

## Aceros y Fundiciones

1 - Introducción

2 – Plantas industriales

3 – Características fundamentales

4 – Tecnología de elaboración

5 - Aceros estructurales

6 - Aceros de construcción mecánica

7 - Aceros inoxidables

8 - Aceros para herramientas

9 - Fundiciones

## 1 - Introducción

En este tratado se presentan principalmente aspectos relevantes de los aceros en el campo de la tecnología. A través de la historia de la humanidad, este material ha incidido constructivamente en el avance de las sociedades, pero también ha posibilitado el desarrollo bélico con sus conocidas consecuencias. Todo contribuye al constante y creciente campo tecnológico.

Básicamente acero es el nombre de una aleación de hierro que contiene carbono para lograr alta dureza y alta resistencia mecánica.

Se sabe que 1000 A. C., en el cercano y medio oriente, después de forjar el hierro con martillos, los artesanos endurecían la superficie de sus herramientas y armas calentándolas en carbón de leña al rojo vivo. Lo que lograban era una capa superficial de acero, dado que el hierro absorbía el carbón de las brasas.

200 A. C., los hindúes dominaban la fabricación de aceros por la técnica de forja.

Entre fines de siglo XIX y principios del siglo XX, se produjeron hechos importantes en tecnología de aceros, tales como la aplicación de procesos por convertidores de oxígeno (Bessemer 1856, UK), en solera abierta (Siemens 1864, Alemania), por horno eléctrico (Hérault 1902, Francia).

El avance de la química, de la metalurgia física, de la construcción de maquinaria industrial requerida por los modernos procesos de elaboración, de la tecnología instrumental y electrónica, tanto en el campo de trabajo de altas y bajas temperaturas, ha posibilitado la producción de grandes tonelajes de aceros de alta calidad, en sus diversas variantes.

Si bien en la actualidad las características microestructurales fundamentales de los aceros se pueden resolver por medio de un microscopio óptico, dado que se logra un poder de resolución de 0.5 micrones (el ojo humano tiene un poder de resolución de 0.1 mm), para el estudio de precipitados y defectos de cristales se debe recurrir al empleo del microscopio electrónico, donde la resolución es mayor (cercano al nanómetro). Esta herramienta, en sus diferentes versiones, se encuentra disponible en cualquier laboratorio que trabaja en alta tecnología, de manera que su aplicación resulta indispensable.

### Avances científicos y tecnológicos del siglo XX y XXI

En general, las armas fueron las impulsoras del desarrollo tecnológico. El hombre, tanto para defenderse como para conquistar, tuvo que fabricar armas con características de contundencia progresiva.

Las conquistas de Alejandro el Magno (334-323 a. C.), la formación del imperio romano de occidente (280 a. C. a 470 d. C.), el imperio romano de oriente (imperio bizantino) que sobrevivió hasta que en 1453, Constantinopla fue conquistada por los turcos otomanos, las cruzadas (1096 a 1396 d. C.), la guerra de los Cien Años entre Francia e Inglaterra (1337-1453), las conquistas europeas que incluyen el descubrimiento del nuevo mundo en 1492, las guerras napoleónicas del siglo XIX que incluyen las invasiones inglesas al Río de La Plata, la guerra de secesión de EEUU (1861-65), las grandes guerras mundiales del siglo XX, la situación de Irak con la ocupación de EE. UU. desde 1996, son ejemplos del desarrollo de la humanidad, donde cuesta encontrar mil años de paz.

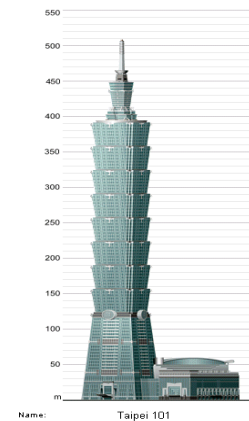
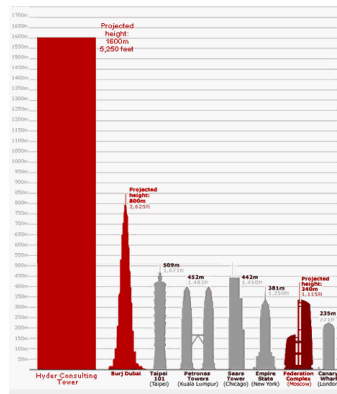
Sin duda, el belicismo fue la forma de vida que prevaleció en la humanidad y por ende se debió perfeccionar la tecnología armamentista. El rol del acero resultó fundamental en los hechos. La conquista del Este de Europa por los alemanes, requirió de blindados de acero. La reconquista por parte de los rusos, también se realizó con blindados. EE. UU., que cuenta con el ejército más poderoso de la actualidad, por ejemplo tiene el portaaviones Ronald Reagan, que es la nave de guerra más grande del mundo. Desplazan más de 100.000 toneladas y su eslora es de 330 metros. En la actualidad estos navíos disponen de reactores nucleares para la impulsión.

Desde el punto de vista de las actividades civiles, se sabe que la torres gemelas de New York, tenían alrededor de 200000 tn de acero entre ambas. Con 508 metros de altura, el edificio Taipei 101 inaugurado en el año 2004, es el más alto del mundo. Entre acero, cemento y vidrios porta alrededor de 700.000 toneladas de material. Por lo tanto es uno de los más pesados del planeta (Figura 2.3).

Existen buques mercantes que desplazan más de 500000 tn y el casco es de acero de chapa naval. Así hay innumerables ejemplos de estructuras y superestructuras, en cuya construcción se destaca el acero como material básico. El hecho de producir en el planeta alrededor de 1200 millones de toneladas por

año de acero en sus diferentes versiones, requiere del conocimiento de sus propiedades y aplicaciones, prácticamente por todos los estratos de la sociedad.

Mile High Tower	
<b>General information</b>	
<b>Location</b>	Jeddah, Saudi Arabia
<b>Status</b>	Proposed
<b>Height</b>	
<b>Antenna or spire</b>	1,600 m (5,280 ft)
<b>Technical details</b>	
<b>Floor count</b>	Unknown
<b>Cost</b>	US\$13.6 billion
<b>Companies involved</b>	
<b>Architect(s)</b>	Omrania and Associates, Pickard Chilton
<b>Structural engineer</b>	Hyder Consulting, Arup
<b>Contractor</b>	Bechtel
<b>Owner</b>	Kingdom Holding Company



Edificio Taipei 101. 508 m de altura. 700.000 toneladas (acero, cemento y vidrio). Año 2004

### La escalada bélica de 1930 a 1950 y sus consecuencias

En la historia de la Humanidad se conocen dos guerras mundiales. La Primera Guerra Mundial (1914-1918) también conocida como la Gran Guerra y la Segunda Guerra Mundial (1939-1945). No cabe duda que el acero fue el material por excelencia que utilizaron las sociedades belicistas para la fabricación de armamento (buques, blindados, armas de fuego, etc.)

Como corolario de estos episodios se destaca el uso de la energía nuclear. (Ver figura).



Prueba de explosión nuclear en atolones en el Pacífico. Año 1945

El 6 de agosto de 1945, es lanzada la primera bomba atómica sobre la ciudad japonesa de Hiroshima. La explosión acaba instantáneamente con la vida de más de 100000 personas. El 9 de agosto de ese mismo año, la segunda bomba atómica es arrojada sobre la ciudad japonesa de Nagasaki. Mueren más de 30000 personas con más de 40.000 heridos.

A partir de estos hechos, el desarrollo de tecnología nuclear se extendió a países de las más diferentes ideologías y costumbres. Así hoy, la comunista Corea del Norte o la fundamentalista Irán entre otras, se agregan a las grandes potencias.

En Argentina existe el ciclo completo de la tecnología nuclear, que se utiliza para la producción de energía.

En este caso, donde está el acero? Las reacciones nucleares se desarrollan en un reactor que se denomina recipiente a presión, cuyas características son las siguientes:

- Recipiente de presión de acero. Diámetro 5,36 m altura 12 m, espesor 220 mm)
- Envoltura de seguridad de acero, esfera de 50 m de diámetro, espesor de 24 mm.

En energía nuclear, la vida del reactor depende del grado de daño del recipiente que debe soportar la radiación neutrónica. Los neutrones generan endurecimiento del acero por deformación, lo que deviene en el deterioro del componente. Por eso se establece un programa de vigilancia dirigido a evitar accidentes catastróficos.

Por lo indicado, es muy difícil aceptar premisas que contemplen desarrollos de alta tecnología donde no intervenga la energía nuclear en alguna de sus diferentes formas. Incluso hoy es importante la medicina nuclear o la radiación aplicada a la conservación de alimentos.

## El acero y el siglo XXI

Hasta los años 1970, la humanidad deglutió la mecánica cuántica y el avance tecnológico siguió su rumbo arrollador. Pronto se superó la escala del micrón para pasar a la nanométrica.

En la actualidad existen discusiones relacionadas con la preponderancia de la filosofía como actividad del hombre (estudio de las cosas por sus primeras causas) y la cibernética como acción de las máquinas (La cibernética es el estudio del control y comunicación en los Sistemas Complejos: organismos vivos, máquinas y organizaciones).

Entonces, como ha incidido la tecnología en el acero? Se nota que ha primado la racionalización. Existen pocas calidades pero las cantidades son significativas. Las unidades de producción de acero líquido procesan normalmente desde 100 hasta 400 tns. Esto hace que esta actividad se encuentre en manos de grandes grupos económicos. Es una realidad que la nanotecnología incluirá al acero en la obtención de materiales avanzados.

En el caso de los hornos eléctricos, para el proceso de aceros de alta aleación, es de destacar la potencia instalada que se basa en uso de transformadores de hasta 400000 kVA (en los años 1970, apenas se utilizaban transformadores de alrededor de 10000 kVA).

Otro aporte tecnológico significativo es la implementación de procesos de aceración secundaria como refusión bajo vacío (VAR) o refusión bajo escoria electroconductora (ESR), que tienen por objeto lograr alto grado de limpieza y homogeneidad química.

Ya se realiza control de defectos mediante radiografía en línea de producción. Las propiedades de los productos y variables de procesos de elaboración se siguen con métodos de inteligencia artificial. Es habitual el uso de la computadora para tomar decisiones y analizar situaciones problemáticas en las unidades de producción. La comunicación es instantánea a través de la gran red. En definitiva, la tecnología encuentra la situación en su mejor momento, aunque la humanidad tenga problemas de diferente índole. En sí, cuando la tecnología no estuvo a sus anchas en el planeta?

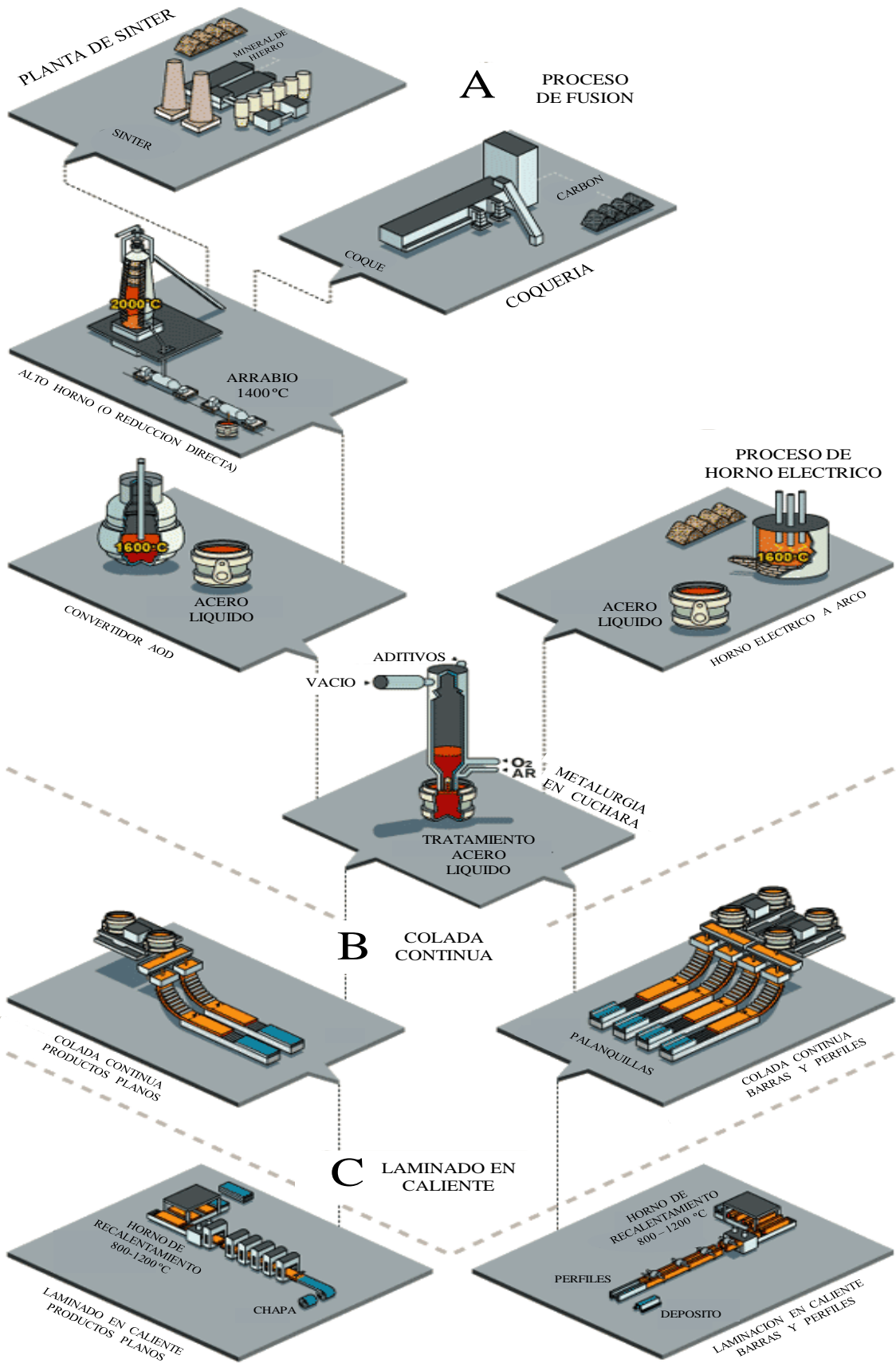
## 2 - Plantas industriales

La tecnología de elaboración de aceros comprende algunas de las siguientes etapas: Tratamiento de materias primas, fusión en convertidores u hornos eléctricos, tratamiento de metalurgia en cuchara bajo vacío, refusión bajo escoria electroconductora o refusión por arco en vacío, colada continua, forja, Laminación, trefilado, rectificado, enderezado, premecanizado, tratamientos térmicos, tratamiento de superficies, etc.

En la figura siguiente se presenta el layout de una planta siderúrgica integral. En las factorías modernas, se utilizan alto hornos de más de 1000 tns/día de producción de arrabio. Los convertidores en general son del tipo AOD (argon-oxygen-decarburization) con capacidades mayores de 200 tns. Los hornos eléctricos utilizan transformadores de ultra alta potencia del orden de los 100000 KVA. En las etapas de terminado, un tren de laminación puede producir alambrión a velocidades mayores de 60 m/s. Sin duda que todas estas operaciones y procesos son comandados por computadora, empleando la automatización asistida por la heurística.

Para la obtención de propiedades físicas y mecánicas en los productos, se requiere de tecnología de tratamientos térmicos y termomecánicos. Por ejemplo en chapa laminada en frío, luego del recocido en campana, se aplica temper rolling (pasada final de laminación de alrededor de 0.5 % de deformación en frío), para lograr las características superficiales de este producto. En alambrones se debe aplicar tratamiento de globulizado para proveer un material apto para la aplicación de trefilado (técnica que se utiliza para la fabricación de alambre y bulones).

En la siguiente figura se presenta el layout de una planta industrial siderúrgica de elaboración de aceros.



Lay out planta siderúrgica

En general en productos planos como en barras y perfiles, la etapa de terminado es compleja. Se requiere de equipamiento sofisticado para detección de defectos, corte, enderezado, pulido. Es importante lograr niveles de defectología y calidad superficial acorde con los requisitos de normas y usuarios.

La obtención de aceros especiales (para herramientas, inoxidable, etc.), las plantas emplean técnicas de refusión bajo escoria electroconductora o refusión bajo vacío. En general la misma planta se equipa con equipos de forja calentamiento, tratamiento térmicos y premecanizado para la producción de grandes piezas (ejes, coronas y piñones, tubos sin costura, domos de recipientes a presión, pistas de rodamientos, etc.). En la siguiente figura se observa un esquema de planta de forja y tratamientos térmicos.

Existen diversos procesos de metalurgia secundaria que en general tienen por objeto el ajuste final de composición química y eliminación de gases e inclusiones. Algunos de estos equipos se denominan VD (desgasificación en vacío), VOD (desgasificación en vacío con soplado de oxígeno para acero extra bajo carbono), RH (desgasificación en vacío), LF (horno cuchara), VIM (fusión por inducción en vacío). Con estos procesos se logran aceros con microestructuras primarias de solidificación (microestructuras y macroestructuras dendríticas columnares con alto grado de segregación).

La refusión (bajo escoria electroconductora o por arco en vacío), toma como materia prima lingotes elaborados en metalurgia secundaria, De esta manera, confiere al acero características microestructurales de tipo secundario y principalmente elimina el problema de segregación, característica de los procesos de colada convencionales. Con la aplicación de estos procesos es posible lograr tenores del orden de 1 ppm de hidrógeno (el hidrógeno es nocivo en la mayoría de los aceros y de manera más perniciosa en aceros para herramientas y grandes piezas forjadas).

La etapa de calentamiento y forja, permite fabricar piezas con formas geométrica predeterminadas, denominados esbozos (por ejemplo, ejes, cilindros, tubos, anillos, placas, barras, etc). En forja es recomendable aplicar bajas velocidades de deformación y reducir al menos a un tercio la dimensión transversal del lingote original. Por esta razón es necesario aplicar varios precalentamientos y calentamientos para alcanzar las temperaturas de trabajo.

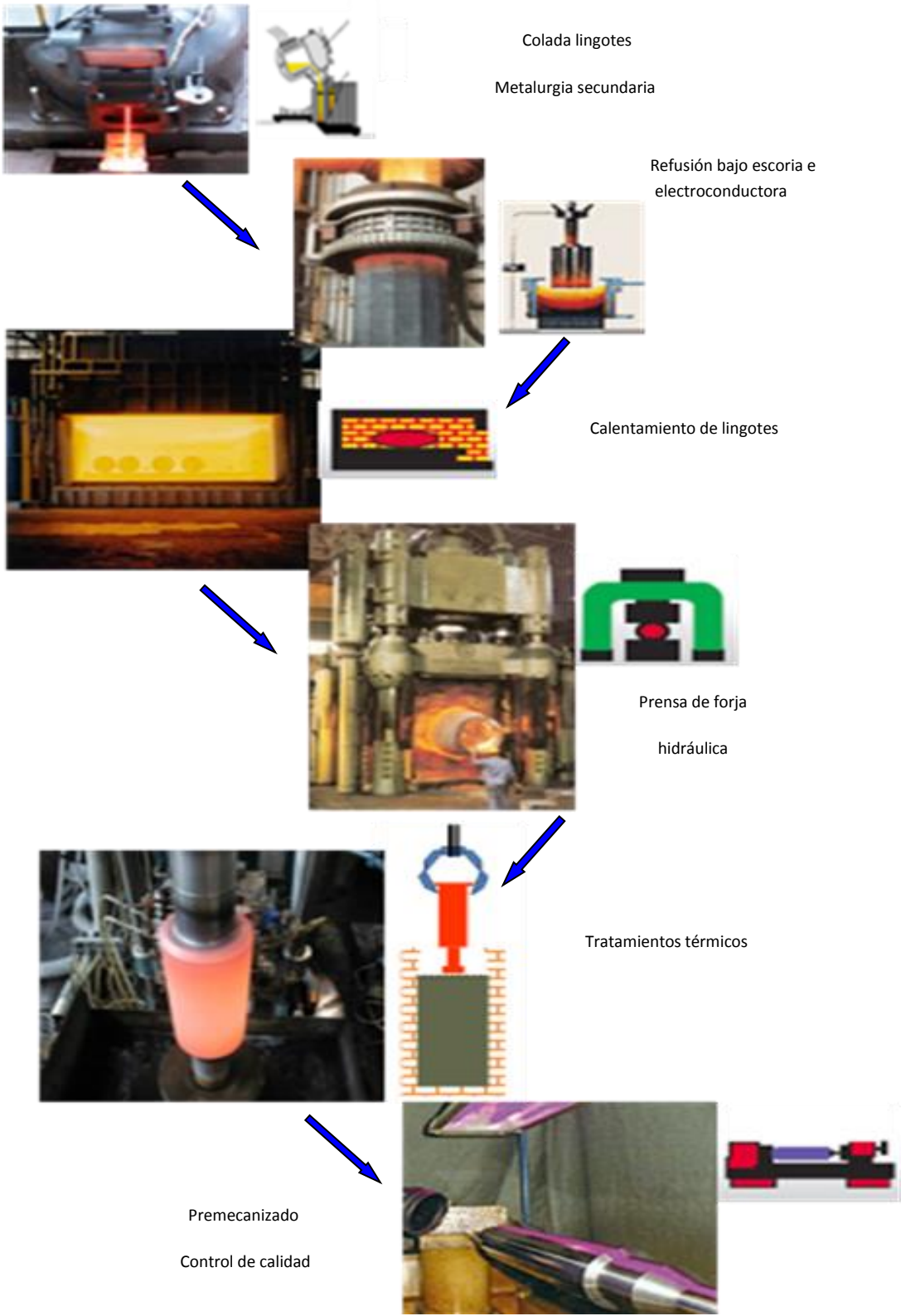


Fig. 1.2 – Esquema Planta de Forja

A fin de garantizar un óptimo nivel de propiedades, las plantas modernas de forja en general disponen de tratamientos térmicos que cuentan con hornos de calentamiento y sistemas de enfriamiento. En el caso de cilindros, tubos, ejes, el enfriamiento se realiza en una cuba vertical que utiliza como refrigerante, aceite.

