) hay, además, insuficiencia de material de aporte del electrodo.

Otra cosa interesante de este estudio afloró durante la inevitable consulta bibliográfica. Debíamos comparar nuestras observaciones con el código de procedimientos de soldadura que suponíamos existente. Primero resultó que en México no había tal código y luego que los códigos de otros países eran muy difíciles de conseguir. En las bibliotecas de la UNAM encontramos algunas recomendaciones sobre soldadura pero, por ejemplo, el código de Estados Unidos lo tuvimos que obtener del Instituto de Investigaciones Eléctricas de Cuernavaca. ¿Cómo se les puede pedir a los ingenieros civiles supervisar el procedimiento de soldadura si el acceso a la información necesaria es sumamente limitado. Cada soldador debería tener, junto con sus herramientas, un ejemplar de dicho código. La primera conclusión de nuestro trabajo fue sugerir que se elaborara cuanto antes un código mexicano para la soldadura de aceros de refuerzo.

LA SOLDABILIDAD

Siguiendo el mismo hilo conductor nos propusimos estudiar la soldabilidad de las varillas encontradas en edificios derrumbados por los sismos. La soldabilidad del acero es un concepto empírico que se usa para tratar de calificar la nobleza de un material para ser soldado. Como la, soldabilidad está estrechamente relacionada con la composición química del acero, decidimos analizar los elementos que componían cada una de las muestras de acero que, tomamos. Se encontró hierro como principal elemento; el manganeso casi siempre en una proporción menor al 2%; el carbono casi siempre entre, 0.3 y 0.5% (aunque algunas muestras tuvieron hasta el 1%); el fósforo y azufre que son indeseables, entre 0.01 y 0.08 %. el silicio, siempre inferior al 0.5% y otros elementos como el cromo y cobre que suelen aparecer porque vienen en la chatarra que a veces se usa como materia prima en la acerías. Las muestras se separaron en dos grupos. En el primero se catalogaron aquellas que tuvieron una composición química que según estándares internacionalmente serían aceptados,

serían recomendables para operaciones de soldadura. En el segundo agruparon las restantes, y éstas fueron la mayoría: el 70 % de las muestras.

La revisión bibliográfica, que se desarrolló paralelamente, se facilitó porque sobre este punto ya existía un cúmulo notable de trabajo en normatividad en México. La explicación de nuestros resultados fue obvia: ninguna de las normas oficiales mexicanas se comprometía con la soldabilidad del acero. ¿Por qué? Por razones técnicas y económicas.

En los años cuarenta, predominaba en México lo que se llama "varilla estructural". Era una varilla de bajo carbono y generalmente de buena soldabilidad. El problema que tenía era su baja resistencia en relación con otras opciones, porque una varilla podía cargar solamente hasta alrededor de 3 toneladas por cada centímetro cuadrado de sección. A mediados de los años cincuenta se iniciaron cambios en los procesos de fabricación para aumentar la resistencia de la varilla. La razón era económica, porque cuando se usa acero, más resistente se puede reducir el volumen de acero en las obras.

Las ventajas económicas de la transformación, que para 1975 estaba muy avanzada, opacaron mucho sus posibles limitaciones. La resistencia del acero dio un salto del 40% hacia arriba y lo mismo se logró respecto al ahorro, ya que las obras consumirían menos acero. Esto representó, además, un respiro en la tarea de satisfacer la necesaria expansión de la planta acerera.

Había dos posibilidades. Por un lado, se tenía la experiencia europea de aumentar la resistencia del acero por medios mecánicos: la torsión o la laminación en frío. Por el otro, se podía pasar de aceros de bajo a medio carbono, es decir, modificar la composición química. Los cambios vinieron en las dos vertientes.

Los aceros tienen la propiedad de endurecerse cuando se deforman. El caso del elástico es el más familiar. Un resorte, al irse estirando, se va volviendo más tenso. La tensión es proporcional a la elongación. En los mercados populares se experimenta este fenómeno en repetidas ocasiones al pesar las mercancías en las básculas de resorte. Cuando se carga la báscula, el resorte se alarga y se va tensando hasta que la fuerza de tensión, iguala al peso de la carga.

La deformación elástica no es muy relevante en el conformado de los metales porque desaparece cuando se retira la carga. Cuando una placa se deforma para hacer la defensa de un coche, se busca que cuando salga de la prensa ya no regrese a su forma original, es decir, que se haya deformado plásticamente.

Si un acero se deforma un poco, regresa a su forma original cuando se suelta. Sin embargo, si se deforma considerablemente ya no regresa a su forma, original. La deformación, sobrepasa el límite elástico y entra en la región plástica, que es de interés para el conformado mecánico.

Un método para aumentar la resistencia de la varilla consiste en torsionarla: en frío, es decir, la temperatura ambiente. Otro consiste en pasarla por unos rodillos acanalados, también en frío, de manera que, al salir; su diámetro se haya reducido. En ambos casos el acero se deforma plásticamente y su resistencia puede incrementarse de un 10% a un 40%, según el tipo de acero y la severidad de la deformación. Este proceso de endurecimiento se hace con ciertas precauciones. Si la torsión o la laminación son excesivas, el acero puede fracturarse o quedar muy frágil. Lo que hacen los fabricantes es determinar primero la deformación plástica total que aguanta su acero antes de romperse, y en su proceso aplican solamente de un 20% a un 50% de la deformación total. De esta manera el acero queda con una reserva dúctil.

El endurecimiento mecánico del acero de refuerzo tiene enormes ventajas económicas porque cuesta poco endurecerlo y ahorra cantidades importantes de acero en las obras. Además, el espectro de aplicaciones que tiene es muy amplio.

Como todos, los aceros endurecidos mecánicamente tienen limitaciones. Algunas de ellas aparecen cuando estos aceros se emplean en la construcción de componentes estructurales de edificios altos. Estos componentes requieren del uso de varillas de diámetro grande, de 32 a 38 mm, que muchas veces se unen por medio de la soldadura de arco eléctrico. Durante la soldadura de una de estas varillas, que con mayor propiedad deberían llamarse barras, la temperatura llega a varios cientos de grados en los alrededores del punto de unión. En la figura 44 se muestra una gráfica de la temperatura a una distancia de medio centímetro del punto donde se hace la soldadura como función del tiempo. Los máximos de la temperatura ocurren cuando el arco eléctrico se enciende y se deposita el material fundido; los mínimos se deben a que el soldador tiene que retirar el electrodo para mover la escoria con un cepillo metálico. La soldadura de una varilla toma más de dos horas y durante ese tiempo suele ocurrir un ablandamiento del acero por efecto del calentamiento. El endurecimiento mecánico del acero se degrada cuando se somete durante horas a calentamientos superiores a los 200°C.

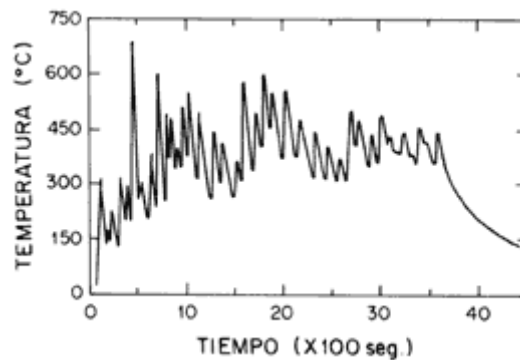


Figura 44. Ciclo térmico que sufre el acero a una distancia de medio centímetro del punto donde se aplica una soldadura. Los máximos de temperatura se generan cuando está aplicándose el electrodo y los mínimos se dan cuando se limpia la escoria de la soldadura.

Algunas de las varillas soldadas que encontramos en las ruinas se procesaron con endurecimiento mecánico. En la figura 45(a) el trozo de varilla de la izquierda es del tipo torcido en frío y el de la derecha es del tipo ordinario. En la figura 45(b) se muestra la dureza del acero en los alrededores de la soldadura y se nota cómo del lado de la varilla endurecida mecánicamente la dureza se redujo.



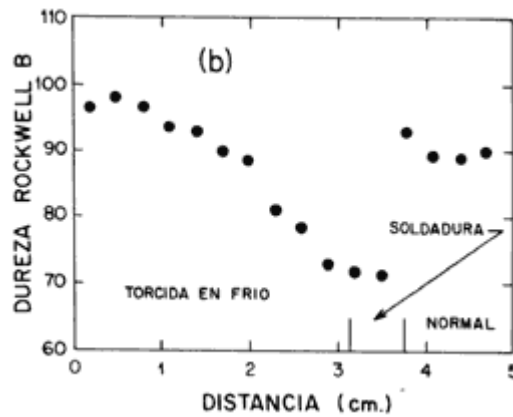


Figura 45. (a) Fotografía de la unión de una varilla torcida en frío (izquierda) con otra de manufactura común por laminado en caliente (derecha). El calentamiento durante la soldadura provocó el ablandamiento de una zona de la varilla torcida en frío. La dureza de la zona disminuye notablemente.

ACEROS DE MEDIO CARBONO

El grueso de la producción de acero de mayor resistencia se obtuvo con la producción de aceros de medio carbono. Con 0.45% de carbono y 1.2% de manganeso, básicamente, las siderúrgicas mexicanas se dieron a la tarea de sustituir sus antiguos aceros de refuerzo para lograr la llamada varilla de alta resistencia: 4.2 toneladas por cada **cm²** de sección de la varilla en el límite elástico.

Sin embargo, como recurso para aumentar la resistencia del acero, el carbono trae problemas. Para clasificar a los aceros desde el punto de vista de la soldabilidad, los expertos suelen utilizar un diagrama llamado "carbono contra carbono equivalente" como el que se muestra en la figura 46. Las coordenadas del diagrama son el contenido de carbono, en la escala vertical, y el "carbono equivalente", en la escala horizontal. El carbono equivalente se calcula, en primera aproximación, con la fórmula siguiente:

$$C. E. = \% C + \frac{\% Mn}{6}$$

donde C es carbono y Mn manganeso.

En el diagrama se delimitan tres zonas. La zona I comprende a los aceros de soldabilidad óptima. Son aceros con contenidos de carbono y manganeso sumamente bajos que se emplean mucho en tuberías y plataformas petroleras en el mar. Esos aceros se deben soldar con un altísimo índice de seguridad. La zona II abarca aceros de soldabilidad regular, que se usan en la construcción de estructuras y edificios. La zona III comprende a los aceros con alto riesgo de falla en el caso de ser soldados.

El salto tecnológico al que nos hemos referido para incrementar con carbono la resistencia de los aceros de refuerzo, tuvo como consecuencia que éstos pasaran de la zona II a la zona III. Por esta razón, las normas oficiales mexicanas que existían antes del terremoto de 1985 no asumían ningún compromiso en cuanto a soldabilidad. Es decir; si esas varillas se llegaran a soldar, sería bajo la exclusiva responsabilidad del constructor.

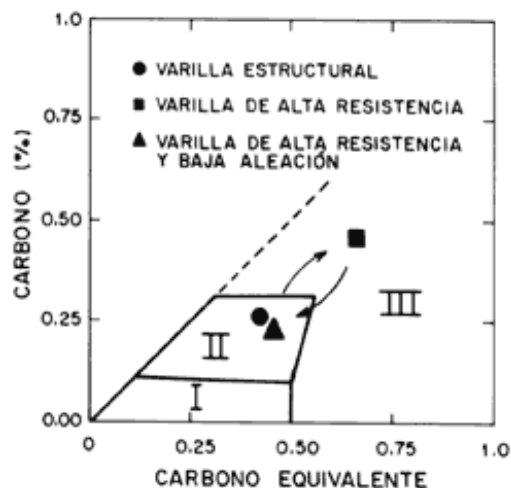


Figura 46. Niveles de soldabilidad en el diagrama de carbono contra carbono equivalente de los aceros. Los aceros comprendidos en el área I son de óptima soldabilidad y se emplean extensivamente en las instalaciones petroleras en el mar. En el área II se incluyen los aceros estructurales de aleación aceptable donde por norma se hace un compromiso de soldabilidad. Los aceros del área III no pueden tener, por norma, ningún compromiso de soldabilidad por el alto riesgo de formación de microgrietas que implica su soldadura.

¿Y por qué no se fabrica acero de bajo carbono y alta resistencia, en el que si pueda establecerse un compromiso respecto a la soldabilidad? "Columbio", contestó el director general de SICARTSA, "se necesita columbio y una norma oficial nueva." La plática fue en abril de 1986, en una visita de investigación de la UNAM a la planta acerera del Pacífico. Entonces hicimos el siguiente compromiso: en la UNAM haríamos el proyecto de normas y estudios de caracterización mecánica y microscópica a la nueva varilla. En SICARTSA desarrollarían el proceso para fabricarla. La palabra columbio tiene un significado muy claro entre los acereros. Columbio es el nombre de un elemento químico también conocido como niobio. De hecho, este último es el nombre oficial que aparece en la tabla periódica de los elementos. El niobio, el vanadio y el titanio son elementos químicos que al adicionarse en pequeñísimas cantidades al acero incrementan notablemente su resistencia. Los aceros de este tipo son conocidos como microaleados o "de alta resistencia y baja aleación", o endurecidos por precipitación.

En unos cuantos meses prosperó la iniciativa conjunta SICARTSA-UNAM. Por nuestra parte, elaboramos el texto de un proyecto de norma oficial y lo sometimos a la consideración de la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial; SICARTSA fabricó entonces una primera colada de 120 toneladas de varilla de acero microaleado y nos entregó algunas de ellas para hacer la caracterización mecánica y microscópica.

Desde el momento de cortar los trozos de varilla para preparar muestras nos dimos cuenta que el acero era muy distinto. "¡Este no viene acerado!" exclamó el mecánico del taller. Efectivamente, la segueta se deslizaba con facilidad. Muchos albañiles y constructores se quejan de lo que llaman varilla "acerada". Es una varilla de medio o alto carbono que es muy dura y que, además de que cuesta mucho cortarla, resulta quebradiza a la hora de hacer los dobleces necesarios para ensamblar los castillos de columnas y traveses en las obras.

Mientras el mecánico cortaba y maquinaba las probetas para la máquina de tensión, nos dedicamos a ver el acero en los microscopios electrónicos. Hay dos tipos de éstos, el de barrido y el de transmisión. En el de barrido se puede ver la superficie de una muestra y en el de transmisión se observa a través de una película delgada del acero.

Para ver la superficie de la muestra la pulimos hasta que quedara como un espejo; luego la mojamos con una solución de ácido nítrico durante unos segundos; la lavamos

y la secamos. Lo que se vio en el microscopio electrónico fue la imagen de un acero típico de bajo carbono que se muestra en la figura 47. Las partículas submicroscópicas responsables del endurecimiento del acero no pueden verse en este instrumento; aquí solamente pueden verse los granos negros de la fase ferrita, y los granos con franjas negras y blancas de la perlita.

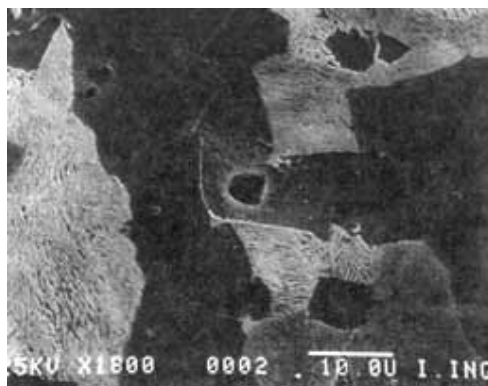


Figura 47. Metalografía en el microscopio electrónico de barrido del acero microaleado que SICARTSA emplea para la fabricación de varilla de alta resistencia y baja aleación. La alta proporción de ferrita (zonas oscuras) indica que el contenido de carbono es bajo. La zona de laminillas de perlita se muestra con claridad.

La preparación de la muestra, para el microscopio electrónico de transmisión es más complicada. Hubo que cortar una rebanada del acero de una décima de milímetro de grosor y de la rebanada sacar un disco de 3 milímetros de diámetro. Luego, con un chorrito de una mezcla de ácidos, se le fue carcomiendo el centro del disco hasta dejarlo sumamente delgado. Algunas zonas del disco llegan a tener grosores de unas cuantas micras (milésimos de milímetros), y sólo en estas zonas pueden atravesar los electrones con los que el microscopio electrónico de transmisión genera la imagen.

En la figura 48(a) vemos al acero microaleado. Aquí las zonas claras marcadas con una F son de ferrita, y las zonas de franjas negras y blancas son de perlita y están marcadas con una P. En la figura 48(b) se ve con mayor detalle la ferrita y aparecen claramente unos puntos oscuros que son los precipitados ricos en niobio y vanadio que tiene este acero. Estas partículas no son de niobio o de vanadio puros, son carburos o carbonitruros de niobio o vanadio.

En la máquina de tensión constatamos las propiedades mecánicas extraordinarias de estos aceros. Una resistencia mecánica superior a las 4.2 toneladas por cada centímetro cuadrado de sección de la varilla y una ductilidad muy superior a la que anteriormente habíamos visto en otras varillas.

La mejora en soldabilidad fue sorprendente. En el diafragma de "carbono contra carbono equivalente" se ilustra cómo este tipo de acero ofrece la posibilidad de regresar de la zona III, a la zona II, donde ya se puede establecer un compromiso en cuanto a soldabilidad. Se hicieron cientos de pruebas con varillas soldadas y se comprobó que, efectivamente, se mantiene la resistencia y la falla no se presenta en la soldadura.

Desde la perspectiva con que inicialmente se habían planteado las actividades de colaboración entre SICARTSA y la UNAM los objetivos se habían alcanzado, es decir, se contaba con una varilla de alta resistencia y de buena soldabilidad. Sin embargo, el detalle del comportamiento mecánico mostró que los aceros microaleados tenían mucho más que ofrecer a los constructores en las zonas sísmicas.

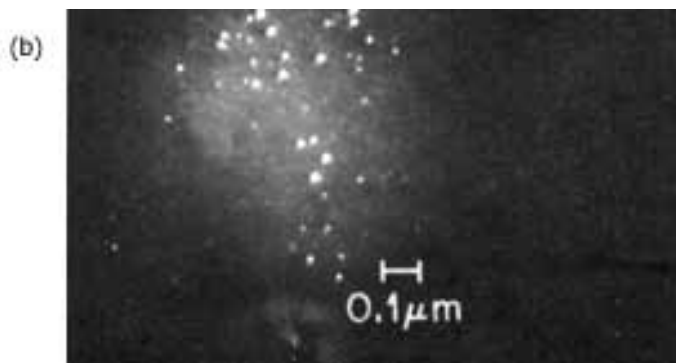
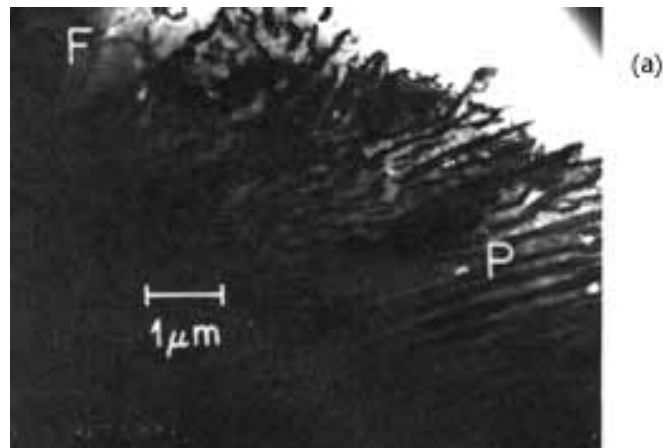


Figura 48. (a) Estructura del acero microaleado tomada en el microscopio electrónico de transmisión. Las zonas de franjas negras (cementita) y claras (ferrita) son granos de perlita. La zona más clara en la esquina superior izquierda se amplifica en el recuadro (b) empleando la técnica del campo oscuro. Los puntos blancos (en b) son precipitados de carburos o carbonitruros de niobio o vanadio. A estos precipitados se deben la alta resistencia y la gran ductilidad de estos aceros.

La varilla microaleada es sumamente tenaz. La tenacidad es la capacidad que tienen los materiales de absorber la energía al deformarse antes de ocurrir la fractura. En las zonas sísmicas, la estructura de los edificios debe absorber la energía de movimiento transmitida por los terremotos. Si esta energía no es absorbida por el acero, que es el elemento plástico de las estructuras de concreto reforzado, esa energía se concentra entonces en la fractura del concreto de trabes o columnas, lo cual es catastrófico.

La disponibilidad de varilla microaleada para la construcción de grandes estructuras de concreto seguramente ayudará a elevar su capacidad de resistencia ante los inevitables sismos del futuro. Afortunadamente en México contamos ahora con una nueva norma oficial que ampara a la varilla microaleada y, además, ésta se ha incorporado a la nueva normatividad que en materia de construcción se elaboró en la ciudad de México, aprovechando las lecciones que nos dejaron los terremotos de septiembre de 1985.

acero. Aleación de hierro con un poco de carbono.

arrabio. Aleación de hierro con más de 2% de carbono y otras impurezas que sale del alto horno.

cementita. Carburo de hierro, Fe_3C , que forma parte de la estructura del acero.

ductilidad. Capacidad de un material para ser deformado plásticamente sin presentar fractura. Usualmente se expresa como el porcentaje máximo de elongación que alcanza una barra del material al ser estirado.

dureza. Capacidad de un material para resistir a las rayaduras o a las muescas. La dureza de un material se mide haciendo incidir sobre su superficie una punta de diamante y es proporcional a la carga sobre el diamante e inversamente proporcional al tamaño de la huella que resulta en la superficie.

ferrita. Componente del acero que contiene más del 99.95% de hierro y muy poco carbono. Su red cristalina es cúbica centrada en el cuerpo.

forja. Conformado de los metales con golpes de martillo.

frontera de grano. Intercara entre dos granos donde la red cristalina está desordenada.

fundiciones. Aleaciones de hierro con más del 2% de carbono, conocidas también como hierros colados.

granos. Cristales con que se estructuran internamente los metales y los cerámicos. En cada grano los átomos están arreglados con la red cristalina en una sola orientación.

hierro esponja. Hierro casi completamente puro con estructura sumamente porosa.

hierro forjado. Hierro forjado a partir de hierro esponja.

martensita. Red cristalina del acero templado, donde el contenido de carbono es alto y los átomos de carbono, ocupan posiciones que producen una distorsión elástica.

perlita. Componente de la estructura de los aceros formado por laminillas alternadas de ferrita y de cementita.

resistencia. Capacidad de los materiales para soportar esfuerzo. Se determina cuantificando la fuerza máxima por unidad de área de sección que resiste un material antes de romperse.

temple. Endurecimiento del acero que normalmente se obtiene calentándolo al rojo vivo (alrededor de 800°C) y después enfriándolo súbitamente por inmersión en un líquido.

tenacidad. Capacidad de un acero para absorber energía de golpes o deformación. Generalmente se mide cuantificando el trabajo necesario para deformarlo hasta provocar su fractura y dividiéndolo entre el volumen del material deformado.

CAPÍTULO I

Buchwald, V.F., *Handbook of Iron Meteorites*, Center for Meteorites Studies, Arizona State University, University of California Press, 1975.

Eliade, M., *Herreros y alquimistas*, Alianza Editorial, Madrid, 1983.

Goldstein, J.I. y R.E. Ogilvie, *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*, vol. 233, 1965.

Metals Handbook, vol. 8, 8a. ed., American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1973.

Sears, D.W., "The Nature and Origin of Meteorites," en *Monographs on Astronomical Subjects*, núm. 5, Adam Hilger Ltd., Bristol, 1979.

CAPÍTULO II

Barret, C.R., W.D. Nix, y A.S. Tetelman, *The Principles of Engineering Materials*, Prentice-Hall, 1973.

Brick, R.M., A.W. Pense, y R.B. Gordon, *Structure and Properties of Engineering Materials*, Mc Graw Hill, Nueva York, 1977

Kelly, A. y G.W. Grooves, *Cristallography and Cristal Defects*, Addison-Wesley, Massachusetts, 1970.

Morrow, II., "Zinc" en *Metals Handbook Desk Edition*, American Society for Metals, Metal Park, Ohio, 1985.

Roe, GJ., "Weldability of Steels" en *Metals Handbook*, 9a. ed., vol. 1, American Society for Metals Park, Ohio, 1978.

Sherby; O.D. y J. Wadsworth, *Scientific American*, vol. 252, num. 2, 1985.

Sisco, F.T., "Alloys of Iron and Carbon", en *Engineering Foundation*, McGraw-Hill, Nueva York, 1939.

CAPÍTULO III

Alexander; W. y A. Street, *Metals in the Service of Man*, Penguin Books, Middlesex, Inglaterra, 1985.

Crandall, R.W., "The Changing Face of the U. S. Steel Industry", en *Journal of Metals*, vol. 38, núm. 3, p. 37, 1986.

Encyclopaedia Britannica, vol. 17, p. 637, 1981.

Latapi, J., *Compendio de términos siderúrgicos*, AHMSA, FUMOSA, SICARTSA, México, 1978.

Maddin, R., J. D. Muhly y T. S. Weeler; "How the Iron Age Began", en *Scientific American*, vol. 253, núm. 4, 1986.

"Metallurgraphics", en *Journal of Metals*, vol. 38, num 3, p. 15, 1986.

Roberts, G. y R. Cary, *Tools Steels*, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1980.

Sada, C.G., *The H y L Iron Ore Direct Reduction Process*, Grupo Acero HYL SA, 1973.

Wadsworth, J., D.W. Kum, y O.D. Sherby, *Metal Progress*, junio de 1986.

CAPÍTULO IV

Clark, D.S. y W.R. Varney, *Physical Metallurgy for Engineers*, D. van Nostrand, Nueva York, 1962.