La etapa terminación para estos productos, se complementa con máquinas herramienta para premecanizado (tornos, taladradoras, alesadoras) y técnicas de control de calidad tales como ultrasonido y partículas magnéticas.

En la actualidad, la producción industrial en sus diferentes variantes, requiere de aceros. Desde una fábrica de papel (que utiliza calderas, digestores, cilindros calandrados, etc.), hasta una planta que produce plásticos por inyección y moldeo, utilizan distintas clases de componentes de acero. Así por ejemplo el recipiente de un reactor nuclear es de acero. El casco y eje de impulsión de todos los buques (mercantes, de la armada, submarinos), La industria alimenticia emplea casi exclusivamente aceros inoxidables. Gran parte del instrumental quirúrgico se fabrica con aceros inoxidables. La perforación de pozos de petróleo en tierra y offshore, se realiza con barras de acero que alcanzan varios kilómetros de longitud. Es decir que sin acero, probablemente no habría una industria como la que se conoce en la actualidad.

Un aspecto importante a tener en cuenta es que en el campo de los componentes estructurales y unidades destinadas a procesos químicos (recipientes a presión, tanques, cascos de hornos y buques, calderas, digestores, intercambiadores de calor, etc.), se requiere de aplicación de soldadura de arco eléctrico de alto rendimiento de tipo automático (con alambres tubulares o de arco sumergido). Por esta causa resulta de fundamental importancia el estudio de los procesos de soldadura de arco eléctrico, que posibilitan la fabricación de equipos industriales a gran escala.

El desarrollo tecnológico en elaboración de aceros estructurales, desde diferentes ópticas ha logrado establecer las características relacionadas con la soldabilidad. Aquí se tienen en cuenta tanto parámetros microestructurales de los aceros, como de las condiciones del proceso de soldadura. Si bien los conceptos teóricos y prácticos de la soldabilidad permanentemente evolucionan, las bases de estudio fueron establecidas por F. B. Pickering y J. M. Gray en los años 70. Otros investigadores como R. W. K. Honeycombe, T. Gladman, M. F. Ashby también fijaron los principios relacionados con ductilidad, soldabilidad, tenacidad de aceros estructurales. En definitiva, en el caso de aceros estructurales de alta soldabilidad, se incorpora el concepto de "microaleado", que no solo implica la necesidad de un agregado de Niobio al acero, sino un cambio en la tecnología de transformación termomecánica (en la elaboración de productos de aceros microaleados, se requiere principalmente de equipamiento para recristalización dinámica a bajas temperaturas de deformación).

### 3 – Características fundamentales

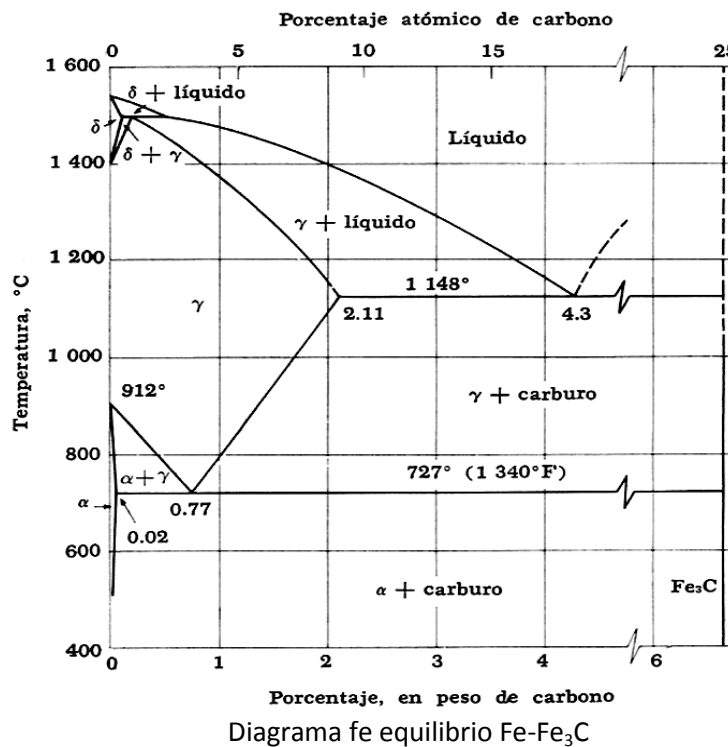
#### Diagrama hierro - carbono

Se define fase, como una parte del material diferente del resto en estructura y en composición química. Los diagramas de fase, se utilizan para identificar las fases presentes a cualquier temperatura o composición química, cuando la aleación se encuentra en equilibrio. En estas condiciones los campos de cada fase, separados por límites de solubilidad, dependen de los sistemas específicos que se estudien en cada caso.

Otra factor de importancia que se observa en los diagramas de fase, son los intervalos de temperaturas en los cuales se produce la solidificación, que varían con la composición química de la aleación. Así se tiene la línea de liquidus, que es el límite por encima de la cual la aleación es líquida y solidus, el límite por debajo del cual dicha aleación es un sólido. Las curvas de liquidus y solidus se unen en puntos denominados eutécticos. También puede darse casos de unión de tres fases originando puntos denominados eutectoides o peritéticos.



La principal herramienta de estudio de los aceros es el diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C, que se presenta en la siguiente figura:



Este diagrama también se conoce como diagrama hierro-carbono (Fe-C) y las fases y principales reacciones del sistema son las siguientes:

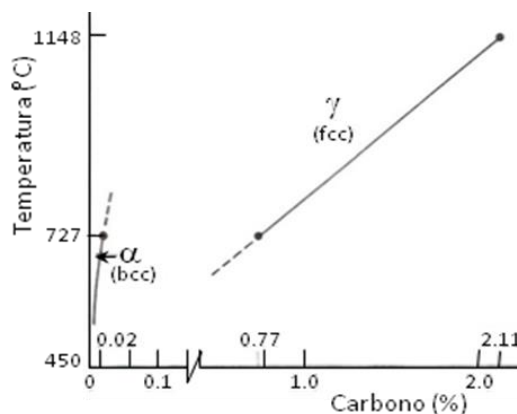
Hierro puro.

El hierro puro cambia su estructura cristalina de cubica centra en el cuerpo (bcc) a cubica de caras centradas (fcc) a 912 °C, en el calentamiento. El hierro nuevamente cambia a 1394 °C formando una estructura bcc que permanece estable hasta la temperatura de fusión que es de 1538 °C.

Ferrita o hierro  $\alpha$ .

La modificación que se produce en el hierro puro a temperatura ambiente debido a la presencia del carbono, se denomina hierro  $\alpha$  o ferrita. La ferrita es muy dúctil y con pureza comercial tiene una resistencia mecánica de 310 MPa. A temperaturas inferiores a 770 °C es ferromagnética.

Dado que la ferrita tiene una estructura bcc, los espaciados interatómicos son reducidos y por lo tanto no pueden contener fácilmente los átomos de carbono. En sí, la solubilidad del carbono en la ferrita es muy baja. La dimensión del carbono es grande para formar una solución sólida intersticial extensa y pequeña para generar una solución sólida sustitucional. En la siguiente figura se presenta la solubilidad del carbono en hierro y en la tabla, la solubilidad del carbono y nitrógeno.



Solubilidad de carbono y nitrógeno en hierro

Solubilidad de intersticiales en hierro  $\alpha$  y  $\gamma$ 

Elemento	Temperatura (°C)	Solubilidad % en peso
Carbono en hierro $\alpha$	20	<0.00005
	723	0.02
Carbono en hierro $\gamma$	723	0.80
	1150	2.04
Nitrógeno en hierro $\alpha$	20	<0.0001
	590	0.10
Nitrógeno en hierro $\gamma$	590	2.35
	650	2.80

Austenita o hierro  $\gamma$ 

La fase fcc se denomina austenita o hierro  $\gamma$ . Corresponde a la forma estable del hierro puro entre 912 °C y 1394 °C. En la zona de temperaturas de estabilidad, esta fase es altamente dúctil y por lo tanto es apta para transformación por procesos termomecánicos. Así por ejemplo, el forjado, laminado o conformado, se realizan alrededor de 1100 °C. Las teorías y prácticas de plasticidad tienen gran aplicación cuando el acero se encuentra en fase  $\gamma$  (estado austenítico). Cabe destacar que la austenita no es ferromagnética a ninguna temperatura.

Ferrita delta o hierro  $\delta$ .

A temperaturas mayores de 1394 °C, la austenita deja de ser estable y se transforma en estructura bcc. Esta fase es la misma que la ferrita o hierro  $\alpha$ , pero tiene mayor solubilidad de carbono por efecto de la energía térmica presente.

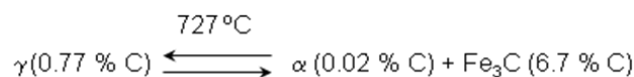
Carburo de hierro ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) o cementita.

En las aleaciones Fe-C, cuando el carbono excede el límite de solubilidad de una fase (ferrita o austenita), forma otra fase denominada cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). En realidad no se forman moléculas de  $\text{Fe}_3\text{C}$ , sino que la red cristalina contiene átomos de Fe y C en proporción de 3 a 1. El  $\text{Fe}_3\text{C}$  tiene una celda unitaria tetragonal de 12 átomos de hierro y tres átomos de carbono, lo que da un contenido de 6.7 % de carbono en peso.

En comparación con la ferrita y la austenita, la cementita es muy dura y frágil. La presencia de cementita en aceros, aumenta la resistencia mecánica, pero disminuye la ductilidad (tenacidad).

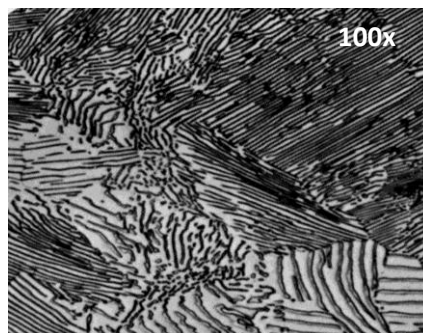
## La reacción eutectoide.

En el equilibrio a 727 °C, coexisten 3 fases. Hierro  $\gamma$ , hierro  $\alpha$  y  $\text{Fe}_3\text{C}$ . La reacción es la siguiente:



## Descomposición de la austenita.

Durante el enfriamiento, se produce la reacción eutectoide. Se forma simultáneamente la ferrita y la cementita por descomposición de la austenita que tiene composición eutectoide. La mezcla resultante contiene aproximadamente 12 % de cementita y el resto es ferrita. La forma de este constituyente, que se observa con microscopio óptico, es de tipo laminar y se denomina perlita.



Perlita. Constituyente laminar del acero

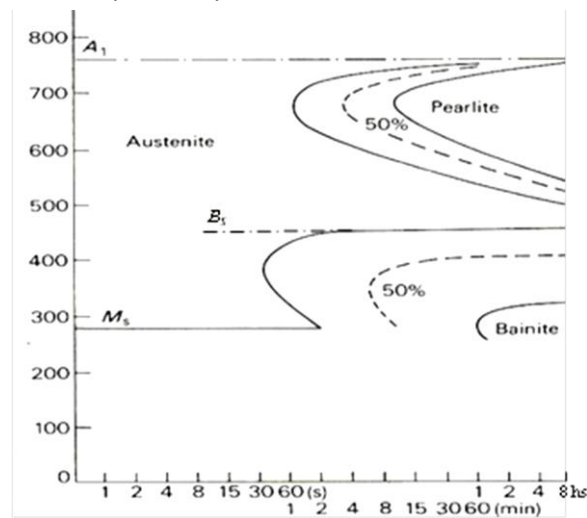
## Otros microconstituyentes del acero

## Bainita

La bainita es una mezcla de fases de ferrita y cementita y en su formación intervienen procesos de difusión. La bainita forma agujas o placas, dependiendo de la temperatura de transformación. Los detalles microestructurales de la bainita son tan finos que para su resolución en general se requiere el uso del microscopio electrónico. Está compuesta de una matriz ferrítica y de partículas alargadas de cementita. La fase que rodea las agujas es martensita.

Las transformaciones bainíticas de la austenita, dependen del tiempo y de la temperatura y se representan en un diagrama de transformación isotérmico, a temperaturas inferiores a las de formación de la perlita, pero por encima de las temperaturas de transformación martensítica.

La denominación se impuso en honor a su descubridor Edgar C. Bain. Esquemáticamente en la Figura 19.5, se presenta el diagrama TTT que incluye las reacciones bainíticas.



Transformaciones bainíticas de la austenita

El rango de temperaturas en que se producen las transformaciones bainíticas es de 250 a 550 °C. Existen dos formas de microestructuras bainíticas: Bainitas superiores y bainitas inferiores.

## Bainita superior

La morfología de las bainitas superiores se asemeja a la ferrita Widmanstätten. Se compone de láminas de ferrita con precipitados internos (Figura 20).

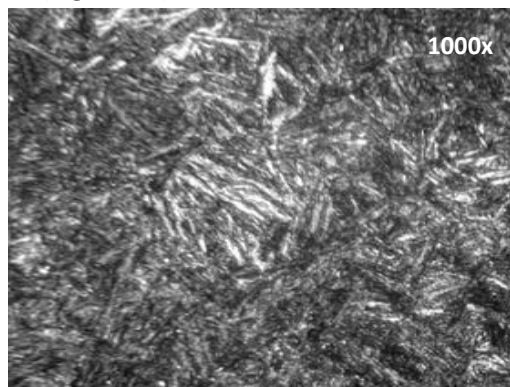


Fig. 20.5 – Bainita superior 0.6 % C

A temperaturas elevadas (550-400 °C), la difusión es tan rápida que no hay posibilidad de precipitar carburos en la ferrita, obteniéndose así una microestructura de bainita superior. Finalmente, la cementita precipita desde la austenita residual enriquecida en carbono. Tiempos cortos dan lugar a una microestructura de bainita superior, dado que no hay oportunidad para la precipitación de carburos en la ferrita.

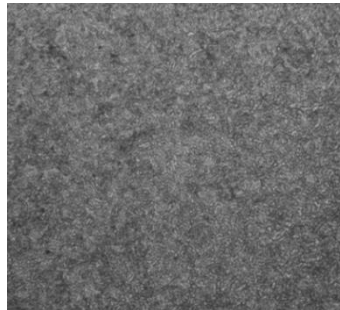
Estudios realizados en microscopio electrónico revelan que las placas de bainita superior son de 0.5 micrones de ancho. La densidad de dislocaciones en las placas de bainita aumenta con el decrecimiento de la temperatura de transformación, siendo mayor que en la ferrita Widmanstätten.

La morfología de la cementita que se forma en los límites de las placas depende del contenido de carbono. En aceros de bajo carbono las líneas de cementita son discontinuas, mientras que en aceros de alto carbono son continuas.

Los aceros con microestructuras de bainita superior, tienen menor tenacidad y mayor tensión de fluencia que los aceros con microestructuras de bainita inferior.

#### Bainita inferior

La bainita inferior se obtiene generalmente a temperaturas de transformación isotérmicas relativamente bajas, entre 250 y 400 °C. Los carburos precipitan en la ferrita reduciéndose así la cantidad de carbono disponible para precipitar entre la austenita y la ferrita. La transición entre bainita superior e inferior puede explicarse como un proceso de revenido rápido que ocurre en una placa de ferrita sobresaturada en carbono después de su crecimiento. Este exceso de carbono en la ferrita tiende a reducirse mediante la difusión del carbono hacia la austenita residual y por precipitación en la misma ferrita. La bainita inferior tiene una forma más acicular que la bainita superior.



Bainita inferior acero 0.4 % C, 0.5 % Mo

Una característica de la bainita inferior es el crecimiento de varillas de carburos dentro de las placas de ferrita. En general estas varillas son de cementita. Cuando la temperatura de transformación se reduce y el tiempo necesario para la descarburación se incrementa, parte del carbono puede precipitar como carburos finos en la ferrita, mientras que el resto difunde a la austenita para finalmente precipitar entre las placas. Debido a que sólo una fracción del carbono difunde a la austenita, los carburos precipitados entre placas son mucho más pequeños que los asociados a la bainita superior. Por esta causa la bainita inferior presenta una estructura tan fina y es siempre más tenaz que la bainita superior, con una mayor tensión de fluencia. Otros factores que favorecen la obtención de alto límite de fluencia y alta tenacidad en microestructuras de bainita inferior son la alta densidad de dislocaciones, el mayor porcentaje de carbono en solución sólida en la ferrita y los pequeños carburos precipitados en el interior de la placa.

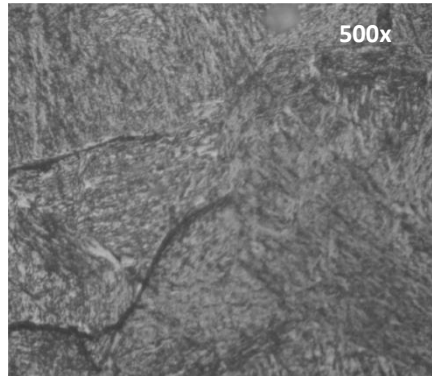
Es importante saber que con un adecuado control de tamaño de grano austenítico y ancho de los paquetes de carburos, se pueden obtener aceros con mayor tenacidad que la martensita revenida del mismo nivel de resistencia mecánica.

Una consecuencia del mecanismo de transición entre bainita superior e inferior es el hecho de que aceros con una alta concentración en carbono solo transformen a bainita inferior. La gran cantidad de carbono atrapado en la ferrita durante la transformación, no puede difundir suficientemente rápido a la austenita, por lo que precipita inevitablemente en la ferrita. Por el contrario, en aceros de muy bajo carbono, el tiempo necesario para la descarburación es tan pequeño que sólo es posible obtener por transformación, bainita superior a cualquier temperatura entre el final de la transformación perlítica y el inicio de la transformación martensítica.

#### Martensita

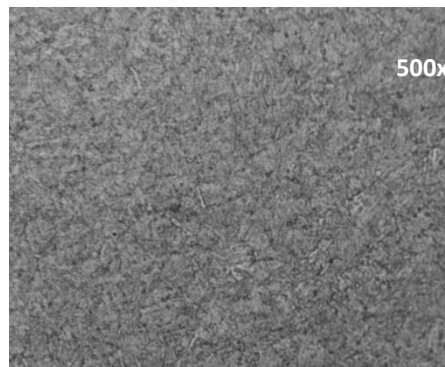
Martensita es el nombre que recibe la fase cristalina bct (tetragonal de caras centradas), en aceros. Esta denominación es en honor a su descubridor, al metalúrgico alemán Adolf Martens. Esta fase se genera a partir de una transformación de fases sin difusión de la austenita, a una velocidad que es muy cercana a la velocidad del sonido en el material. Por extensión, se denominan martensitas todas las fases que se producen a raíz de una transformación sin difusión en diferentes aleaciones. Ya que la transformación

martensítica no implica difusión, ocurre casi instantáneamente. Los granos de martensita se generan por nucleación y crecen dentro de la matriz austenítica. De este modo, a efectos prácticos, la velocidad de transformación de la austenita es independiente del tiempo. La estructura de la martensita tiene la apariencia de láminas o de agujas (Figura 22). La fase blanca es austenita que no se transforma durante el temple rápido. Se denomina austenita retenida. La martensita también puede coexistir con otros constituyentes, como la perlita.



Acero de 0.8 % C sometido a temple. Se observa martensita con fisura en la microestructura debido al elevado estado de tensiones

En aceros sin elementos de aleación y con tamaño de grano austenítico grosero, se originan martensitas de grandes dimensiones. Cuando se emplean elementos que contribuyen a mejorar el tamaño de grano austenítico como boro, molibdeno, cromo, se obtienen martensitas más finas, con menor tendencia a la fragilización.

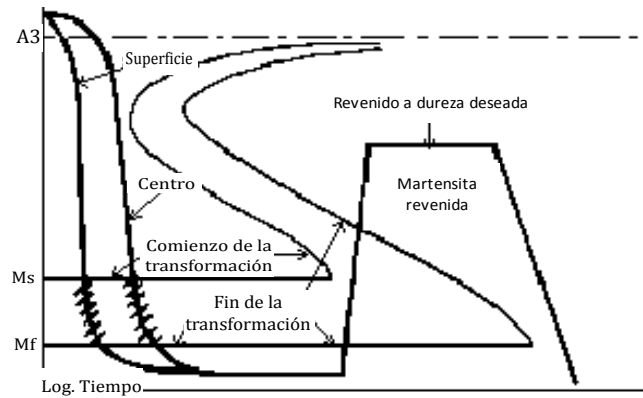


Martensita de 0.4 % C, 0.008 % B

Las transformaciones martensíticas se puede considerar como el resultado de un producto de transformación competitivo con la perlita o la bainita. La transformación martensítica tiene lugar a velocidades de temple muy rápidas que dificultan la difusión del carbono. Si hubiera difusión se formarían las fases ferrita y cementita. Durante la transformación martensítica, gran número de átomos se mueven de modo cooperativo, lo que representa pequeños desplazamientos de un átomo respecto a sus vecinos. Esta transformación significa que la austenita  $fc$  experimenta una transformación polimórfica a martensita tetragonal centrada en el cuerpo (bct). La celda unidad de esta estructura cristalina es un tetrágono alargado en una de sus tres dimensiones, con un átomo en el centro. Todos los átomos de carbono permanecen como solutos intersticiales en la martensita y constituyen una sólida sobresaturada capaz de transformarse rápidamente en otras estructuras si se calienta a temperaturas que implican una apreciable velocidad de difusión. La mayoría de los aceros retienen la estructura martensítica casi indefinidamente a temperatura ambiente.