Dieter; G.E., *Mechanical Metallurgy*, Mc Graw Hill, Tokio, 1961.

"Gas Nitriding", en *Metals Handbook* 9a. edición, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1981.

Morgan J.D., "Present US Posture in Strategic Materials", en *Critical Materials Overview, Proceeding of the Fall Meeting of the Metallurgical Society*, octubre de 1981.

Roberts, G. y R. Cary, *Tool Steels*, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1980.

Wadsworth, J. y O.D. Sherby, "On the Bulat", en *Progress in Material Science*, vol. 25, p. 35, 1980.

CAPÍTULO V

American Concrete Institute, *Building Code Requirements for Reinforced Concrete*, Chicago, Illinois, 1983.

American Welding Society, *Structural Welding Code*, AWS D1.4 -79, Miami, Florida, 1979.

Ashby, M.F. y D.H. Jones, "*Engineering Materials*", en *Programon* núm. 71, 1980.

Broek D., *Elementary Engineering Fracture Mechanics*, Sijthoff y Noordhoff, Holanda, 1978.

Flores, J., O. Novaro y T. Seligmann, *Nature*, vol. 326, núm. 23, 1987.

Giménez Cacho, L, "Los aceros para refuerzo de concreto, efectos económicos de su evolución", en *Siderurgia latinoamericana*, núm. 211, noviembre de 1987.

Kolmogorov, A.N., *Foundations of the Theory of Probability*, Chelsea, Nueva York, 1969.

Martínez L., J.L. Albarrán y J. Fuentes, "Lessons in Welding from the 1985 México City Earthquake", en *Welding Journal* núm. 66, 1987.

Reducing Earthquakes Hazard: Lessons Learned from Earthquakes, Publicación 86-02, Earthquake Engineering Research Institute, 1986.

Roe, GJ., "Weldability of Steels", en *Metals Handbook*, 9a. edición, vol. I, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1978.

Historia del acero. Qué es el acero. Producción y refinación de arrabio. Productos de acero. Proceso crisol. Tipos de hornos. Efectos de los elementos de aleación.

HISTORIA DEL ACERO

No se conoce con exactitud la fecha en que se descubrió la técnica de fundir mineral de hierro para producir un metal susceptible de ser utilizado. Los primeros utensilios de hierro descubiertos por los arqueólogos en Egipto datan del año 3.000 a.C., y se sabe que antes de esa época se empleaban adornos de hierro. Los griegos ya conocían hacia el 1.000 a.C. la técnica, de cierta complejidad, para endurecer armas de hierro mediante tratamiento térmico.

Las aleaciones producidas por los primeros artesanos del hierro (y, de hecho, todas las aleaciones de hierro fabricadas hasta el siglo XIV d.C.) se clasificarían en la actualidad como hierro forjado. Para producir esas aleaciones se calentaba una masa de mineral de hierro y carbón vegetal en un horno o forja con tiro forzado. Ese tratamiento reducía el mineral a una masa esponjosa de hierro metálico llena de una escoria formada por impurezas metálicas y cenizas de carbón vegetal. Esta esponja de hierro se retiraba mientras permanecía incandescente y se golpeaba con pesados martillos para expulsar la escoria y soldar y consolidar el hierro. El hierro producido en esas condiciones solía contener un 3% de partículas de escoria y un 0,1% de otras impurezas. En ocasiones esta técnica de fabricación producía accidentalmente auténtico acero en lugar de hierro forjado. Los artesanos del hierro aprendieron a fabricar acero calentando hierro forjado y carbón vegetal en recipientes de arcilla durante varios días, con lo que el hierro absorbía suficiente carbono para convertirse en acero auténtico.

Después del siglo XIV se aumentó el tamaño de los hornos utilizados para la fundición y se incrementó el tiro para forzar el paso de los gases de combustión por la carga o mezcla de materias primas. En estos hornos de mayor tamaño el mineral de hierro de la parte superior del horno se reducía a hierro metálico y a continuación absorbía más carbono como resultado de los gases que lo atravesaban. El producto de estos hornos era el llamado arrabio, una aleación que funde a una temperatura menor que el acero o el hierro forjado. El arrabio se refinaba después para fabricar acero.

La producción moderna de acero emplea altos hornos que son modelos perfeccionados de los usados antiguamente. El proceso de refinado del arrabio mediante chorros de aire se debe al inventor británico Henry Bessemer, que en 1855 desarrolló el horno o convertidor que lleva su nombre. Desde la década de 1960 funcionan varios minihornos que emplean electricidad para producir acero a partir de chatarra. Sin embargo, las grandes instalaciones de altos hornos continúan siendo esenciales para producir acero a partir de mineral de hierro.

¿ QUE ES EL ACERO?

Los metales y las aleaciones empleados en la industria y en la construcción pueden dividirse en dos grupos principales: Materiales FERROSOS y NO FERROSOS. Ferroso viene de la palabra Ferrum que los romanos empleaban para el fierro o hierro. Por lo tanto, los materiales ferrosos son aquellos que contienen hierro como su ingrediente principal; es decir, las numerosas calidades del hierro y el acero.

Los materiales No Ferrosos no contienen hierro. Estos incluyen el aluminio, magnesio, zinc, cobre, plomo y otros elementos metálicos. Las aleaciones el latón y el bronce, son una combinación de algunos de estos metales No Ferrosos y se les denomina Aleaciones No Ferrosas.

Uno de los materiales de fabricación y construcción más versátil, más adaptable y más ampliamente usado es el ACERO. A un precio relativamente bajo, el acero combina la resistencia y la posibilidad de ser trabajado, lo que se presta para fabricaciones mediante muchos métodos. Además, sus propiedades pueden ser manejadas de acuerdo a las necesidades específicas mediante tratamientos con calor, trabajo mecánico, o mediante aleaciones.

¿Qué es el Acero?

El Acero es básicamente una aleación o combinación de hierro y carbono (alrededor de 0,05% hasta menos de un 2%). Algunas veces otros elementos de aleación específicos tales como el Cr (Cromo) o Ni (Níquel) se agregan con propósitos determinados.

Ya que el acero es básicamente hierro altamente refinado (más de un 98%), su fabricación comienza con la reducción de hierro (producción de arrabio) el cual se convierte más tarde en acero.

El hierro puro es uno de los elementos del acero, por lo tanto consiste solamente de un tipo de átomos. No se encuentra libre en la naturaleza ya que químicamente reacciona con facilidad con el oxígeno del aire para formar óxido de hierro - herrumbre. El óxido se encuentra en cantidades significativas en el mineral de hierro, el cual es una concentración de óxido de hierro con impurezas y materiales térreos.

Clasificación del Acero

Los diferentes tipos de acero se clasifican de acuerdo a los elementos de aleación que producen distintos efectos en el Acero:

ACEROS AL CARBONO

Más del 90% de todos los aceros son aceros al carbono. Estos aceros contienen diversas cantidades de carbono y menos del 1,65% de manganeso, el 0,60% de silicio y el 0,60% de cobre. Entre los productos fabricados con aceros al carbono figuran máquinas, carrocerías de automóvil, la mayor parte de las estructuras de construcción de acero, cascos de buques, somieres y horquillas.

ACEROS ALEADOS

Estos aceros contienen un proporción determinada de vanadio, molibdeno y otros elementos, además de cantidades mayores de manganeso, silicio y cobre que los aceros al carbono normales. Estos aceros de aleación se pueden sub-clasificar en:

Estructurales	Son aquellos aceros que se emplean para diversas partes de máquinas, tales como engranajes, ejes y palancas. Además se utilizan en las estructuras de edificios, construcción de chasis de automóviles, puentes, barcos y semejantes. El contenido de la aleación varía desde 0,25% a un 6%.
Para Herramientas	Aceros de alta calidad que se emplean en herramientas para cortar y modelar metales y no-metales. Por lo tanto, son materiales empleados para cortar y construir herramientas tales como taladros, escariadores, fresas, terrajas y machos de roscar.
Especiales	Los Aceros de Aleación especiales son los <u>aceros inoxidables</u> y aquellos con un contenido de cromo generalmente superior al 12%. Estos aceros de gran dureza y alta resistencia a las altas temperaturas y a la corrosión, se emplean en turbinas de vapor, engranajes, ejes y rodamientos.

ACEROS DE BAJA ALEACION ULTRARRESISTENTES

Esta familia es la más reciente de las cuatro grandes clases de acero. Los aceros de baja aleación son más baratos que los aceros aleados convencionales ya que contienen cantidades menores de los costosos elementos de aleación. Sin embargo, reciben un tratamiento especial que les da una resistencia mucho mayor que la del acero al carbono. Por ejemplo, los vagones de mercancías fabricados con aceros de baja aleación pueden transportar cargas más grandes porque sus paredes son más delgadas que lo que sería necesario en caso de emplear acero al carbono. Además, como los vagones de acero de baja aleación pesan menos, las cargas pueden ser más pesadas. En la actualidad se construyen muchos edificios con estructuras de aceros de baja aleación. Las vigas pueden ser más delgadas sin disminuir su resistencia, logrando un mayor espacio interior en los edificios.

ACEROS INOXIDABLES

Los aceros inoxidable contienen cromo, níquel y otros elementos de aleación, que los mantienen brillantes y resistentes a la herrumbre y oxidación a pesar de la acción de la humedad o de ácidos y gases corrosivos. Algunos aceros inoxidable son muy duros; otros son muy resistentes y mantienen esa resistencia durante largos periodos a temperaturas extremas. Debido a sus superficies brillantes, en arquitectura se emplean muchas veces con fines decorativos. El acero inoxidable se utiliza para las tuberías y tanques de refineries de petróleo o plantas químicas, para los fuselajes de los aviones o para cápsulas espaciales. También se usa para fabricar instrumentos y equipos quirúrgicos, o para fijar o sustituir huesos rotos, ya que resiste a la acción de los fluidos corporales. En cocinas y zonas de preparación de alimentos los utensilios son a menudo de acero inoxidable, ya que no oscurece los alimentos y pueden limpiarse con facilidad.

PRODUCCION Y REFINACION DE ARRABIO

El arrabio es el primer proceso que se realiza para obtener Acero, los materiales básicos empleados son Mineral de Hierro, Coque y Caliza. El coque se quema como combustible para calentar el horno, y al arder libera monóxido de carbono, que se combina con los óxidos de hierro del mineral y los reduce a hierro metálico. La ecuación de la reacción química fundamental de un alto horno es:



La caliza de la carga del horno se emplea como fuente adicional de monóxido de carbono y como sustancia fundente. Este material se combina con la sílice presente en el mineral (que no se funde a las temperaturas del horno) para formar silicato de calcio, de menor punto de fusión. Sin la caliza se formaría silicato de hierro, con lo que se perdería hierro metálico. El silicato de calcio y otras impurezas forman una escoria que flota sobre el metal fundido en la parte inferior del horno. El arrabio producido en los altos hornos tiene la siguiente composición: un 92% de hierro, un 3 o 4% de carbono, entre 0,5 y 3% de silicio, del 0,25% al 2,5% de manganeso, del 0,04 al 2% de fósforo y algunas partículas de azufre.

El ALTO HORNO es virtualmente una planta química que reduce continuamente el hierro del mineral. Químicamente desprende el oxígeno del óxido de hierro existente en el mineral para liberar el hierro. Está formado por una cápsula cilíndrica de acero forrada con un material no metálico y resistente al calor, como ladrillos refractarios y placas refrigerantes. El diámetro de la cápsula disminuye hacia arriba y hacia abajo, y es máximo en un punto situado aproximadamente a una cuarta parte de su altura total. La parte inferior del horno está dotada de varias aberturas tubulares llamadas toberas, por donde se fuerza el paso del aire. Cerca del fondo se encuentra un orificio por el que fluye el arrabio cuando se sangra (o vacía) el alto horno. Encima de ese orificio, pero debajo de las toberas, hay otro agujero para retirar la escoria. La parte superior del horno, cuya altura es de unos 30 m, contiene respiraderos para los gases de escape, y un par de tolvas redondas, cerradas por válvulas en forma de campana, por las que se introduce la carga en el horno. Los materiales se llevan hasta las tolvas en pequeñas vagonetas o cucharas que se suben por un elevador inclinado situado en el exterior del horno.

Carga típica en Alto Horno de CSH

Componentes	kg/t	kg/carga
Mineral de Hierro	490	9.600
Pellets	995	19.600
Chatarra	15	300
Mineral de Mn	22	450
Caliza	112	2.300
Cuarzo	12	250
Coque	451	9.200
Petróleo + Alquitrán	44	899
Aire Insuflado		1.530 m3/min
Temperatura Aire Insuflado		1.030°C

Composición química del Arrabio

Elementos	%
Hierro (Fe)	93,70
Carbono (C)	4,50
Manganeso (Mn)	0,40
Silicio (Si)	0,45
Fósforo (P)	0,110
Azufre (S)	0,025
Vanadio (V)	0,35
Titanio (Ti)	0,06
Temperatura en Alto Horno : 1.460°C	

Las materias primas se cargan (o se vacían) en la parte superior del horno. El aire, que ha sido precalentado hasta los 1.030°C aproximadamente, es forzado dentro de la base del horno para quemar el coque. El coque en combustión genera el intenso calor requerido para fundir el mineral y produce los gases necesarios para separar el hierro del mineral. En forma muy simplificada las reacciones son:

Carbono (Coque)	+	Oxígeno (aire)	→	Calor	+	Monóxido de Carbono Gaseoso
2C		O ₂		Calor		2CO
Oxido de Hierro	+	Monóxido de Carbono	→	Hierro Fundido	+	Dióxido de Carbono Gaseoso
Fe ₂ O ₃		3CO		2Fe Hierro		3CO ₂
Impurezas en el Mineral Derretido	+	Piedra Caliza	→			ESCORIA

Los altos hornos funcionan de forma continua. La materia prima que se va a introducir en el horno se divide en un determinado número de pequeñas cargas que se introducen a intervalos de entre 10 y 15 minutos. La escoria que flota sobre el metal fundido se retira una vez cada dos horas, y el arrabio se sangra cinco veces al día.

El aire insuflado en el alto horno se precalienta a una temperatura aproximada de 1.030°C. El calentamiento se realiza en las llamadas estufas, cilindros con estructuras de ladrillo refractario. El ladrillo se calienta durante varias horas quemando gas de alto horno, que son los gases de escape que salen de la parte superior del horno. Después se apaga la llama y se hace pasar el aire a presión por la estufa. El peso del aire empleado en un alto horno supera el peso total de las demás materias primas.

Esencialmente, el CO gaseoso a altas temperaturas tiene una mayor atracción por el oxígeno presente en el mineral de hierro (Fe₂O₃) que el hierro mismo, de modo que reaccionará con él para liberarlo. Químicamente entonces, el hierro se ha reducido en el mineral. Mientras tanto, a

alta temperatura, la piedra caliza fundida se convierte en cal, la cual se combina con el azufre y otras impurezas. Esto forma una escoria que flota encima del hierro derretido.

Después de la II Guerra Mundial se introdujo un importante avance en la tecnología de altos hornos: la presurización de los hornos. Estrangulando el flujo de gas de los respiraderos del horno es posible aumentar la presión del interior del horno hasta 1,7 atmósferas o más. La técnica de presurización permite una mejor combustión del coque y una mayor producción de hierro. En muchos altos hornos puede lograrse un aumento de la producción de un 25%. En instalaciones experimentales también se ha demostrado que la producción se incrementa enriqueciendo el aire con oxígeno.

Cada cinco o seis horas, se cuelan desde la parte interior del horno hacia una olla de colada o a un carro de metal caliente, entre 150 a 375 toneladas de arrabio. Luego se transportan a un horno de fabricación de acero. La escoria flotante sobre el hierro fundido en el horno se drena separadamente. Cualquier escoria o sobrante que salga del horno junto con el metal se elimina antes de llegar al recipiente. A continuación, el contenedor lleno de arrabio se transporta a la fábrica siderúrgica (Acería).

Los altos hornos modernos funcionan en combinación con hornos básicos de oxígeno o convertidores al oxígeno, y a veces con hornos de crisol abierto, más antiguos, como parte de una única planta siderúrgica. En esas plantas, los hornos siderúrgicos se cargan con arrabio. El metal fundido procedente de diversos altos hornos puede mezclarse en una gran cuchara antes de convertirlo en acero con el fin de minimizar el efecto de posibles irregularidades de alguno de los hornos.

El arrabio recién producido contiene demasiado carbono y demasiadas impurezas para ser provechoso. Debe ser refinado, porque esencialmente, el acero es hierro altamente refinado que contiene menos de un 2% de carbono.

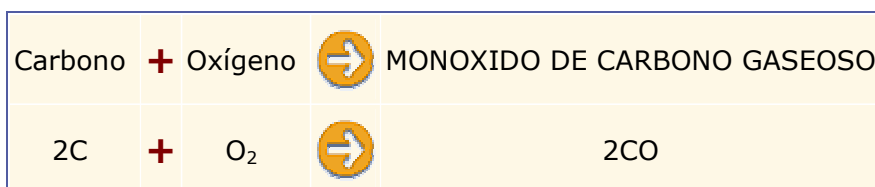
El hierro recién colado se denomina "arrabio". El oxígeno ha sido removido, pero aún contiene demasiado carbono (aproximadamente un 4%) y demasiadas impurezas (silicio, azufre, manganeso y fósforo) como para ser útil, para eso debe ser refinado, porque esencialmente el acero es hierro altamente refinado que contiene menos de un 2% de carbono.

La fabricación del acero a partir del arrabio implica no sólo la remoción del carbono para llevarlo al nivel deseado, sino también la remoción o reducción de las impurezas que contiene.

Se pueden emplear varios procesos de fabricación de acero para purificar o refinar el arrabio; es decir, para remover sus impurezas. Cada uno de ellos incluye el proceso básico de oxidación.

REFINACION DEL ARRABIO:

En el alto horno, el oxígeno fue removido del mineral por la acción del CO (monóxido de carbono) gaseoso, el cual se combinó con los átomos de oxígeno en el mineral para terminar como CO₂ gaseoso (dióxido de carbono). Ahora, el oxígeno se empleará para remover el exceso de carbono del arrabio. A alta temperatura, los átomos de carbono (C) disueltos en el hierro fundido se combinan con el oxígeno para producir monóxido de carbono gaseoso y de este modo remover el carbono mediante el proceso de oxidación. En forma simplificada la reacción es:

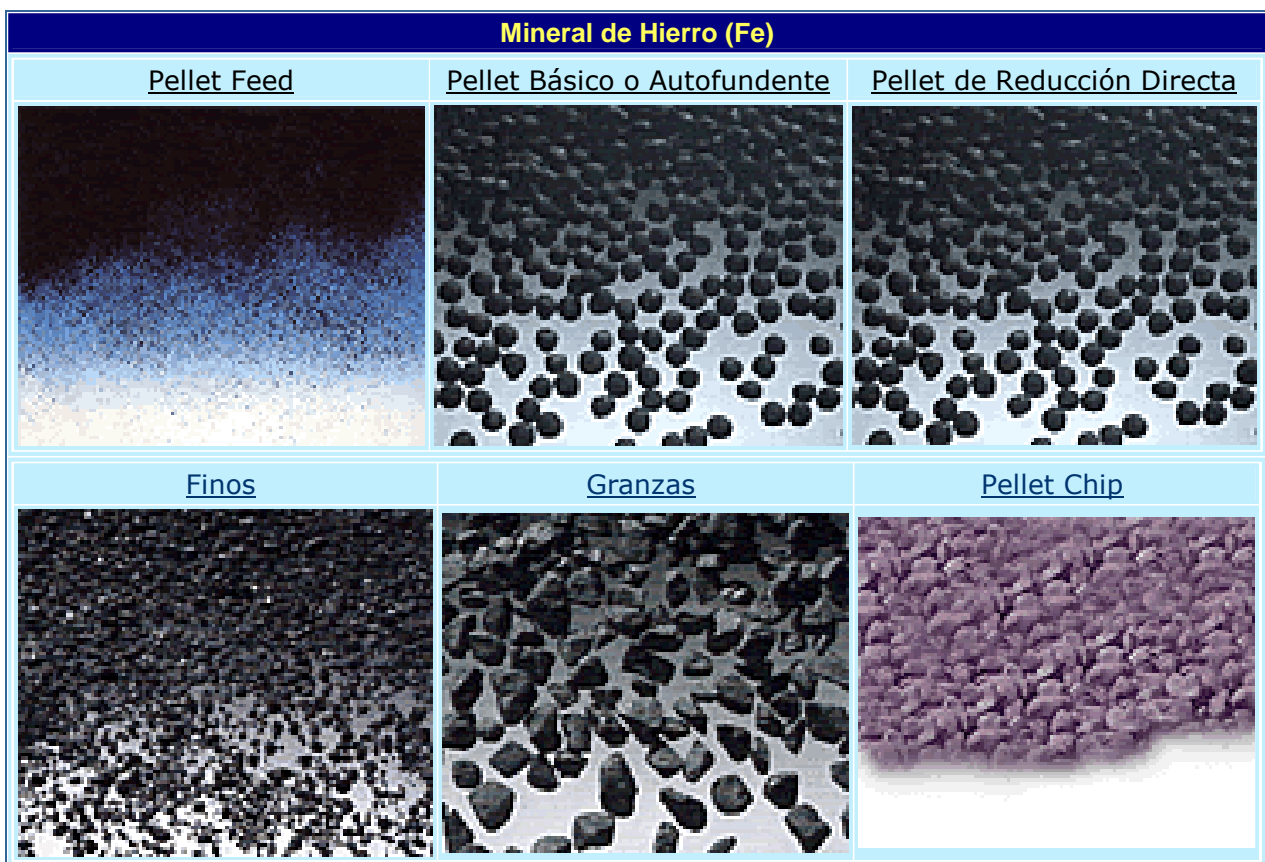


PRODUCTOS

El Acero está presente en diversos aspectos en nuestra vida diaria, la construcción, el transporte, etc.

Desde los yacimientos mineros y plantas de procesamiento (ver procesos de peletización) se producen materias primas que son exportados y utilizados como materia prima para elaborar acero. Por otra parte la fabricación y laminación del acero dan como resultado una serie de productos que se comercializa local e internacionalmente.

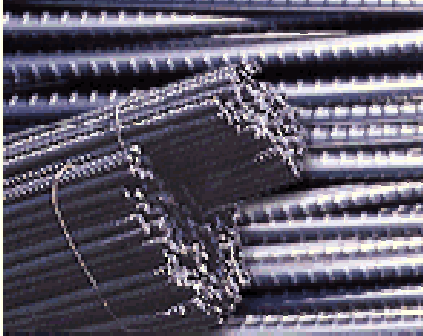
Productos de Mineral de Hierro



Principales Productos de Acero

BARRAS

Barras para hormigón



Barras para Molienda



Alambrón



PLANOS

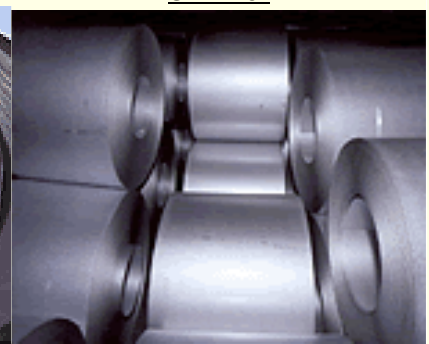
Planchas Gruesas



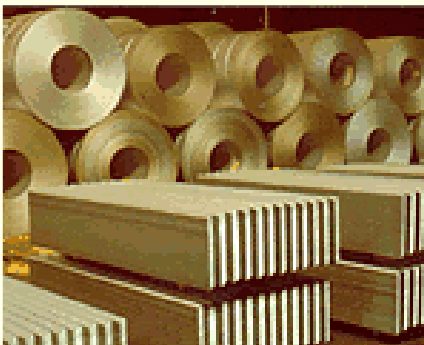
Rollos y Planchas laminadas en Caliente



Rollos y Planchas laminadas en Frío



ZincAlum en Planchas o Rollos



Hojalata Electrolytica en Láminas o Rollos



TUBULARES

Tubos Soldados por Arco Sumergido



SUB PRODUCTOS

Caliza



BIOGRAFIA DE SIR HENRY BESSEMER

Bessemer, Sir Henry (1813-1898)

Inventor británico, nacido en Charlton, Hertfordshire, y autodidacta, en gran medida.

Fue un inventor prolífico, pero se le conoce sobre todo por sus innovaciones en la siderurgia que elevaron enormemente la producción anual de acero en Inglaterra, consiguiendo un acero de gran calidad, disponible a un costo muy reducido.

En 1856, Henry Bessemer introdujo un nuevo método de producción de acero utilizando un horno especial llamado Convertidor. Este Convertidor se desarrolló posteriormente en Kentucky EE.UU., por William Kelly.

El Convertidor de Bessemer pudo producir cantidades mayores de acero refinado que el Proceso del Crisol. El sistema consiste en insuflar aire en el fondo del horno para que burbujeara a través del hierro fundido. Este proceso hace que el carbono del hierro genere mucho más calor, refinando así el metal.

En 1860 patentó el *convertidor inclinado* que produjo acero más eficazmente que el horno fijo anterior. En ese tiempo, el acero del crisol tenía un costo aproximado de 40 libras por tonelada. En cambio el acero Bessemer se obtuvo a un costo aproximado de 20 libras la tonelada.

Después de la Guerra de Crimea (1854-1856), se generó una demanda grande para el hierro y acero para los armamentos y también para abastecer las nuevas vías férreas.

En 1860, John Brown de Sheffield sacó la primera licencia para producir acero de Bessemer.

Usando el proceso Bessemer, las compañías de fabricación de acero en Sheffield pudieron proporcionar el acero barato en las cantidades grandes requeridas para las partes de la vía férrea, enchapado de la armadura y construcción. Las empresas de Sheffield continuaron produciendo el acero de alta calidad para las herramientas de precisión.

En 1850 la producción de acero en Bretaña era aproximadamente 50.000 toneladas. De este total, el 85% se produjo en Sheffield. Por 1880, la producción de acero con el sistema Bessemer estaba sobre un millón de toneladas de una producción de acero total país aproximada de 1.300.000 toneladas.

Por todo ello, Bessemer recibió muchos honores, entre otros el de Sir y fue miembro de la Sociedad Real, ambas distinciones en 1879.

PROCESO DE CRISOL ABIERTO

Cualquier proceso de producción de acero a partir de arrabio consiste en quemar el exceso de carbono y otras impurezas presentes en el hierro. Una dificultad para la fabricación del acero es su elevado punto de fusión, 1.400°C, que impide utilizar combustibles y hornos convencionales.

Para superar la dificultad se desarrolló el horno de crisol abierto, que funciona a altas temperaturas gracias al precalentado regenerativo del combustible gaseoso y el aire empleados para la combustión.

En el precalentado regenerativo los gases que escapan del horno se hacen pasar por una serie de cámaras llenas de ladrillos, a los que ceden la mayor parte de su calor. A continuación se invierte el flujo a través del horno, y el combustible y el aire pasan a través de las cámaras y son calentados por los ladrillos. Con este método, los hornos de crisol abierto alcanzan temperaturas de hasta 1.650 °C.

El horno propiamente dicho suele ser un crisol de ladrillo plano y rectangular de unos 6×10 m., con un techo de unos 2,5 m. de altura. Una serie de puertas da a una planta de trabajo situada delante del crisol. Todo el crisol y la planta de trabajo están situados a una altura determinada por encima del suelo, y el espacio situado bajo el crisol lo ocupan las cámaras de regeneración de calor del horno. Un horno del tamaño indicado produce unas 100 toneladas de acero cada 11 horas.

El horno se carga con una mezcla de arrabio (fundido o frío), chatarra de acero y mineral de hierro, que proporciona oxígeno adicional. Se añade caliza como fundente y fluorita para hacer que la escoria sea más fluida. Las proporciones de la carga varían mucho, pero una carga típica podría consistir en 60.000 kg. de chatarra de acero, 11.000 kg. de arrabio frío, 45.000 kg. de arrabio fundido, 12.000 kg. de caliza, 1.000 kg. de mineral de hierro y 200 kg. de fluorita. Una vez cargado el horno, se enciende, y las llamas oscilan de un lado a otro del crisol a medida que el operador invierte su dirección para regenerar el calor.

Desde el punto de vista químico la acción del horno de crisol abierto consiste en reducir por oxidación el contenido de carbono de la carga y eliminar impurezas como silicio, fósforo, manganeso y azufre, que se combinan con la caliza y forman la escoria. Estas reacciones tienen lugar mientras el metal del horno se encuentra a la temperatura de fusión, y el horno se mantiene entre 1.550 y 1.650 °C durante varias horas, hasta que el metal fundido tenga el contenido de carbono deseado. Un operario experto puede juzgar el contenido de carbono del metal a partir de su aspecto, pero por lo general se prueba la fundición extrayendo una pequeña cantidad de metal del horno, enfriándola y sometiéndola a examen físico o análisis químico. Cuando el contenido en carbono de la fundición alcanza el nivel deseado, se sangra el horno a través de un orificio situado en la parte trasera. El acero fundido fluye por un canal corto hasta una gran cuchara situada a ras de suelo, por debajo del horno. Desde la cuchara se vierte el acero en moldes de hierro colado para formar lingotes, que suelen tener una sección cuadrada de unos 50 cm. de lado, y una longitud de 1,5 m.

Estos lingotes -la materia prima para todas las formas de fabricación del acero- pesan algo menos de 3 toneladas. Actualmente se han puesto en práctica métodos para procesar el acero de forma continua (colada continua) sin tener que pasar por el proceso de fabricación de lingotes.

OTROS METODOS DE REFINADO DEL HIERRO

Aunque casi todo el acero que se fabrica en el mundo se obtiene a partir del arrabio producido en altos hornos, hay otros métodos de refinado del hierro que se han practicado de forma limitada. Uno de ellos es el denominado método de reducción directa para fabricar hierro y acero a partir del mineral, sin producir arrabio.

En este proceso se mezclan mineral de hierro y coque en un horno de calcinación rotatorio y se calientan a una temperatura de unos 950 °C. El coque caliente desprende monóxido de carbono, igual que en un alto horno, y reduce los óxidos del mineral a hierro metálico. Sin embargo, no tienen lugar las reacciones secundarias que ocurren en un alto horno, y el horno de calcinación produce el llamado hierro esponja, de mucha mayor pureza que el arrabio. También puede producirse hierro prácticamente puro mediante electrólisis haciendo pasar una corriente eléctrica a través de una disolución de cloruro de hierro, pero esta no tiene importancia comercial.

TIPOS DE HORNOS

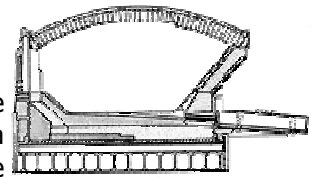
Cualquier proceso de producción de acero a partir del Arrabio consiste en quemar el exceso de carbono y otras impurezas presentes en el hierro.

Una dificultad para la fabricación del acero es su elevado punto de fusión, 1.400 °C aproximadamente, que impide utilizar combustibles y hornos convencionales.

Para superar esta dificultad, se han desarrollado 3 importantes tipos de hornos para el refinamiento del Acero, en cada uno de estos procesos el oxígeno se combina con las impurezas y el carbono en el metal fundido. El oxígeno puede introducirse directamente mediante presión dentro o sobre la carga a través del oxígeno en el aire, o en forma de óxidos de hierro o herrumbre en la chatarra. Esto oxidará algunas impurezas, las que se perderán como gases, mientras otras impurezas reaccionarán con la piedra caliza fundida para formar una escoria que será colada posteriormente.

HORNO DE HOGAR ABIERTO o CRISOL

El HORNO DE HOGAR ABIERTO semeja un horno enorme, y se le denomina de esta manera porque contiene en el hogar (fondo) una especie de piscina larga y poco profunda (6m de ancho, por 15 m de largo, por 1 m de profundidad, aproximadamente).



El horno se carga en un 30% a un 40% con chatarra y piedra caliza, empleando aire precalentado, combustible líquido y gas para la combustión, largas lenguas de fuego pasan sobre los materiales, fundiéndolos. Al mismo tiempo, se quema (o se oxida) el exceso de carbono y otras impurezas como el fósforo, silicio y manganeso.

Este proceso puede acelerarse introduciendo tubos refrigerados por agua (lanzas), los que suministran un grueso flujo de oxígeno sobre la carga.

Periódicamente, se revisan muestras de la masa fundida en el laboratorio para verificar la composición empleando un instrumento denominado espectrómetro. También se determinan los niveles de carbono.

Si se está fabricando acero de aleación, se agregarán los elementos de aleación deseados. Cuando las lecturas de composición son correctas, el horno se cuela y el acero fundido se vierte en una olla de colada.

El proceso completo demora de cinco a ocho horas, mientras que el Horno de Oxígeno Básico produce la misma cantidad de acero en 45 minutos aproximadamente. Debido a esto, este horno ha sido virtualmente reemplazado por el de Oxígeno Básico.

HORNO DE OXIGENO BASICO



Es un horno en forma de pera que puede producir una cantidad aproximadamente de 300 toneladas de acero en alrededor de 45 minutos.

El horno se inclina desde su posición vertical y se carga con chatarra de acero fría (cerca de un 25%) y luego con hierro derretido, después de ser devuelto a su posición vertical, se hace descender hacia la carga una lanza de oxígeno refrigerada por agua y se fuerza sobre ella un flujo de oxígeno puro a alta velocidad durante 20 minutos. Este actúa como fuente de calor y para la oxidación de las impurezas.

Tan pronto como el chorro de oxígeno comienza, se agrega la cal y otros materiales fundentes. La reacción química resultante desarrolla una temperatura aproximada de 1.650° C. El oxígeno se combina con el exceso de carbono acabando como gas y se combina también con las impurezas para quemarlas rápidamente. Su residuo es absorbido por la capa flotante de escoria.

Después de haberse completado la inyección de oxígeno, se analiza el contenido de carbono y la composición química de diversas muestras de la masa fundida.

Cuando la composición es correcta, el horno se inclina para verter el acero fundido en una olla de colada.

Aunque se pueden producir algunos aceros de aleación con este proceso, el ciclo de tiempo aumenta considerablemente, eliminando así su ventaja principal. Consecuentemente, el proceso de oxígeno básico, como el del hogar abierto, se emplea generalmente para producir altos tonelajes de acero con un bajo nivel de carbono, que son los de mayor consumo. Estos aceros con bajo nivel de carbono se utilizan para barras, perfiles y planchas gruesas y delgadas.

HORNO DE ARCO ELECTRICO



Es el más versátil de todos los hornos para fabricar acero. puede proporcionar altas temperaturas, hasta 1.930 °C, sin puede controlarse eléctricamente con un alto grado de precisión.

Debido a que no se emplea combustible alguno, no se introduce ningún tipo de impurezas. El resultado es un acero más limpio.

Consecuentemente, puede producir todo tipo de aceros, desde aceros con regular contenido de carbono hasta aceros de alta aleación, tales como aceros para herramientas, aceros inoxidable y aceros especiales para los cuales se emplea principalmente. Otra ventaja sobre el Horno de Oxígeno Básico es que puede operar con grandes cargas de chatarra y sin hierro fundido.

El Horno de Arco Eléctrico se carga con chatarra de acero cuidadosamente seleccionada. El arrabio fundido se emplea raramente. Si la carga de chatarra es muy baja en carbono, se agrega coque (el cual es casi puro carbono) o electrodos de carbono de desecho, para aumentar así su nivel.

Al aplicarse la corriente eléctrica, la formación del arco entre los electrodos gigantes produce un calor intenso. Cuando la carga se ha derretido completamente, se agregan dentro del horno cantidades medidas de los elementos de aleación requeridos.

La masa fundida resultante se calienta, permitiendo que se quemen las impurezas y que los elementos de aleación se mezclen completamente.

Para acelerar la remoción del carbono, el oxígeno gaseoso se introduce generalmente en forma directa dentro de acero fundido por medio de un tubo o lanza. El oxígeno quema el exceso de carbono y algunas de las impurezas, mientras otras se desprenden como escoria por la acción de varios fundentes.

Cuando la composición química de la masa fundida cumple con las especificaciones, el horno se inclina para verter el acero fundido dentro de una olla de colada.

Este horno puede producir una hornada de acero en un período de dos a seis horas, dependiendo del horno individual.

PROCESO DE VACIO (DESGASIFICACIÓN) DEL ACERO FUNDIDO.

Después de ser producido en cualquiera de los hornos de fabricación de acero, el acero derretido puede refinarse aún más para producir acero de alta pureza y homogeneidad. Esto se logra removiendo los gases (oxígeno, hidrógeno y nitrógeno) en el acero derretido que fueron absorbidos o formados durante el proceso de fabricación.

Si los gases no se remueven antes que el acero se solidifique, su presencia o sus reacciones con otros elementos en el acero puede producir defectos tales como: inclusiones (partículas sólidas de óxido), sopladuras (bolsas de gas), descascarillamiento (grietas internas) y fragilidad (pérdida de ductibilidad).

La desgasificación del acero fundido se lleva a cabo exponiéndolo a un vacío. La presión enormemente reducida sobre la superficie del líquido permite que los gases escapen.

El acero fundido puede desgasificarse de varias maneras. Las dos más comunes son:

- DESGASIFICACION POR FLUJO
- DESGASIFICACION EN LA OLLA DE COLADA.

DESGASIFICACION POR FLUJO

En este proceso, el acero fundido se vierte desde la olla de colada dentro de una lingotera, la cual está completamente encerrada en una cámara de vacío. Mientras el flujo de acero fundido cae dentro del vacío, se separa en gotitas. Debido a la reducida presión sobre el líquido, los gases disueltos revientan y se extraen fuera de la cámara por medio de una bomba de vacío. Libre ya de gases en la lingotera, éste se solidifica en un acero de alta pureza.

DESGASIFICACION EN LA OLLA DE COLADA.

En este proceso, el acero derretido se desgasifica en la olla de colada. Se hace descender un recipiente de vacío calentado de modo que su boquilla de absorción quede por debajo del nivel líquido del acero fundido.

La presión atmosférica impulsa el acero fundido hacia arriba dentro de la cámara de vacío, en donde los gases revientan y se extraen mediante la bomba de vacío. La elevación del recipiente de vacío permite que el acero fundido fluya de vuelta, por la fuerza de gravedad, dentro de la olla de colada. Este ciclo se repite varias veces hasta que la totalidad el acero fundido en la olla se ha desgasificado.

EFFECTOS DE LOS ELEMENTOS DE ALEACION

Los elementos de aleación específicos y sus cantidades determinan el tipo de acero de aleación y sus propiedades particulares.

Los efectos principales de algunos de los elementos más comunes son:

ALUMINIO	→	Empleado en pequeñas cantidades, actúa como un desoxidante para el acero fundido y produce un Acero de Grano Fino.
BORO	→	Aumenta la templabilidad (la profundidad a la cual un acero puede ser endurecido).
CROMO	→	Aumenta la profundidad del endurecimiento y mejora la resistencia al desgaste y corrosión.
COBRE	→	Mejora significativamente la resistencia a la corrosión atmosférica.
MANGANESO	→	Elemento básico en todos los aceros comerciales. Actúa como un desoxidante y también neutraliza los efectos nocivos del azufre, facilitando la laminación, moldeo y otras operaciones de trabajo en caliente. Aumenta también la penetración de temple y contribuye a su resistencia y dureza.
MOLIBDENO	→	Mediante el aumento de la penetración de temple, mejora las propiedades del tratamiento térmico. Aumenta también la dureza y resistencia a altas temperaturas.
NIQUEL	→	Mejora las propiedades del tratamiento térmico reduciendo la temperatura de endurecimiento y distorsión al ser templado. Al emplearse conjuntamente con el Cromo, aumenta la dureza y la resistencia al desgaste.
SILICIO	→	Se emplea como desoxidante y actúa como endurecedor en el acero de aleación.
AZUFRE	→	Normalmente es una impureza y se mantiene a un bajo nivel. Sin embargo, alguna veces se agrega intencionalmente en grandes cantidades (0,06 a 0,30%) para aumentar la maquinabilidad (habilidad para ser trabajado mediante cortes) de los aceros de aleación y al carbono.
TITANIO	→	Se emplea como un desoxidante y para inhibir el crecimiento granular. Aumenta también la resistencia a altas temperaturas.
TUNGSTENO	→	Se emplea en muchos aceros de aleación para herramientas, impartiendo una gran resistencia al desgaste y dureza a altas temperaturas.
VANADIO	→	Imparte dureza y ayuda en la formación de granos de tamaño fino. Aumenta la resistencia a los impactos (resistencia a las fracturas por impacto) y también la resistencia a la fatiga.

En resumen, los efectos de los elementos de aleación son:

- Mayor resistencia y dureza
- Mayor resistencia a los impactos
- Aumento de la resistencia al desgaste
- Aumento de la resistencia a la corrosión
- Mejoramiento de maquinabilidad
- Dureza al rojo (altas temperaturas)
- Aumento de la profundidad a la cual el acero puede ser endurecido (penetración de temple)

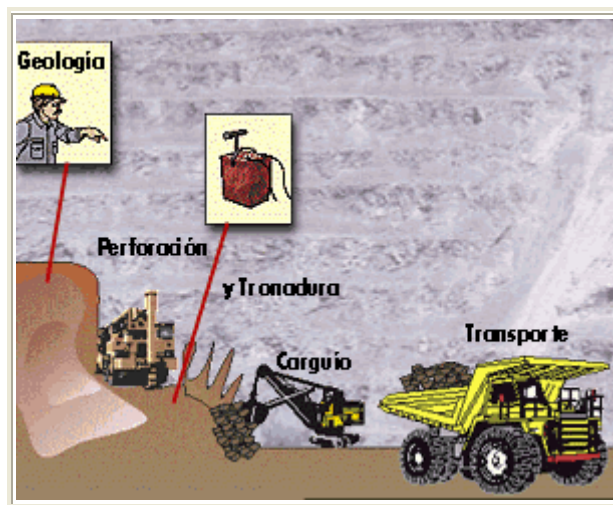
EXTRACCION DEL MINERAL DE HIERRO

El mineral extraído de una mina de hierro puede ser de carga directa a los altos hornos o puede requerir de un proceso de peletización para ser utilizado en la producción del acero, esto según sea su calidad.

Es importante destacar que si el mineral posee bajo contenido de impurezas (principalmente fósforo y azufre), puede ser utilizado para carga directa, requiriendo sólo tratamientos de molienda y concentración.

Si, por el contrario, el contenido de impurezas es relativamente alto, se realiza también la molienda y concentración, pero requiere además de un proceso químico de peletización, donde se reducen significativamente dichas impurezas.

PROCESO DE EXTRACCION DE MINERAL CON BAJO CONTENIDO DE IMPUREZAS – MINA EL ROMERAL (CHILE)



Extracción de Mineral - Geología



GENERALIDADES

El distrito de Minas de El Romeral consiste en una sucesión de cuerpos mineralizados de magnetita de 3.5 km de largo y 0.5 km de ancho, ubicada en un cinturón de rocas volcánicas y cataclásticas, alteradas hidrotermalmente, que han sufrido posteriormente metamorfismo dinámico de carácter regional debido a la Megafalla de Atacama. Este cinturón de supuesta

edad jurásica superior neocomiana está controlado por una gran zona de falla, de rumbo norte-sur al Noreste.

Las brechas de actinolita resultantes de la alteración hidrotermal están contactadas hacia el oeste con la Diorita Romeral. Hacia el este, ellas se encuentran en contacto directo con una vasta zona de alteración.

Cuerpos masivos lenticulares subverticales de alta ley, con amplio reemplazo de la roca hospedera, coexisten con cuerpos mineralizados brechosos de media ley, con reemplazo parcial de la roca original, y con zonas de baja ley derivadas del relleno de fracturas y de la diseminación del mineral.

Pueden identificarse varios cuerpos elongados con rumbo norte- sur, denominados Siciliano, Extensión Norte, Cerro Principal y Extensión Sur. Cerro Principal, el mayor y más rico de los cuerpos mineralizados se encuentra actualmente en explotación.

Mineralización

La mineralización de Cerro Principal está compuesta fundamentalmente por magnetita, con actinolita como ganga predominante y pequeñas cantidades de pirita y apatita.

La pirita se presenta en vetillas y diseminada, asociada en mayor proporción a la ganga que la magnetita.

La apatita se presenta diseminada, en agregados de cristales y en guías; está fundamentalmente asociada a la ganga.

El vanadio se encuentra asociado a la magnetita formando parte de la estructura cristalina, reemplazando al Fe+3.

Se ha denominado como "textura" la proporción y forma de distribución del mineral y la ganga, generándose la diferenciación de tres texturas predominantes: maciza, brechosa y diseminada, las que se encuentran en diversas proporciones en las unidades mineralizadas.

El cuerpo mineralizado denominado Cerro Principal está formado por dos unidades de alta ley (Cuerpo Principal y Cuerpo Secundario Sur) y una de baja ley (Unidad Occidental o Cuerpo de Baja Ley).

Textura	Cuerpo Principal	Cuerpo Secundario Sur	Unidad Occidental
Maciza	60%	10%	5%
Brechosa	30%	80%	20%
Diseminada	10%	10%	75%

Distribución de las texturas en Cerro Principal

INVENTARIO MINERO

Recursos Mineros

La evaluación de los recursos mineros se realiza mediante la aplicación de técnicas geostatísticas. El área de medición contemplada y su estructuración consiste en:

Nivel Superior (sobre nivel del mar)	500m
Nivel Inferior (sobre nivel del mar)	-150m
Coordenada mínima Norte	10.900m
Coordenada máxima Norte	12.595m
Coordenada mínima Este	5.600m
Coordenada máxima Este	6.700m
Dimensión de los bloques	25x25x10m
Nº bloques dirección N-S	65
Nº bloques dirección E-W	44
Nº bloques altura	60

Los recursos evaluados (probados, probables y posibles) utilizando una ley de corte de 30% Fe, alcanzan a: **60.279 mtm y 46,79% Fe** (al 31-12-1999)

Reservas Mineras

La evaluación de las reservas se realiza considerando que constituye la porción económicamente explotable de los recursos mineros.

El diseño del pit considera una ley de corte de 30% Fe, con un nivel base de 40 m bajo el nivel del mar y ángulos de talud final entre los 40 y 45°. Los ángulos de talud se determinan considerando la información estructural y litológica, la geometría del pit y los parámetros geomecánicos obtenidos en el muestreo de los distintos sectores. Así, las reservas mineras de Cerro Principal alcanzan a: **40.947 mtm y 46,86% Fe** (al 31-12-1999).

Plan Minero

El plan minero consiste en la ubicación apropiada en el tiempo de las secuencias de extracción de minerales y estéril, de manera de asegurar un desarrollo armónico del pit y la permanente disponibilidad de minerales aptos para cumplir con los compromisos de venta.

El desarrollo armónico del pit implica remover los bloques de estéril requeridos para generar el mineral a la vista necesario en el mediano y largo plazo, respetar los ángulos de talud del diseño y generar los minerales necesarios para cumplir en cantidad y calidad los planes de producción.

El Plan Minero considera:

- La geología actualizada
- La evaluación de las reservas
- La capacidad de los equipos mineros
- La capacidad de la Planta de Beneficio

Sobre la base de estos antecedentes se prepara un cuidadoso programa de operaciones que debe asegurar el cumplimiento de los objetivos precedentes, sobre la base de los planes de venta actualizados.

La capacidad nominal de producción de Romeral alcanza a los 3.9 millones de toneladas anuales: 800.000 TM de granzas, 2.000.000 TM de finos y 1.100.000 TM de pellet feed

Extracción de Mineral - Perforación y Tronadura



GENERALIDADES

La explotación del yacimiento de El Romeral se concentra en el cuerpo mineralizado denominado Cerro Principal, mediante el método de cielo abierto, con un rajo alargado en el sentido norte-sur, de acuerdo a la forma del cuerpo mineralizado. La longitud del rajo alcanza alrededor de 1.700 m y su ancho a 600 m, en la parte central.

El acceso principal al rajo se realiza por el extremo sur, en el nivel 270 m, donde se encuentra ubicada la tolva de recepción de la Planta de Chancado y se inician los caminos hacia los botaderos de lastre y acopios de minerales.

La altura del banco también varía de acuerdo los sectores; los bancos situados sobre el nivel 250 tienen una altura de 12,5 m, en tanto que los bancos bajo dicho nivel tienen una altura de 10 m.

Perforación y Tronadura

La perforación para tronadura se realiza mediante la combinación de 2 perforadoras con martillo en el fondo, Ingersoll Rand modelo T-4, con diámetro de perforación de 9 1/2" y una perforadoras Bucryus Erie 45-R, con diámetro de perforación de 9 7/8".

Los tiros se perforan verticalmente, en mallas triangulares o cuadradas y con un espaciamiento variable de acuerdo al tipo de material, explosivos y diámetro de la broca. Se agrega agua durante la perforación en zonas secas a fin de evitar la polución ambiental.

La perforación secundaria se realiza con perforadora neumática montada sobre orugas.

El explosivo para tronaduras consiste principalmente en Anfo pesado, una mezcla de diversas proporciones de Anfo (nitrato de amonio y petróleo) y una emulsión de mayor poder explosivo y resistente al agua. Las proporciones de la mezcla de Anfo y emulsión dependen de la aplicación requerida, especialmente del tipo de roca y la abundancia de agua en el sector.

El carguío del explosivo se realiza por medio de camiones fábrica, que se caracterizan por acarrear los componentes hasta el hoyo perforado y producir la mezcla explosiva en el momento del carguío. Los explosivos son suministrados en el hoyo de perforación por empresas especializadas en el rubro.

Las cargas explosivas de cada hoyo se conectan por líneas a las que se aplica retardadores, lo que permite un tiempo de detonación distinto a cada tiro, con la consiguiente mayor fracturación de la roca y minimización del daño en las paredes del rajo.

Extracción de Mineral - Carguío



GENERALIDADES

El carguío del material tronado se realiza con 4 palas eléctricas Bucyrus Erie 195-B y 2 cargadores frontales Caterpillar 992-C.

Las palas eléctricas operan con baldes de llenado rápido de 12 y 13 yd³ (*) de capacidad, mientras los cargadores frontales utilizan baldes de 11.7 yd³.

Los cargadores frontales se destinan habitualmente al carguío de mineral para la alimentación de Planta de Chancado, mientras las palas orientan su accionar a la extracción de estéril.

(*) yd³ : 1 Yarda = 0,9144 metros

Extracción de Mineral - Transporte



GENERALIDADES

Transporte de materiales mina

El transporte de mina se distribuye entre el despacho de minerales a Planta de Chancado y acopios, y el material estéril hacia botaderos. Para esto se dispone de una flota de Seis camiones Caterpillar 773-B, de 50 TM de capacidad; nueve camiones Lectra Haul M-100 de 91 TM de capacidad, y seis camiones Caterpillar 785-B de 140 TM de capacidad.