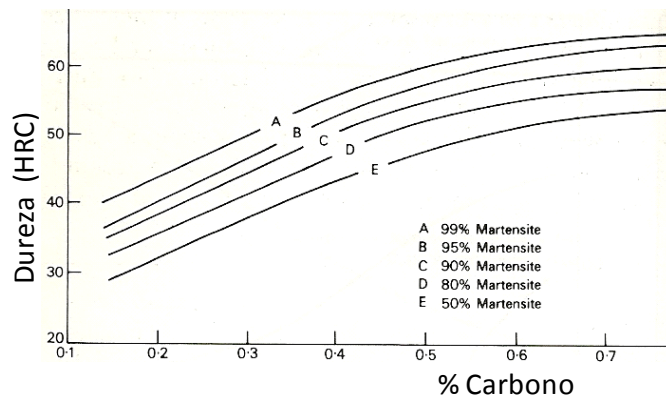
Los aceros con microestructura martensítica son los más duros y mecánicamente resistentes, pero también los más frágiles y menos dúctiles. La dureza de estos aceros depende del contenido en carbono. Son aceros con menor tenacidad y ductilidad. Si se le realiza un revenido alto pueden llegar a obtener mayor tenacidad a costa de perder dureza y resistencia mecánica, asemejándose a los aceros con microestructura bainítica inferior en dureza y resistencia mecánica, pero mantienen un bajo alargamiento y baja tenacidad

Esquemáticamente en la siguiente figura se presenta el tratamiento térmico de temple y revenido que se aplica en las transformaciones martensíticas de la austenita.



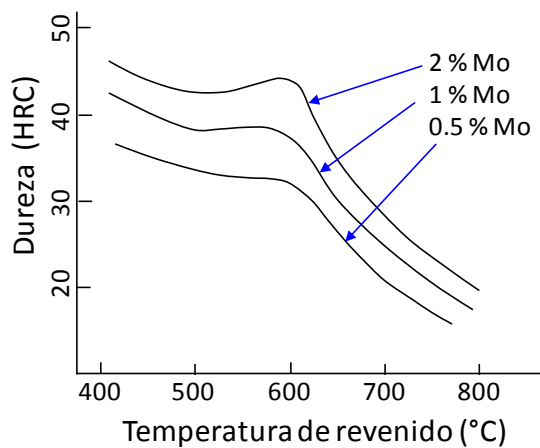
Tratamiento térmico de temple y revenido

En función del contenido de carbono, tomando como parámetro el porcentaje de martensita, la dureza aumenta mediante el tratamiento de temple.



Efecto del contenido de carbono y % de la martensita sobre la dureza de temple en aceros

Es importante la aplicación de revenido a los aceros sometidos a temple. El tratamiento térmico de revenido, atenúa las tensiones mecánicas resultantes de las transformaciones martensíticas. Cada acero tiene una curva de revenido. En la siguiente se observa una curva genérica de revenido donde se grafica la dureza en función de la temperatura.



Curvas de revenido de aceros al molibdeno. Se observa endurecimiento secundario

## Aceros: Definición y Clasificación

En base al diagrama de fases Fe-Fe<sub>3</sub>C, considerando las propiedades tecnológicas resultantes (ductilidad, plasticidad, colabilidad), se denominan aceros a las aleaciones que contienen tenores de carbono menores de 2 % en peso. Los materiales con mayores porcentajes de carbono se denominan fundiciones o hierros colados.

Teniendo en cuenta las características del proceso de elaboración de los aceros, la definición pertinente es la siguiente:

*“Aceros, son aleaciones hierro-carbono, con tenores de carbono menores de 2 %, que contienen impurezas (P, S, Si, Mn < 0.5 %) y eventualmente algunos elementos de aleación (Cr, Mo, N, Ni, W, Mn > 0.5 %, V, Ti, Co, Nb, Al)”.*

En cuanto a la clasificación, desde el punto de vista de la tecnología, se consideran los siguientes grupos de aceros:

- Aceros estructurales
- Aceros de construcción mecánica
- Aceros inoxidables
- Aceros para herramientas

## Normas y Códigos

En la actualidad, de la mano de la globalización se han unificado las normas que catalogan y codifican a los aceros.

Las normas ASTM, en general contienen a los aceros estructurales. También especifican ensayos para determinación de propiedades. Así por ejemplo se tienen las siguientes normas (entre otras):

ASTM A 370: Norma para ensayos mecánicos en aceros laminados, forjados y moldeados.

ASTM A 434: Barras de acero aleado, forjado en caliente o terminado en frío, con tratamiento de temple y revenido

ASTM A 106: Tubos de acero sin costura para servicios a alta temperatura

ASTM A 255: Aceros aleados al V-Mn-Ni, para recipientes a presión

ASTM A 193: Aceros aleados e inoxidables para bulones destinados a alta temperatura.

ASTM A 181: Aceros forjados al carbono

ASTM A 668: Aceros forjados al carbono y aleados para uso industrial.

ASTM A 167: Chapas de acero Cr-Ni inoxidables y resistentes al calor

En general estas normas dan las propiedades mecánicas en forma mandatoria. En cambio la composición química a veces resulta ambigua.

Es importante tener en cuenta que existen diversos grados en las diferentes normas. Estos grados de acero (por ejemplo a, b, c, etc.), no siempre son de fácil cumplimiento. Por lo tanto en cada caso se deberá consultar a un especialista a fin de evitar inconvenientes de tipo técnico o incluso jurídico.

Las normas ASTM se han universalizado de tal forma que existen contratos internacionales de provisión o fabricación que se basan taxativamente en estas especificaciones.

La aplicación de estas normas como de otras tales como SAE, AISI o incluso el Código ASME, son de tipo internacional y están totalmente desreguladas. En definitiva, si una norma se inserta en un contrato, las partes involucradas resultan ser responsables de su aplicación. Los problemas que pudiesen surgir en alguna instancia de la ejecución de un contrato, no son atribuibles de ninguna manera a la American Standard Testing of Materials (ASTM).

### Normas DIN

El aporte a la tecnología de gran significado ha sido dado por la Deutsches Institut für Normung de Alemania. En primer lugar, estas normas especifican a los aceros, desde la cuna de la tecnología. Contienen todas las clases de aceros. Es famosa la DIN 17200 que especifica aceros de construcción mecánica (indica la composición química de estos aceros que debe ser sometidos a tratamientos térmicos), mientras que la DIN 17100 contiene a los aceros estructurales y por lo tanto da información de las propiedades mecánicas.

El manual denominado La Llave del Acero es un excelente material que contiene todo tipo de aceros y fundiciones, incluyendo las equivalencias con norma SAE, AISI, JIS, etc.

Si bien en países tales como Francia, España, Alemania, Rusia, Japón, China, Suecia, Estados Unidos, Brasil, etc., se fabrican aceros en sus diferentes variantes, las normas que se utilizan para la racionalización de calidades y medidas son en general las indicadas precedentemente. Por ejemplo el Código ASME de la American Society of Mechanical Engineers, cuando se refiere a componentes de estructuras metálicas, recipientes a presión, u otros equipos, hace referencia a las normas SAE, AISI u otras cuando se especifica aceros o ensayos.

## Propiedades de los productos

Si bien resulta difícil establecer las propiedades físicas y mecánicas del acero debido a que varían con la composición química y los diversos tratamientos térmicos, químicos o mecánicos a que se someten para lograr características adecuadas para una gran variedad de productos, se pueden citar genéricamente las siguientes propiedades:

Su densidad media es de  $7.85 \text{ kg/mm}^3$ .

El módulo de elasticidad es de 205000 MPa.

En función de la temperatura el acero se puede contraer, dilatar o fundir. Según la siguiente ecuación

$$\frac{\Delta l}{l} = \alpha_l \cdot \Delta T$$

$\Delta l/l$  : Variación longitudinal

$\alpha_l$  : Coeficiente de dilatación lineal del acero

$\Delta T$ : Variación de temperatura

El acero se dilata y se contrae según un coeficiente de dilatación similar al coeficiente de dilatación del hormigón, por lo que resulta muy útil su uso simultáneo en la construcción, formando un material compuesto que se denomina hormigón armado. El acero da una falsa sensación de seguridad al ser incombustible, pero sus propiedades mecánicas fundamentales se ven gravemente afectadas por las altas temperaturas que pueden alcanzar los perfiles en el transcurso de un incendio

El punto de fusión del acero depende del tipo de aleación. En procesos de acería se utiliza  $1620 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Es un material muy tenaz, especialmente en alguna de las aleaciones usadas para fabricar herramientas. Relativamente dúctil. Con él se obtienen hilos delgados llamados alambres.

Es maleable. Se pueden obtener láminas delgadas llamadas hojalata. La hojalata es una lámina de acero, de entre 0,5 y 0,12 mm de espesor, recubierta electrolíticamente por estaño.

Permite una buena mecanización en máquinas herramientas antes de recibir un tratamiento térmico.

Algunas composiciones y formas del acero mantienen mayor memoria, y se deforman al sobrepasar su límite elástico.

En el caso de aceros estructurales, se puede soldar con facilidad.

La corrosión es la mayor desventaja de los aceros ya que el hierro se oxida con suma facilidad incrementando su volumen y provocando grietas superficiales que posibilitan el progreso de la oxidación hasta que se consume la pieza por completo. Tradicionalmente los aceros se han protegido mediante diversos tratamientos superficiales. En la actualidad existen aleaciones con resistencia a la corrosión mejorada como los aceros de construcción «corten» aptos para intemperie (en ciertos ambientes) o los aceros inoxidable.

Posee una alta conductividad eléctrica. Aunque depende de su composición es aproximadamente de  $3 \times 10^6 \text{ S m}^{-1}$ . En las líneas aéreas de alta tensión se utilizan con frecuencia conductores de aluminio con alma de acero proporcionando éste último la resistencia mecánica necesaria para incrementar los vanos entre la torres y optimizar el coste de la instalación.

Se utiliza para la fabricación de imanes permanentes artificiales, ya que una pieza de acero imantada no pierde su imantación si no se la calienta hasta cierta temperatura. La magnetización artificial se hace por contacto, inducción o mediante procedimientos eléctricos.

En el caso de aceros inoxidables, a temperatura ambiente el ferrítico y martensítico son magnéticos, mientras que el inoxidable austenítico no es magnético.

Composición química



Los procesos de aceración primaria permiten obtener aceros con composición química controlada y un determinado nivel de impurezas.

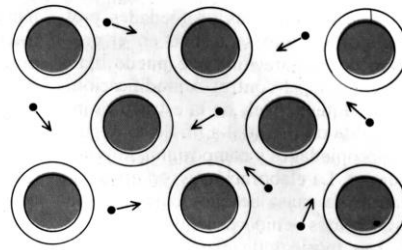
Según la clase de acero (estructural, de construcción mecánica, inoxidable o para herramientas), se ajusta la composición química. Se obtiene un análisis de colada que forma parte de los certificados de calidad. Debido al fenómeno de segregación se produce una variación de la composición química desde el centro del semielaborado hacia la periferia. Este problema se traslada hasta el producto final.

Existen procesos en los que se utiliza Silicio para estabilizado que da lugar a los aceros calmados. En los aceros de alta calidad, se utiliza Aluminio para el control del estado de oxidación. De esta manera se evita el problema de envejecimiento que tiende a fragilizar a los productos.

Otro problema que se genera en los aceros es la formación de impurezas de tipo inclusiones no metálicas (óxidos de hierro, silicatos, aluminatos y sulfuros).

**Enlaces atómico en aceros**

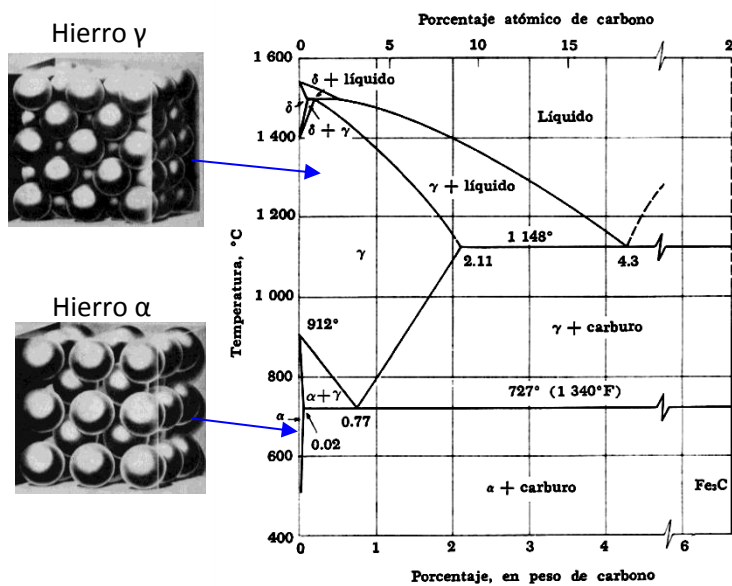
El tipo de enlace atómico en los aceros es de tipo metálico. Es un modelo complejo. Los electrones deslocalizados responden a campos eléctricos moviéndose en una capa con un patrón de onda. De hecho la conductividad es posible si un electrodo positivo está presente para eliminar electrones desde un extremo de la capa y existe un electrodo negativo disponible para suministrar electrones al otro extremo. Los electrones deslocalizados pueden moverse en tres dimensiones formando una nube o gas, dado que tiene una menor fuerza de unión.



Modelo de enlace metálico (movimiento browniano superficial de electrones)

**Estructura cristalina de los aceros**

Los aceros están constituidos por soluciones sólidas intersticiales y sustitucionales. En las soluciones sólidas intersticiales, el carbono es el elemento que forma parte de la red. El manganeso, níquel, cromo, etc., forman las soluciones sólidas sustitucionales.



Estructura cristalina de los aceros

**Productos**

La obtención de productos de acero (superadas las etapas de aceración primaria y secundaria), depende en primer instancia de la solidificación primaria y los tratamientos térmicos y mecánicos.

En general los productos de la solidificación no pueden obtenerse mediante enfriamiento en condiciones de equilibrio. Por lo tanto la solidificación se realiza en condiciones controladas, de manera de obtener microestructuras acorde con las propiedades requeridas en el producto final. En este sentido se puede operar de alguna de las siguientes maneras:

- Enfriamiento a bajas velocidades (medio aire o atmósferas controladas)
- Enfriamiento a velocidades intermedias
- Enfriamiento a altas velocidades

También la temperatura velocidad de deformación juegan un rol importante en la obtención de propiedades. En general en la actualidad se emplean tratamientos termomecánicos. Esto implica que se deben combinar los ciclos térmicos con las deformaciones en estado plástico, para los productos terminados con propiedades de especificaciones técnicas o normas.

## Tipos de productos de acero

Los productos de aceros estructurales microaleados, se obtienen mediante aplicación de altas deformaciones a la menor temperatura de transformación posible. De esta manera se logra el retardo de la recristalización dinámica, con lo que se obtienen productos con microestructuras de grano fino. En consecuencia estos productos son de alta resistencia, alta tenacidad, alta soldabilidad, que es lo ideal en aceros estructurales.

La variedad de formas de los aceros es muy grande. Incluye chapas, alambres, tubos, barras y perfiles.

En aceros estructurales planos, en general se requiere alta conformabilidad y soldabilidad, con niveles elevados de resistencia mecánica y resistencia al impacto.

En el caso de aceros de construcción mecánica, es más importante la aplicación de una alta velocidad de enfriamiento para lograr resistencia mecánica y resistencia a la fatiga. Se conoce como tratamiento térmico de temple y revenido a este proceso.

En aceros para herramientas, teniendo en cuenta que lo principal es la dureza, el tratamiento térmico de temple y revenido es el que determina el nivel de esta propiedad. Dado el alto nivel de aleación, el diseño de los tratamientos térmicos debe considerar la distorsión que es un problema de difícil solución.

Los aceros inoxidables austeníticos, presentan alta plasticidad debido a la estructura cristalina fc. Esta estructura presenta un alto número de sistemas de deslizamiento, lo que posibilita que el acero tenga alta conformabilidad. La microestructura de estos aceros es de grano grueso, lo que genera dificultades en las soldaduras.

En aceros de construcción mecánica e inoxidables, resulta de suma importancia la obtención de ciertos niveles de calidad superficial. Existen casos de componentes de maquinaria donde se debe aplicar enderezado y pulido en enderezadoras hiperbólicas para lograr parámetros tales como calidad superficial y rectitud (por ej. esta operación se aplica en la fabricación de piezas del sistema de bombeo de la industria de extracción del petróleo).

Todos los aceros se pueden someter a procesos de moldeo cuando se requieren piezas de formas intrincadas. En estos casos, mediante aplicación de tratamientos térmicos se logran propiedades de alto nivel de calidad, aunque en general no superan las propiedades de los aceros laminados o forjados.

Los tipos de productos que se fabrican con aceros, se presenta en el siguiente esquema:



Los productos trefilados comprenden en general alambres. También se trefilan barras para lograr alta calidad superficial y elevada dureza superficial (por ej. acero plata).

Los productos conformados se obtienen a partir del prensado de chapas (por ej. partes de carrocería de automóviles tipo sedán).

En general en la bibliografía estos productos aparecen con la denominación WROUGHT.

Los aceros moldeados, son aquellos que resuelven el problema de elaboración de piezas de formas intrincadas. Por ej. coronas y piñones, válvulas de acero inoxidable destinado a servicios de alta temperatura en atmósferas corrosivas, rodillos de apoyo, etc.

## Calidad del acero

Los factores que determinan la calidad del acero, referidos a productos semielaborados (terminados en acerías y plantas de laminación o forja), son los siguientes:

### Composición química

Debe cumplir con la especificación de norma para análisis de colada y de comprobación. Sobre productos terminados se aplica el check análisis o análisis de comprobación.

En aceros estructurales, la composición química es indicativa. En cambio las propiedades mecánicas tienen carácter mandatorio (resistencia máxima, tensión de fluencia, porcentaje de alargamiento, resistencia al impacto, tenacidad a la fractura, etc.). En estos casos, la norma DIN 17100, da datos de especificación técnica de aceros estructurales, tanto en composición química como en propiedades mecánicas.

En aceros de construcción mecánica, la composición química es la principal propiedad. A partir de un nivel aceptable de composición química, es posible obtener propiedades tales como resistencia a la fatiga, a la torsión, etc., que son fundamentales en elementos de máquinas tales como palieres, rodamientos, ejes. El tratamiento térmico de temple y revenido es posible de ser ejecutado si el acero cumple con los requisitos de composición química. La norma SAE (Society of Automotive Engineers), especifica la composición química de aceros destinados a elementos de máquinas de la industria automotriz.

En aceros para herramientas, donde se requiere alta dureza, el análisis químico es el factor de mayor importancia. Se aplican las especificaciones de la norma AISI (American Iron and Steel Institute), en estos casos.

En aceros inoxidables, también resulta determinante el cumplimiento de normas y requisitos referidos a composición química. En aceros laminados se utiliza la norma AISI para. En cambio en aceros moldeados se emplea la especificación ACI (American Casting Institute)

### Grado de limpieza

En general este parámetro está relacionado con el contenido de inclusiones no metálicas de tipo óxidos, sulfuros, aluminatos y silicatos. Estas inclusiones se forman durante el proceso de aceración. La norma que indica niveles y la técnica de cuantificación es la ASTM E45. Tanto en serie fina como gruesa, en la actualidad se especifica nivel 2 máximo para componentes estándar y nivel 1 máximo para aceros destinados a altas exigencias en servicio (torsión, fatiga, impacto).

Dependiendo del tipo de proceso (por ej. horno eléctrico), hasta el año 1990, se aceptaban niveles 3. Actualmente incluso existen acerías que entregan productos con nivel 1 máximo, en serie fina y gruesa, como actitud competitiva y teniendo en cuenta el grado de responsabilidad del componente (por ej. rodamiento, palier, engranaje, etc.).

Por lo indicado, cuando el nivel de inclusiones no metálicas es elevado, se tienen valores de norma también elevados (por ej. nivel 3). En cambio en aceros de alta calidad, que implica que tienen un alto grado de limpieza (por ejemplo aceros elaborados en procesos de aceración secundaria como VAR o ESR), se obtienen niveles menores (por ejemplo nivel 1).

El grado de limpieza de un acero (en estado de producto terminado), incide en el comportamiento en servicio del componente.

### Nivel de impurezas

Las impurezas del acero son fósforo, azufre, silicio y manganeso. Si bien el aluminio no es una impureza, su presencia también genera presencia de compuestos nocivos, cuyo contenido debe ser controlado.

Las impurezas provienen de la materia prima que es el mineral de hierro. Por esta razón, los yacimientos de mayor valía son aquellos que contienen bajo azufre y fósforo. En cambio el manganeso y el silicio son elementos químicos que se encuentran presentes en grandes cantidades en la naturaleza, prácticamente en similares cantidades en todos los yacimientos.

Las impurezas en general son perjudiciales para las propiedades del acero. Por lo tanto se procura eliminarlas o reducir su contenido. Dado que resulta difícil su eliminación o demasiado costosa, se admite la presencia de estas impurezas en cantidades mínimas.

#### Fósforo

En normas se especifica 0,04% máximo. El fósforo resulta perjudicial para todas las propiedades del acero. Cuando se disuelve en la ferrita, endurece y en consecuencia disminuye la ductilidad (tenacidad). Por otra parte también forma FeP (fosfuro de hierro). El fosfuro de hierro, junto con la austenita y la cementita, forma un eutéctico ternario denominado esteadita, que es sumamente frágil y posee punto de fusión relativamente bajo, por lo cual aparece en bordes de grano, generando decohesión y fragilidad. Por ej. en un tubo de acero SAE 6150, se midió una resistencia al impacto de 42 J (joules), a 0 °C, con un contenido de 0.008 % de P. Para este mismo acero, con 0.035 % P, se obtuvo una resistencia al impacto de 3 J. Dado que se trata de la misma acería (planta de obtención de aceros), es interesante conocer como se obtiene un acero de bajo fósforo. El producto de aceración primaria (proceso Horno Eléctrico + Metalurgia en Cuchara), se trata mediante proceso de aceración secundaria (ESR o VAR). Otra alternativa puede ser la aplicación de procesos de aceración primaria mejorados.

En épocas pasadas se ha tratado de producir aceros con alto contenido de fósforo para lograr maquinabilidad. Dado que todas las propiedades resultan deterioradas (la resistencia a la corrosión, al impacto, a la fatiga, etc.), se ha abandonado esta práctica.

#### Azufre

En normas se especifica un límite máximo de 0,04%. El azufre con el hierro forma sulfuro de hierro el que conjuntamente con la austenita, da lugar a un eutéctico cuyo punto de fusión es bajo y que, por lo tanto, aparece en bordes de grano. Cuando los lingotes de acero colado deben ser laminados en caliente, ese eutéctico se encuentra en estado líquido, lo que provoca decohesión del acero.

Mediante el agregado de manganeso, se controla la presencia del sulfuro de hierro en el acero. El manganeso tiene mayor afinidad por el azufre que hierro por lo que en lugar de FeS, se forma MnS que tiene alto punto de fusión y buena plasticidad.



Inclusiones tipo SMn en aceros HSLA

El contenido de Mn debe ser aproximadamente 5 veces la concentración de S para que se produzca la reacción. Existen aceros resulfurados (con alto contenido de azufre), destinados a mejorar la maquinabilidad en operaciones de mecanizado. En estos casos se logra la formación de viruta discontinua, que contribuye a mantener el filo de las herramientas. Se debe tener en cuenta que en estos casos, el alto contenido de azufre deteriora otras propiedades del acero. Por ejemplo en uniones obtenidas por soldadura, genera porosidad.

#### Silicio

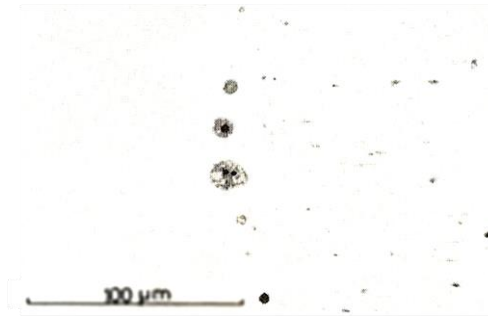
El silicio constituye un 28% de la corteza terrestre. No existe en estado libre elemental, sino que se encuentra en forma de dióxido de silicio y de silicatos complejos. Es un elemento que siempre está presente en los aceros. Como impureza su presencia está limitada a valores de 0.25-0.35 %.

En el proceso de aceración, el silicio se utiliza para el calmado.

La ventaja de empleo de silicio para el calmado del acero, es que no se taponan la buza de las cucharas de colada. El inconveniente reside en que en general el tamaño de grano tiende a ser grosero, lo que incide

en la calidad de los componentes laminados o forjados. En piezas sometidas a temple y revenido, la microestructura es de martensita gruesa, que es frágil.

La presencia de inclusiones no metálicas de tipo silicatos, también es perjudicial para las propiedades mecánicas del acero.



Silicato de calcio en acero estructural calmado al silicio

El silicio también se utiliza en proporciones de 2.5 a 4 %, en componentes destinados a la fabricación de chapas para núcleos de transformadores eléctricos, debido que esta aleación presenta baja histéresis magnética.

Existe una aleación de acero, el durirón, que contiene un 15% de silicio que es dura, frágil y resistente a la corrosión. El durirón se usa en equipos industriales que están en contacto con productos químicos corrosivos.

#### Manganeso

Es un elemento fundamental e indispensable del acero. Está presente en todas estas aleaciones. El Manganeso es un formador de austenita y al combinarse con el azufre previene la formación de sulfuro de hierro en bordes de grano.

El manganeso durante el proceso de aceración se utiliza como desoxidante.

Por solución sólida contribuye al endurecimiento del acero. Un caso especial es el Acero Hadfield (12 % Mn + 1 % C), donde el manganeso actúa como un fuerte endurecedor de la aleación y aumenta la velocidad de endurecimiento por deformación (por ej. cuando se somete a corte con sierra un componente de Acero Hadfield, rápidamente se endurece hasta impedir el corte).

Actualmente en aceros, contenidos menores de 0.4 % de Mn se consideran impurezas. Los contenidos mayores, son elementos de aleación que dan lugar a aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA). Cuando el contenido de Mn es mayor de 1 %, se generan las series SAE 13XX ó SAE 15XX. Un caso especial es el acero SAE 1541 (1.3 % Mn + 0.41 % C), destinado a palieres de transmisión pesada, cuyas propiedades finales se obtienen mediante aplicación de temple por inducción (la superficie del palier es dura, mientras que el núcleo es tenaz)

#### Aluminio

El aluminio es usado principalmente como desoxidante en la elaboración de acero. El Aluminio también reduce el crecimiento del grano al formar óxidos y nitruros.

#### Propiedades mecánicas

Las normas ASTM. en general contienen requisitos de propiedades mecánicas, dependiendo del uso final del semielaborado o del producto terminado.

Otras normas de extenso uso en el campo industrial son BS (British Standard), DIN (Deutsches Institut für Normung), ISO (International Organization for Standardization).

En cuanto a niveles de propiedades mecánicas, dado que en general se utilizan aceros especificados en normas, se deben aplicar procesos (por ej. tratamientos termoquímicos) y operaciones (rectificado o pulido), de manera de preservar valores preestablecidos.

En el caso de piezas terminadas, la dureza resulta ser un dato de gran ayuda dado que indica el nivel de propiedades mecánicas del componente como dato cualitativo.

#### Calidad superficial

Cuando este requisito se aplica a productos semielaborados, implica que se tiene en cuenta el uso final. Por ejemplo en chapas laminadas en frío, se especifica la rugosidad y planaridad.

En barras destinadas a elementos de máquinas, mediante aplicación de trefilado y enderezado se pueden lograr altos niveles de calidad superficial, de tipo bruñido o lapidado. También se emplean barras con superficies rectificadas.

Existen casos en que conjuntamente con la calidad superficial se exigen un cierto grado de rectitud. Esto se logra mediante el empleo de máquinas enderezadoras. Se debe tener en cuenta la incorporación de energía de deformación que puede modificar el nivel de propiedades mecánicas.

Una operación de alta responsabilidad es el corte de las barras, perfiles o planos. Se debe seleccionar el método de corte a fin de evitar endurecimiento. En casos de aceros destinados a temple y revenido, esto puede ser tan perjudicial que termine inutilizando el uso de estos productos. Para este caso se recomienda el uso de discos de corte de muy baja dureza, de manera que no sobrecaliente la zona de corte. En caso contrario se pueden generar microestructuras frágiles (martensitas).

#### Tamaño de grano

En general se requiere que los aceros tengan grano fino y homogéneo. En esto es de gran ayuda la aplicación de la norma ASTM E112. La escala que especifica esta norma da índices que van de 1 (grano grueso) a 8 (grano fino).

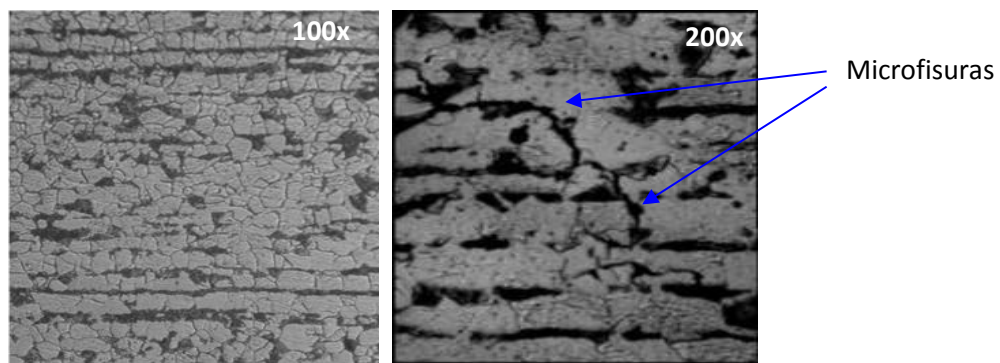
La uniformidad de grano se determina mediante observación directa en microscopio a aumentos de 100x. En ningún caso es conveniente la presencia de granos dúplex y menos si hay grandes diferencias de tamaños de grano.

Por ejemplo en aceros de construcción mecánica (piezas sometidas a tratamientos térmicos de temple y revenido), los granos gruesos tienden a dar martensita grosera, que es más frágil que una martensita fina. En esas condiciones la pieza en servicio tiende a fracturarse más rápidamente que un acero de grano fino. El mismo problema se presenta en casos de resistencia a la fatiga.

En consecuencia, el tamaño de grano y homogeneidad de este parámetro se debe especificar en función de las aplicaciones del acero.

#### Calidad de la microestructura

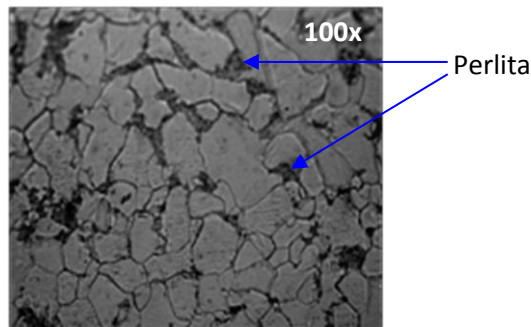
Uno de los problemas sumamente perjudiciales para las propiedades del acero es la presencia de microestructura en banda.



Microfisuras en bandas de segregación de perlita

Pueden darse casos críticos que producen microfisuras. En esta situación, el acero no soporta solicitaciones mecánicas por lo que aparecen fallas prematuras que inutilizan el componente.

Dado que la perlita está formada por 11 % de cementita (6.67 % C) y 89 % de ferrita  $\alpha$  (0.02 % C), es importante la obtención de microestructuras exentas de bandas de segregación.



Acero 0.15 % C sin bandas de segregación

Otro factor de importancia es la presencia de tamaño de grano homogéneo. Existen casos en que se acepta grano dúplex, siempre y cuando esto corresponda a números consecutivos. Por ej. tamaño de grano ASTM 7/8.

Otros factores que definen la calidad del acero

- Nivel de defectos superficiales (se evalúa con END, ensayos no destructivos)
- Grado de decarburación (los procesos de calentamiento para laminación generan pérdida de carbono en la superficie, lo que puede resultar perjudicial cuando se requieren piezas con alta dureza de temple). En estos casos es importante el control de las atmósferas de calentamiento, de manera que no sean altamente oxidantes.
- Nivel de defectos internos (se controla con END)
- Contenido de gases (por ejemplo en la actualidad se exige un valor de 1 ppm de hidrógeno en piezas forjadas de responsabilidad).
- Homogeneidad química. Naturalmente los productos contienen segregación de elementos químicos. Dependiendo del grado de responsabilidad del producto, a veces es necesario aplicar procesos de aceración secundaria como VAR o ESR para lograr homogeneidad química longitudinal y transversal.

Especificación técnica

Los parámetros que definen la calidad de un producto (semielaborado), se indican en un documento denominado especificación técnica.

Este tipo de documentos tiene carácter de contrato, dado que los que se acuerda entre fabricante y usuario, requiere su estricto cumplimiento. En general, cualquier requisito más exigente que los dispuesto en normas, por ejemplo un menor contenido de impurezas, un menor nivel de defectos superficiales, etc., debe ser incluido en una especificación técnica. Incluso es recomendable insertar en este documento propiedades del estándar de fabricación fijadas por normas, de manera que no queden aspectos fundamentales sin consignar.

Es una práctica habitual adjuntar la especificación técnica al orden de compra. En este sentido, la especificación técnica es un documento que hace a la parte productiva, mientras que la orden de compra es más bien un documento administrativo.

## 4 - Tecnología de elaboración

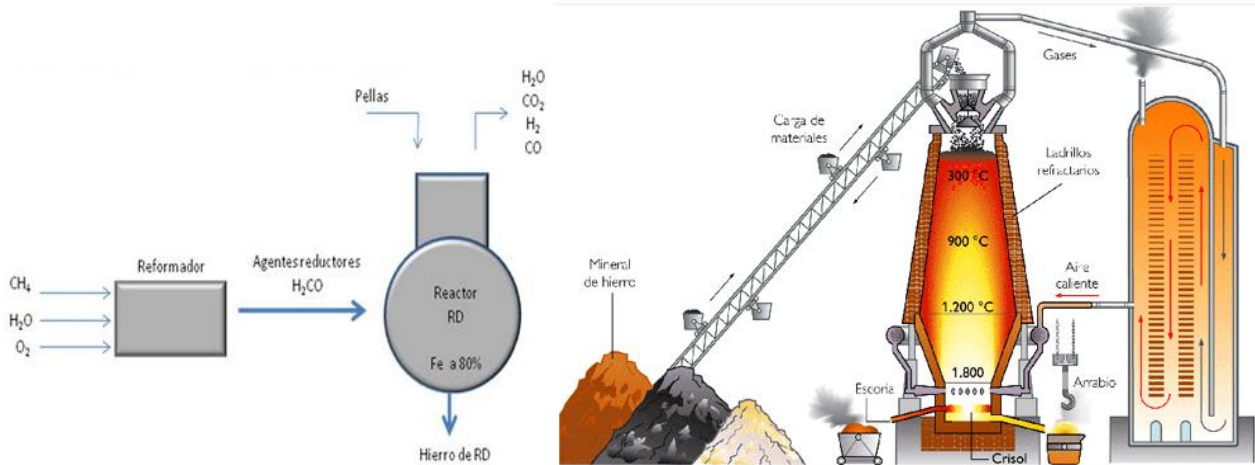
Hierro y acero

El hierro es uno de los metales más abundantes (% de la superficie terrestre). La explotación principal es bajo la forma de óxidos. La producción de hierro y acero es rentable con minerales con leyes superiores a 65 %. El mineral se comercializa calibrado (seleccionado granulométricamente). En casos de baja ley, se fabrican pellets (esferitas), con mineral pulverulento de hierro y bentonita como aglomerante.

El consumo anual es de  $1000 \times 10^6$  tns/año. Las reservas mundiales se estiman en  $300000 \times 10^6$  tns.



Principales países con reservas de mineral de hierro: Brasil, Australia, India, China, Sudáfrica. El mineral se procesa en el alto horno (reducción) o procesos de reducción directa (por ej. Midrex). Los elementos nocivos que pasan al producto (arrabio), son P y S. En el caso del P un tenor ideal es 0.15 %.



Esquema de proceso RD y alto horno

Niveles de producción

Producción mundial 2010: 1600 millones de toneladas de acero

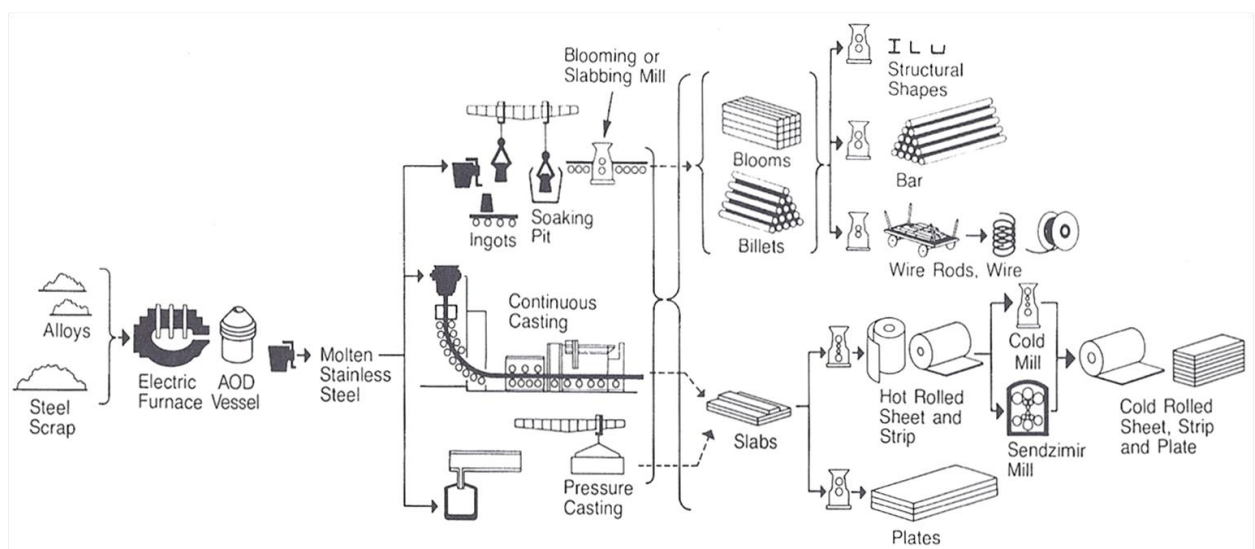
Consumo: 127 kg/habitante; Precio por kg (aprox.): U\$ 0.30

Principales productores (millones tns/año)

- 1 - China 200
- 2 - Estados Unidos 160
- 3 - Japón 160
- 4 - Alemania 67
- 5 - Rusia 60
- 6 - Corea del Sur 60
- 7 - Italia 39
- 8 - Brasil 37; 16 - México 20; 28 - Argentina 5

La producción de América Latina es de 78 millones de tns/año (6.8 % de la producción mundial).

Procesos de elaboración del acero



Horno Eléctrico ó AOD-Colada continua-Laminación-Terminado



## Procesos de aceración primaria

Los aceros estructurales en general se elaboran mediante convertidores AOD + colada continua + laminación

Para la elaboración de los aceros de construcción mecánica se aplica:

- Proceso de Horno Eléctrico + Metalurgia Secundaria + Laminación (forja) + Tratamientos térmicos
- Proceso AOD + Metalurgia Secundaria + Laminación (forja) + Tratamientos térmicos

En casos de grandes piezas de construcción mecánica (ejes de rotores de turbina, blocks de motores, pistas de rodamientos, etc.), también se aplica adicionalmente procesos de aceración secundaria como ESR o VAR.

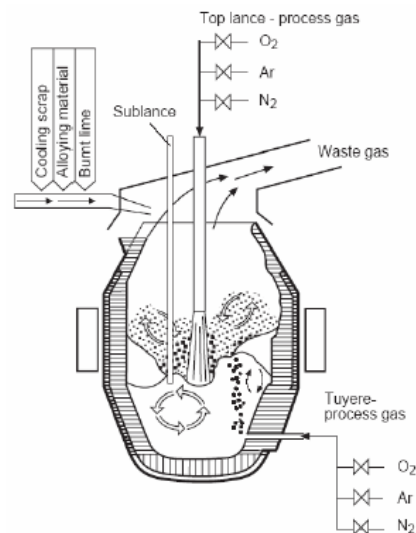
Los aceros inoxidables se producen mediante procesos de AOD + Metalurgia Secundaria + Laminación + Tratamientos térmicos.

Los aceros para herramientas se pueden producir con alguna de las siguientes alternativas:

- Proceso Horno Eléctrico o AOD + Metalurgia Secundaria + ESR + Forja + Tratamientos térmicos
- Proceso ASEA-STORA (pulvimetalurgia) – HIP (prensado isostático en caliente) + Tratamientos térmicos

## Proceso AOD

Fusión y afino

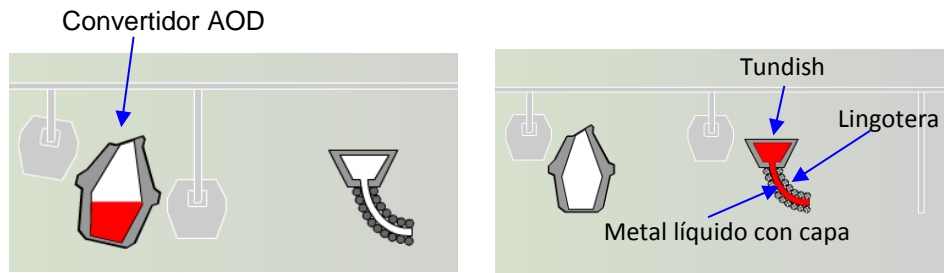


Esquema proceso AOD (argon-oxygen-decarburization)

Se inyecta oxígeno a alta presión. El oxígeno se combina con las impurezas. Con P, S, C, Si genera calor, dando lugar a la formación de óxidos. Elimina las impurezas del Cr, Mo, Ni, V, W, Nb, etc. Los compuestos resultantes de estas reacciones pasan a la escoria (compuesto de menor densidad que el acero líquido) y por lo tanto flotan. El argón que es un gas inerte, genera un barrido tal que contribuye al transporte de impurezas hacia la superficie. El producto resultante es un acero de alta pureza en cuanto a P, S, Si y Mn, con un tenor de alrededor de 0.02 % de C (incluso puede ser menor). Por esta causa en general es necesario recarburar.

En cuanto a los elementos de aleación Cr, Mo, Ni, Mn, W, Nb, etc., no es necesario disponer de materiales de alta pureza cuando se aplica proceso AOD. Esta es una ventaja tecnológica que no se dispone con otros procesos de aceración.

Por lo indicado el AOD es el proceso que más ha evolucionado tecnológicamente. En consecuencia la mayoría de los aceros se puede obtener en este tipo de convertidores. Dada su importancia, a continuación se presenta el esquema de este proceso para la fabricación de aceros inoxidables austeníticos extra bajo carbono (que tiene las variantes pertinentes para la elaboración de otros tipos de aceros).



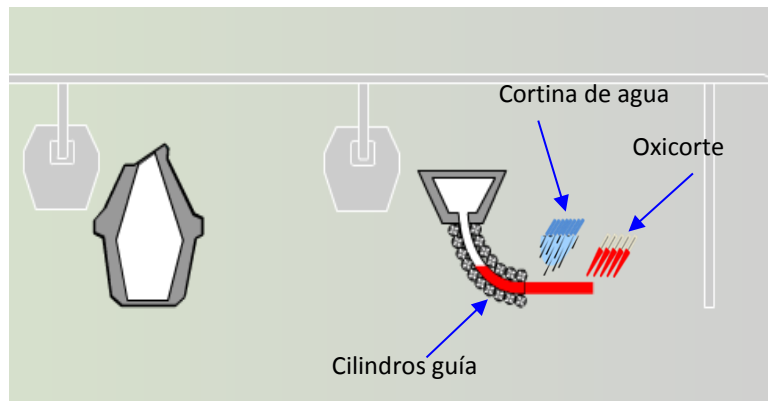
Proceso en convertidor AOD (Transferencia de acero líquido).  
Solidificación del acero en lingotera de cobre refrigerada con agua.