Los caminos de interior mina se encuentran diseñados con una pendiente de 10%, mientras el tramo desde la salida sur de la mina hacia botaderos presenta una pendiente promedio de 4%.

Equipos de Apoyo

Se dispone de la siguiente flota de equipos para el apoyo de las operaciones mineras:

- Un cargador frontal Caterpillar 988-B.
- Dos tractores sobre orugas Caterpillar D9N.
- Un tractor sobre orugas Komatsu 355-A.
- Dos tractores sobre neumáticos Caterpillar 824.
- Dos motoniveladoras Caterpillar 14-G.

Estos equipos deben construir caminos, mantener las carpetas de rodado de caminos y plataformas de trabajo y apoyar a los equipos de carguío en sus frentes de trabajo.

PROCESO DE PELETIZACION DEL HIERRO

El proceso productivo se inicia con la extracción del mineral de hierro desde las minas.

Si el mineral posee bajo contenido de impurezas (principalmente fósforo y azufre), puede ser utilizado para carga directa a Altos Hornos, requiriendo sólo tratamientos de molienda y concentración. Este es el caso de Mina El Romeral (Chile).

Si, por el contrario, el contenido de impurezas es relativamente alto, se realiza también la molienda y concentración, pero requiere además de un proceso químico de peletización, donde se reducen significativamente dichas impurezas. Este es el caso de las minas Los Colorados y El Algarrobo (Chile), en que el mineral se transporta por vía férrea hacia la Planta de Pellet de Valle del Huasco.

PROCESO DE PELETIZACION DEL MINERAL DE HIERRO

(PLANTA DE PELLET VALLE DEL HUASCO)

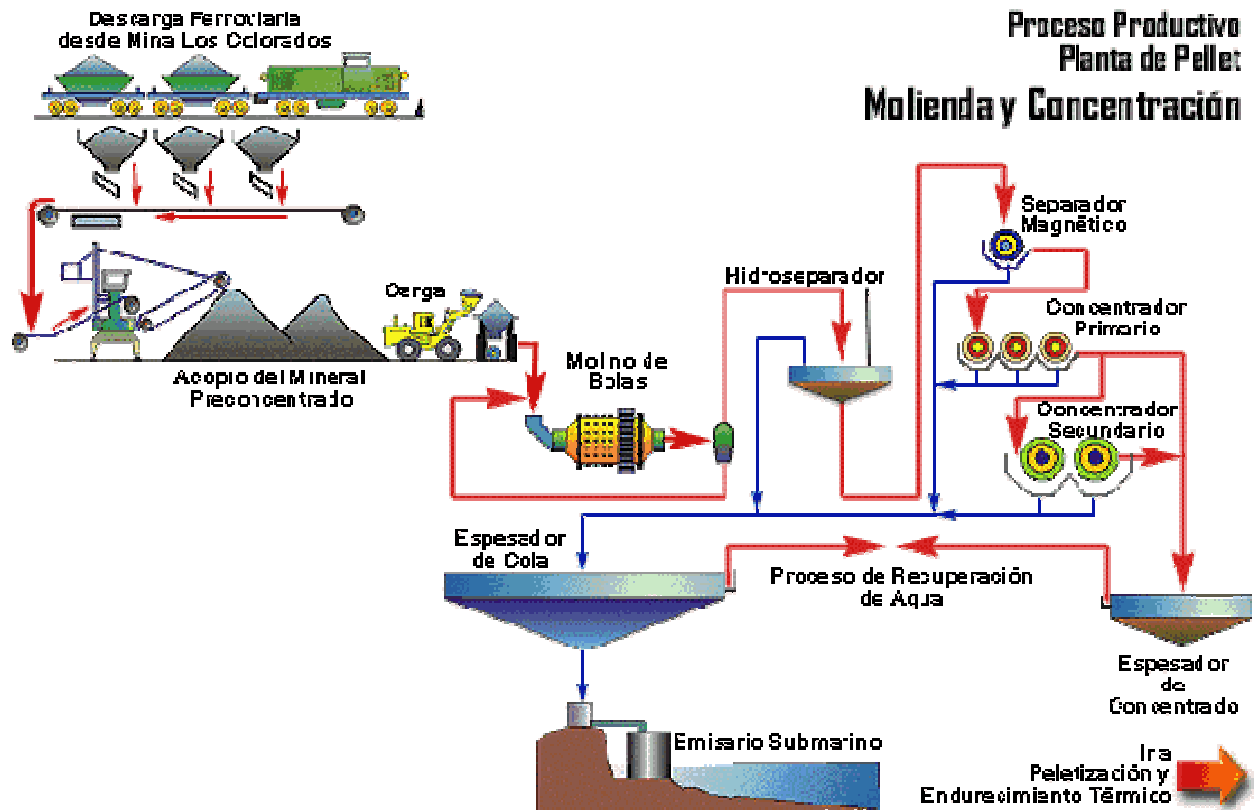


Lámina 1/2

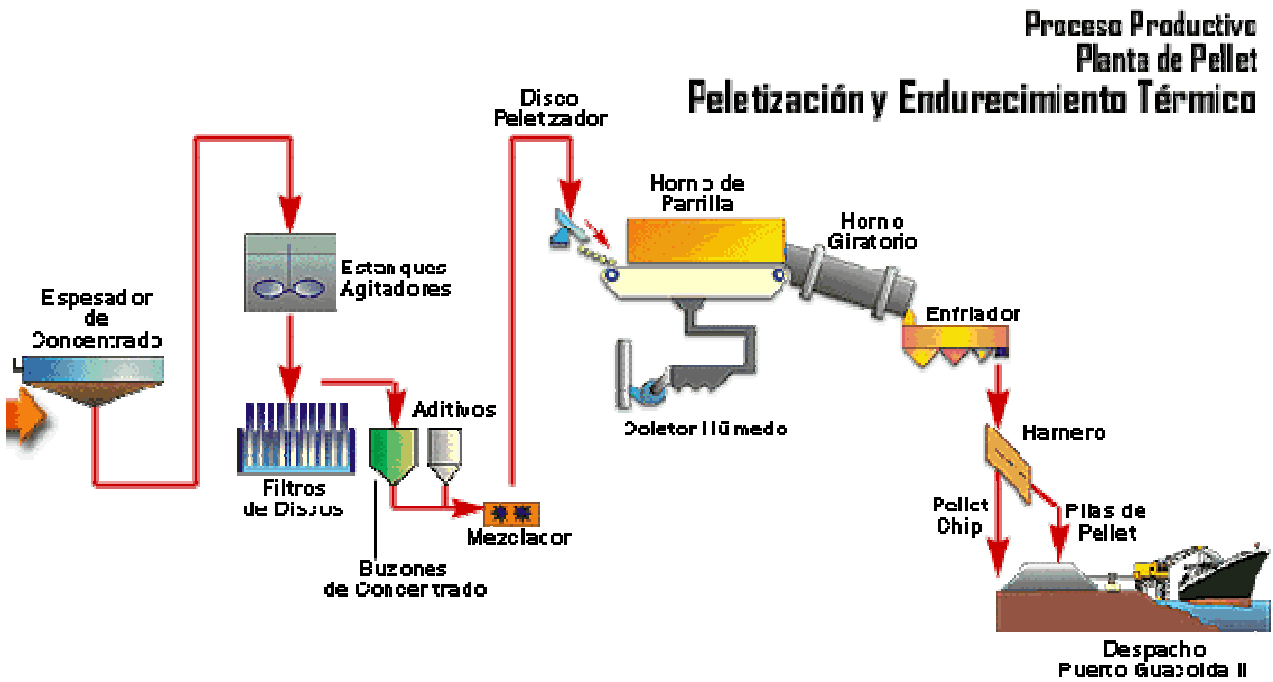
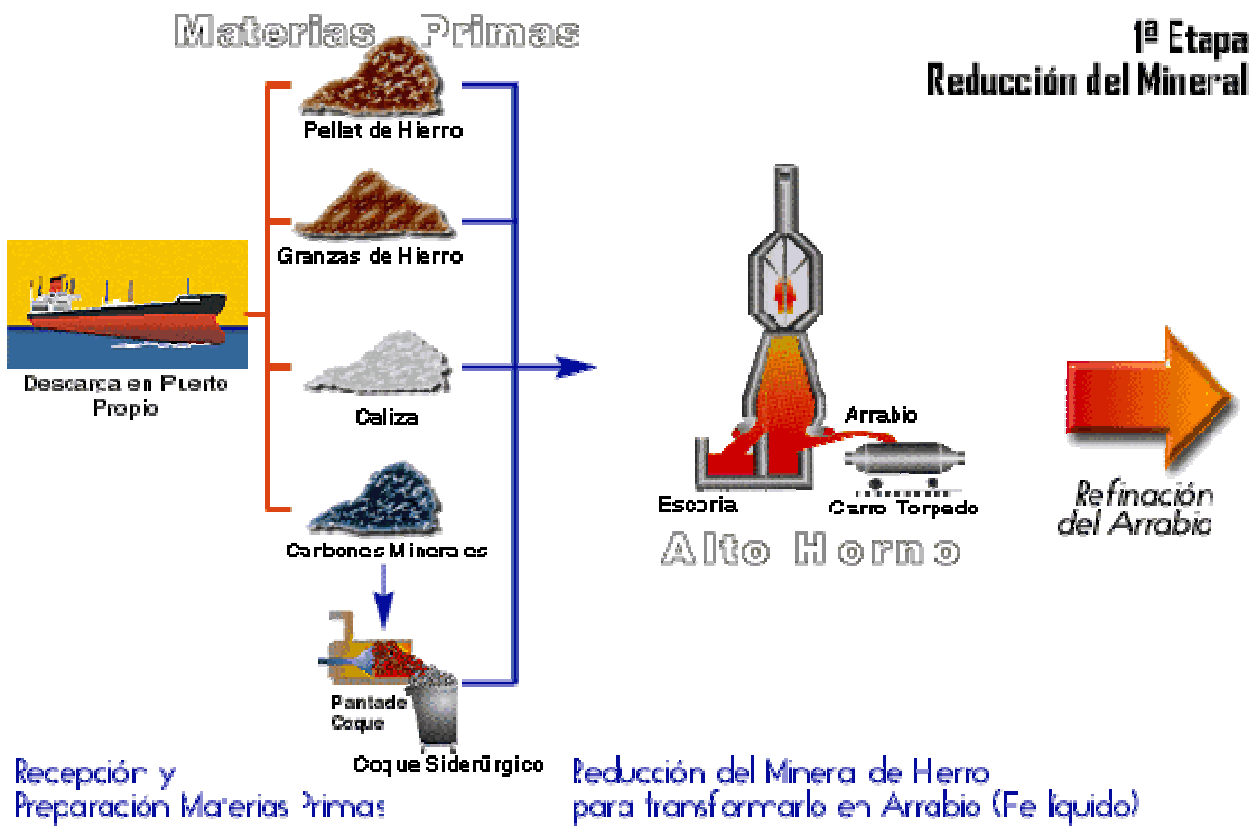


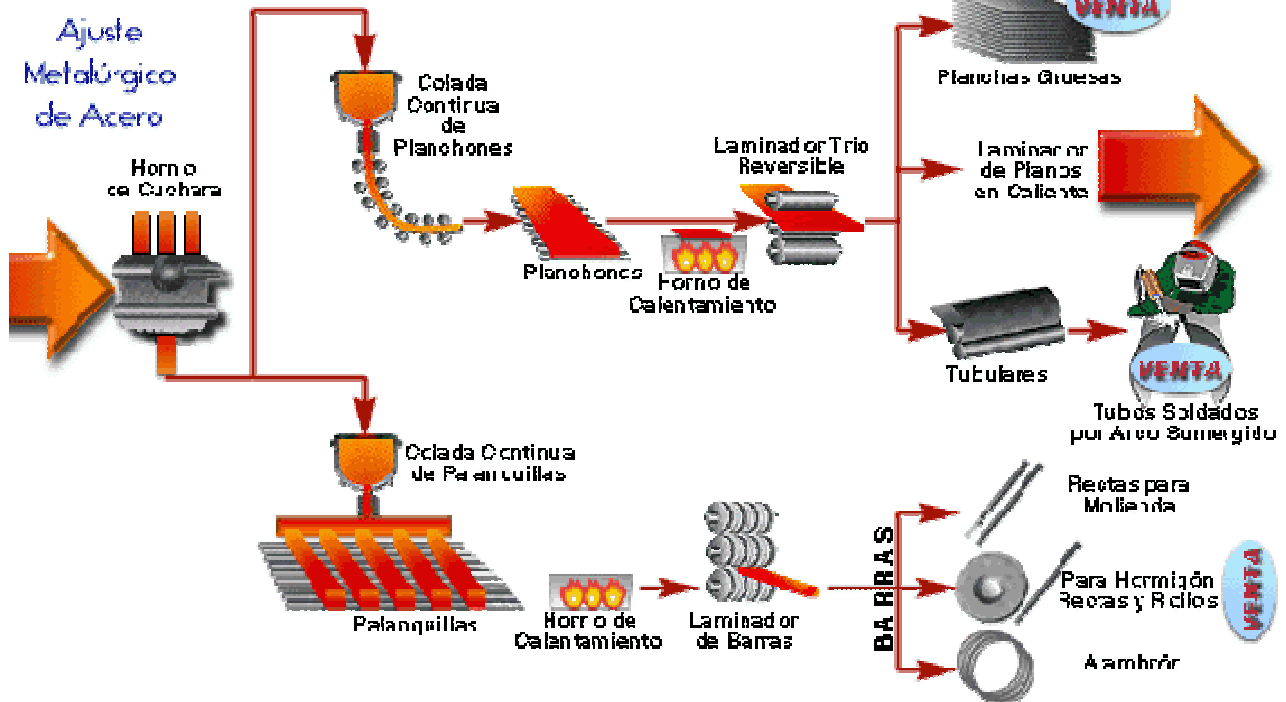
Lámina 2/2

PROCESO PRODUCTIVO SIDERURGICO

El Proceso Productivo Siderúrgico lo hemos dividido gráficamente en 6 pantallas debido a su extensión.

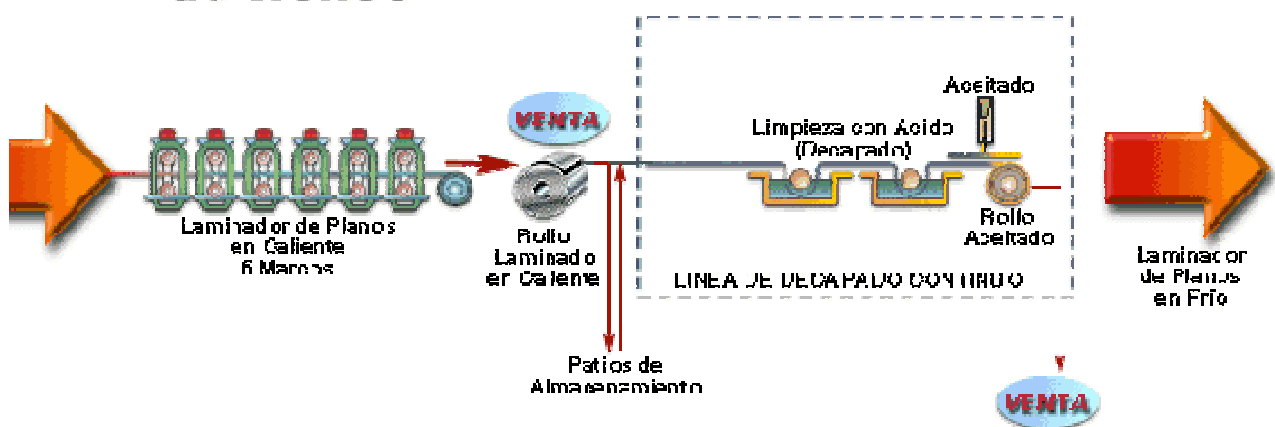


Colada Continua

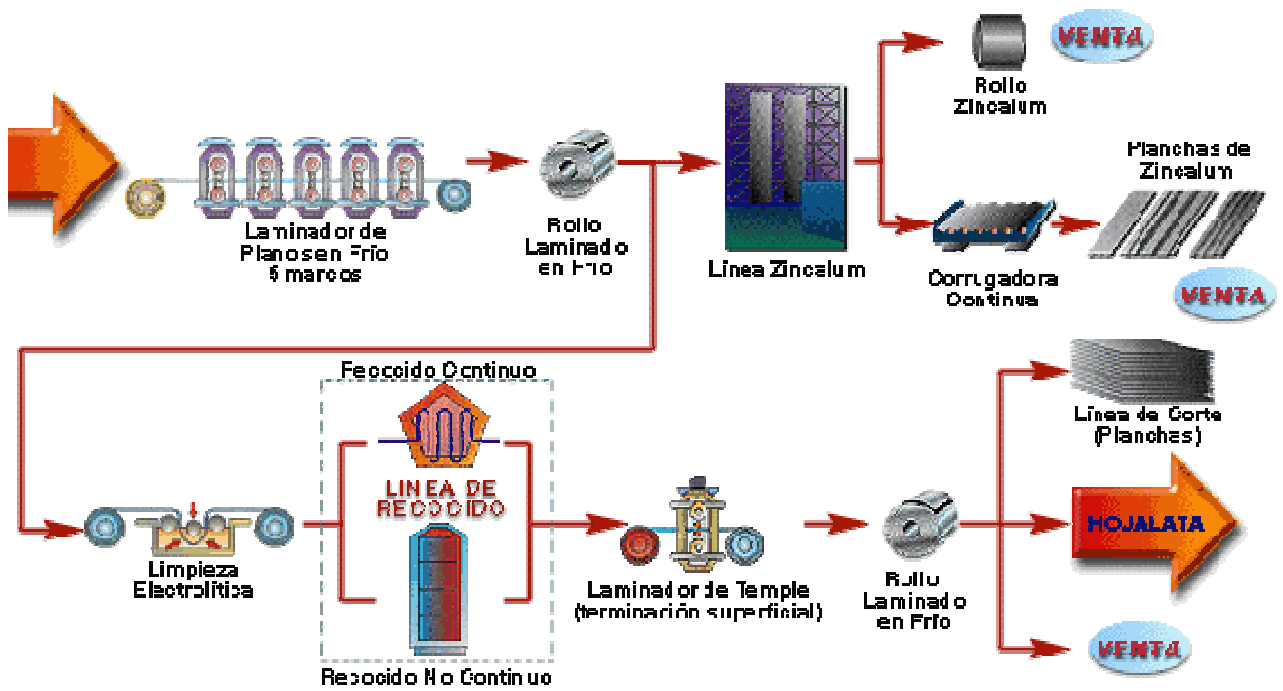


3ª Etapa Laminación del Acero 2

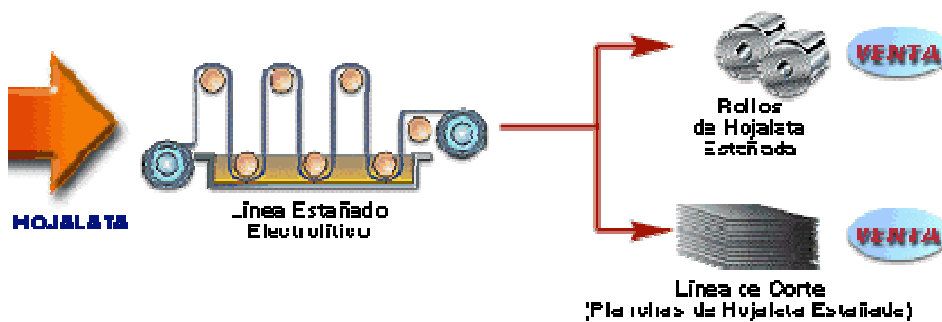
Fabricación de Rollos



3ª Etapa Laminación del Acero 3



3ª Etapa Laminación del Acero 4



1.- Preparación de Materia Primas

- a) Materias Primas
- b) Planta de Coque y Sub productos

2.- Reducción del Mineral para obtener Arrabio

- a) Alto Horno

3.- Fabricación del Acero

- a) Acería de Convertidores al Oxígeno
- b) Colada Continua de Planchones

4.- Laminación del Acero en Productos Terminados Finales

- a) Laminador de Barras
- b) Laminador de Planos en Caliente
- c) Laminador de Planos en Frío
- d) Productos Tubulares

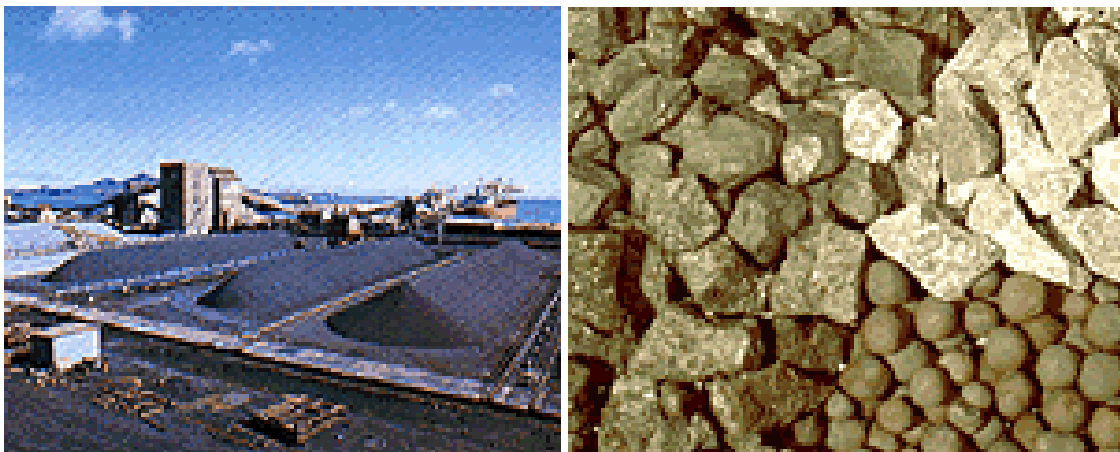
Materias Primas

Esta etapa incluye la descarga, clasificación, pesaje y almacenamiento de las materias primas necesarias para la fabricación del acero, que básicamente son: mineral de hierro, carbones metalúrgicos y caliza.

Carbones Metalúrgicos: Que se convierte en Coque, se importa desde países como Australia, Canadá y Estados Unidos.

Mineral de Hierro: Pellets y Granzas.

Caliza



Planta de Coque y Subproductos

La mezcla de carbones metalúrgicos se somete a un proceso de destilación seca que lo transforma en coque metalúrgico. Este proceso se realiza en la Planta de Coque.

La coquificación del carbón mineral deja, como subproducto, gas de alto poder calorífico, que es utilizado como combustible en los diversos procesos de la industria.

Carbones



Coque



Alto Horno

La reducción del mineral para obtener arrabio, se realiza en los Altos Hornos. Por el tragante (parte superior del horno) se cargan por capas los minerales de hierro, la caliza y el coque.

La inyección de aire precalentado a 1.000 °C, aproximadamente, facilita la combustión del coque, generando elevadas temperaturas y gases reductores que actúan sobre el mineral y la caliza, transformándolos en arrabio (hierro líquido) y en escoria, respectivamente.

La colada, que consiste en extraer estos elementos acumulados en el crisol (parte inferior de los altos hornos), se efectúa aproximadamente cada dos horas. El arrabio es recibido en carros torpedo para ser transportado a la Acería de Convertidores al Oxígeno; la escoria, separada del arrabio por su menor densidad, se hace fluir hacia un foso donde es "apagada" y granulada por un chorro de agua.



Acería de Convertidores al Oxígeno

Se cuenta con dos convertidores de 115 toneladas cada uno. El arrabio proveniente de los Altos Hornos se carga junto con chatarra de acero. Por la acción del oxígeno puro que se inyecta al convertidor se oxidan el carbono, silicio y fósforo del arrabio. Estas reacciones son exotérmicas y causan la fusión de la carga metálica fría sin necesidad de agregar ningún combustible y, por adición de cal, se forma la escoria en que se fijan otras impurezas como azufre y parte de fósforo. Una vez finalizada la inyección de oxígeno se analiza su composición y se mide su temperatura, agregando finalmente las ferroaleaciones que imparten las características principales a los diversos tipos de aceros.

El tiempo requerido para procesar una hormada de 115 toneladas en aproximadamente 42 minutos. El acero líquido así producido se recibe en cucharadas de 115 toneladas de capacidad y se envía a un proceso de metalurgia secundaria y luego al vaciado de colada continua de planchones o palanquillas según su composición química.



Colada Continua de Planchones y de Palanquillas

Colada Continua de Planchones

El acero líquido de la cuchara es vaciado a una artesa que se comunica por el fondo con un molde en constante movimiento que es enfriado por agua; en el se inicia el proceso de solidificación del acero que se completa a lo largo del trayecto por el interior de la máquina.

El planchón que se produce es una cinta continua con un espesor de 156 mm., un ancho que varía entre 800 y 1.050 mm. y que a la salida se va cortando a los largos requeridos.

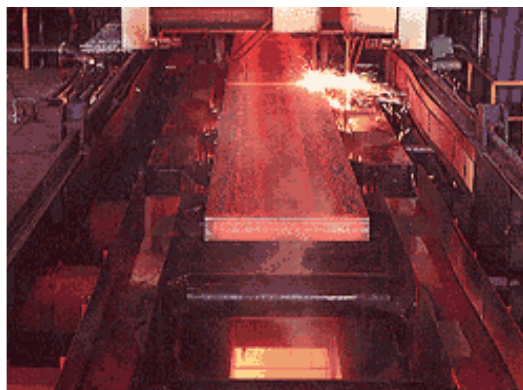
Colada Continua de Palanquillas

La máquina de colada continua de palanquillas, cuenta con 5 líneas conformadas por tubos de cobre de sección cuadrada con refrigeración interna por agua, con sistema de enfriamiento controlado a lo largo de la hebra y un agitador electromagnético al final de la hebra para prevenir segregación en aceros alto carbono.