**Solidificación**

Es el paso del acero líquido a desbastes. El acero líquido de la cuchara de transferencia se vierte en un recipiente llamado tundish.

**Colada continua de desbastes**

El tundish , gradúa el metal líquido que pasa a una lingotera de cobre refrigerada, de manera que con el contacto, el metal líquido se solidifica en una capa de su superficie. El acero baja por gravedad y por la presión del metal líquido.

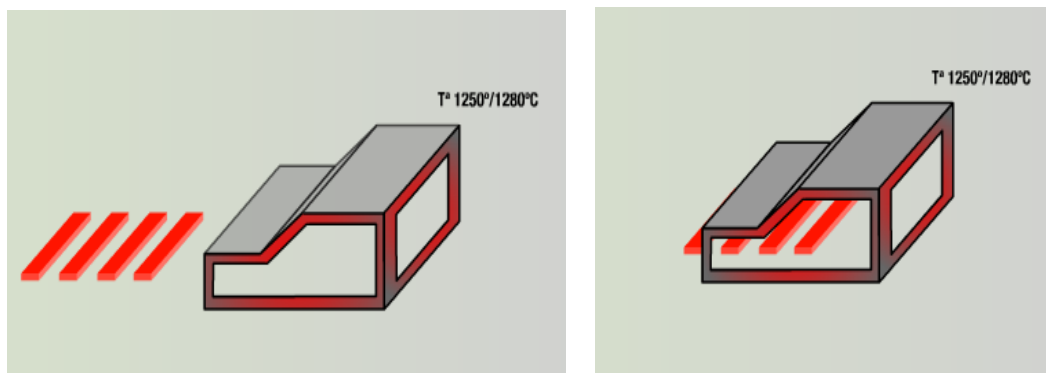


Solidificación y corte del desbaste

Para la obtención de desbastes, el acero líquido es guiado por cilindros y sometido a una cortina de agua que produce la solidificación de la parte interior. Una vez solidificada, esta línea continua se corta mediante proceso de oxicorte, obteniendo así el desbaste.

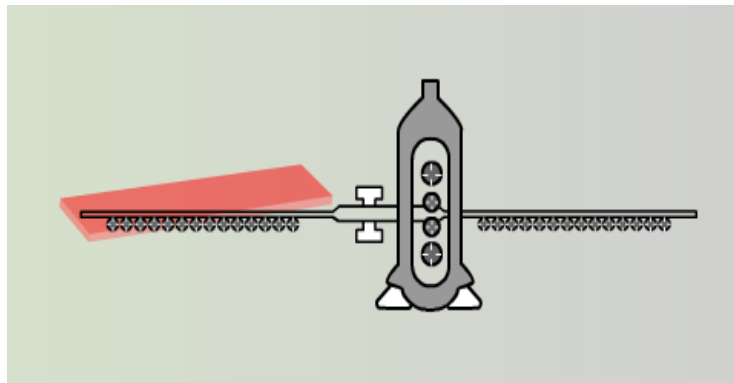
**Laminación en caliente**

Los desbastes esmerilados se introducen en un horno de precalentamiento de vigas galopantes y se llevan a la temperatura de laminación de 1250 – 1280 °C. (Ver figura).



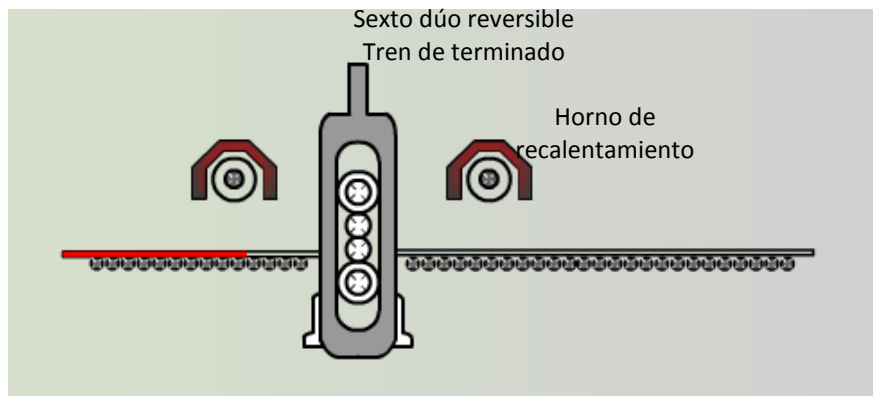
Carga de desbastes a horno de precalentamiento

Una vez homogeneizadas las temperaturas del núcleo y la superficie del desbaste, se trasladan por camino de rodillos al tren desbastador.



Transferencia de desbastes a tren de laminación

Laminación en caliente. Hasta 5 mm de espesor

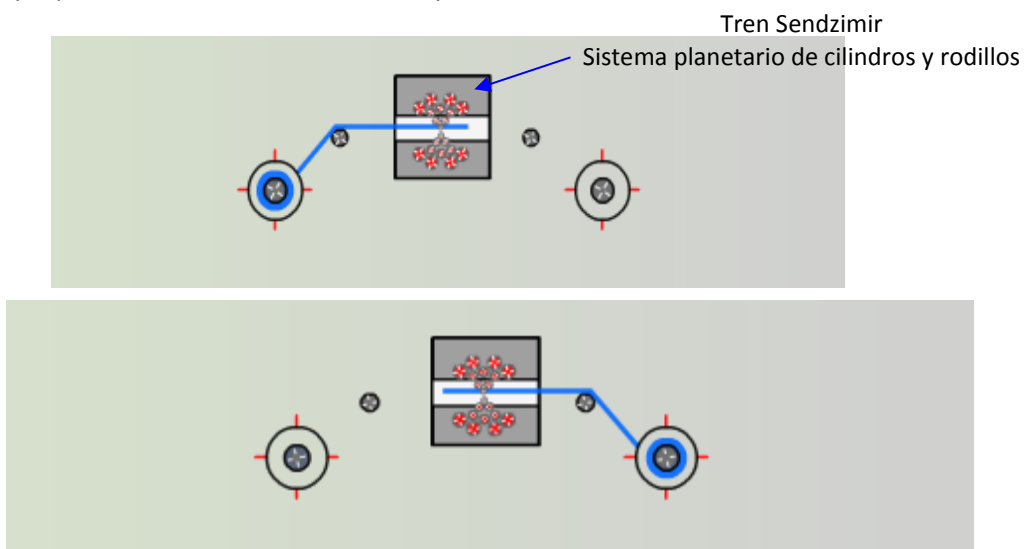


Tren de laminación en caliente

Tren de laminación en frío (Sendzimir)

El objeto de esta operación (Ver figura), es reducir el espesor de la plancha de manera que se obtenga un espesor de 0.28 a 6 mm

Después de la laminación en frío es necesario restablecer las condiciones mecánicas iniciales mediante recocido ya que el material se encuentra muy endurecido.



Tren de laminación en frío Sendzimir

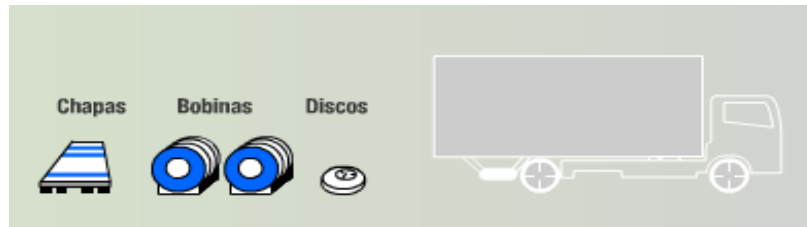
### Sector terminado

Se utiliza un tren de temple Skin-pass (laminación de pasada final). Se trata de un tren dúo en el que se consigue la calidad superficial y planaridad de la chapa de acero inoxidable austenítico.

Se obtiene el terminado mate y brillante.

### Corte y embalaje

El corte puede ser longitudinal, transversal, discos o formatos. En la Figura 3.19, se presenta un esquema del sector expedición.



Corte, embalaje y expedición

## 5 - Aceros estructurales

### Introducción

Los aceros estructurales constituyen el grupo de aceros producido en mayor tonelaje en todo el mundo. La cantidad de acero utilizado para la construcción de las grandes estructuras es muy elevada (por ejemplo para una plataforma de explotación petrolera offshore de gran tamaño se necesitan unas 40.000 tns de acero) y normalmente constituye un porcentaje importante del costo total de las mismas. El creciente tamaño de varios tipos de estructuras junto con condiciones de servicio de creciente severidad, imponen requerimientos cada vez más exigentes para estos aceros.

Los aceros estructurales se utilizan en construcción de:

- Obras de ingeniería civil (edificios, puentes, represas y estructuras de hormigón armado en general).
- Grandes estructuras marinas (cascos de barcos, estructuras offshore).
- Cañerías de conducción de gas y petróleo (pipelines).
- Recipientes a presión.
- Tanques de almacenamiento.
- Vehículos (bastidores y chasis de transporte pesado, maquinaria de minería y remoción de tierra).
- Tuberías.

Como puede inferirse, estos aceros están involucrados en una amplia gama de tipos de industrias lo que justifica su gran importancia en el campo tecnológico.

### Requerimientos generales

Si bien cada uno de los tipos de las estructuras citados precedentemente presenta particularidades que hacen que los requerimientos técnicos exigidos sobre estos aceros no sean los mismos, existen algunos que son comunes a todas las aplicaciones de aceros estructurales:

- Alta tensión de fluencia ( $R_{p0,2}$ ). Esto tiende a reducir la cantidad de material lo que contribuye reducir la cantidad de acero de las estructuras y facilita el transporte y montaje de la estructura.
- Alta tenacidad (es importante en prevención de fallas frágiles catastróficas).
- Buena soldabilidad (bajo Carbono y Carbono equivalente, disminución del contenido y longitud de las inclusiones alargadas para prevenir el desgarramiento laminar).
- Alta conformabilidad (por ej. en casos de necesidad de estampado profundo de piezas tales como capots y puertas de vehículos).
- Bajo costo (dado que es elevada la incidencia del costo del material en el costo total de las estructuras).

### Principios de diseño de aceros estructurales.

De acuerdo a los requerimientos generales se deduce que los mecanismos de endurecimiento mediante los que se trata de obtener la resistencia mecánica adecuada, están condicionados por la necesidad de

una alta soldabilidad y tenacidad. Rigen entonces los siguientes principios básicos en la elaboración de estos aceros:

- Se requiere bajo carbono para lograr alta tenacidad, soldabilidad y conformabilidad
- Se busca la obtención de resistencia mecánica mediante el mecanismo de endurecimiento por reducción de tamaño de grano, de manera de no afectar la tenacidad ni la soldabilidad
- Se trata de minimizar la cantidad de aleantes y evitar la aplicación de tratamientos térmicos para lograr las propiedades

A partir de la ecuación de Hall-Petch y de numerosos estudios cuantitativos que trataron de relacionar los parámetros microestructurales con las propiedades mecánicas, se ha llegado a una serie de ecuaciones de relación microestructura-propiedades que son válidas dentro de ciertos rangos de composición y para ciertas microestructuras básicas. Para el caso de aceros al C y al C-Mn de menos de 0,25 %C y estructuras ferrítico-perlíticas se tiene las siguientes ecuaciones empíricas:

$$R_{p0,2} [\text{MPa}] = 15,4 [3,5 + 2,1 (\text{Mn}) + 5,4 (\text{Si}) + 23 (\text{N}_s)^{1/2} + 1,13 d^{-1/2}]$$

$$R_m [\text{MPa}] = 15,4 [19,1 + 1,8 (\text{Mn}) + 5,4 (\text{Si}) + 0,25 (\% \text{Perlita}) + 0,5 d^{-1/2}]$$

$$T \text{ de transición } (^\circ\text{C}) = -19 + 44 (\text{Si}) + 700 (\text{N}_s)^{1/2} + 2,2 (\% \text{Perlita}) - 11,5 d^{-1/2}$$

$$\epsilon_u = 0,28 - 0,2(\text{C}) - 0,25 (\text{Mn}) - 0,044 (\text{Si}) - 0,039 (\text{Sn}) - 1,2 (\text{N}_s)$$

d: tamaño de grano ferrítico en mm

N<sub>s</sub>: % en peso de N en solución

ε<sub>u</sub>: alargamiento porcentual uniforme

Como puede verse la perlita no tiene incidencia sobre la tensión de fluencia en este rango de C, en cambio tiene una fuerte influencia negativa sobre la tenacidad pues aumenta mucho la temperatura de transición dúctil-frágil. Por otra parte el C tiene un efecto muy adverso sobre la soldabilidad pues aumenta los riesgos de la fisuración en frío en la soldadura.

De lo anterior se deduce que los aceros estructurales deben tener bajo C. En los aceros estructurales modernos rara vez se supera el 0,15% y en muchos es bastante menor. La tendencia permanente es bajar cada vez más el C y esto requiere de procesos de acería y refinación secundaria que son complejos y costosos.

Un acero de bajo carbono debe tener una microestructura de grano fino, con ferrita-perlita, que impulsen un estado de ductilidad y tenacidad en los productos. En consecuencia se deben buscar mecanismos que permitan mejorar la resistencia mecánica, sin desmedro de la tenacidad y la ductilidad. El único mecanismo de endurecimiento que no afecta la tenacidad es el refinamiento de grano. Para estos casos, se agregan algunos elementos de aleación (aleantes), que permitan obtener un grano primario de austenita fino y consecuentemente una microestructura final ferrítica también de grano fino. Estos aceros se conocen como "aceros microaleados HSLA", porque los aleantes se encuentran en bajísimas proporciones y por sus características de alta resistencia (High Strength Low Alloy). En la mayor parte de los casos estos aleantes también producen endurecimiento por precipitación.

Cuando los valores de resistencia que se consiguen con el mecanismo de obtención de grano fino no son suficientes, se suele recurrir a endurecimiento por solución sólida sustitucional (se utiliza principalmente manganeso). De esta manera se resuelve de paso el problema de la soldabilidad.

Los niveles de resistencia de los aceros estructurales varían entre 370 MPa y 750 MPa de tensión de fluencia, dependiendo de los espesores.

### Clasificación de aceros estructurales

Existen diferentes tipos de clasificaciones. Por ejemplo una se refiere al tipo de aplicación (aceros para recipientes a presión, aceros para plataformas marinas, etc.). Las normas ASTM utilizan este criterio. Así se tienen los siguientes casos entre los más importantes:

ASTM A 36 – Carbon Structural Steel

ASTM A 242 – High-Strength Low-Alloy Structural Steel

ASTM A 515 – Pressure Vessel Plates, Carbon Steel, for intermediate- and Higher-Temperature Service

ASTM A 106 – Seamless Carbon Steel Pipe for High-Temperature Service

ASTM A 563 – Carbon and Alloy Steel Nuts

ASTM A 668 – Steel Forgings, Carbon and Alloy, for General Industrial Use

También existen normas API (American Petroleum Institute), tales como:

API 5L – Specification for Pipe Line

API 12B – Specification for Bolted Tanks for Storage of Production Liquids

El Código ASME, las normas DIN, JIS, etc., contienen normas que especifican propiedades de aceros estructurales.

Clasificación

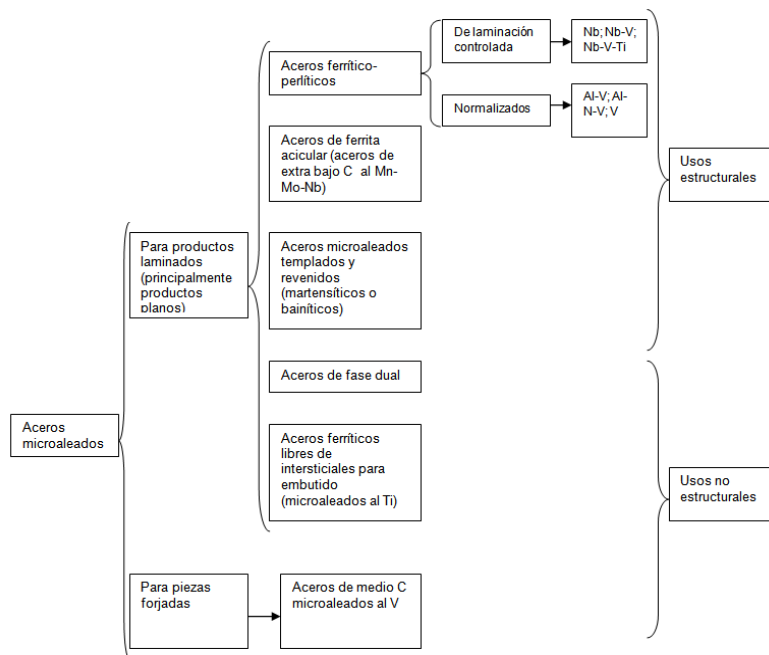
Según el criterio adoptado por la tecnología, se tienen las siguientes clases de aceros estructurales:

- Aceros al C: La microestructura es de tipo ferrítico-perlítica. se usan en estado laminado y son los de menor resistencia mecánica. La tensión de fluencia no supera los 270 MPa y este grupo no entra dentro de los llamados aceros estructurales de "alta resistencia". El ejemplo más común es el de los aceros que responden a la norma ASTM A-36.

- Aceros al C-Mn: misma estructura y estado que los del grupo anterior solo que el mayor porcentaje de Mn hace que se pueda lograr una mayor resistencia. Tensiones de fluencia mínimas entre 275 y 350 MPa.

- Aceros microaleados: son aceros al C-Mn a los que se adiciona pequeñas cantidades de elementos formadores de carburos, nitruros o carbonitruros (Nb, V, Ti), con el objeto de refinar el tamaño de grano de la estructura y para lograr endurecimiento por precipitación. Existen algunos (como los aceros de ferrita acicular) en los que se agrega además algunos otros aleantes que modifican las curvas de transformación. Se usan en estado normalizado o de laminado controlado. Las tensiones de fluencia van desde 350 hasta 690 MPa.

En La siguiente figura se presentan las clases de aceros microaleados existentes. Algunos de ellos no tienen uso estructural sino que su composición y/o tratamiento han sido optimizados para mejorar la conformabilidad en operaciones como el estampado profundo.



Clases de aceros microaleados

Si bien el efecto y uso más conocido y explotado de los microaleantes es como refinadores de la estructura y endurecedores por precipitación cuando se los combina con un adecuado procesamiento sobre el acero, y además este es el aspecto que se tratará en este curso, cabe destacar que su poder de formación de diferentes compuestos (carburos, nitruros, carbonitruros, y en algunos casos también óxidos, sulfuros y carbosulfuros) hace que puedan usarse para producir por ejemplo aceros de muy bajo C donde el N y el C quedan retenidos en los nitruros o carbonitruros, estos aceros se denominan libres de intersticiales (interstitials free) y poseen una excelente conformabilidad en operaciones exigentes como el embutido profundo.

Métodos de refinamiento del tamaño de grano

El refinamiento de grano es un mecanismo fundamental en aceros microaleados. Para lograr un tamaño de grano fino en la estructura final se necesita primero lograr refinar la estructura matriz o sea la austenita.

El refinamiento del tamaño de grano austenítico puede lograrse de dos formas diferentes.

#### Normalizado

El refinamiento de grano se genera a partir del retraso del crecimiento de grano por la acción de los precipitados (AlN, VN, NbCN, TiN). Si se logra retener una distribución fina y homogénea de precipitados a las temperaturas del normalizado, se puede controlar el tamaño de grano de la austenita. Estos precipitados anclan los bordes de grano y generan una fuerza de anclaje que se opone a la fuerza impulsora que tiende a hacer crecer el tamaño de grano. La fuerza de anclaje o restricción al crecimiento depende del tamaño y fracción en volumen de estos precipitados, como así también del grado de inhomogeneidad del tamaño de grano austenítico.

La efectividad de cada uno de los elementos que se adicionan con el fin de mantener fino el tamaño de grano austenítico depende principalmente de su solubilidad a la temperatura del normalizado y de sus características de coalescencia.

El efecto refinador de cualquier normalizado se basa en las transformaciones de fase que operan tanto al calentar el acero como al enfriarlo. Cada una de estas transformaciones es una oportunidad para el refinamiento si se eligen adecuadamente los parámetros del tratamiento. Para que este refinamiento no sea contrabalanceado por el natural crecimiento de grano de la austenita durante su mantención a alta temperatura, es imprescindible que actúe algún mecanismo que se oponga a la fuerza impulsora para el crecimiento de los granos. El método más efectivo para lograr esto es la presencia de una dispersión homogénea de partículas finas que sean estables a las temperaturas de normalizado.

Los microaleantes son fuertes formadores de carburos, nitruros, o carbonitruros y dependiendo de la historia termomecánica del acero, estas fases aparecen como dispersiones finas más o menos homogéneas que pueden retenerse a las temperaturas del normalizado con lo que controlan el tamaño de grano austenítico.

Uno de los modelos más aceptados que cuantifican este control en el tamaño de grano es el de Gladman. Igualando la fuerza de anclaje que ejercen los precipitados con la fuerza impulsora para el crecimiento de grano llega a la siguiente ecuación:

$$r_{\text{crit}} = (6R_0 f / \pi) / ((3/2) - 2/Z)$$

$r_{\text{crit}}$  es el tamaño de partícula crítico que al ser superado permite el desanclaje del borde de grano y el crecimiento correspondiente del grano. Para este tamaño crítico, la fuerza de anclaje iguala a la fuerza impulsora para el movimiento del borde de grano, si las partículas crecen por sobre este tamaño entonces la fuerza de anclaje es superada y el grano crece.

$f$  es la fracción en volumen de segundas fases

$R_0$  es el radio de los granos de la matriz

$Z$  es la relación entre el radio del grano que crece y los granos de la matriz

Los investigadores han determinado que un valor adecuado para  $Z$  es 1,5 para la mayoría de las estructuras de grano ferrítico poligonal.

En el tratamiento de normalizado de los aceros microaleados, los precipitados disueltos pueden volver a precipitar durante la transformación de la austenita generando endurecimiento por precipitación cuya magnitud dependerá de la fracción en volumen precipitada, del tamaño de los precipitados, y de las características de la interfase precipitado/matriz. A mayor solubilidad de los precipitados, mayor será la fracción solubilizada para una dada temperatura de normalizado y mayor el endurecimiento por precipitación posterior.

También es importante la relación estequiométrica del compuesto formado, ya que la máxima dependencia de la solubilidad con la temperatura (lo que asegura una mayor fracción de precipitados finos), se da para la composición estequiométrica.

Todos estos conceptos ayudan a entender el efecto de los diferentes microaleantes usados en los aceros normalizados:

Aluminio: Forma AlN que es bastante soluble en la austenita y por lo tanto solo logra el control del tamaño de grano hasta unos 1050 a 1100°C. Obviamente la temperatura de coalescencia y la de solubilización dependerán del contenido de Al y de N, pero el rango anterior es bastante representativo

para las cantidades usuales de estos dos elementos en los aceros. El AlN no genera mucho endurecimiento por precipitación cuando se solubiliza, al parecer esto se debe a que precipita en forma no muy fina y preferentemente en los bordes de grano. A diferencia de otros precipitados como el carbonitruro de Nb o el carburo de V, no se produce la llamada precipitación de interfase que genera hileras de finos precipitados durante la transformación de austenita a ferrita y que ocasiona un endurecimiento por precipitación importante.

En cambio, el AlN retiene el N y esto, junto con el refinamiento de grano logrado, hace descender la temperatura de transición. Por supuesto que si la cantidad de Al del acero es muy superior a la necesaria para fijar el N, la temperatura de transición vuelve a subir debido al efecto del Al en solución sólida.

Vanadio: Forma un carburo y un nitruro, ambos relativamente solubles en la austenita por lo que su poder refinador es similar al del Al. En cambio es un potente endurecedor por precipitación y es el principal elemento endurecedor en los aceros microaleados normalizados.

El efecto sobre la temperatura de transición resulta de la competencia entre el poder refinador, el endurecimiento por precipitación y la extracción del N en solución cuando forma el nitruro.

Niobio: Forma carburos y carbonitruros que son poco solubles en la austenita. En consecuencia puede controlar muy bien el tamaño de grano durante el normalizado pero no es endurecedor por precipitación pues no se solubiliza durante este tratamiento.

Titanio: Su comportamiento en el normalizado es similar al del Nb. El Ti tiene una ventaja adicional pues es también un controlador de forma de inclusiones, sin embargo su adición debe ser efectuada cuando el acero ha sido fuertemente desoxidado pues tiene una alta afinidad con el oxígeno.

Si bien en los aceros microaleados normalizados no se alcanzan niveles de resistencia mecánica tan altos como en los procesados mediante la laminación controlada a igualdad de C equivalente, los aceros normalizados tienen menos limitación de espesor para conseguir una determinada resistencia mecánica. Esto tiene gran importancia en algunas aplicaciones como chapas para grandes recipientes a presión, chapas navales o chapas para construcción civil. En estos casos se necesitan espesores que están fuera del alcance de lo que se obtiene por laminación controlada.

### Laminación controlada

En este tipo de proceso el refinamiento de grano depende del retraso de la recrystalización y del crecimiento de grano de la austenita por efecto de los precipitados de microaleantes y de su presencia en solución. Los precipitados finos pueden retrasar la recrystalización bajo determinadas condiciones, esto hace que se pueda obtener un grano austenítico fino y no recrystalizado que provee muchos sitios de nucleación para la ferrita que aparecerá posteriormente.

### Refinamiento del tamaño de grano ferrítico

Una vez refinado el tamaño de grano austenítico puede lograrse una refinación posterior si se controla la temperatura de transformación de la austenita. El descenso de la temperatura de transformación se obtiene mediante el aumento de la velocidad de enfriamiento y/o por adición de aleantes como el Mn. Esta temperatura de transformación determina el tipo de estructura final (ferrítica, ferrítica-perlítica, bainítica) y su nivel de refinamiento. Si se desea una estructura ferrítico-perlítica debe cuidarse de combinar adecuadamente el nivel y tipo de aleantes con la velocidad de enfriamiento de modo de que no aparezcan microestructuras no deseadas.

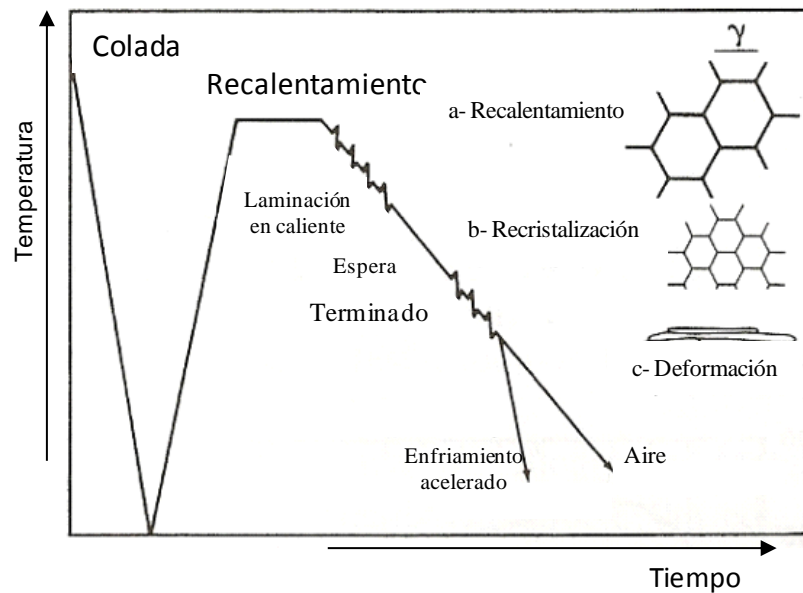
La laminación es el proceso de conformado más usado en la industria del acero. En la laminación, el lingote (o un producto intermedio que recibe diferentes nombres de acuerdo a su forma) se somete a la acción de las tensiones de compresión que generan los cilindros laminadores entre los que se obliga a pasar al mismo, esto produce una reducción en el espesor del producto y un aumento en su longitud. Esta reducción es un parámetro muy importante pues determina, desde el punto de vista del acero procesado, la deformación que éste recibe; y desde el punto de vista de los cilindros y los motores que los impulsan, las cargas que reciben y la potencia necesaria para el proceso.

La laminación se puede realizar tanto en frío como en caliente. En general, la reducción total del espesor desde el producto del cual se parte hasta el producto final se efectúa en varios pasos cada uno de los cuales se denomina pasada de laminación.

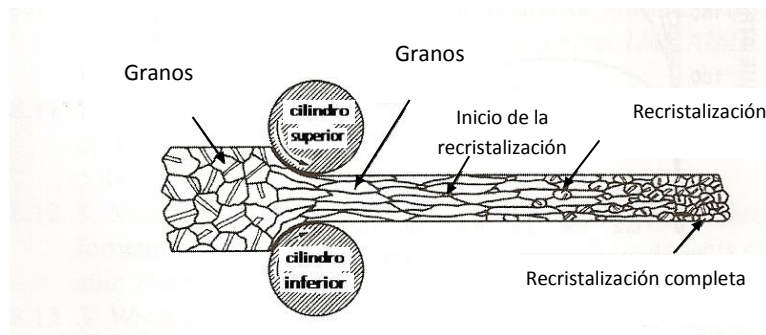
En la laminación en caliente convencional (Ver Figura), los parámetros del proceso se eligen de modo de llegar a las dimensiones del producto final requerido en forma compatible con la potencia y resistencia



de los equipos disponibles; en otras palabras, el diseño del esquema de una laminación convencional obedece a cuestiones principalmente geométricas limitadas por la potencia y resistencia de los equipos disponibles.



Cambios de estado de la austenita durante la laminación en caliente



Esquema de recristalización de la austenita durante la laminación en caliente de aceros estructurales

Por el contrario, en un esquema de laminación controlada, además de dar forma adecuada al producto metalúrgico (en general se trata de un producto plano como chapa o fleje, aunque también se puede aplicar a otro tipo de productos como tubos), se eligen los parámetros de laminación (temperatura inicial, distribución de pasadas, temperatura de pasadas, reducción por pasada, y enfriamiento final) de modo de lograr un refinamiento sustancial en la estructura del acero. Para el caso de aceros microaleados se puede obtener además cierto endurecimiento por precipitación sin la necesidad de un tratamiento térmico posterior.

La mayoría de los aceros laminados en forma controlada se usan en estado laminado y en eso reside en parte su gran ventaja económica.

Un proceso de laminación controlada consta en general de:

- Elección adecuada de la composición química (C, aleantes y microaleantes)
- Elección de la temperatura de solubilización para comenzar la laminación (solubilización de los precipitados).
- Deformación en el rango de recristalización para lograr refinamiento por deformación y recristalización repetidas.
- Deformación en el rango de no recristalización para lograr un grano austenítico deformado con abundantes sitios de nucleación para la ferrita (este paso es opcional).
- Deformación en el rango bifásico  $\alpha+\gamma$  (esto es opcional).
- Deformación en el rango ferrítico (esto es opcional)

- Enfriamiento adecuado para controlar la temperatura de transformación de la austenita (y por lo tanto el tamaño microestructural y el tipo de producto que se obtendrá) y la precipitación de las partículas que endurecen.

Afortunadamente varios de estos puntos tienen efectos que si bien no son totalmente equivalentes, son parecidos cualitativamente y por lo tanto, para lograr una cierta combinación de propiedades finales en el acero, puede haber múltiples combinaciones de estas etapas que den resultados casi idénticos. En otras palabras, dependiendo del tipo de producto a obtener (chapas, flejes, tubos, etc.) y de las disponibilidades que existan en la planta laminadora (capacidad y distribución de los equipos, condiciones de operación, etc.) se podrá elegir el proceso de laminación controlada más conveniente. Esto hace que el proceso sea muy versátil.

### Procesos de restauración estáticos y dinámicos durante la laminación en caliente

Hay dos clases de procesos de restauración de propiedades asociados con el trabajado en caliente:

Procesos dinámicos y procesos estáticos.

Los procesos de restauración se denominan estáticos cuando ocurren luego de que el material ha sido deformado. En cambio en los procesos dinámicos la restauración de las propiedades ocurre concurrentemente con la deformación.

En cualquiera de los dos casos existen dos tipos de procesos, la recuperación y la recristalización.

Para que exista recristalización estática se debe superar cierta deformación mínima llamada deformación crítica. En forma similar, para que ocurra una recristalización dinámica también debe superarse cierta deformación crítica que depende fuertemente de la temperatura de la velocidad de deformación. Esta deformación crítica crece al bajar la temperatura y al elevarse la velocidad de deformación.

En general, la deformación crítica para la recristalización dinámica es muy grande aún en el caso de aceros que no posean microaleantes que retrasen la recristalización; y en la mayoría de los casos para las condiciones habituales de laminación en caliente (temperatura, reducción por pasada y velocidad de deformación) no se llega a alcanzar. En cambio, la recuperación dinámica sí tiene lugar pues no necesita de una deformación crítica.

De acuerdo a lo anterior y en general, en la laminación en caliente el único tipo de recristalización que aparece es la recristalización estática entre las pasadas.

Por otra parte, aún cuando pudiese ocurrir recristalización dinámica en algunas pasadas, el poder refinador de este proceso es muy limitado debido a que ocurre a muy alta temperatura.

### Efecto de los microaleantes en los procesos de restauración

Para los aceros al C y al C-Mn la recristalización estática de la austenita es muy rápida para temperaturas por sobre los 800°C. El crecimiento del grano que sigue luego de la recristalización también puede ser rápido si no existen partículas que lo controlen. Algunos aleantes fuertes formadores de carburos, nitruros y carbonitruros pueden retrasar notablemente la recristalización entre pasadas y el crecimiento del grano austenítico. Estos aleantes (Nb, V y Ti) solo necesitan adicionarse en proporciones muy bajas y por ese motivo se los denomina microaleantes.

También se denominan microaleantes no solo al Nb, Ti y V sino también a cualquier otro elemento aleante cuya proporción en los aceros sea muy baja y ejerza una influencia sensible en algunas propiedades. De este modo se incluyen el Zr, B, Al y Tierras raras que cumplen funciones bien diferentes de las que se verán para el Nb, Ti y V.

El elemento más efectivo en el retraso de la recristalización es el Nb debido a que su baja solubilidad en la austenita hace que su rango de precipitación coincida con el rango de temperaturas de laminación.

Además del Nb, se ha reportado que el V también tiene algún efecto de retardo en la recristalización aunque mucho menor que el del Nb, esto se debe a que el V es mucho más soluble que el Nb.

El retardo causado por el Nb se atribuye a:

- Efecto de arrastre de solutos
- Precipitación de NbCN inducida por la deformación de la austenita
- Un efecto combinado de ambos

Algunos investigadores sostienen que el Nb opera por el efecto de arrastre de soluto lo que retarda la recrystalización, y además que cuando las condiciones se dan para que la precipitación inducida por la deformación sea más rápida que la recrystalización, esta será detenida o retrasada hasta que se complete la precipitación. En varias investigaciones se ha encontrado que en los rangos de temperatura donde los tiempos de comienzo de la precipitación son mayores que los del comienzo de la recrystalización, la curva de recrystalización tiene una dependencia normal con la temperatura y es afectada por el efecto de arrastre del soluto. Sin embargo, cuando la precipitación ocurre antes que comience la recrystalización, la nucleación y crecimiento de los granos recrystalizados es sensiblemente retrasada y la curva presenta una irregularidad en la dependencia con la temperatura. Esto es una prueba de que en realidad es la precipitación de NbCN inducida por la deformación lo que mayor incidencia tiene en el retraso de la recrystalización de la austenita. Para temperaturas de laminación menores a 900°C, la recrystalización puede retrasarse más de dos órdenes de magnitud si el Nb está previamente en solución. Como se verá, este retraso en la recrystalización tiene una importancia primordial en el proceso de laminación controlada.

En definitiva, el retardo en la recrystalización que exhibe el Nb solo se observa si este elemento está en solución en la austenita antes de la deformación, de manera que pueda precipitar inducida por esta, de otro modo su efecto es despreciable. De esto se desprende la importancia que tiene la temperatura de solubilización inicial.

### Zonas de deformación en la laminación controlada

El rango de temperaturas de laminación en el campo de la austenita se puede dividir en tres zonas. La zona de mayor temperatura se denomina zona de recrystalización, en la misma la austenita recrystaliza completamente para el tiempo disponible entre las pasadas de laminación. Para la siguiente zona a temperaturas menores la austenita no llega a recrystalizar totalmente para el tiempo entre pasadas, esta zona se denomina de recrystalización parcial. Finalmente, a temperaturas aún menores, existe una zona en la que la austenita no recrystaliza y que se denomina zona de no recrystalización. Además de la temperatura, estas zonas dependen de la cantidad de deformación.

Los microaleantes, en especial el Nb, permiten que la zona de no recrystalización se extienda hasta mayores temperaturas y mayores deformaciones.

El refinamiento de grano austenítico se consigue fundamentalmente por la deformación en las zonas de recrystalización y en la de no recrystalización, la deformación en la zona de recrystalización parcial debe evitarse siempre que sea posible porque a no ser que la reducción (deformación) acumulada en la misma sea muy grande, se termina consolidando una estructura de tamaño de grano mixto.

Un incremento adicional en la resistencia del acero se puede obtener si se continúa la laminación en el rango bifásico  $\gamma+\alpha$  o aún en el rango ferrítico. Esto conduce a la formación de una subestructura en los granos ferríticos, logrando la recuperación de la ferrita.

De acuerdo a lo anterior la laminación controlada podría abarcar tres etapas de deformación. En la primera se deforma en el rango de recrystalización con lo que se refina el tamaño de grano por recrystalización repetida y por el retraso del crecimiento del grano entre las pasadas, se obtiene un grano austenítico fino y recrystalizado, pero la ferrita que se produciría a partir del mismo es solo relativamente fina. Algunos esquemas de laminación controlada terminan en esta etapa aunque el refinamiento que se logra solo es moderado.

Si se quiere llegar a la zona de no recrystalización, en general se debe esperar para que la temperatura baje lo suficiente pues la temperatura de la última pasada en la zona de recrystalización suele estar bastante por encima del rango de temperaturas de la zona de no recrystalización. En algunos casos esto se puede acelerar mediante enfriamientos intermedios. Durante el tiempo de espera el grano austenítico puede crecer y si el tamaño de grano es muy grande antes de comenzar con la etapa en la zona de no recrystalización, la cantidad de deformación necesaria para refinarlo nuevamente puede ser excesiva. Cuando se llega al rango de temperatura adecuado, la laminación continúa en el rango de no recrystalización y se forman bandas de deformación en los granos de austenita. La densidad de estas bandas crece al crecer la cantidad de deformación en esta zona. Si en ese momento el acero termina de laminarse y se enfría, y la ferrita nuclea tanto en los bordes de grano de la austenita como en las bandas de deformación que están dentro de los granos, en otras palabras, existe nucleación intergranular e

intragranular y se obtiene un tamaño de grano ferrítico muy fino. A mayor cantidad de deformación acumulada en la zona de no recrystalización menor será el tamaño de grano ferrítico posterior debido a la mayor cantidad de sitios de nucleación. La deformación total acumulada en el rango de no recrystalización es muy importante para obtener un grano ferrítico uniforme y fino. Para lograr esto el espesor del material antes de reiniciar la laminación luego del tiempo de espera final se controla para que sea de 3 a 5 veces el espesor del producto final. Muchos procesos de laminación controlada terminan en esta etapa.

Como puede verse, la necesidad de deformar en una zona de menores temperaturas donde la austenita no recrystaliza y por lo tanto mantiene una alta resistencia a la deformación y la de aplicar grandes deformaciones en esa zona, hace que se generen grandes cargas en los equipos de laminación que se usan en las últimas pasadas del proceso. La potencia y características de estos equipos pueden imponer limitaciones en la elección de los parámetros óptimos del proceso.

Si se obtiene un tamaño de grano austenítico fino por deformación en la zona de recrystalización y se acumula una deformación total de entre 70 y 80 % en la zona de no recrystalización, pueden obtenerse tamaños de grano ferríticos de entre ASTM N° 12 y 14 (5,6 y 2,8  $\mu\text{m}$  respectivamente), mientras que por tratamiento de normalizado solo puede alcanzarse a lo sumo un ASTM N° 10 (11  $\mu\text{m}$ ). Para valorar el poder refinador de la laminación controlada, se deben comparar estos tamaños de grano con los usuales para los aceros comunes llamados de "grano fino", ASTM N° entre 6 y 8 (44 y 22  $\mu\text{m}$  respectivamente).

Para un determinado espesor inicial y final del producto, existe una cantidad total de deformación a aplicar bien definida. Esta deformación total deberá repartirse entre las diferentes zonas. La repartición de esta deformación total entre la zona de recrystalización y la de no recrystalización no solo está regida por las propiedades finales requeridas en el acero sino también por condicionamientos del proceso de laminación, esto a su vez depende del tipo de producto laminado: chapas o flejes. En el caso de las chapas se produce una gran reducción del espesor en la región de baja temperatura, por debajo de los 800°C (zona de no recrystalización). En cambio, para el caso de los flejes laminados en caliente, el énfasis se pone en la deformación en la región de recrystalización de la austenita. Esto se debe a particularidades propias del proceso de laminación que se aplica a cada uno de estos dos productos.

Además del efecto ya mencionado sobre la recrystalización y el control del crecimiento del grano austenítico, los microaleantes tienen otras funciones importantes durante este proceso. Se puede sintetizar los efectos de los microaleantes en los siguientes puntos:

- Control del tamaño de grano de la austenita inicial (a la temperatura de solubilización)
- Retraso de la recrystalización entre pasadas
- Retraso del crecimiento de grano
- Endurecimiento por precipitación

Las partículas no disueltas a la temperatura de solubilización inicial controlan el tamaño de grano austenítico inicial. A este respecto el Ti y en menor medida el Nb, son efectivos debido a su baja solubilidad en la austenita. Por supuesto que esta efectividad dependerá, además de la composición química del acero, de la temperatura elegida para la solubilización inicial.

El retraso en la recrystalización ya fue tratado anteriormente. Se debe recordar que solo es el Nb que ha sido solubilizado con anterioridad a la deformación el que tiene efecto en este sentido. De aquí se deduce la importancia que tiene la temperatura de solubilización inicial, cuanto mayor sea será mayor la cantidad de Nb disuelto.

Los precipitados no disueltos antes a la temperatura de solubilización inicial, así como los que precipiten durante la deformación, pueden controlar el crecimiento de grano posterior a la recrystalización. Esto es muy útil para evitar que el grano austenítico crezca durante el tiempo extra entre pasadas y durante el tiempo de espera para que la temperatura baje lo suficiente como para entrar en el campo de no recrystalización.

Los precipitados que han aparecido durante la deformación de la austenita no tienen efecto endurecedor en la ferrita que aparece posteriormente. Esto se debe a que su ubicación, tamaño y tipo de interfase no son los adecuados para lograr endurecimiento por precipitación. En cambio, si aún queda en solución cierta cantidad de microaleantes antes de que comience la transformación a ferrita, se produce una precipitación durante la transformación e incluso posteriormente a la misma que logra

un endurecimiento por precipitación apreciable. Para el caso del Nb esto dependerá de la temperatura de solubilización inicial, cuanto mayor sea la misma mayor será el Nb en solución inicial y mayor cantidad quedará solubilizado aún luego de la deformación y antes de la transformación a ferrita, en consecuencia, se logrará mayor endurecimiento por precipitación. Para reforzar el efecto del Nb se puede recurrir al V que por tener mayor solubilidad en la austenita, quedará retenido en solución hasta el fin de la laminación y podrá precipitar durante la transformación.