Una vez que se ha formado una piel suficientemente gruesa dentro del molde, la hebra inicia su recorrido curvo dentro de la máquina, sometida a la acción de rociadores de agua controlados en función de la velocidad de la máquina.

Al término de esta zona la hebra es enderezada mediante rodillos y cortada a la dimensión especificada por sopletes de oxígeno-propano para terminar siendo estampada con un número identificador.

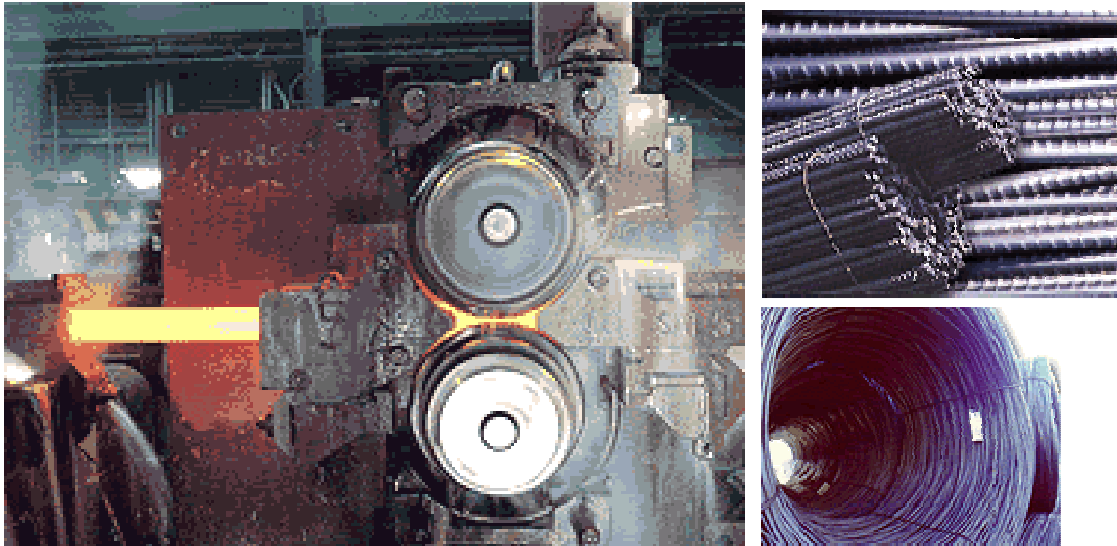
La palanquilla terminada de 150 x 150 mm. de sección y 6,70 metros de largo, es trasladada mediante mesas de empuje, mesas de rodillos y una mesa galopante hasta la zona de despacho desde donde es cargada mediante una grúa dotada de electroimanes a carros de ferrocarril o camiones según su destino final.



Laminador de Barras

Las palanquillas son productos semiterminados 150 x 150 mm de sección y largos de 6,70 metros.

Las palanquillas se procesan en este laminador en el cual después de ser recalentadas en un horno se laminan en pases sucesivos y se transforman en barras redondas lisas o con resaltes para hormigón, todos ellos, productos terminados ampliamente utilizados como materiales de construcción y en la manufactura de alambres, clavos, tornillos, bolas para molinos, pernos, etc.

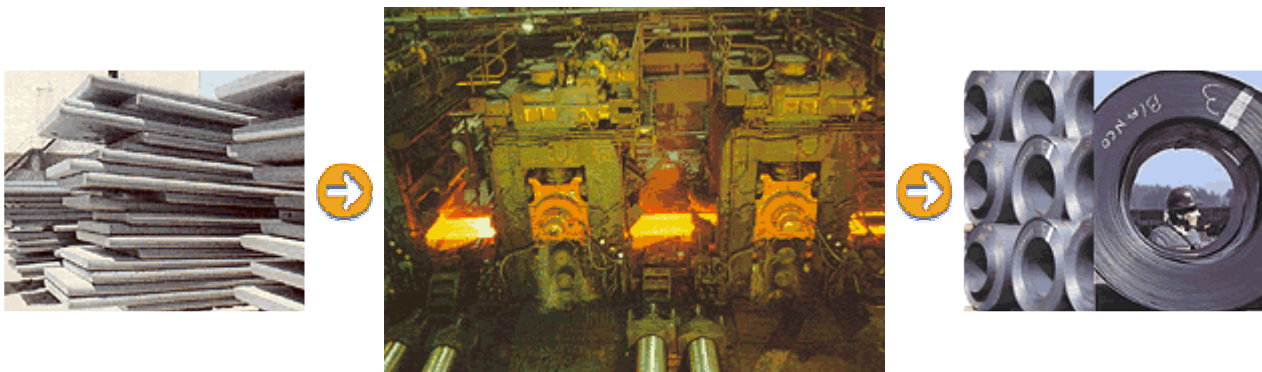


Laminador de Planos en Caliente

Los planchones que produce la Colada Continua son sometidos a laminación en caliente, con lo cual se reduce el espesor y aumenta su longitud.

El proceso comienza calentando el material en un horno con una capacidad de 150 toneladas/hora. Una vez alcanzada la temperatura requerida, los planchones son reducidos en su espesor, primero en un Laminador Trio, el que mediante pases sucesivos entrega un semilaminado de 25 mm (plancha gruesa), para pasar posteriormente al laminador continuo de seis marcos y obtener rollos de aproximadamente 8,5 toneladas de peso, cuyas dimensiones finales van de 725 a 1.050 mm de ancho por 1,8 a 12,0 mm de espesor.

Una parte de los productos obtenidos en este laminador, va directamente al mercado, tanto en forma de rollos o planchas, donde encuentra una gran aplicación en la industria, y la otra parte de rollos, continúa su proceso en el Laminador de Planos en Frío.

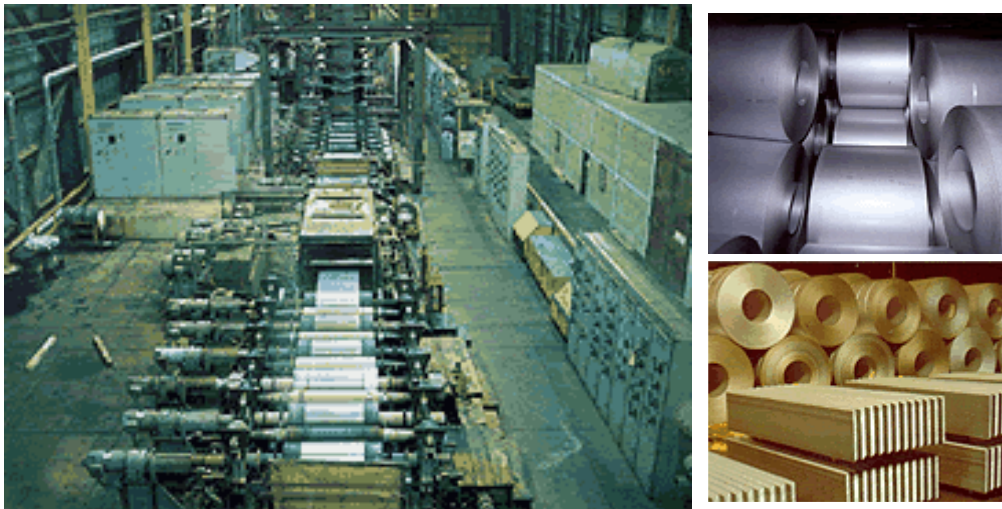


Laminador de Planos en Frío

A los rollos laminados en caliente, que se destinan a la fabricación de productos planos laminados en frío, se les somete al proceso de decapado para eliminar los óxidos y laminación en frío para disminuir el espesor. En esta etapa, una parte de los rollos son procesados en la línea Zinc-Alum, para obtener productos recubiertos con una aleación de Zinc y Aluminio, necesarios en la construcción.

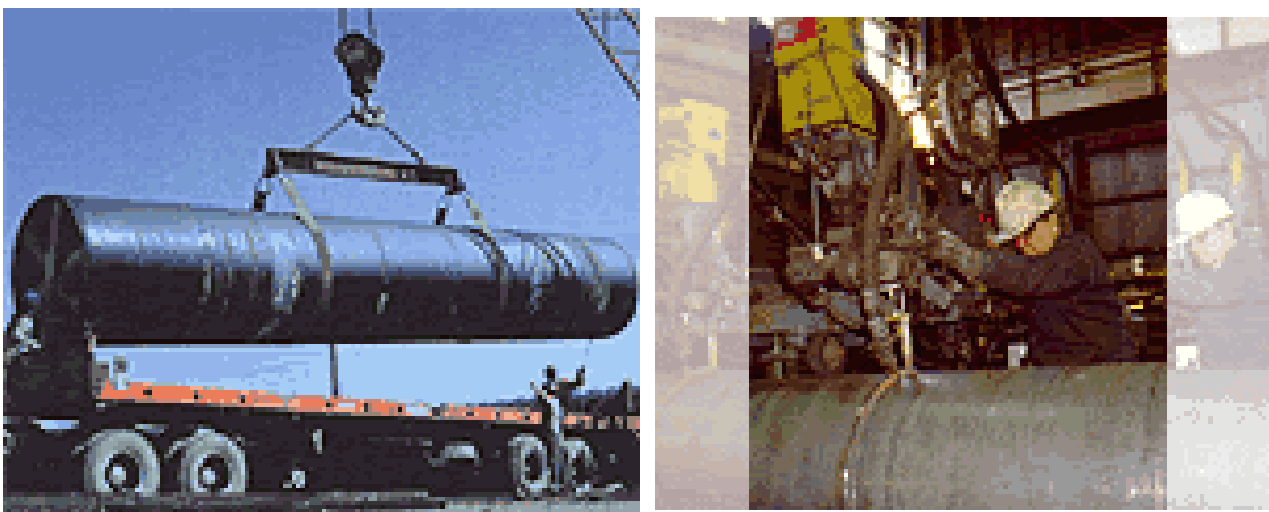
El resto de los rollos son sometidos a limpieza electrolítica para eliminar el aceite empleado en la laminación en frío; recocido en atmósfera protectora, que puede ser en Hornos o en línea de recocido continuo para eliminar la acritud dada por el trabajo mecánico realizado en frío, y laminador de temple para eliminar las líneas de fluencia, corregir la forma y dar la terminación superficial requerida.

Una fracción de los rollos templados que resultan se despacha a los clientes, como tales o cortados previamente en planchas, para ser usados en la industria metalmeccánica. Otra fracción de ellos es estañada en la línea de Estañado Electrolytico para obtener hojalata apta para la industria conservera.



Productos Tubulares

De la producción de planchas gruesas del laminado de Planos en Caliente, una parte se destina a la fabricación de tubos de gran diámetro, soldados por arco sumergido de 356 a 2.210 mm de diámetro.



ACERO Y STEEL FRAMING - Antecedentes del acero. Proceso de fabricación del acero. Antecedentes del Steel Framing. Características del Steel Framing. Detalles Constructivos y Diagramas.

ANTECEDENTES DEL ACERO

La historia de la tecnología comienza con el uso de las primeras herramientas de piedra en el desarrollo y evolución del hombre.

El siguiente gran paso en la evolución del hombre fue el uso y control del fuego, que se utilizó no solo para iluminar y generar calor sino que también sirvió para obtener utensilios de cerámica cocida de diversos usos. Uno de estos usos fue el desarrollo del moldeo de los primeros metales, inicialmente usado para la ornamentación.

Posteriormente, con el descubrimiento de la rueda y con el desarrollo de las técnicas de templeado de los metales y sus combinaciones (aleaciones), los hombres fueron capaces de producir bronce por lo que a partir del año 3000 a.C. el humanismo ingresa en lo que denominamos Era de Bronce, con progresos en la agricultura, herramientas y los primeros pasos en la metalurgia.

Hacia el año 1200 a.C. , y hasta el 600 a.C. aproximadamente, los Asirios con sus conocimientos de las armas y los metales (hierro) dominaron gran parte del mundo civilizado.

Durante la Edad Media, la utilización de los metales en los arados hizo posible acrecentar de manera sustancial gran cantidad de tierra cultivable. Este punto y el desarrollo de los medios de transporte generaron una gran transformación en el comercio y por consecuencia en las costumbres y hábitos de la civilización Europea. Un evento notable de la época fue la invención de la imprenta con moldes tipográficos metálicos.

La Civilización Industrial. Año 1760

El término "Revolución Industrial" describe la histórica transformación de las costumbres tradicionales, por las de la sociedad moderna, debido a la industrialización de la economía. El hecho más relevante de este período es el inmenso crecimiento de la producción per capita, posibilitado por el proceso de mecanización de las fábricas.

Con la Revolución Industrial (1760), los cambios tecnológicos se hicieron más veloces, llevando a pensadores, filósofos, artistas, diseñadores y científicos a generar cambios profundos en los aspectos culturales e intelectuales que complementaran esta evolución.

Inglaterra, que era rica en carbón y hierro, contaba con vías navegables, costas con puertos para el comercio, y por sobre todo, tenía condiciones sociales, religiosas y políticas abiertas a la evolución. Estas ventajas naturales explican por qué este proceso comenzó allí.

A mediados del siglo XIX se inicia lo que hoy llamamos "Arquitectura Moderna", como una consecuencia más de esta evolución.

Uno de los primeros edificios realizado en hierro y vidrio, fue el "Palacio de Cristal" (1850), erigido por el Arquitecto J. Paxton para una Exposición Internacional en Londres. Además de sus valores estéticos, la mayor virtud de este edificio radica en la clara expresión de sus características estructurales, basada en la utilización de dichos materiales.

A partir de la disponibilidad de materiales como el hierro, el vidrio y el acero, la construcción dejó de estar limitada a la mampostería de piedra y de ladrillos, y a la madera.

Dos edificios ejecutados en 1889, para la Feria Internacional de París, manifestaron este cambio de manera contundente. Estos fueron: "El Hall de la Maquinaria", obra del Arquitecto Dutert, con luces libres entre apoyos de 117 mts., y la "Torre Eiffel", obra del Arquitecto Eiffel, de 300 mts. de altura.

Del otro lado del Océano Atlántico, E.E.U.U. colonizado por Británicos en su mayoría, tenía también características adecuadas para el desarrollo de la Industrialización. Posteriormente dichas características convertirían a E.E.U.U en el líder de los cambios tecnológicos en la construcción.

Hacia el año 1871, la ciudad de Chicago contaba con una población de 300.000 habitantes, y era el centro de comercio más importante de los E.E.U.U. En Octubre de ese año un incendio destruyó la ciudad. Para la reconstrucción de la ciudad, los diseñadores libres de las restricciones de altura antes vigentes y contando con nuevas tecnologías (ascensor, acero, etc.), construyeron los primeros rascacielos. Así nació lo que actualmente se conoce como la "Escuela de Chicago".

La construcción del primer rascacielos ejecutado con Metal Frame fue el de la "Home Insurance Company" de Chicago (1885), de 10 pisos de altura, debido al Arquitecto e Ingeniero William Le Barón Jenney, formado profesionalmente en Massachusetts (E.E.U.U.) y en París (Francia).

El Arquitecto W. Jenney, además de diseñar edificios comerciales y de oficinas, tuvo otro rol muy importante que fue la formación de los arquitectos que trabajaron con él y que luego integraron la famosa "Escuela de Chicago". Entre ellos se destacaron Burnham, Holabird, Root, Roche, y Louis Sullivan. Este último, un gran Arquitecto, fue además, el maestro del Arquitecto Frank Lloyd Wright, quien fuera el más célebre profesional de su época en E.E.U.U.

Con relación al uso del acero en obras de infraestructura, podemos decir que el "Puente de Brooklyn" (1869), diseñado por John Roebling, fue el primer puente colgante de los E.E.U.U. En él se utilizaron tensores formados por cables de acero paralelos, metodología que aún se sigue utilizando frecuentemente en la actualidad. Este puente une los barrios de Brooklyn y Manhattan por sobre el East River, y consta de seis carriles para la circulación de vehículos sobre una luz de 486 mts.

A comienzos del siglo XX, continuando con la evolución tecnológica, cultural y artística, surgen en Europa distintas tendencias como el Art Nouveau, La Bauhaus (1920) y el Art Deco (1930).

Este último movimiento, tiene como exponentes en los E.E.U.U. a dos edificios notables construídos con Acero: el "Empire State Building" (1931) y el "Chrysler Building" (1930), construidos ambos en la ciudad de Nueva York.

En la Argentina, los edificios construidos sobre la Avenida de Mayo a principios de siglo, y las terminales del Ferrocarril de Retiro y Constitución, son claras evidencias de la presencia del Acero en la construcción de nuestro país.

El Hormigón Armado, concebido en 1880 por los ingenieros Monier y Coignet, fue otro de los cambios tecnológicos relevantes la evolución tecnológica de la construcción. Fue utilizado por primera vez en 1902 para la construcción de un edificio de Departamentos de renta en París, Francia. El Ingeniero Garnier y el Arquitecto Perret, autores de dicho edificio, fueron quienes comenzaron a utilizar el H^o A^o.

Si bien es cierto que la utilización de materiales ligantes como el cemento data de la época de los Egipcios y los Romanos, la invención del Cemento Portland, tal como lo conocemos en nuestros tiempos, se le atribuye a Joseph Aspdin en 1824.

La historia y la evolución tecnológica de la construcción están afectadas por varios aspectos:

- Durabilidad de los materiales: adobe, piedra y madera fueron los precursores, evolucionando en ladrillo, hormigón armado, metales y plásticos.
- Ductilidad de los materiales: el constante desarrollo de métodos constructivos y nuevas tecnologías, permite un mayor rendimiento de los materiales para la construcción de edificios más complejos (luces libres entre apoyos, alturas, etc.).
- Confort y Ahorro de Energía: las nuevas técnicas y materiales permiten ejercer el control de la temperatura, la acústica y el funcionamiento general de los edificios modernos.
- Ecología y Medio Ambiente: aunque reciente, es un aspecto muy importante en la evolución tecnológica y el desarrollo de los materiales.

El aumento del consumo de Acero a lo largo del siglo XX es un fiel reflejo de la evolución en la utilización de nuevas tecnologías y materiales. Desde 1900 a 1999 el consumo aumentó de 28 millones de toneladas anuales a 780 millones de toneladas anuales. Esto determina un crecimiento promedio de 3,4 % anual a lo largo de 100 años. Así como decimos que este fue el siglo del Acero, si tomamos en cuenta la evolución del Acero hacia el Acero Liviano Galvanizado y otras aleaciones, bien podríamos decir que el siglo XXI será el siglo del "Acero Inteligente".

PROCESO DE FABRICACION DEL ACERO

El acero galvanizado es un material compuesto por una chapa de acero laminada en frío o caliente, que recibe en ambas caras una capa de cinc fundido prácticamente puro, que al solidificar se une al acero base formando un material altamente resistente a la corrosión y fácilmente transformable. Para comprender con mayor profundidad las propiedades del acero galvanizado, nos referiremos a continuación al proceso de fabricación del acero en general y luego al proceso de galvanizado en sí.

La fabricación del acero mediante proceso siderúrgico integrado parte del mineral de hierro, el carbón de coque y el sinter que conforman la carga del Alto Horno. En él se lleva a cabo el proceso de reducción de los óxidos naturales del hierro, transformándose los minerales en arrabio, que se utiliza en estado líquido para la producción de Acero. La producción actual del Acero en la Argentina es de 2.000.000 tn/año, estando este proceso certificado bajo la norma ISO 9002.

El Arrabio líquido así obtenido es colado en el convertidor LD y los hornos cuchara, para luego ser transportado a la estación de ajuste químico y de temperatura. El Acero líquido se vierte en la máquina de colada continua que cuenta con un sistema de molde de ancho variable, permitiendo la transformación en desbastes.

Los desbastes son cargados en los hornos de recalentamiento continuo del Laminador en Caliente, donde se elevará su temperatura hasta la requerida para el proceso de laminación. Cuando salen de los hornos, los desbastes pasan por el desescamador, los desbastadores y las series de cajas terminadoras que reducen su espesor hasta las dimensiones requeridas para la siguiente etapa del proceso, o las que sean solicitadas por el cliente. A la salida del Laminador en Caliente, aparece el primer producto comercializable: la Chapa Laminada en Caliente.

Las dimensiones de la Chapa Laminada en Caliente se encuentran en el rango de espesor 1.60-12.70 mm, y un ancho de 760 y 1500 mm., estando disponible en una amplia variedad de calidades de acuerdo a normas nacionales e internacionales.

Las calidades estándares están clasificadas de acuerdo a su uso final de la siguiente manera:

- Usos generales (calidad comercial)
- Calidad para uso embutido
- Calidad para usos en la industria automotriz
- Calidad para envases de gas licuado
- Calidad para usos estructurales generales
- Calidad para recipientes de presión
- Calidad para caños API

Este material es bobinado y enfriado para finalmente pasar por la Línea de Decapado. El proceso consiste en un baño de ácido clorhídrico a una temperatura que produce la eliminación de las impurezas de óxido. La Chapa Laminada en Caliente pasa luego por el Laminador en Frío, que mediante deformación plástica reduce el espesor de la chapa hasta en un 90%. El material así obtenido se vende como Chapa Laminada en Frío Cruda, o sigue un proceso de recocido y templado para ir al mercado como Chapa Laminada en Frío Recocida. El proceso de recocido sirve para eliminar las tensiones producidas en el proceso de laminación en frío.

Las dimensiones de la Chapa Laminada en Frío se encuentran en el rango de espesor 0.30 - 3.00 mm y un ancho de 600 - 1500 mm., estando disponible en una amplia variedad de calidades de acuerdo a normas nacionales e internacionales.

Las calidades estándar están clasificadas de acuerdo a su uso final de la siguiente manera:

- Calidad para usos generales (calidad comercial)
- Calidad para embutido moderado, profundo y extra profundo
- Calidad apta para esmaltado
- Calidades de alta resistencia con características especiales de conformabilidad
- Calidad para usos eléctricos
- Calidad con alta exigencia de planitud
- Calidad con buena condición de soldabilidad y expandido
- Calidad de alta dureza

Tanto la chapa laminada en frío como la laminada en caliente decapada, pueden ser galvanizadas en Planta. En la línea continua de galvanizado por inmersión la chapa es recubierta por una delgada capa de cinc que le otorga una gran resistencia a la corrosión. El material galvanizado es entregado en bobinas, hojas lisas y conformadas acanaladas, trapezoidales, bandejas y tejado metálico. También en la línea continua por inmersión en caliente se produce chapa "Cincaalum", recubierta por una aleación compuesta de un 55% de Aluminio, 1.6% de Silicio y el restante de Cinc.

Acero Galvanizado para el uso en el Steel Framing

El tipo de acero galvanizado para Steel Framing se encuentra especificado en la Norma IRAM-IAS U 500-205, en la cual se establece que el mismo deberá cumplir con los requisitos de la Norma IRAM-IAS U 500-214 (Norma de acero galvanizado de tipo estructural), posibilitando el uso de cualquiera de sus grados.

ANTECEDENTES DEL STEEL FRAMING

Para entender el concepto de Steel Framing, comenzaremos definiendo el término "Framing". "Frame" quiere decir conformar un Esqueleto estructural compuesto por elementos livianos diseñados para dar forma y soportar a un edificio. "Framing" es el proceso por el cual se unen y vinculan estos elementos.

Para definir los antecedentes históricos del Framing tenemos que remontarnos alrededor del año 1810, cuando en los E.E.U.U. comenzó la conquista del territorio, y hacia 1860, cuando la migración llegó hasta la costa del Océano Pacífico. En aquellos años la población se multiplicó por diez, y para solucionar la demanda de viviendas se recurrió a la utilización de los materiales disponibles en el lugar (madera), y a conceptos de practicidad, velocidad y productividad originados en la Revolución Industrial. La combinación de estos conceptos y materiales gestaron lo que hoy conocemos como Balloon Framing (1830).

El concepto básico del "Balloon Framing" es la utilización de Studs (Montantes) que tienen la altura total del edificio (generalmente dos plantas), con las vigas del entrepiso sujetas en forma lateral a los studs, quedando así, contenido dentro del volumen total del edificio. Esta forma constructiva evolucionó hacia lo que hoy se conoce como "Platform Framing", que se basa en el mismo concepto constructivo que el "Balloon Framing", con la diferencia que los studs tienen la altura de cada nivel o piso, y por lo tanto el entrepiso que los divide es pasante entre los montantes.

De esta manera, el entrepiso transmite sus cargas en forma axial, y no en forma excéntrica como en el caso del "Balloon Framing", resultando en studs con secciones menores. La menor altura de los studs del "Platform Framing" es otra ventaja de esta variante, ya que permite implementar el panelizado en un taller fuera de la obra dado que no hay limitaciones al transporte, obteniendo así una mejor calidad de ejecución y un mayor aprovechamiento de los recursos.

Los cambios en el concepto de fabricación, tienen aspectos tecnológicos muy relevantes:

- La optimización de la utilización de la Energía.
- La optimización de la fabricación de acero y su calidad.
- El crecimiento de la Industria de las Maquinarias y Herramientas
- El concepto de Producción en masa o en gran escala, la llamada línea de montaje o producción

La utilización del Steel Framing en los edificios comerciales es de larga data. En cambio, en el rubro "viviendas" solo después de la segunda Guerra Mundial se comenzaron a ver los primeros ejemplos. Actualmente dentro de la construcción de viviendas el acero se posiciona mejor que su competidor la madera, a raíz de los movimientos ecológicos, las fluctuaciones de su precio, y su calidad, que permite que el acero se consolide en el mercado de viviendas en forma creciente.