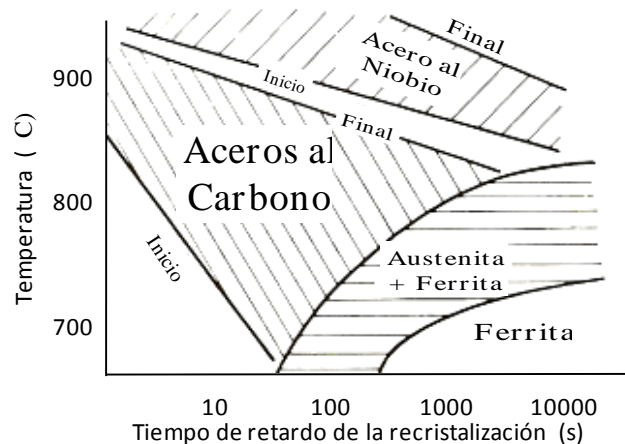
Además de la cantidad y tipo de microaleantes que queden en solución al final de la laminación y que están disponibles para precipitar durante y luego de la transformación, la cantidad de endurecimiento por precipitación dependerá de la velocidad de enfriamiento. Esta variable controla la cantidad y tamaño de los precipitados que, como se sabe, determinan el incremento en la resistencia mecánica logrado por la precipitación.

Por último se debe destacar que debido a su fuerte afinidad con otros elementos como el oxígeno y el azufre, algunos microaleantes pueden tener otras funciones como el control de forma de inclusiones.

En resumen puede decirse para cada uno de los tres microaleantes más usados:

- Niobio: Es el más efectivo para lograr el retraso en la recristalización de la austenita debido a que la dependencia de su solubilidad con la temperatura hace que precipite dentro del rango en que se realiza la laminación (Figura 4.4). De este modo es el de mayor poder refinador durante la laminación controlada. Es además un potente endurecedor por precipitación siempre que quede una fracción en solución antes de la transformación de la austenita. Estas dos cualidades lo hacen el elemento más usado en los aceros microaleados.

- Vanadio: A diferencia del Nb solo tiene una débil influencia en la recristalización de la austenita pues su solubilidad en la misma es mucho mayor y no puede precipitar durante la laminación, de este modo su poder refinador durante la laminación controlada es muy débil. En cambio, la alta solubilidad permite que el V sea un potente endurecedor por precipitación



#### Efecto de la austenita sobre la recristalización después de una reducción de 50 %

- Titanio: La solubilidad de este elemento es aún inferior a la del Nb y por eso puede controlar al tamaño de grano austenítico inicial (a la temperatura de solubilización) así como el crecimiento de grano entre las pasadas en la zona de recristalización. Su efecto sobre la recristalización de la austenita y su poder endurecedor son inferiores a los del Nb. El Ti se usa además en algunos aceros como controlador de forma de inclusiones lo que mejora las propiedades transversales y en el espesor.

Debido a la afinidad que tiene el Ti con el N, lo que resulta en la formación de TiN antes de que comience la solidificación del acero, por debajo de 0,025% este elemento no altera la resistencia. En realidad este valor depende del contenido de N que es típicamente de 0,006 para un acero obtenido por el proceso de acería básica al oxígeno.

Para mayores porcentajes de Ti el endurecimiento por precipitación que se obtiene depende del contenido de Mn.

Una comparación de valores medidos y del análisis de las fases en el sistema Ti-N-S-C muestra que, para un porcentaje fijo de N, la formación del carbosulfuro  $Ti_4C_2S_2$  (que es el que permite el control de la forma de las inclusiones) o bien el carburo TiC (que es el que endurece por precipitación) depende del Mn. A medida que se incrementa el Mn, la actividad del S baja y se retarda la formación del carbosulfuro. De acuerdo a esto, el Ti endurece hasta que se llega a un contenido tal que ocurre la reacción con el S.

### Enfriamiento final luego de la última pasada

Al terminar la última pasada de laminación, sea que esta se haya hecho el rango de recrystalización o el de no recrystalización, el producto laminado es enfriado y la austenita se transforma. Además del grado y fineza de la precipitación, la velocidad de enfriamiento controla la temperatura de transformación de la austenita y por lo tanto el tipo de estructura final y su grado de refinamiento (para un dado tamaño y grado de deformación de los granos austeníticos).

Ambas cuestiones tienen una influencia fundamental en las propiedades finales del acero.

En el caso de los aceros de laminación controlada de estructura ferrítico-perlítica, a medida que se acelera el enfriamiento se refina el tamaño de grano de la ferrita y baja la cantidad de perlita para un C dado. Esto puede lograrse también mediante la adición de ciertos aleantes que retrasen las transformaciones y permitan obtener menores temperatura de transformación para una dada velocidad de enfriamiento, en este sentido el Mn es el elemento más efectivo y económico.

De todos modos, se debe tener presente que si se desea una estructura ferrítico-perlítica no se podrá acelerar demasiado el enfriamiento ni retrasar mucho las transformaciones pues de otro modo pueden aparecer estructuras bainíticas, es por esto que el nivel de Mn en este tipo de aceros tiene un límite que depende del contenido de C y de los otros aleantes, así como del espesor del producto, pero que puede rondar aproximadamente en un 1,8%. Excepto que se trate de aceros de muy bajo C (en general menor de 0,06%), la aparición de estructuras bainíticas deteriora fuertemente las propiedades de impacto.

Existe un grupo de aceros microaleados de muy bajo C (menos de 0,06%) donde se logra obtener una alta proporción de una estructura llamada ferrita acicular que posee muy buena combinación de resistencia y tenacidad, en realidad se trata de una bainita de muy bajo C. En estos aceros los aleantes (Mn y Mo en general) y la velocidad de enfriamiento se ajustan de modo de poder obtener este producto de baja temperatura de transformación. Los aceros de ferrita acicular se verán más adelante.

En cuanto a la precipitación de los carburos o carbonitruros que endurecerán a la ferrita, la velocidad tiene un efecto importante. Si esta velocidad es muy alta puede disminuir la cantidad de precipitados quedando una ferrita sobresaturada en microaleantes que solo podrán terminar de precipitar durante un tratamiento posterior. Si en cambio la velocidad de enfriamiento es muy lenta la fracción precipitada será máxima pero los precipitados serán más gruesos y su poder endurecedor disminuye. En general es para un rango de velocidades intermedias donde se consigue un resultado óptimo.

Queda en claro que la velocidad de enfriamiento tienen una importancia primaria en las propiedades finales del acero. Las técnicas del enfriamiento controlado han permitido mejorar aún más la combinación de resistencia-tenacidad-soldabilidad de este tipo de aceros.

### Propiedades de aceros microaleados de laminación controlada

Estos aceros, para tenores de C 0.18 % y Mn 1.3 %, presentan:

- Alta tensión de fluencia, alto grado de alargamiento, alta resistencia al impacto, debido al grano fino y la presencia de precipitación de microfases.
- También son aceros de alta soldabilidad si se tiene en cuenta los valores resultantes del cálculo del

carbono equivalente:  $CE = \%C + \frac{\%Mn}{6}$

## 6 - Aceros de Construcción Mecánica

### Introducción

Estos aceros, están destinados principalmente a la fabricación de elementos de maquinaria de la Industria Mecánica. Se comercializan principalmente en forma de productos largos, con secciones tales como redondos, cuadrados, rectangulares y hexagonales. Sus diferentes características técnicas, justifican de una u otra manera, su empleo en piezas que por lo general necesitan unas notables propiedades mecánicas.

Los elementos de máquinas que se fabrican con estos aceros son:

- Ejes de transmisión de potencia
- Engranajes
- Rodamientos
- Resortes, muelles y ballestas
- Palieres
- Coronas
- Bulones y tuercas
- Cadenas y piñones
- Pernos de pistón
- Bielas
- Cigüeñales
- Árboles de transmisión
- Barras de torsión

En definitiva, los aceros de construcción mecánica deben cumplir con una serie de requisitos técnicos, de manera que los productos tengan las propiedades que se requieren para cada aplicación.

Estos aceros se destinan a piezas de maquinaria en general. Las propiedades predominantes en este tipo de componentes son: Resistencia a la fatiga, resistencia a la torsión, maquinabilidad, resistencia mecánica y límite elástico, calidad superficial, rectitud. A diferencia de los aceros estructurales, estos aceros no requieren soldabilidad, sino mas bien aptitud para aplicación de tratamientos térmicos (temple y revenido, cementación, normalizado, austempering, martempering, globulizado, tratamiento para obtención de microestructuras bainíticas, etc.).

### Procesos de aceración, laminación, tratamientos térmicos y terminado

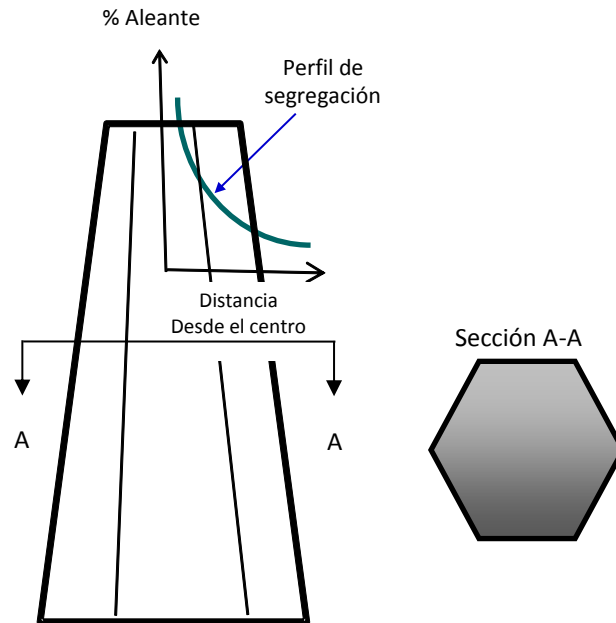
Para el caso de piezas de maquinaria en general se utiliza Horno Eléctrico o Procesos de Conversión tales como OBM, BOF, AOD. En general es necesario el uso de Metalurgia en Cuchara o Metalurgia Secundaria (ESR o VAR).

Tradicionalmente, el acero líquido se cuela en moldes de sección rectangular, circular, cuadrada o poligonal. Luego del desmoldeo (con control de velocidad de solidificación), se obtienen lingotes, cuya micro y macroestructura primaria se somete posteriormente a tratamiento termomecánico para llegar a la obtención de los productos largos.

El acero, en estado de lingotes presentan una microestructura primaria, caracterizada por granos dendríticos y columnares.

En las acerías modernas, se opera con colada continua. De esta forma, directamente desde el proceso de acería se obtiene un producto de secciones reducidas, denominado palanquilla.

Un factor de gran importancia es la segregación que presentan los lingotes de moldeo estático y las palanquillas de colada continua. La dirección de la solidificación va desde la periferia hacia el núcleo (transversal). Por lo tanto se obtiene un perfil de solidificación que hace que los elementos químicos se concentren el núcleo (Ver figura).



Segregación en el acero durante la solidificación

En primera instancia, se definen las características del acero en función del producto final (piezas terminada). En este caso se considera un material semielaborado (productos largos, con secciones tales como redondos, cuadrados, rectangulares y hexagonales).

Las palanquillas pueden ser laminadas a redondos o cuadrados, de manera que estos productos pasan a ser semielaborados que se destinan a mecanizado.

Estos últimos semielaborados pueden ser sometidos a forja o laminación (en frío o en caliente), o directamente a mecanizado final. Este último caso se da en barras trefiladas.

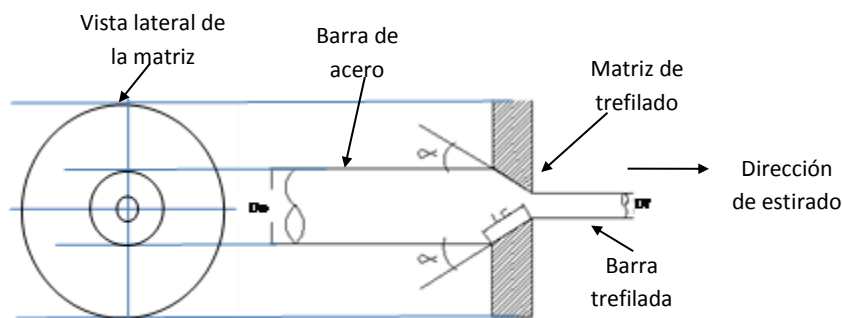
En cuanto los productos semielaborados, en general deben cumplir con los siguientes requisitos:

- Composición química acorde con normas SAE (Society of Automotive Engineering)
- Nivel de inclusiones no-metálicas, según ASTM E 45
- Contenido de gases (ppm de hidrógeno y nitrógeno)
- Tamaño de grano fino, según ASTM E 45
- Templabilidad según norma SAE
- Calidad superficial (relacionada con rugosidad y defectología)
- Rectitud

Por ejemplo una barra redonda laminada a partir de palanquillas, se puede someter a operaciones de trefilado para obtener alta calidad superficial. También se pueden obtener barras trefiladas de sección hexagonal para luego fabricar piezas en tornos automáticos.

El estirado se realiza a través de una máquina hidráulica, denominada trefiladora. La matriz está formada por insertos de carburo de tungsteno, que es una herramienta de alta resistencia al desgaste. Está alojada dentro de la trefiladora.

El esquema de trefilado de barras redondas, se observa en la siguiente figura:



Esquema de trefilado de barras redondas de acero



Las matrices de trefilado en general son de sección circular pero también pueden ser hexagonales.

La intensa fricción que se produce entre la barra y la matriz, que permite pasar de una sección  $D_0$  inicial a una sección  $D_f$  final de menor diámetro, se reduce mediante la aplicación de lubricantes. En particular algunos detergentes prestan un excelente servicio de lubricación y además son económicos.

La extrusión es una operación similar al trefilado. En lugar de estirar la barra, en la extrusión se empuja. La barra a ser extrudada, se coloca en un contenedor cerrado. La prensa hidráulica, con un punzón de cabeza cilíndrica, empuja la barra. Las matrices de extrusión son más robustas. Las prensas hidráulicas de extrusión en general superan las 4000 tnsf.

En productos de alta calidad superficial (en particular la maquinaria destinada a bombeo en pozos de petróleo requiere este tipo de productos), es importante la rugosidad y la rectitud. En estos casos, luego del tratamiento térmico es necesario emplear enderezadoras hiperbólicas que permiten obtener superficies pulidas y gran rectitud (Ver figura).

La calidad superficial permite construir maquinaria de alta precisión y durabilidad. Dado que los defectos superficiales inciden en el comportamiento de las piezas en servicio, se logra alta resistencia a la fatiga.

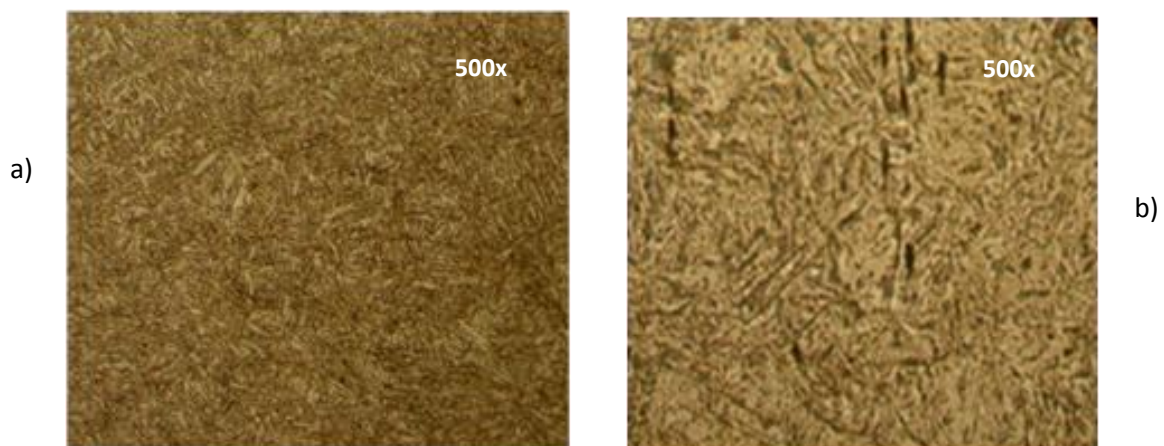


Enderezado y pulido de barras redondas de acero

### Microestructura de aceros de sometidos a temple y revenido

Los semielaborados en general tienen microestructuras ferrítico-perlíticas, con tamaño de grano definido y nivel de inclusiones controlado.

Los productos terminados (que en general requieren alta resistencia mecánica, resistencia al desgaste y tenacidad), obtenidos por posterior mecanizado y tratamientos térmicos, presentan microestructuras de temple y revenido. Es decir martensita revenida. (Ver figura).



Martensita revenida. a) Fina. b) Grosera (se observan fisuras debido a la severidad de temple)

Los aceros aleados (con Cr, Mo, B, u otros) y calmados con aluminio (0.02-0.04 % de Al), tienen microestructuras de martensita fina y por lo tanto tienen alta tenacidad (Fig. 6.4.a). En cambio los aceros al carbono (0.35 a 1.0 % de C), que no son calmados al aluminio y que no contienen aleantes, en el tratamiento térmico de temple desarrollan martensita gruesa. Estos aceros tienden a ser frágiles que es la principal desventaja en aplicaciones tecnológicas porque afecta a la integridad del componente.

Cabe aclarar que el problema de la presencia de martensita gruesa, además de ser sinónimo de fragilidad, también afecta negativamente a la durabilidad del componente. La durabilidad de una pieza de construcción mecánica es determinante en la calidad de dicha pieza. De aquí surge que para los componentes en servicio, integridad y durabilidad están íntimamente relacionadas.

#### Tratamiento térmico de temple y revenido

Las piezas de acero destinadas a elementos de maquinaria, esencialmente deben trabajar bajo sollicitaciones simples o combinadas de tracción, compresión, fatiga, torsión, flexión.

El impacto no es una sollicitación frecuente en piezas de maquinaria. En casos de necesidad de resistencia al impacto, que en general no se trata de alta tenacidad, es conveniente utilizar aceros de procesos secundarios (VAR o ESR), de manera que de partida se disponga de semielaborados con alta homogeneidad de elementos químicos, bajos contenidos de impurezas (P, S), bajo contenido de gases. El hidrógeno es un elemento que fragiliza a las piezas sometidas a temple y revenido, cuando se encuentra presente en tenores mayores de 2 ppm.

En grandes piezas de forja (ejes de rotores de turbinas, ejes de ventiladores, tubos sin costura para alta presión, cilindros de laminación, etc.), la aplicación de aceración secundaria (VAR o ESR), mas forja, es un procedimiento recomendado para la obtención de componentes de alta calidad.

El desgaste tampoco es un requisito que se puede exigir a los aceros de construcción mecánica. Esta es una propiedad de los aceros para herramientas.

#### Templabilidad

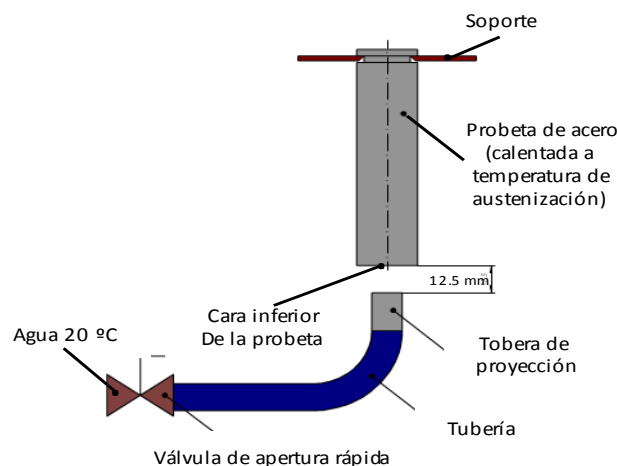
La templabilidad es una propiedad de los aceros de construcción mecánica. Se define como la capacidad de un acero para transformarse en martensita durante el temple. En esta situación, la templabilidad depende de:

- La composición química
- Tamaño de grano austenítico
- Dimensiones de la pieza
- Medio de enfriamiento

En aceros, existe relación específica entre las propiedades mecánicas y la velocidad de enfriamiento de la pieza durante el temple.

La templabilidad no es dureza (la dureza significa resistencia a la penetración de un indentador de diamante en el ensayo de dureza Rockwell), aunque se utilizan medidas de dureza para determinar la extensión de la transformación martensítica en el interior de una probeta.

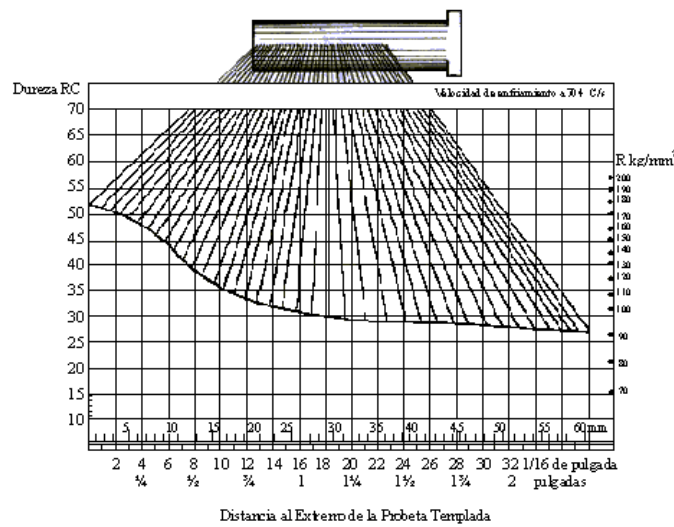
La templabilidad de un acero se determina mediante el ensayo de Jominy (Ver figura). La probeta previamente debe ser sometida a tratamiento térmico de normalizado.