La tradición constructiva en la Argentina tiene sus raíces en sus Colonizadores. La inmigración que hubo fue mayormente de origen mediterráneo, donde la piedra, el adobe y la cerámica son los materiales característicos. La tradición constructiva de países como E.E.U.U., Japón, y China, con condiciones climáticas mas severas que las nuestras, siempre fue distinta. En general, ha estado orientada a materiales más livianos como la madera, sin que esto implique menor categoría o calidad de los edificios. Incluso en países con tradición tipo Mediterránea como la nuestra, la evolución de los sistemas y materiales esta dirigiéndose a los sistemas constructivos denominados livianos, ya que son objetivamente mas eficientes. En nuestro país, esta evolución comenzó en la década del 60, con ejemplos dirigidos a un mercado específico: el de muy bajos recursos. Esto originó que la población en general asociara equivocadamente el término "Prefabricación" o "Industrialización" con este tipo de construcción.

La definición de "Industrialización" o "Prefabricación" dista mucho de lo que la gente en general, tenía como concepto de ellas, pero el tiempo y la realidad han permitido que esto cambie rápidamente. Se está comprendiendo que evolución, prefabricación e industrialización, no son sinónimos de baja calidad, sino de parámetros necesarios de la era en que vivimos, y la construcción no es una excepción.

CARACTERISTICAS DEL STEEL FRAMING

Anteriormente, al definirse los conceptos de "Frame" y "Framing", se ha hecho referencia a las características principales que describen al Steel Framing como un sistema liviano y, a la vez, muy resistente.

Asimismo, otro aspecto particular del Steel Framing, que lo diferencia de otros sistemas constructivos tradicionales, es que está compuesto por una cantidad de elementos o "sub- sistemas" (estructurales, de aislaciones, de terminaciones exteriores e interiores, de instalaciones, etc.) funcionando en conjunto. Como ejemplo y para una fácil comprensión, podríamos compararlo con el funcionamiento del cuerpo humano, infiriendo las siguientes asociaciones:

- Los perfiles de acero galvanizado que conforman la estructura se corresponden con los huesos del cuerpo humano.
- Las fijaciones y flejes de la estructura del edificio se corresponden con las articulaciones y tendones.
- Los diafragmas de rigidización en el edificio se corresponden con los músculos.
- Las diferentes aislaciones, ventilaciones y terminaciones del edificio se corresponden con la piel y los mecanismos de respiración y transpiración.

Es decir que el conjunto de "sub- sistemas" y el modo en que los mismos están interrelacionados, es lo que hace posible el correcto funcionamiento del edificio en su totalidad como un macro sistema. Por ello, la elección y selección de materiales idóneos y recursos humanos, influirá en un mayor rendimiento de los mismos y en un correcto funcionamiento del edificio.

Estos conceptos llevan a una optimización de recursos de materiales, mano de obra y tiempos de ejecución y como consecuencia final la optimización de los costos.

Conceptos que definen el Steel Framing

- **Abierto:** Es abierto porque se puede combinar con otros materiales dentro de una misma estructura, o ser utilizado como único elemento estructural. En edificios en altura se utiliza para las subdivisiones interiores y para la estructura secundaria de revestimiento de fachadas. En edificios entre medianeras logra adaptarse perfectamente a las exigencias y situaciones existentes. En viviendas, y en otros edificios de menor altura, puede ser el único material estructural utilizado, haciendo de base a substratos en cubiertas y fachadas.

- **Flexible:** El proyectista puede diseñar sin restricciones, planificar etapas de ampliación o crecimiento, debido a que no tiene un modulo fijo sino uno recomendado de 0,40/ 0.60 mts. o menos. Admite cualquier tipo de terminaciones tanto exteriores como interiores.
- **Racionalizado:** Se lo considera racionalizado por sus características y procesos, ya que establecen la necesidad de pensar y trabajar con 3 decimales, lo cual hace mas precisa la documentación de obra, y del mismo modo, su ejecución. Una de sus cualidades más destacadas, es la precisión propia del material en su conformación, permitiendo un mejor control de calidad. En situaciones de trabajos de gran envergadura, la estandarización se hace notable y contribuye a la disminución y optimización de los recursos.
- **Confort y Ahorro de Energía:** El sistema permite pensar y ejecutar de una manera mas eficiente las aislaciones, las instalaciones y todos los ítems que redundan en un mayor confort de la construcción. El Steel Framing, es especialmente apto para cualquier tipo de clima y situación geográfica, sobre todo las extremas.
- **Optimización de Recursos:** Por ser un sistema liviano nos da la posibilidad de rapidez de ejecución incluyendo el panelizado, y posterior montaje. La ejecución de las instalaciones es realmente sencilla y muy eficiente. Estas características influyen en gran medida en el aprovechamiento de los materiales y de la mano de obra, ya que la planificación se hace más sencilla y precisa, pudiendo cumplir las metas fijadas en cuanto a los recursos económicos y de tiempo. Las reparaciones son muy simples y la detección de los problemas de pérdidas en cañerías de agua es inmediata.
- **Durabilidad:** El Steel Framing utiliza materiales inertes y nobles como el acero galvanizado, lo cual lo convierte objetivamente en extremadamente durable a través del tiempo.
- **Reciclaje:** La composición del acero producido en la actualidad incluye más de un 60% de acero reciclado, por lo que, desde un punto de vista ecológico, lo caracteriza como muy eficiente.

Conceptos que definen el Acero Galvanizado para Steel Framing

- El Acero es un material de los llamado "nobles", tiene una gran estabilidad dimensional.
- El Acero como material fue utilizado en la construcción con anterioridad que el Hormigón Armado, por lo cual es considerado "tradicional".
- El Acero Galvanizado Liviano es una evolución tecnológica de Acero Laminado y todo indica que en el siglo XXI esta evolución continuará. (por ejemplo, en los autos del 2000 se utiliza el 50% menos de acero que en 1960 y las piezas son un 30% mas livianas pero con mayor resistencia, debido justamente al empleo de acero galvanizado en las carrocerías.)
- El Acero Galvanizado en la Argentina, con recubrimiento estándar Z275, reúne las características aptas para un clima marítimo. Esto implica una mayor "barrera" o "defensa" a la corrosión por algún tipo de infiltración de la humedad.
- El Acero Galvanizado es un material no combustible con una gran resistencia al fuego. Protegido con los elementos inertes correspondientes este valor aumenta a niveles comparables a los de los materiales de los sistemas de construcción tradicional o sistemas húmedos.
- El Acero Galvanizado no es atacado por termitas ni otros animales otorgando, sin embargo, el espacio para albergar la aislación requerida.
- El Acero Galvanizado es 100% reciclable.

En el caso de las Estructuras de Acero Galvanizado hay tres temas fundamentales para tener en cuenta, dado que son la base de la protección de la estructura y del óptimo funcionamiento del Steel Framing como sistema integral. Estos temas son corrosión, fuego y puentes térmicos y los desarrollaremos a continuación.

ACEROS: Microestructuras de los aceros. Ferrita. Perlita. Cementita. Austenita. Martensita. Bainita. Troostita. Sorbita. Aceros al carbono. Aceros herramientas. Aceros aleados. Aceros inoxidables.

ACEROS AL CARBONO

Aceros de construcción

Aceros de bajo contenido de carbono

Tratamiento térmico de los aceros al carbono de construcción

Aceros al carbono para cementación

Aceros al carbono de alta maquinabilidad

El principal producto siderúrgico es el acero, siendo aproximadamente el 90% de la producción acero al carbono y el 10%, acero aleado. Por lo tanto, el material metálico más importante para la industria es el acero al carbono.

El acero al carbono es una aleación de composición química compleja. Además de hierro, cuyo contenido puede oscilar entre 97,0-99,5%-, hay en él muchos elementos cuya presencia se debe a los procesos de su producción (manganeso y silicio), a la dificultad de excluirlos totalmente del metal (azufre, fósforo, oxígeno, nitrógeno e hidrógeno) o a circunstancias casuales (cromo, níquel, cobre y otros).

El aumento del contenido de carbono en el acero eleva su resistencia a la tracción, incrementa el índice de fragilidad en frío y hace que disminuya la tenacidad y la ductilidad. Los aceros se clasifican teniendo en cuenta sus propiedades y utilización, en tres grandes grupos: aceros de construcción, aceros de herramientas y aceros inoxidables.

ACEROS DE CONSTRUCCIÓN

Son los aceros que se utilizan para la fabricación de piezas, órganos o elementos de maquinas, motores, instalaciones, carriles, vehículos, etc.

1. Aceros al carbono que se usan en bruto de laminación para construcciones metálicas y para piezas de maquinaria en general.
2. Aceros de baja aleación y alto límite elástico para grandes construcciones metálicas, puentes, torres etc.
3. Aceros de fácil mecanización en tornos automáticos.

Los aceros de construcción generalmente se emplean para la fabricación de piezas, órganos o elementos de maquinas y de construcción de instalaciones. En ellos son fundamentales ciertas propiedades de orden mecánico, como la resistencia a la tracción, tenacidad, resistencia a la fatiga y alargamiento.

Aceros ordinarios al carbono que se usan en bruto de forja o laminación

Se incluyen los aceros cuyas propiedades dependen principalmente del porcentaje de carbono que contienen. Se emplean en grandes cantidades para la construcción de estructuras metálicas de edificios, para elementos y piezas de maquinaria, motores, ferrocarriles, etc., y su contenido de carbono suele variar desde 0.03 a 0.70%. Además siempre contienen pequeñas cantidades de manganeso y silicio que se emplean como elementos auxiliares en los procesos de fabricación, fósforo y azufre que son impurezas perjudiciales que provienen de las materias primas (lingotes,

chatarra, combustibles y minerales).

En general los aceros ordinarios contienen: Mn < 0.90%, Si < 0.50%, P < 0.10%, S < 0.10%

De acuerdo con las propiedades mecánicas, se establecen una serie de grupos de aceros ordenados por su resistencia a la tracción.

Cuando se desean resistencias de 38 a 55 Kg/mm² se emplean aceros en bruto de forja o laminación. Para resistencias de 55 a 80 Kg/mm² se emplean unas veces los aceros al carbono en bruto de forja y laminación, y otras veces se emplean los aceros al carbono tratados (templados y revenidos), para resistencias superiores a 80 Kg/mm² se suelen emplear aceros tratados.

ACEROS DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO

Estos aceros contienen menos del 0.25% C, no adquieren dureza sensible con un temple.

Su resistencia media en estado normalizado varía de 35 a 53 Kg/mm² y los alargamientos de 33 a 23%. Teniendo en cuenta sus características, se suelen agrupar en tres clases:

Denominación Características aproximadas

R (Kg/mm²) A % Carbono % Semidulces, Dulces, Extradulces 5045 <40 2528>30 0.200.15<0.08

R: resistencia a la tracción A: alargamiento

Con estos aceros de 0.06 a 0.25% de carbono, se fabrican los puentes de ferrocarril, las grandes estructuras de las estaciones, las columnas metálicas de las líneas eléctricas, los cascos de los buques, las estructuras de las casas, las carrocerías de los automóviles, los tubos de las bicicletas, los clavos, los alfileres, las cerraduras de las puertas, los asientos de las clases y muchos objetos más que utilizamos diariamente. En la mayoría de los casos se utiliza el acero tal como viene de las acerías, sin darle ningún tratamiento térmico especial.

Aceros semiduros forjados o laminados para la construcción de piezas de maquinaria en general

Los aceros ordinarios de contenido en carbono comprendido entre 0.25 y 0.70% de C que se emplean en estado bruto de forja o laminación se suelen emplear para piezas de maquinaria en general.

Aceros de 0.30% de C. Ejes para vagones, ruedas, piezas de maquinaria, etc. (R=57 Kg/mm², A = 23%).

Aceros de 0.40% e C. Elementos de maquinas y motores, alambres para cables, ejes para locomotoras, etc. (R = 65 Kg/mm², A = 19%).

Aceros de 0.50% de C. Bandejas, alambres, flejes, herramientas agrícolas forjadas etc. (R = 74 Kg/mm², A=17%).

Aceros de 0.60% de C. Para fleje duro, alambre, herramientas para agricultura, etc. (R = 82 Kg/mm², A = 15%).

Influencia de elementos extraños en las características mecánicas de los aceros de bajo contenido en carbono

La presencia de fósforo y azufre, salvo en muy pocas ocasiones, es perjudicial para la calidad de los aceros, procurándose eliminar esos elementos en los procesos de fabricación. En general se recomienda que en los aceros ordinarios el contenido de cada uno de esos elementos no pase del 0.06%, y en los aceros de calidad se suele exigir porcentajes de fósforo y azufre inferiores a 0.03%.

El azufre cuando se presenta como sulfuro de hierro, provoca durante los procesos de forja o laminación del acero poca resistencia y a veces se agrieta por iniciarse la fusión de éste, que se encuentra en el acero en forma de redícula en la microestructura del acero. Por el contrario cuando aparece como sulfuro de manganeso, tiene una temperatura de fusión muy elevada, y no da paso a la fragilidad en caliente; en ambos casos el alargamiento y la resistencia del acero queda muy disminuido.

El fósforo se encuentra siempre disuelto en los granos de ferrita a los que comunica gran fragilidad.

TRATAMIENTOS TERMICOS DE LOS ACEROS AL CARBONO DE CONSTRUCCION

RECOCIDO: el objeto de este tratamiento es ablandar el acero, homogenizar su estructura y composición química y aumentar su ductilidad. Se presentan cuatro formas:

-Recocido de regeneración: Cuando después de la forja o laminación se desea mecanizar en las mejores condiciones posibles los aceros con porcentajes de carbono variables de 0.35 a 0.60%.

-Recocido de ablandamiento: En algunos casos en que interesa disminuir la dureza de los aceros al carbono.

-Recocidos contra acritud: Se emplea para aceros de bajo contenido en carbono (inferior a 0.30%) que han sufrido un fuerte trabajo en frío por laminado o estirado y en los que la dureza ha aumentado por deformación de los cristales, habiéndose disminuido al mismo tiempo la ductilidad y el alargamiento hasta límites tan bajos que no se puede seguir el proceso mecánico de transformación en frío porque se rompe el acero.

-Recocido globular: En algunos casos excepcionales en que se interesa que los aceros queden con estructuras globulares debe calentarse durante largo tiempo el acero a temperaturas entre 700° a 740°C y luego enfriar lentamente. De esta forma el material tiene una extraordinaria ductilidad.

NORMALIZADO: Este tratamiento consiste en calentar el acero a unos 50°C por encima de la temperatura crítica A_c y enfriarlo luego al aire. Su empleo es importante cuando la estructura cristalina del acero es gruesa por haber sufrido calentamientos a temperaturas muy elevadas, o porque el trabajo de forja ha sido insuficiente para destruir la estructura en bruto de colada o la estructura cristalina no es la correcta.

TEMPLE Y REVENIDO: Al dar a los aceros al carbono un temple y revenido se consiguen muy buenas características cuando el perfil es delgado. En un acero al carbono bien templado o revenido, el valor del límite elástico suele llegar a ser un 75% de la carga de rotura.

Cuando interesa fabricar piezas con resistencia de 38 a 55 Kg/mm² es, en general, muy poco ventajoso el tratamiento térmico (temple y revenido), ya que por tratarse de aceros de bajo contenido de carbono (0.15 a 0.30%). Cuando quieren fabricarse piezas con esas resistencias en general, conviene utilizar aceros en bruto de forja, laminados o normalizados. Sin embargo en casos excepcionales cuando se desea conseguir la mejor combinación de características (resistencia, alargamiento y alto límite elástico) se pueden temprar y revenir los aceros de 0.15 a 0.30% de C obteniéndose, resistencias variables de 38 a 55 Kg/mm², alargamientos y límites de elasticidad ligeramente superiores a los que corresponden al estado normalizado. Cuando se trata de piezas de gran espesor el tratamiento es casi inútil porque se presenta el problema de poca penetración de temple o templabilidad.

Los aceros al carbono templados y revenidos con porcentajes de carbono variables de 0.25 a 0.55%, se suelen emplear generalmente con resistencias comprendidas entre 55 y 90 Kg/mm² y, a veces, en casos excepcionales como el de fabricación de muelles, se usan hasta resistencias de 150 a 200 Kg/mm².

El empleo de los aceros al carbono templados y revenidos para la fabricación de piezas con esas resistencias tiene varias ventajas. Una muy importante es que el límite de elasticidad es más

elevado que en los aceros normalizados o recocidos, y otra que la combinación de características (resistencia y alargamiento) también se mejora.

En cambio si esa resistencia se consigue templando y reveniendo la pieza después de mecanizada, el trabajo de torno o fresa se podrá hacer previamente en estado recocido mucho más fácil.

En el caso de que por mecanizado haya que quitar material, preferible, como hemos dicho, mecanizar en estado de recocido y luego templar y revenir, dejando generalmente en el mecanizado un exceso de medidas para eliminar luego las deformaciones que se producen en el temple y revenido. Cuando la cantidad de material a eliminar por mecanizado es pequeña puede convenir templar y revenir el material y luego mecanizar las piezas pudiéndolas dejar así a las medidas definidas.

ACEROS AL CARBONO PARA CEMENTACION

Acero 1010: Acero muy tenaz, para piezas de pequeño tamaño y forma sencilla, en las cuales no sean necesarios altos valores de resistencia mecánica (bujes, pasadores, etc.). Se usa con temple directo en agua. En estado normalizado o como laminado sirve para piezas embutidas o estampadas en frío.

Acero 1015: Para construcciones mecánicas de baja resistencia. Tiene los mismos usos del 1010 pero se prefiere cuando se necesita un corazón más duro y tenaz.

Acero 1022: Para partes de vehículos y maquinaria que no sean sometidas a grandes esfuerzos mecánicos. Posee mejor resistencia en el núcleo que el 1015.

Aceros al carbono de temple y revenido

Acero 1020: Esta clase de acero puede ser empleado en piezas que no estén sometidas a fuertes esfuerzos mecánicos. Considerando la escasa penetración de temple que tiene, generalmente se usa en estado normalizado. Puede emplearse en estado templado y revenido para piezas de pequeño espesor. Puede ser cementado cuando se requieren en el núcleo propiedades mecanizadas más altas de las que pueden obtenerse con el tipo 1015 en cuyo caso se aplican las mismas normas de cementación que las especificadas para este acero.

Acero 1030: Acero para temple y revenido para los más amplios usos, tales como ejes, árboles y todas aquellas piezas que no estén sometidas a fuertes esfuerzos mecánicos. Como no tiene gran penetración de temple, este tipo de acero es aconsejable solamente para piezas templadas y revenidas de tamaño pequeño.

Acero 1040: La templabilidad de este acero es mejor que la de los dos anteriores; se usa para piezas de maquinas de pequeño y mediano espesor y sirve para piezas que deban ser templadas a inducción, o con soplete.

Acero 1045: Es un acero muy apropiado para piezas de pequeño tamaño que deban templarse a inducción, obteniéndose una dureza superficial de 54-56 Rc. Se emplea para herramientas forjadas de todo tipo, como: hachas, azadones, rastrillos, picas, martillos de varios usos, porras, etc.

Acero 1050: Gracias a la buena penetración de temple que tiene este acero, es apto para piezas de maquinas que deban soportar esfuerzos altos, longitudinales y transversales, pero sin impactos continuos. Para piezas de pequeño espesor es preferible el temple en aceite; para las piezas de mayor espesor y forma sencilla, en agua.

Acero 1055: Tiene más o menos los mismos usos del 1050. Sirve para fabricar pasadores que deban soportar esfuerzos muy elevados. En este caso se pueden templar las piezas por inducción. Se usan para herramientas agrícolas que deban tener más resistencias que las fabricadas con acero 1045.

Acero 1060: Como acero de construcción tiene los mismos usos que el 1055, pero para piezas que

deban tener una resistencia mecánica más elevada. Como acero de corte sirve para herramientas de trabajos plásticos, madera y materiales no ferrosos (latan, bronce, etc). Este acero tiene una buena penetración de temple, aun en piezas de tamaño medio y con temple en aceite. Con temple de inducción y con temple al soplete se pueden obtener buenos resultados en piezas de no muy alta resistencia mecánica que sean sometidos a desgaste. Este acero puede ser también usado para resortes.

Acero 1070: Como acero de construcción para todo tipo de piezas que requieran alta resistencia y que sean sometidas a fuertes esfuerzos mecánicos, por ejemplo: partes móviles de molinos y trituradoras y cuchillas para moler materiales blandos. Como acero para resortes sirve para fabricar este tipo de piezas con excelente calidad y con especialidad aquellas de tipo helicoidal. Como acero para herramientas para todas las piezas que requieran dureza, tenacidad y resistencia al desgaste.

NOTA: las temperaturas de revenido son: Como acero de construcción 560°C/640°C. Como acero de resortes 420°C/480°C. Como acero de herramientas 200°C/350°C

Acero 1095: Este es el acero al carbono de mayor resistencia, usado para la fabricación de resortes de todos los tipos y para todos los usos. A semejanza de los otros tipos con porcentajes de C más bajo, que puede ser también trefilado a través de tratamientos térmicos adecuados, puede emplearse también en frío para la construcción de resortes especiales.

Acero 1541(0.36-0.44% de C): Para partes que deban tener un limite de fluencia alto y fuerte resistencia al desgaste. Particularmente apto para forjar, por ejemplo: herramientas agrícolas y de mano. Se usa para fabricar tornillería de alta resistencia y es uno de los aceros más apropiados para la fabricación de grapas automotores.

ACEROS AL CARBONO DE ALTA MAQUINABILIDAD (RESULFURADOS)

Esta clase de aceros se usa en aquellos casos donde se desea una maquinabilidad mejor que la de los aceros al carbón. Se logran costos más bajos aumentando la producción con mayores velocidades de maquinado y mejor vida de la herramienta, o eliminando operaciones secundarias a través de una mejoría en la superficie terminada. La adición de azufre ocasiona algún sacrificio en las propiedades de soldabilidad, forja y conformación en frío.

SAE 1110 - 1111 - 1112 - 1113: Tienen excelentes características de maquinabilidad y buena resistencia estirados en frío. Estos aceros se pueden cianurar o carburar. La maquinabilidad aumenta en este grupo al aumentar el azufre, el cual se combina principalmente con el manganeso del acero y precipita como inclusiones de sulfuros, las cuales favorecen la maquinabilidad al proporcionar la formación de virutas pequeñas, y al suministrar un lubricante propio evita que las virutas se agarren a la herramienta y emboten el filo. Al disminuir esta adherencia, se necesita menos potencia, se mejora la superficie y la velocidad de maquinado se puede doblar en comparación de un acero no resulturado.

SAE 1108 - 1109 - 1116 - 1117 - 1118 - y 1119: Los aceros de este grupo se usan cuando se necesita una combinación de buena maquinabilidad y respuesta a tratamiento térmico. En variedades de bajo carbono se usan para partes pequeñas que deben cianurarse o carbonitrurarse.

SAE 1117 - 1118 y 1119: tienen más manganeso para mejor templabilidad, permitiendo temple en aceite después de la carburación.

SAE 1132 - 1137 - 1140 - 1141 - 1144 - 1145 - 1146 y 1151: Cada tipo tiene características comparables a los aceros al carbono del mismo nivel del carbón. Se usan para partes donde es necesario una gran cantidad de maquinado, o donde la presencia de roscas, estrías, u otra operación ofrece problemas especiales de herramental.

SAE 1132 -1137 - 1141 - 1144: de alto manganeso ofrecen mayor templabilidad y los tipos de alto

carbono son adecuados para temple en aceite, para temple por inducción o para temple con llama.

Otra clasificación del acero desde el punto de vista de su producción es: efervescente, calmado, semicalmado o tapado.

En los aceros efervescentes sólo se ha eliminado una pequeña parte del oxígeno mientras dura el proceso de solidificación, lo que deja una capa exterior o cerco relativamente libre de carbono, o sea que el centro del lingote tiene un mayor contenido de carbono que el exterior. Esta superficie con una porción de carbono extremadamente baja es muy dúctil, tiene excelentes cualidades de su superficie y muy buenas características para su conformado en frío. Los aceros calmados son lo opuesto a los efervescentes; a estos aceros se les ha extraído gran cantidad de oxígeno, de donde resulta un acero relativamente libre de carbono. Los aceros calmados son útiles cuando se necesitan técnicas severas de conformado, pero siempre requiere un tratamiento térmico al terminar la técnica de conformado de manufactura.

Los aceros semicalmados tienen una composición y propiedades mecánicas que varían entre las de los aceros efervescentes y los calmados. Los aceros tapados combinan las características de los aceros efervescentes y las de los semicalmados o sea, el cerco de carbono se forma en la superficie del acero, y el grueso de la sección transversal interior tiene las características del acero semicalmado.

ACEROS PARA HERRAMIENTAS

En este grupo se incluyen todos los aceros que normalmente se emplean para la fabricación de útiles o herramientas destinados a modificar la forma, tamaño y dimensiones de los materiales por cortadura, por presión o por arranque de viruta.

Los aceros de herramientas tienen generalmente un contenido en carbono superior a 0.30%, aunque a veces también se usan para la fabricación de ciertas herramientas, aceros de bajo contenido en carbono (0.1 a 0.30%).

Principales tipos de aceros de herramientas

-Aceros al carbono: para la fabricación de herramientas para los usos más diversos, se emplean aceros sin elementos de aleación con porcentajes de carbono variables de 0.50 a 1.40%. para herramientas que deban tener gran tenacidad como martillos y picas; se emplean medios contenidos en carbono 0.50 a 0.70%. para herramientas de corte como brocas, cuchillas, y limas; calidades intermedias de 0.70 a 1%. Para conseguir en cada caso la máxima dureza, deben ser templados en agua.

-Aceros rápidos: la característica fundamental de estos aceros es conservar su filo en caliente, pudiéndose trabajar con las herramientas casi a l rojo (600°) sin disminuir su rendimiento. Algunas composiciones típicas de los aceros rápidos son: C = 0.75%, W = 18%, Cr = 4% y V = 1% ; otra C = 0.75%, W = 18%, Co = 4% y V = 1.25%.

-Aceros indeformables: reciben este nombre los aceros que en el temple no sufren casi deformaciones y con frecuencia después del temple y revenido quedan con dimensiones prácticamente idénticas a las que tenían antes del tratamiento. Esto se consigue empleando principalmente el cromo y el manganeso como elementos de aleación. Estos aceros templan con un simple enfriamiento al aire o en aceite. Composiciones típicas: C = 2% y Cr = 12%; C = 1% y Cr = 5% y otra C = 1% y Mn = 1%.

-Aceros al corte no rápidos: se agrupan varios aceros aleados, principalmente con cromo y wolframio, muy empleados para la fabricación de herramientas de corte que no deben trabajar en condiciones muy forzadas. Pueden considerarse como unas calidades intermedias entre los aceros

rápidos y los aceros al carbono, y la mayoría de herramientas fabricadas con ellos suelen quedar con durezas comprendidas entre 60 y 66 Rockwell-C.

ACEROS ALEADOS

Clasificación de los aceros aleados

Nomenclatura AISI-SAE

Influencia de los elementos de aleación

Aceros aleados para cementación

Se da el nombre de aceros aleados a los aceros que además de los cinco elementos: carbono, silicio, manganeso, fósforo y azufre, contienen también cantidades relativamente importantes de otros elementos como el cromo, níquel, molibdeno, etc., que sirven para mejorar alguna de sus características fundamentales. También puede considerarse aceros aleados los que contienen alguno de los cuatro elementos diferentes del carbono que antes hemos citado, en mayor cantidad que los porcentajes que normalmente suelen contener los aceros al carbono, y cuyos límites superiores suelen ser generalmente los siguientes: Si=0.50%; Mn=0.90%; P=0.100% y S=0.100%.

Los elementos de aleación que más frecuentemente suelen utilizarse para la fabricación de aceros aleados son: níquel, manganeso, cromo, vanadio, wolframio, molibdeno, cobalto, silicio, cobre, titanio, circonio, plomo, Selenio, aluminio, boro y Niobio. La influencia que ejercen esos elementos es muy variada, y, empleados en proporciones convenientes, se obtienen aceros con ciertas características que, en cambio, no se pueden alcanzar con los aceros ordinarios al carbono.

Utilizando aceros aleados es posible fabricar piezas de gran espesor, con resistencias muy elevadas en el interior de las mismas. En elementos de máquinas y motores se llegan a alcanzar grandes durezas con gran tenacidad. Es posible fabricar mecanismos que mantengan elevadas resistencias, aún a altas temperaturas. Hay aceros inoxidables que sirven para fabricar elementos decorativos, piezas de maquinas y herramientas, que resisten perfectamente a la acción de los agentes corrosivos. Es posible preparar troqueles de formas muy complicadas que no se deformen ni agrieten en el temple, etc.

La tendencia que tienen ciertos elementos a disolverse en la ferrita o formar soluciones sólidas con el hierro alfa, y la tendencia que en cambio tienen otros a formar carburos.

la influencia de los elementos de aleación en los diagramas de equilibrio de los aceros (Elevación o descenso de las temperaturas críticas de los diagramas de equilibrio y las temperaturas Ac y Ar correspondientes a calentamientos y enfriamientos relativamente lentos, modificaciones en el contenido de carbono del acero eutectoide, Tendencia a ensanchar o disminuir los campos austeníticos o ferríticos correspondientes a los diagramas de equilibrio, y otras influencias también relacionadas con el diagrama hierro-carbono, como la tendencia a grafitizar el carbono, a modificar el tamaño del grano, etc.

La influencia de los elementos aleados sobre la templabilidad. La influencia que tienen en retardar el ablandamiento que se produce en el revenido.

Existen otras influencias diversas, como mejoras en la resistencia a la corrosión, resistencia al calor, resistencia a la abrasión, etc., las cuales se deben directa o indirectamente a alguna de las variaciones o fenómenos citados anteriormente.

Clasificación de los aceros aleados de acuerdo con su utilización

Aceros en los que tiene una gran importancia la templabilidad:

Aceros de gran resistencia

Aceros de cementación
Aceros de muelles
Aceros indeformables
Aceros de construcción:
Aceros de gran resistencia
Aceros de cementación
Aceros para muelles
Aceros de nitruración
Aceros resistentes al desgaste
Aceros para imanes
Aceros para chapa magnética
Aceros inoxidable y resistentes al calor
Aceros de herramientas:
Aceros rápidos
Aceros de corte no rápidos
Aceros indeformables
Aceros resistentes al desgaste
Aceros para trabajos de choque
Aceros inoxidable y resistentes al calor.

En esta tabla se señalan los aceros aleados de uso más corriente clasificados en tres grupos. Se señalan los dos grupos clásicos de aceros de construcción y de herramientas, y además otro grupo en el que se destaca la importancia de la templabilidad, y en el que se incluyen los aceros de gran resistencia, muelles cementación, etc., que aun perteneciendo a los otros dos grupos, interesa destacar por separado por la gran importancia que en ellos tiene la templabilidad.

NOMENCLATURA DE LOS ACEROS SISTEMA S.A.E - A.I.S.I

Como la microestructura del acero determina la mayoría de sus propiedades y aquella está determinada por el tratamiento y la composición química; uno de los sistemas más generalizados en la nomenclatura de los aceros es el que está basado en su composición química.

En el sistema S.A.E. - A.I.S.I, los aceros se clasifican con cuatro dígitos XXXX. Los primeros dos números se refieren a los dos elementos de aleación más importantes y los dos o tres últimos dígitos dan la cantidad de carbono presente en la aleación. Un acero 1040 AISI es un acero con 0.4%C; un acero 4340 AISI, es un acero aleado que contiene 0.4%C, el 43 indica la presencia de otros elementos aleantes.

Las convenciones para el primer dígito son:

1 – MANGANESO

2 – NIQUEL

3 - NIQUEL-CROMO, principal aleante el cromo

4 – MOLIBDENO

5 – CROMO

6 - CROMO-VANADIO, principal aleante el cromo

8 - NIQUEL-CROMO-MOLIBDENO, principal aleante el molibdeno

9 - NIQUEL-CROMO-MOLIBDENO, principal aleante el níquel.

No hay aceros numerados 7xxx porque estos aceros resistentes al calor prácticamente no se fabrican.

Se observa entonces que si el primer número es 1 se sabe que es un acero al carbono; si el dígito siguiente es el 0, o sea que la designación es 10xx, se trata de un acero ordinario al carbono.

INFLUENCIA DE LOS ELEMENTOS DE ALEACIÓN EN LAS PROPIEDADES DE LOS ACEROS

Níquel

Una de las ventajas más grandes que reporta el empleo del níquel, es evitar el crecimiento del grano en los tratamientos térmicos, lo que sirve para producir en ellos gran tenacidad. El níquel además hace descender los puntos críticos y por ello los tratamientos pueden hacerse a temperaturas ligeramente más bajas que la que corresponde a los aceros ordinarios. Experimentalmente se observa que con los aceros aleados con níquel se obtiene para una misma dureza, un límite de elasticidad ligeramente más elevado y mayores alargamientos y resistencias que con los aceros al carbono o de baja aleación. En la actualidad se ha restringido mucho su empleo, pero sigue siendo un elemento de aleación indiscutible para los aceros de construcción empleados en la fabricación de piezas para máquinas y motores de gran responsabilidad, se destacan sobre todo en los aceros cromo-níquel y cromo-níquel-molibdeno.

El níquel es un elemento de extraordinaria importancia en la fabricación de aceros inoxidables y resistentes a altas temperaturas, en los que además de cromo se emplean porcentajes de níquel variables de 8 a 20%.

Los aceros al níquel más utilizados son los siguientes:

a) Aceros al níquel con 2, 3 y 5%. Con 0.10 a 0.25% de carbono se utilizan para cementación, y con 0.25 a 0.40% de carbono para piezas de gran resistencia.

b) Aceros cromo-níquel-molibdeno con porcentajes de níquel variables desde 1 a 5%; con bajos porcentajes de carbono (0.10 a 0.22%) se emplean para cementación y con porcentajes de 0.25 a 0.40% de carbono se emplean para piezas de gran resistencia. En estos aceros los porcentajes de estos elementos aleados suelen estar en relación aproximada de 1% de cromo y 3% de níquel.

c) Aceros de media aleación níquel-molibdeno y níquel-manganeso. Se suelen emplear para piezas de gran resistencia y para piezas cementadas con porcentajes de carbono variables de 0.25 a 0.40% en el primer caso y de 0.10 a 0.25% en el segundo, variando el contenido en níquel de 1 a 2%, el de manganeso de 1 a 1.5% y el molibdeno de 0.15 a 0.40%.

d) Aceros inoxidables y resistentes al calor cromo-níqueles, con 8 a 25% de níquel que son de estructura austenítica.

e) Otros aceros de menor importancia son los aceros cromo-níqueles para estampación en caliente

y para herramientas.

Cromo

Es uno de los elementos especiales más empleados para la fabricación de aceros aleados, usándose indistintamente en los aceros de construcción, en los de herramientas, en los inoxidable y los de resistencia en caliente. Se emplea en cantidades diversas desde 0.30 a 30, según los casos y sirve para aumentar la dureza y la resistencia a la tracción de los aceros, mejora la templabilidad, impide las deformaciones en el temple, aumenta la resistencia al desgaste, la inoxidable, etc.

Los aceros con cromo de mayor utilidad son:

- a) Aceros de construcción, de gran resistencia mecánica de 0.50 a 1.50% de cromo y 0.30 a 0.45% de carbono, aleados según los casos, con níquel y molibdeno para piezas de gran espesor, con resistencias variables de 70 a 150 Kg/mm².
- b) Aceros de cementación con 0.50 a 1.50% de cromo y 0.10 a 0.25% de carbono, aleados con níquel y molibdeno.
- c) Aceros de nitruración cromo-aluminio-molibdeno.
- d) Aceros para muelles cromo-vanadio y cromo-silicio.
- e) Aceros de herramientas con 0.30 a 1.50% de cromo y 0.070 a 1.50% de carbono. En ellos el cromo mejora la penetración de temple, la resistencia al desgaste, permite el temple en aceite y evita deformaciones y grietas.
- f) Aceros indeformables con 5 a 12% de cromo.
- g) Aceros rápidos y de trabajos en caliente.
- h) Aceros inoxidable martensíticos con 12 y 17% de cromo, aceros austeníticos con 14 a 25% de cromo en cantidades de níquel variables de 8 a 25% y aceros inoxidable con 27% de cromo.

El cromo se disuelve en la ferrita y muestra una fuerte tendencia a formar carburos de cromo y carburos complejos.

Molibdeno

Mejora notablemente la resistencia a la tracción, la templabilidad y la resistencia al creep de los aceros. Añadiendo solo pequeñas cantidades de molibdeno a los aceros cromo-níquel, se disminuye o elimina casi completamente la fragilidad Krupp, que se presenta cuando estos aceros son revenidos en la zona de 450° a 550°.

El molibdeno aumenta también la resistencia de los aceros en caliente y reemplaza al wolframio en la fabricación de los aceros rápidos, pudiéndose emplear para las mismas aplicaciones aproximadamente una parte de molibdeno por cada dos de wolframio.

El molibdeno se disuelve en la ferrita, pero tiene una fuerte tendencia a formar carburos. Es un potente estabilizador de los carburos complejos y tiende a retarde el ablandamiento de los aceros, durante el revenido.

Los aceros de molibdeno más utilizados son:

- a) Aceros de manganeso-molibdeno, cromo-molibdeno y cromo-níquel-molibdeno de bajo contenido de carbono para cementación, y de 0.15 a 0.40% de carbono para piezas de gran resistencia.

b) Aceros rápidos con 6 a 10% de molibdeno; son de utilización relativamente parecida a los aceros rápidos al wolframio, pero en ellos el wolframio es sustituido por el molibdeno.

c) Aceros de 0.50 a 6% de molibdeno que se emplean principalmente para construcciones metálicas, tuberías e instalaciones en refinerías de petróleo, en las que llegan a calentarse de 100° a 300° y deben resistir bien el efecto de esos calentamientos relativamente moderados.

Wolframio (tungsteno)

Es un elemento muy utilizado para la fabricación de aceros de herramientas, empleándose en especial en los aceros rápidos, aceros para herramientas de corte y aceros para trabajos en caliente. Sirve para mantener la dureza de los aceros a elevada temperatura y evitan que se desafilan o ablanden las herramientas, aunque lleguen a calentarse a 500° o 600°. También se usa para la fabricación de aceros para imanes.

El wolframio se disuelve ligeramente en la ferrita y tiene una gran tendencia a formar carburos. Los carburos de wolframio tienen gran estabilidad.

Los aceros más utilizados de wolframio son:

a) Los aceros rápidos con 18% de wolframio y cantidades variables de cromo, vanadio y molibdeno y 0.701% aproximadamente de carbono.

b) Aceros para trabajos en caliente con 9 a 15% de wolframio y 0.30 a 0.40% de carbono. Para algunos usos de menos responsabilidad se emplean aceros de más baja aleación con 1 a 5% de wolframio.

c) Aceros para la fabricación de herramientas varias con n1 a 14% de wolframio y otros elementos: cromo, manganeso, vanadio, etc., que se emplean para trabajos de corte.

d) Aceros inoxidables cromo-níqueles con wolframio, de gran resistencia mecánica a elevada temperatura.

Vanadio

Se emplea principalmente para la fabricación de aceros de herramientas, tiende a afinar el grano y a disminuir la templabilidad. Es un elemento desoxidante muy fuerte y tiene una gran tendencia a formar carburos.

El vanadio tiene una gran tendencia muy fuerte a formar carburos, por esta razón, basta con añadir pequeñas cantidades, y pocos aceros, excepto los de herramientas, contienen más de 0.02% de vanadio. Una característica de los aceros con vanadio, es su gran resistencia al ablandamiento por revenido.

Los aceros con vanadio más utilizados son:

a) Aceros rápidos que suelen contener de 0.50 a 1% de vanadio.

b) Aceros de herramientas de diversas clases. Para troqueles indeformables, etc., que suelen tener de 0.10 a 0.30% de vanadio.

c) Aceros para muelles cromo-vanadio.

Manganeso

Aparece prácticamente en todos los aceros, debido, principalmente, a que se añade como elemento de adición para neutralizar la perniciosa influencia del azufre y del oxígeno, que siempre suelen contener los aceros cuando se encuentran en estado líquido en los hornos durante los procesos de fabricación. El manganeso actúa también como desoxidante y evita, en parte, que en

la solidificación del acero que se desprendan gases que den lugar a porosidades perjudiciales en el material.

Si los aceros no tuvieran manganeso, no se podrían laminar ni forjar, porque el azufre que suele encontrarse en mayor o menor cantidad en los aceros, formarían sulfuros de hierro, que son cuerpos de muy bajo punto de fusión (981° aprox.) que a las temperaturas de trabajo en caliente (forja o laminación) funden, y al encontrarse contorneando los granos de acero crean zonas de debilidad y las piezas y barras se abren en esas operaciones de transformación.

Los aceros ordinarios y los aceros aleados en los que el manganeso no es elemento fundamental, suelen contener generalmente porcentajes de manganeso variables de 0.30 a 0.80%.

Los aceros al manganeso de uso más frecuente son:

a) Aceros al manganeso de gran resistencia, que generalmente pertenecen al grupo de aceros de media aleación, en los que al emplearse el manganeso en cantidades variables de 0.80 a 1.60%, con contenidos en carbono de 0.30 a 0.050%, se consigue mejorar la templabilidad y obtener excelentes combinaciones de características mecánicas aun en piezas de cierto espesor.

b) Aceros indeformables al manganeso con 1 a 3% de Mn y 1% de carbono, aproximadamente, en los que la presencia de un alto porcentaje de manganeso, hace posible el temple con simple enfriamiento en aceite, o el aire, con lo que las deformaciones de las herramientas son muy pequeñas.

c) Aceros austeníticos al manganeso con 12% de Mn y 1% de carbono, aproximadamente, que a la temperatura ambiente son austeníticos y tienen gran resistencia al desgaste, empleándose principalmente, para cruzamientos de vías, mordazas de maquinas trituradoras, excavadoras, etc.

Silicio

Este elemento aparece en todos los aceros, lo mismo que el manganeso, porque se añade intencionadamente durante el proceso de fabricación. Se emplea como elemento desoxidante complementario del manganeso con objeto de evitar que aparezcan en el acero los poros y otros defectos internos. Los aceros pueden tener porcentajes variables de 0.20 a 0.34% de Si.

Se emplean aceros de 1 a 4.5% de Si y bajo porcentaje de carbono para la fabricación de chapas magnéticas, ya que esos aceros, en presencia de campos magnéticos variables, dan lugar solo a pérdidas magnéticas muy pequeñas, debido a que el silicio aumenta mucho su resistividad.

Mejora ligeramente la templabilidad y la resistencia de los aceros a disminuir la tenacidad, y en ciertos casos mejora también su resistencia a la oxidación.

Cobalto

Se emplea casi exclusivamente en los aceros rápidos de más alta calidad. Este elemento al ser incorporado en los aceros, se combina con la ferrita, aumentando su dureza y su resistencia. Es uno de los pocos elementos aleados que mueva el punto eutectoide hacia la derecha y reduce la templabilidad de los aceros.

El cobalto se suele emplear en los aceros rápidos al wolframio de máxima calidad en porcentajes variables de 3 a 10%.

Aluminio

Se emplea como elemento de aleación en los aceros de nitruración, que suele tener 1% aproximadamente de aluminio. Como desoxidante se suele emplear frecuentemente en la fabricación de muchos aceros. Todos los aceros aleados en calidad contienen aluminio en

porcentajes pequeñísimos, variables generalmente desde 0.001 a 0.008%.

Titanio

Se suele añadir pequeñas cantidades de titanio a algunos aceros muy especiales para desoxidar y afinar el grano. El titanio tiene gran tendencia a formar carburos y a combinarse con el nitrógeno. En los aceros inoxidable cromo-níquel, actúa como estabilizador de los carburos y evita la corrosión intercrystalina.

Cobre

El cobre se suele emplear para mejorar la resistencia a la corrosión de ciertos aceros de 0.15 a 0.30% de carbono, que se usan para grandes construcciones metálicas. Se suele emplear contenidos en cobre variables de 0.40 a 0.50%.

Boro

Se ha visto que en cantidades pequeñísimas de boro del orden de 0.0001 a 0.0006%, mejoran notablemente la templabilidad, siendo en este aspecto el más efectivo de los elementos aleados y el de mayor poder templante de todos.

ACEROS ALEADOS PARA CEMENTACION

15Cr3

- Para partes de construcción de tamaño pequeño.
- Puede subsistir los aceros al Cr, Ni, Mo, cuando no se requieren grandes características de tenacidad en el núcleo.
- Es aconsejable seguir un recocido de estabilización a las piezas, antes de realizar la cementación, con el fin de prevenir deformaciones durante el temple.
- Se recomienda el doble temple.

16MnCr5

- Para partes de alta resistencia al desgaste y expuestas a esfuerzos elevado. Por ejemplo: ruedas dentadas, ruedas para cadenas, etc.
- El doble temple es aconsejable.

3415

- Para partes de maquinas que exijan una superficie muy dura y un núcleo de alta tenacidad, como por ejemplo ruedas dentadas en engranajes de alto rendimiento, eje de levas, etc.
- En este tipo de acero se aconseja el recocido de estabilización antes de la cementación. El doble temple es aconsejable para piezas complicadas y para los casos en que la profundidad de cementación sea mayor de 1 mm.
- Las piezas sencillas pueden templarse directamente desde el horno de cementación.

4320

- Este tipo de acero se emplea para piezas cementadas de medio y gran espesor.
- Combina una gran dureza superficial a un corazón muy tenaz y durante el temple se deforma muy poco.

-Es aconsejable dar un recocido de estabilización antes de ejecutar la cementación.

-También es aconsejable el doble temple.

8620

-Ofrece muy buena dureza superficial y buenas propiedades del corazón.

-Tiene aceptable profundidad de temple, ausencia de zonas no duras en la parte cementada y baja distorsión.

.-Usos: Ejes ranurados, pasadores de pistón, bujes, piñones para cajas y transmisión de automotores, etc.

-Es aconsejable un recocido de estabilización antes de efectuar la cementación.

-Se aconseja el segundo temple de dureza desde 810/840°C.

4130

-Es un acero con buena penetración de temple y con buenas características de estabilidad hasta temperaturas de más o menos 400°C.

-Tiene una elevada resistencia al deslizamiento en caliente y no presenta fragilidad de revenido.

-Para piezas que necesitan una dureza superior se debe usar 4140 o 4150.

4140

-Es un acero de buena penetración de temple y con buenas características de estabilidad en caliente hasta 400°C.

-Sin fragilidad de revenido, muy versátil y apto para esfuerzos de fatiga y torsión.

-Piezas templadas a inducción pueden dar una dureza de 57-69 Rockwell C.

-Tiene amplia aplicación en construcción de vehículos por ejemplo para cigüeñales, brazos de ejes, bielas, pernos, ejes de contramarcha, ejes de bombas y engranajes.

-Muy utilizado en piezas forjadas como herramientas, llaves de mano, destornilladores, etc.

-Se usa también para espárragos y tornillos den la construcción de plantas que trabajen a temperatura entre 150°C y 300°C, como calderas, turbinas de vapor, plantas químicas, etc.

4150

-Sirve para los mismos usos del 4140 cuando se requieren durezas superiores.

-Piezas templadas a inducción de 4150 pueden dar una dureza superficial de 60-62 HRC.

4340

-Tiene los mismos usos del 9840 y es usado cuando se requiere una dureza superior y mejor resistencia al impacto.

-Piezas templadas a inducción de 4340 pueden dar una dureza superficial de 60-62 Rockwell C.

-Sirve para tornillos prisioneros de bloques motores, ejes traseros de transmisión, mandriles porta-herramientas, ejes y excéntricas para cizallas, ejes de transmisión de grandes dimensiones, etc.

5135

- Para piezas de buena tenacidad y que no requieran una profundidad de temple muy alta.
- Se usa en partes para vehículos, tractores, pasadores, tornillos y tuercas de alta resistencia.

5160

- Este acero esta especialmente indicado para la construcción de resortes para automóviles y camiones, sea en ballestas, sea para resortes helicoidales y también para barras de torsión.

6150

- Se usa este acero para la construcción de resortes de muy alta resistencia, resortes helicoidales y barras de torsión para automóviles.

9260

- Este es el tipo de acero más usado y más económico entre los aceros aleados para la construcción de resortes, particularmente para automóviles y camiones.
- Se templea muy fácilmente y tiene buena penetración de temple.
- Puede también usarse para la construcción de herramientas para maquinas agrícolas y otros implementos de la misma índole.

9840

- Este acero tiene una buena penetración de temple y buena tenacidad.
- Se puede usar en construcción de piezas de tamaño medio que estén sometidas a esfuerzos de torsión.
- Por su contenido en Mo no esta expuesto a la fragilidad de revenido.

ACEROS INOXIDABLES

Clasificación de los aceros inoxidables

Aceros inoxidables martensíticos

Aceros inoxidables ferríticos

Aceros inoxidables austeníticos

Usos de los aceros inoxidables

Los Aceros Inoxidablees son una gama de aleaciones que contienen un mínimo de 11% de Cromo. El Cromo forma en la superficie del acero una película pasivante, extremadamente delgada, continua y estable. Esta película deja la superficie inerte a las reacciones químicas. Esta es la característica principal de resistencia a la corrosión de los aceros inoxidablees. \

El extenso rango de propiedades y características secundarias, presentes en los aceros inoxidablees hacen de ellos un grupo de aceros muy versátiles.

La selección de los aceros inoxidablees puede realizarse de acuerdo con sus características:

Resistencia a la corrosión y a la oxidación a temperaturas elevadas.

Propiedades mecánicas del acero.

Características de los procesos de transformación a que será sometido.

Costo total (reposición y mantenimiento)

Disponibilidad del acero.

Los aceros inoxidable tienen una resistencia a la corrosión natural que se forma automáticamente, es decir no se adiciona. Tienen una gran resistencia mecánica, de al menos dos veces la del acero al carbono, son resistentes a temperaturas elevadas y a temperaturas criogénicas. Son fáciles de transformar en gran variedad de productos y tiene una apariencia estética, que puede variarse sometiendo el acero a diferentes tratamientos superficiales para obtener acabado a espejo, satinado, coloreado, texturizado, etc.

CLASIFICACION DE LOS ACEROS INOXIDABLES

Los aceros inoxidable no son indestructibles, sin embargo con una selección cuidadosa, sometiéndolos a procesos de transformación adecuados y realizando una limpieza periódica, algún integrante de la familia de los aceros inoxidable resistirá las condiciones corrosivas y de servicio más severas.

Serie 400 - Aceros Inoxidable Martensíticos

Son la primera rama de los aceros inoxidable, llamados simplemente al Cromo y fueron los primeros desarrollados industrialmente (aplicados en cuchillería). Tienen un contenido de Carbono relativamente alto de 0.2 a 1.2% y de Cromo de 12 a 18%. Los tipos más comunes son el AISI 410, 420 y 431 Las propiedades básicas son: Elevada dureza (se puede incrementar por tratamiento térmico) y gran facilidad de maquinado, resistencia a la corrosión moderada. Principales aplicaciones: Ejes, flechas, instrumental quirúrgico y cuchillería.

Serie 400 - Aceros Inoxidable Ferríticos

También se consideran simplemente al Cromo, su contenido varía de 12 a 18%, pero el contenido de Carbono es bajo <0.2%. Los tipos más comunes son el AISI 430, 409 y 434 Las propiedades básicas son: Buena resistencia a la corrosión. La dureza no es muy alta y no pueden incrementarla por tratamiento térmico. Principales aplicaciones: Equipo y utensilios domésticos y en aplicaciones arquitectónicas y decorativas.

Serie 300 - Aceros Inoxidable Austeníticos

Son los más utilizados por su amplia variedad de propiedades, se obtienen agregando Níquel a la aleación, por lo que la estructura cristalina del material se transforma en austenita y de aquí adquieren el nombre. El contenido de Cromo varía de 16 a 28%, el de Níquel de 3.5 a 22% y el de Molibdeno 1.5 a 6%. Los tipos más comunes son el AISI 304, 304L, 316, 316L, 310 y 317. Las propiedades básicas son: Excelente resistencia a la corrosión, excelente factor de higiene - limpieza, fáciles de transformar, excelente soldabilidad, no se endurecen por tratamiento térmico, se pueden utilizar tanto a temperaturas criogénicas como a elevadas temperaturas. Principales aplicaciones: Utensilios y equipo para uso doméstico, hospitalario y en la industria alimenticia, tanques, tuberías, etc.

ALGUNOS USOS DE LOS ACEROS INOXIDABLES

Los aceros inoxidable ofrecen resistencia a la corrosión, una adecuada relación resistencia mecánica - peso, propiedades higiénicas, resistencia a temperaturas elevadas y criogénicas y valor a largo plazo. Son totalmente reciclables y amigables con el medio ambiente.

Los aceros inoxidable son ampliamente utilizados en varios sectores, desde la más sofisticada aplicación industrial hasta los utensilios domésticos. Contribuyen, de manera indirecta, a satisfacer

las necesidades humanas básicas tales como alimentación, salud, construcción, medio ambiente, transporte y energía.

Algunos ejemplos de productos fabricados con aceros inoxidable son los equipos de procesos químicos y petroquímicos, equipos de proceso de alimentos y bebidas, equipos farmacéuticos, cámaras de combustión, sistemas de escape y filtros automotrices, vagones de ferrocarril, aplicaciones arquitectónicas y estructurales, mobiliario urbano, paneles de aislamiento térmico, intercambiadores de calor, tanques y recipientes, barriles de cerveza, instrumentos quirúrgicos, agujas hipodérmicas, monedas, tarjas, ollas y sartenes, cubiertos, lavadoras, lavavajillas y utensilios de cocina.

En la industria química y petroquímica, los aceros inoxidable ofrecen elevada resistencia a la corrosión y excelentes propiedades mecánicas así como un bajo costo de mantenimiento. En la industria de alimentos y bebidas y en la industria farmacéutica, proveen excelentes condiciones de higiene además de su resistencia a la corrosión y duración a largo plazo.

ALEACIONES HIERRO - CARBONO

ferrita perlita cementita austenita martensita bainita troostita sorbita

No se conoce con exactitud la fecha en que se descubrió la técnica de fundir mineral de hierro para producir el metal para ser utilizado. Los primeros utensilios de hierro descubiertos por los arqueólogos en Egipto datan del año 3.000 a.c., y se sabe que antes de esa época se empleaban adornos de hierro; los griegos ya conocían hacia el 1.000 a.c, la técnica de cierta complejidad para endurecer armas de hierro mediante tratamiento térmico.

Las aleaciones producidas por los primeros artesanos del hierro (y, de hecho, todas las aleaciones de hierro fabricadas hasta el siglo XIV d.c.) se clasifican en la actualidad como hierro forjado. Para producir esas aleaciones se calentaba una masa de mineral de hierro y carbón vegetal en un horno o forja con tiro forzado. Ese tratamiento reducía el mineral a una masa esponjosa de hierro metálico lleno de una escoria formada por impurezas metálicas y cenizas de carbón vegetal. Esta esponja de hierro se retiraba mientras permanecía incandescente y se golpeaba con pesados martillos para expulsar la escoria y dejar el hierro. El hierro producido en esas condiciones solía contener un 3% de partículas de escoria y un 0,1% de otras impurezas.

En ocasiones esta técnica de fabricación producía accidentalmente auténtico acero en lugar de hierro forjado. Los artesanos del hierro aprendieron a fabricar acero calentando hierro forjado y carbón vegetal en recipientes de arcilla durante varios días, con lo que el hierro absorbía suficiente carbono para convertirse en acero.

Después del siglo XIV se aumentó el tamaño de los hornos utilizados para la fundición y se incrementó el tiro para forzar el paso de los gases de combustión por la carga o mezcla de materias primas. En estos hornos de mayor tamaño el mineral de hierro de la parte superior del horno se reducía a hierro metálico y a continuación absorbía más carbono como resultado de los gases que lo atravesaban. El producto de estos hornos era el llamado arrabio, una aleación que funde a una temperatura menor que el acero o el hierro forjado. El arrabio se refinaba después para fabricar acero.

La producción moderna de arrabio emplea altos hornos que son modelos perfeccionados de los usados antiguamente. El proceso de refinado del arrabio para la producción de acero mediante chorros de aire se debe al inventor británico Henry Bessemer, que en 1855 desarrolló el horno o convertidor que lleva su nombre. Desde la década de 1960 funcionan varios minihornos que emplean electricidad para producir acero a partir de chatarra.

Las aleaciones de hierro y carbono -aceros y fundiciones- son las aleaciones metálicas más importantes de la civilización actual. Por su volumen, la producción de fundición y de acero supera en más de diez veces la producción de todos los demás metales juntos.

Corrientemente se da el nombre de acero y fundición, a las aleaciones hierro - carbono (si tienen más del 2% de C son fundiciones y si tienen menos del 2% de C son aceros).

El hierro forma soluciones con muchos elementos: con los metales, soluciones por sustitución, con el carbono, nitrógeno e hidrógeno, soluciones por inserción.

La solubilidad del carbono en el hierro depende de la forma cristalográfica en que se encuentra el hierro. La solubilidad del carbono en el hierro (cúbica de cuerpo centrado) es menor que el 0,02% y en el hierro (cúbica de caras centradas) es hasta el 2%.

Se distinguen tres grupos de aceros al carbono: eutectoides, que contienen cerca de un 0,8% de C, cuya estructura está constituida únicamente por perlita; Hipoeutectoides, que contienen menos del 0,8% de C, con estructura formada por ferrita y perlita; e Hipereutectoides, que contienen del 0,8 al 2% de C y cuya estructura consta de perlita y cementita.

MICROESTRUCTURAS DE LOS ACEROS

Los constituyentes metálicos que pueden presentarse en los aceros al carbono son: ferrita, cementita, perlita, sorbita, troostita, martensita, bainita, y rara vez austenita, aunque nunca como único constituyente. También pueden estar presentes constituyentes no metálicos como óxidos, silicatos, sulfuros y aluminatos.

El análisis de las microestructuras de los aceros al carbono recocidos y fundiciones blancas deben realizarse en base al diagrama metaestable Hierro-carburo de hierro o Cementita.

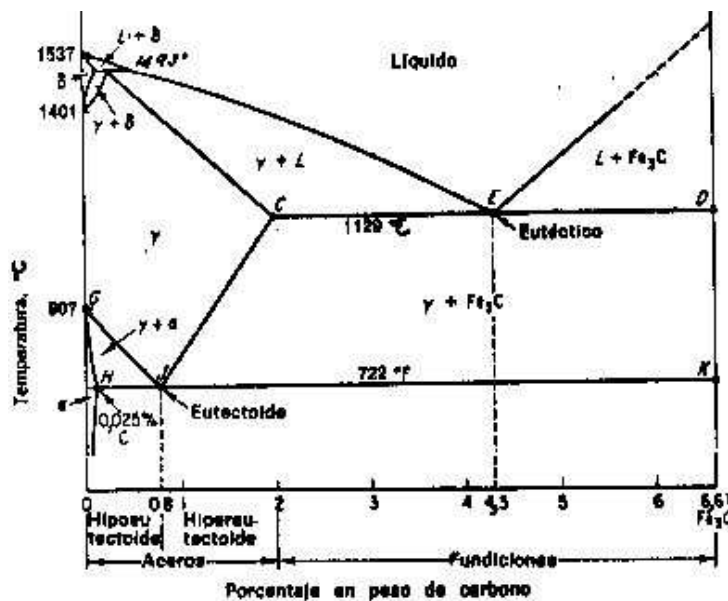
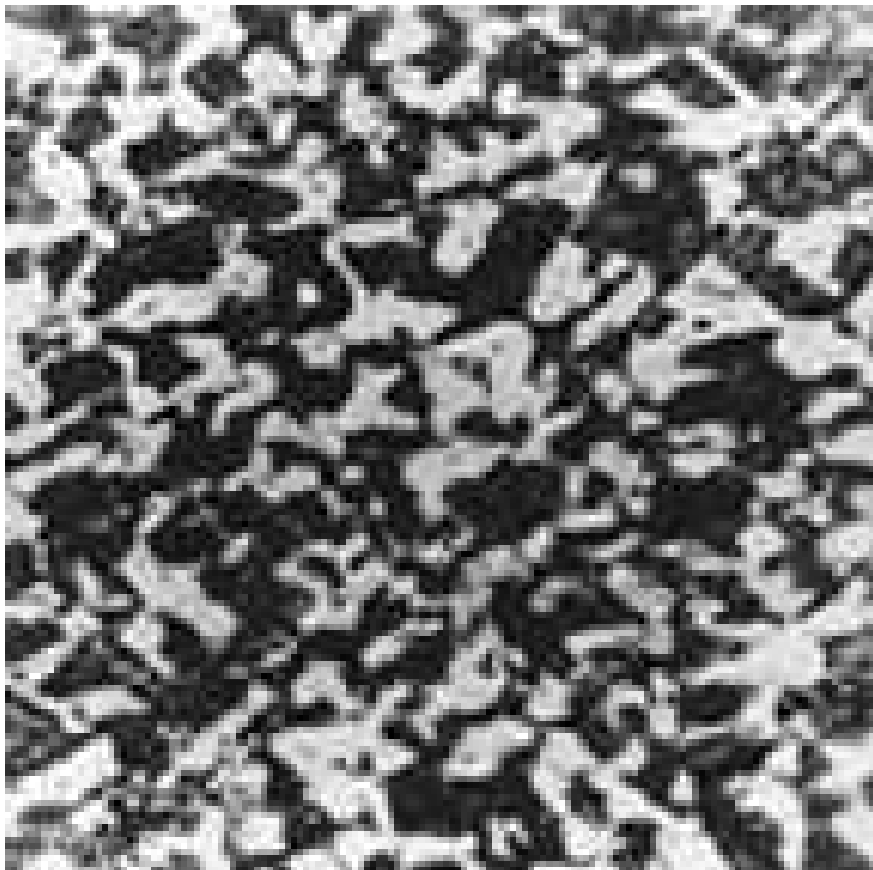


Diagrama Fe-C

Las microestructuras que presenta el diagrama de equilibrio para los aceros al carbono son:

FERRITA

Es una solución sólida de carbono en hierro alfa, su solubilidad a la temperatura ambiente es del orden de 0.008% de carbono, por esto se considera como hierro puro, la máxima solubilidad de carbono en el hierro alfa es de 0,02% a 723 °C.



Microestructura del acero al carbono, cristales blancos de ferrita

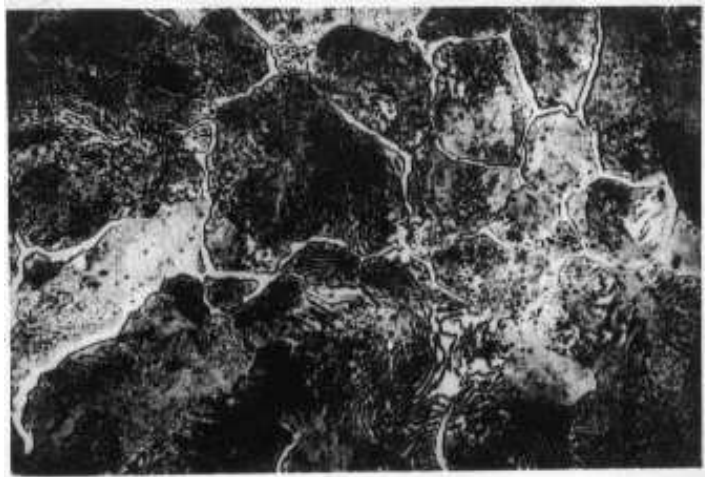
La ferrita es la fase más blanda y dúctil de los aceros, cristaliza en la red cúbica centrada en el cuerpo, tiene una dureza de 90 Brinell y una resistencia a la tracción de 28 kg/mm², llegando hasta un alargamiento del 40%. La ferrita se observa al microscopio como granos poligonales claros.

En los aceros, la ferrita puede aparecer como cristales mezclados con los de perlita, en los aceros de menos de 0.6%C, figura 6; formando una red o malla que limita los granos de perlita, en los aceros de 0.6 a 0.85%C en forma de agujas o bandas circulares orientados en la dirección de los planos cristalográficos de la austenita como en los aceros en bruto de colada o en aceros que han sido sobrecalentados. Este tipo de estructura se denomina Widmanstätten.

La ferrita también aparece como elemento eutectoide de la perlita formando láminas paralelas separadas por otras láminas de cementita, en la estructura globular de los aceros de herramientas aparece formando la matriz que rodea los glóbulos de cementita, figura 9, en los aceros hipoeutectoides templados, puede aparecer mezclada con la martensita cuando el temple no ha sido bien efectuado.

CEMENTITA

Es el carburo de hierro de fórmula Fe₃C, contiene 6.67 %C y 93.33 % de hierro, es el microconstituyente más duro y frágil de los aceros al carbono, alcanzando una dureza Brinell de 700 (68 Rc) y cristaliza en la red ortorrómbica.

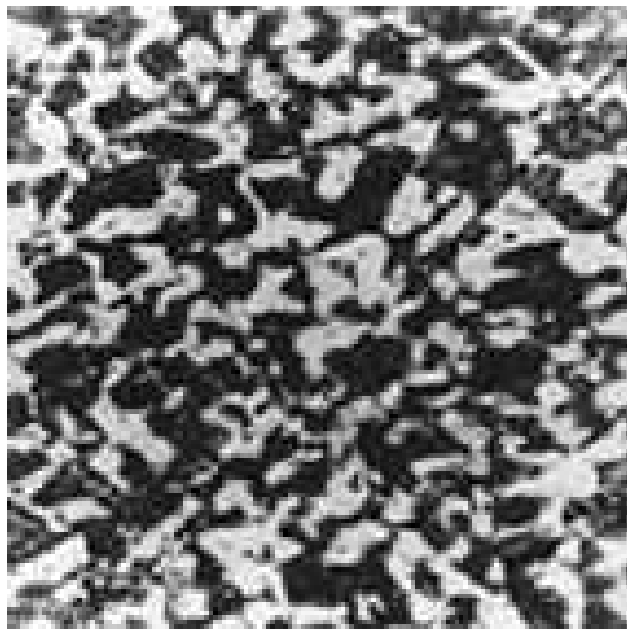


Microestructura del acero 1%C, red blanca de cementita

En las probetas atacadas con ácidos se observa de un blanco brillante y aparece como cementita primaria o proeutéctica en los aceros con más de 0.9%C formando una red que envuelve los granos de perlita, formando parte de la perlita como láminas paralelas separadas por otras láminas de ferrita, se presenta en forma de glóbulos o granos dispersos en una matriz de ferrita, cuando los aceros de alto carbono se han sometido a un recocido de globulización, en los aceros hipoeutectoides que no han sido bien templados.

PERLITA

Es el microconstituyente eutectoide formado por capas alternadas de ferrita y cementita, compuesta por el 88 % de ferrita y 12 % de cementita, contiene el 0.8 %C. Tiene una dureza de 250 Brinell, resistencia a la tracción de 80 kg/mm² y un alargamiento del 15%; el nombre de perlita se debe a las irisaciones que adquiere al iluminarla, parecidas a las perlas. La perlita aparece en general en el enfriamiento lento de la austenita y por la transformación isotérmica de la austenita en el rango de 650 a 723°C.



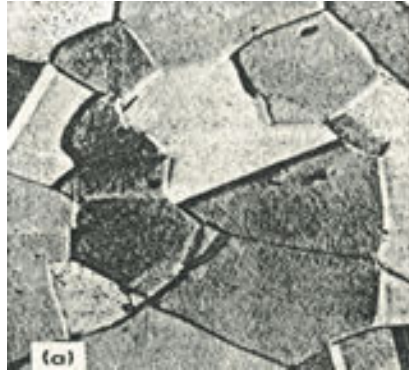
Microestructura del acero al carbono, cristales oscuros de perlita

Si el enfriamiento es rápido (100-200°C/seg.), la estructura es poco definida y se denomina Sorbita, si la perlita laminar se somete a un recocido a temperatura próxima a 723°C, la cementita adopta la forma de glóbulos incrustados en la masa de ferrita, denominándose perlita globular.

AUSTENITA

Es el constituyente más denso de los aceros y está formado por una solución sólida por inserción de carbono en hierro gamma. La cantidad de carbono disuelto, varía de 0.8 al 2 % C que es la máxima solubilidad a la temperatura de 1130 °C. La austenita no es estable a la temperatura ambiente pero existen algunos aceros al cromo-níquel denominados austeníticos cuya estructura es austenita a temperatura ambiente.

La austenita está formada por cristales cúbicos centrados en las caras, con una dureza de 300 Brinell, una resistencia a la tracción de 100 kg/mm² y un alargamiento del 30 %, no es magnética.



Microestructura de la austenita

La austenita no puede atacarse con nital, se disuelve con agua regia en glicerina apareciendo como granos poligonales frecuentemente maclados, puede aparecer junto con la martensita en los aceros templados.

MARTENSITA

Es el constituyente de los aceros templados, está conformado por una solución sólida sobresaturada de carbono o carburo de hierro en ferrita y se obtiene por enfriamiento rápido de los aceros desde su estado austenítico a altas temperaturas.

El contenido de carbono suele variar desde muy poco carbono hasta el 1% de carbono, sus propiedades físicas varían con su contenido en carbono hasta un máximo de 0.7 %C.



Microestructura de la martensita

La martensita tiene una dureza de 50 a 68 Rc, resistencia a la tracción de 170 a 250 kg/mm² y un alargamiento del 0.5 al 2.5 %, muy frágil y presenta un aspecto acicular formando grupos en zigzag con ángulos de 60 grados.

Los aceros templados suelen quedar demasiado duros y frágiles, inconveniente que se corrige por medio del revenido que consiste en calentar el acero a una temperatura inferior a la crítica inferior (727°C), dependiendo de la dureza que se desee obtener, enfriándolo luego al aire o en cualquier medio.

TROOSTITA

Es un agregado muy fino de cementita y ferrita, se produce por un enfriamiento de la austenita con una velocidad de enfriamiento ligeramente inferior a la crítica de temple o por transformación isotérmica de la austenita en el rango de temperatura de 500 a 600C, o por revenido a 400C.

Sus propiedades físicas son intermedias entre la martensita y la sorbita, tiene una dureza de 400 a 500 Brinell, una resistencia a la tracción de 140 a 175 kg/mm² y un alargamiento del 5 al 10%. Es un constituyente nodular oscuro con estructura radial apreciable a unos 1000X y aparece generalmente acompañando a la martensita y a la austenita.

SORBITA

Es también un agregado fino de cementita y ferrita. Se obtiene por enfriamiento de la austenita con una velocidad de enfriamiento bastante inferior a la crítica de temple o por transformación isotérmica de la austenita en la zona de 600 a 650C, o por revenido a la temperatura de 600C. Su dureza es de 250 a 400 Brinell, su resistencia a la tracción es de 88 a 140 kg/mm², con un alargamiento del 10 al 20%.

Con pocos aumentos aparece en forma muy difusa como manchas, pero con 1000X toma la forma de nódulos blancos muy finos sobre fondo oscuro, de hecho tanto la troostita como la sorbita pueden considerarse como perlita de grano muy fino.

BAINITA

Es el constituyente que se obtiene en la transformación isotérmica de la austenita cuando la temperatura del baño de enfriamiento es de 250 a 500°C. Se diferencian dos tipos de estructuras: la bainita superior de aspecto arborescente formada a 500-580°C, compuesta por una matriz ferrítica conteniendo carburos. Bainita inferior, formada a 250-400C tiene un aspecto acicular similar a la martensita y constituida por agujas alargadas de ferrita que contienen delgadas placas de carburos.

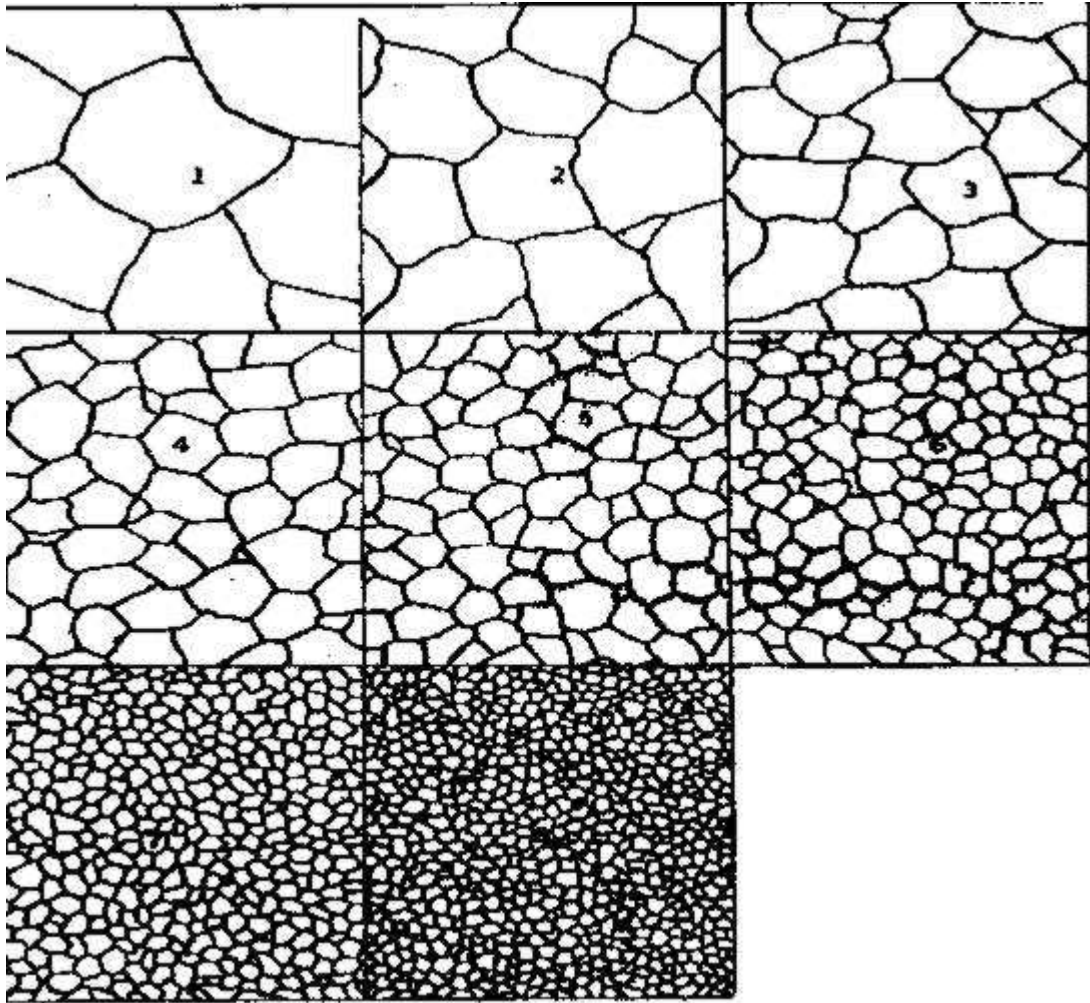
La bainita tiene una dureza variable de 40 a 60 Rc comprendida entre las correspondientes a la perlita y a la martensita.

Los constituyentes que pueden presentarse en los aceros aleados son los mismos de los aceros al carbono, aunque la austenita puede ser único constituyente y además pueden aparecer otros carburos simples y dobles o complejos.

La determinación del tamaño de grano austenítico o ferrítico, puede hacerse por la norma ASTM o por comparación de la microfotografías de la probeta a 100X, con las retículas patrón numeradas desde el 1 para el grano más grueso hasta el 8 para el grano más fino.

En el sistema ASTM el grosor del grano austenítico se indica con un número convencional n, de acuerdo con la fórmula: $\log G = (n-1) \log 2$.

Donde G es el número de granos por pulgada cuadrada sobre una imagen obtenida a 100 aumentos; este método se aplica a metales que han recristalizado completamente, n es el número de tamaño de grano de uno a ocho.



Forma, tamaño y distribución de los cristales o granos en la microestructura del acero para comparación a 100X