Ensayo de Jominy para determinación de templabilidad

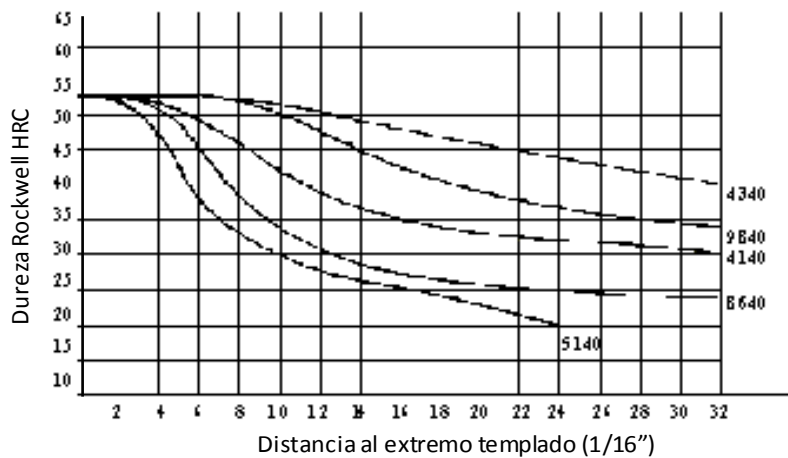
En el ensayo de Jominy, se temple una probeta estandarizada del acero en cuestión. Primero se calienta a la temperatura de austenización (por encima de A3), enfriándola posteriormente mediante un chorro de agua con una velocidad de flujo y a una temperatura preestablecida. El agua enfría solamente la cara inferior de la probeta. Dicha cara actúa como superficie de temple de manera que la probeta se enfría en forma longitudinal hacia su extremo superior sólo por conducción. Se genera un gradiente de velocidades de enfriamiento desde un valor máximo en el extremo templado, a un valor mínimo en el extremo superior.

Una vez que la probeta está completamente fría, se rectifica una generatriz hasta 0,4 milímetros de espesor y se determina la dureza a lo largo de los 50 mm primeros de la probeta. En los primeros 12,5 mm las lecturas de dureza se toman a intervalos de 1,6 mm y en los 37,5 mm siguientes cada 3,2 mm. Después se traza una curva de templabilidad representando los valores de dureza Rockwell RC, en función de la distancia al extremo de la probeta templada (Ver figura).



Curva de templabilidad obtenida del ensayo de Jominy

Dado que la templabilidad es una propiedad de cada acero (en función de su composición química), con tamaño de grano estandarizado, en la siguiente figura se presenta dicha propiedad para varias calidades de aceros más usuales.



Curvas de templabilidad de aceros SAE

## Temple de piezas terminadas

El temple es un tratamiento térmico que tiene por objeto aumentar la dureza y resistencia mecánica del acero. Se ejecuta en tres etapas:

- Calentamiento. Se realiza en horno. Hasta los 500 °C, la velocidad de calentamiento es lenta. Posteriormente, hasta la temperatura de austenización (temperatura de temple), se hace de manera rápida.
- Homogeneización de la temperatura. Durante un determinado tiempo se mantiene la pieza a temperatura de temple. De esta manera se logra la misma temperatura en toda la pieza.
- Enfriamiento rápido. Se saca la pieza del horno y se enfría en un fluido denominado medio de temple.

El medio de temple puede ser:

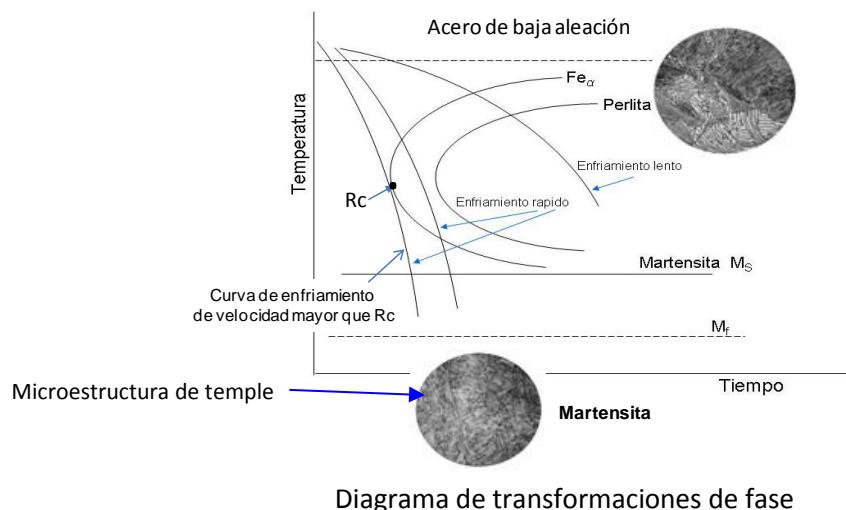
- Agua. Es un medio económico y clásico de enfriamiento. Se consiguen buenos temples en aceros al carbono. Las piezas se deben agitar dentro del agua para evitar la formación de vapor en la interfase, que es un aislante térmico. La presencia de vapor dificulta el temple.
- Aceite. Enfría más lentamente que el agua. Se dice que es un medio menos severo.
- Aire. La pieza se enfría a bajas velocidades de enfriamiento. Se aplica a aceros de alta aleación como el caso de aceros para herramientas.
- Polímeros. Permite programar su comportamiento como aire, agua o aceite según necesidad.

En general los medios de enfriamiento severos, producen distorsión geométrica en las piezas templadas, debido a las elevadas tensiones que se desarrollan en este tratamiento térmico.

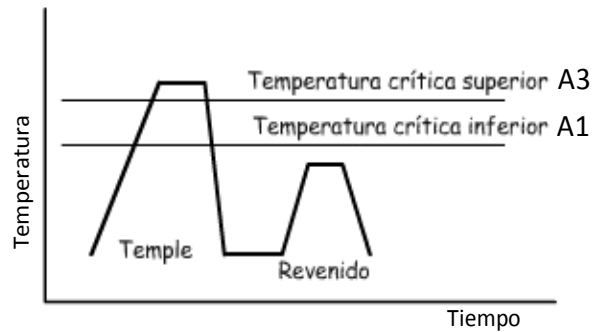
Por lo indicado, en cada caso se debe realizar una correcta selección del medio de enfriamiento.

Un acero aleado de alta templabilidad es aquel que endurece o forma martensita, no sólo en la superficie sino también en su interior. Por tanto, la templabilidad es una medida de la profundidad a la cual una aleación específica puede endurecerse como consecuencia de la aplicación del tratamiento térmico de temple.

Si se consideran las curvas TTT (tiempo-temperatura-transformaciones isotérmicas) o CCT (transformaciones de fase en enfriamiento continuo), para que se produzca el temple, la velocidad de enfriamiento de la pieza debe ser mayor que la velocidad crítica ( $R_c$ ). En la siguiente figura se presenta un esquema de este desarrollo para el caso de las transformaciones continuas y la evolución de las microestructuras.



Las piezas templadas quedan con un elevado estado de tensiones que se refleja en altos valores de dureza. En esta condición estas piezas no pueden ser utilizadas dado que son susceptibles de rotura. Por lo tanto se aplica tratamiento térmico de revenido para disminuir la dureza. En la figura 5.9, se presenta un esquema de tratamientos térmicos de temple y revenido basado en el diagrama hierro-carbono.



Esquema de tratamiento térmico de temple y revenido a partir del diagrama Fe-C

Existen manuales con curvas de revenido para las diferentes aceros sometidos a revenido.

## Norma SAE

La norma SAE (*Society of Automotive Engineers*), se implementó en 1912 en Estados Unidos, como parte de un acuerdo entre productores y consumidores de aceros donde se estableció una nomenclatura y composición química de los aceros de construcción mecánica. Posteriormente AISI (American Iron and Steel Institute), expandió esta norma, de modo que en la actualidad, en general en los manuales se consigna AISI-SAE.

En Argentina, a modo de homologación el Instituto Argentino de Racionalización de Materiales implementó la norma IRAM-SAE, que es prácticamente una copia de la norma AISI-SAE.

Este mismo criterio se aplica en la mayoría de las sociedades tecnológicas, de manera que se puede decir que la codificación AISI-SAE de aceros de construcción mecánica es de aplicación universal.

La nomenclatura de la codificación de los aceros es la siguiente:

Se utilizan 4 dígitos para aceros con  $C < 1\%$ . Para aceros de 1 % de carbono se emplean 5 dígitos.

Designación Norma SAE

X X X X (Aceros con  $C < 1\%$ )

1 2 3 4

Los dígitos 1 y 2 indican si el acero es al carbono o aleado.

Por ejemplo la serie 10 corresponde a aceros al carbono. Las series 20, 21, 30, 33, 40, 41, hasta 92, especifican aceros aleados.

Los dígitos 3 y 4 indican el porcentaje de Carbono multiplicado por un factor 100. Por ejemplo si el acero tiene 0.45 % de Carbono, para los dígitos 3 y 4, corresponde 45.

En el caso de aceros con 1 % de Carbono, es necesario utilizar 5 dígitos. En este caso, se tiene la siguiente situación:

X X X X X

1 2 3 4 5

Nuevamente los dos primeros dígitos se utilizan para designar los elementos de aleación del acero, mientras que las posiciones 3, 4 y 5 indican el contenido de Carbono. En este caso también el % de Carbono se multiplica por el factor 100.

Existe un solo acero de construcción mecánica con 1 % de Carbono y 1 % de Cromo, que se conoce como acero para rodamientos. Se trata del acero SAE 52100, ampliamente utilizado en la industria.

También existen manuales que dan equivalencias entre las distintas codificaciones de normas de otros países como Francia (Norma AFNOR), Japón (Norma JIS), Inglaterra (BS), DIN de Alemania, etc.

Codificación de aceros de construcción mecánica

Si se considera la serie SAE 10XX de aceros de construcción mecánica, es de esperar que existan las calidades SAE1001; SAE 1002; . . . SAE1010; SAE 1011; . . . SAE 1045, SAE 1046; SAE 1049. . . . , etc.,

De hecho esto no es así por lo siguiente:

- Existen pocas calidades útiles para piezas de construcción mecánica. Por ejemplo SAE 1010; SAE 1020; SAE 1035; SAE 1045; SAE 1070. Con este grupo de aceros al carbono se cubren prácticamente todas las necesidades de la industria.

- La racionalización (acuerdo entre fabricantes y usuarios), también ha incidido para que se disponga únicamente de estas calidades, de manera que se puede acceder a precios competitivos.

Lo indicado implica que si se necesita una calidad no racionalizada (por ejemplo SAE 1065), se deberá superar dos dificultades:

- Cantidades de coladas completas, fabricadas especialmente para esta necesidad.

- Precios mucho mayores que los de calidades racionalizadas.

En la actualidad, a partir de la globalización, prácticamente no se utilizan aceros no racionalizados. Cabe aclarar que tanto los aceros racionalizados como los no racionalizados, están contemplados por la Norma SAE.

En la siguiente tabla se presentan los aceros de construcción mecánica, indicando el significado de los dígitos correspondientes a aceros aleados de mayor uso en tecnología. La columna correspondiente a UNS, se refiere a una codificación denominada Unified Numbering System de ASTM.

En aplicaciones tecnológicas y actividades comerciales, esta codificación no se utiliza por lo que tiene solamente un significado académico.

Codificación aceros de construcción mecánica (Norma SAE)

Designación		TIPOS DE ACEROS
AISI - SAE	UNS	
10XX	G10XXX	Aceros al Carbono comunes
11XX	G11XXX	Aceros maquinables, con alto S
12XX	G12XXX	Aceros maquinables, con alto P y S
13XX	G13XXX	Aceros al Manganeso, con 1,75 % Mn
15XX	G15XXX	Aceros al Manganeso, con Mn sobre 1%
41XX	G41XXX	Aceros al Cromo-Molibdeno, con 0,40 a 1,1% Cr y 0,08 a 0,35% Mo
43XX	G43XXX	Aceros al Ni-Cr-Mo, con 1,65 a 2% Ni, 0,4 a 0,9% Cr y 0,2 a 0,3% Mo
51XX	G51XXX	Aceros al Cromo, con 0,7 a 1,1% Cr
61XX	G61XXX	Aceros Cr-V, con 0,6 a 0,95% Cr y 0,1 a 0,15% V mínimo
86XX	G86XXX	Aceros Ni-Cr-Mo, con 0,55% Ni, 0,5% Cr y 0,2% Mo
9260	G92XXX	Aceros al Silicio, con 1,8 a 2,2% Si
50BXX	G50XXX	Aceros al Cr, con 0,2 a 0,6% Cr y 0,0005 a 0,003% boro
51B60	G51601	Aceros al Cr, con 0,8% Cr y 0,0005 a 0,003% boro
E52100	G52986	Aceros al Cromo (horno eléctrico), con 1,45% Cr

## Clasificación y aplicaciones de aceros de construcción mecánica

En el campo de la industria mecánica, se utilizan ampliamente los siguientes aceros:

### Aceros para cementación

#### SAE 1010

Composición química: C 0.08/0.13 % - Mn 0.30/0.60 %

Características: Acero al carbono, de baja resistencia mecánica y alta tenacidad.

Aplicaciones: Piezas fabricadas por estampado en frío (bulones, remaches, etc.).

Tratamientos térmicos: Normalizado 900/920 °C. Cementación 870/930 °C. Temple 850 °C. Revenido 150 °C. (240 HB).

#### SAE 3310

Composición química: C 0.08/0.13 % - Mn 0.45/0.60 % - Cr 1.40/1.75 % - Ni 3.25-3.75 %.

Características: Acero al Cr-Ni, de muy alta tenacidad. Tiene alta templabilidad y elevada resistencia a la fatiga.

Aplicaciones: Piezas de alta responsabilidad y de grandes dimensiones. Engranajes, ejes traseros, piezas de dirección, pernos de seguridad. Matrices para plásticos y metales no ferrosos.

Tratamientos térmicos: Normalizado 870/890 °C. Cementación 850/900 °C. Temple 830 °C (aceite). Revenido 150 °C (302 HB).

#### SAE 5120

Composición química: C 0.17/0.22 % - Mn 0.70/0.90 % - Cr 0.70/0.90 %.

Características: Acero al Cr con buena resistencia y tenacidad y baja templabilidad

Aplicaciones: Piezas de pequeñas y medianas dimensiones, fabricadas por extrusión o mecanizado. Pernos de pistón, etc.

Tratamientos térmicos: Normalizado 880/930 °C. Cementación 870/930 °C. Temple 860°C (agua o aceite). Revenido 150°C (302 HB).

SAE 8620

Composición química: C 0.18/0.23 % - Mn 0.7/0.9 % - Cr 0.4/0.6 % - Ni 0.40/0.70 % - Mo 0.15/0.25 %.

Características: Acero al Cr-Ni-Mo de alta resistencia, con templabilidad mediana y alta tenacidad.

Aplicaciones: Piezas de mediano tamaño, solicitadas a la fatiga. Piñones y coronas del diferencial. Engranajes de alta revolución. Pernos de seguridad

Tratamientos térmicos: Normalizado 875/915 °C. Cementación 900/930 °C. Temple 845 °C (aceite). Revenido 150°C (255 HB).

Aceros de temple y revenido

SAE 1038

Composición química: C 0.35/0.42 % - Mn 0.60/0.90 %

Características: Acero al C. Con estructura globulizada es apto para estampar en frío. Baja templabilidad

Aplicaciones: Piezas fabricadas por estampado en frío ( Bulones, tuercas, tornillos, etc.). Otras piezas forjadas en caliente poco exigidas.

Tratamientos térmicos: Normalizado 870/900 °C. Temple 850 °C (aceite). Revenido 540 °C (240 HB)

SAE 1045

Composición química: C 0.43/0.50 % - Mn 0.60/0.90 %

Características: Acero al C. De baja templabilidad. En estado templado tiene alta dureza y buena tenacidad. Es apto para temple superficial.

Aplicaciones: Piezas de alta dureza y buena tenacidad (manivelas, chavetas, ejes, cigueñales, bielas, engranajes, espárragos, etc.)

Tratamientos térmicos: Normalizado 850/875 °C. Temple (aceite) 840 °C. Revenido 540 °C (270 HB).

SAE 1541

Composición química: C 0.36/0.44 % - Mn 1.35/1.65 %

Características: Acero al Carbono con templabilidad mejorada

Aplicaciones: Piezas de dimensiones medianas y chicas. Engranajes, árboles, pernos, palieres, etc.

Tratamientos térmicos: Normalizado 850/875 °C. Temple 840 °C (aceite). Revenido 540 °C (270 HB).

SAE 4140

Composición química: C 0.38/0.43% - Mn 0.65/0.85 % - Cr 0.7/0.9 % - Ni 1.65/2.00 % - Mo 0.2/0.3 %

Características: Acero al Cr-Mo de mediana templabilidad y buena tenacidad. No presenta fragilidad de revenido. Apto para temple superficial. Con estructura globulizada puede ser sometida a estampado en frío.

Aplicaciones: Piezas de alta exigencia para la construcción de vehículos en general. Cigüeñales, árboles, palieres, engranajes de transmisión. Piezas fabricadas por estampado en frío (bulones de alta calidad)

Tratamientos térmicos: Recocido de globalización 755 °C. Dureza 92 HRB. Temple 840 °C. Revenido 540 °C (320 HB).

SAE 4340

Composición química: C 0.38/0.43 % - Mn 0.65/0.85 % - Cr 0.7/0.9 % - Ni 1.65/2.00 % - Mo 0.20/0.30 %.

Características Acero al Cr-Ni-Mo de alta templabilidad, de alta resistencia y excelente tenacidad. No presenta fragilidad de revenido. Alta resistencia a la fatiga.

Aplicaciones: Piezas de aviones y automóviles sometidas a las más grandes exigencias y los más altos esfuerzos estáticos y dinámicos. Piezas para temperaturas debajo de 0 °C

Tratamientos térmicos: Normalizado 870 °C. Temple 840 °C (aceite). Revenido 540 °C (350 HB).

Aceros de corte libre

SAE 12L14 (alternativa SAE1212)

Composición química: C máx. 0,13 - Mn 0,85/1,35 % - P 0,04/0,12 % - S 0,24/0,40 % - Pb 0,15/0,35 %.

Características: Aceros de corte libre para temple y revenido, que puede mecanizarse directamente, o puede forjarse primero y luego mecanizarse. Templabilidad limitada.

Aplicaciones: Piezas confeccionadas en tornos automáticos con alta velocidad de corte.

Tratamientos térmicos: Normalizado 920 °C.

Trefilado ( $\phi$  12/26 mm): 130/207 HB

Aceros para resortes

SAE 5160

Composición química: C: 0,56 / 0,64 % - Mn 0,75/1,00 % - Cr 0,70/0,90 %

Características: Acero aleado al Cr. Tiene alta templeabilidad. Diámetro ideal  $\phi$  94 mm.

Aplicaciones: Resortes, muelles, ballestas y resortes planos de cualquier espesor. Barras de torsión.

Resortes de suspensión de automóviles

Tratamientos térmicos: Normalizado 850/900 °C. Recocido de globulización 750 °C. Temple 840 °C (aceite). Revenido 540 °C (350 HB).

SAE 6150

Composición química: C: 0,48/0,53 % - Mn 0,70/0,90 Si: 0,20 / 0,35 Cr: 0,80 / 1,10 V: 0,15

Características: Acero al Cr-V de buena templeabilidad. Diámetro ideal  $\phi$  101 mm. Acero de grano fino, alta resistencia a la fatiga y al impacto. Puede ser utilizado a altas temperaturas (hasta 500 °C)

Aplicaciones: Resortes, muelles, ballestas y resortes planos de cualquier espesor. Barras de torsión.

Resortes de suspensión de automóviles. Barras de torsión de vehículos blindados.

Tratamientos térmicos: Normalizado 840/880 °C. Recocido globular 755 °C. Temple 840 °C. Revenido 540 °C. Dureza 350 HB.

SAE 9260

Composición química: C 0,56/0,64 % - Mn 0,70/1,00 % - Si 1,80/2,20 %

Características: Acero aleado al Si y Mn de mediana templeabilidad. Diámetro ideal  $\phi$  71 mm. Muy resistente a la fatiga.

Aplicaciones: Resortes, muelles, ballestas, resortes planos de cualquier dimensión. Resortes de discos.

Resortes de suspensión de vehículos.

Tratamientos térmicos: Normalizado 870/890 °C. Temple 850 °C (aceite). Revenido 400 °C (480 HB).

Acero para rodamientos

SAE 52100

Composición química: 0.90/1.05 % - Cr 1.40/1.65 %.

Características: Acero de alto carbono aleado al Cr. Tiene alta templeabilidad en grandes secciones, alta dureza y excelente resistencia al desgaste. Su aplicación se restringe hasta 150 °C de temperatura. Por encima de esta temperatura se reduce la dureza. Tiene alta resistencia al desgaste y fatiga.

Aplicaciones: Se Utiliza en rodillos, esferas y pistas de rodamientos. Cilindros de calandras para laminado de papel. Anillos de rodamiento.

Tratamientos térmicos: Normalizado 870/900 °C. Temple 830/870 °C (aceite). Revenido 100 °C. Dureza 66 HRC (Rockwell C)

## 7 - Aceros Inoxidables

### Introducción

Son aceros de alta aleación (Cr, Ni, Mo, Mn), que presentan una alta resistencia a la corrosión en un amplio rango de condiciones. La composición química, los tratamientos térmicos y los métodos de fabricación que se utilizan (fundición, soldadura, mecanizado, trabajado mecánico, terminación superficial, etc.), deben ser seleccionados preservando dicha propiedad.

Según Pickering (1960), la propiedad más significativa de estos aceros de alta contenido de cromo, es la resistencia a la corrosión. En consecuencia se debe recurrir a otros aceros y aleaciones, cuando se requieren materiales con propiedades tales como alta resistencia mecánica, mayor grado de conformabilidad, alta conductividad térmica, etc.

En la actualidad, los aspectos que se deben tener en cuenta en el diseño de los aceros inoxidables, tienen relación con:

- La resistencia a la corrosión en diferentes ambientes de operación y procesos, en plantas industriales.
- El nivel de propiedades físicas y mecánicas.
- Las condiciones de fabricación que impone el trabajado mecánico (conformado, laminado, enderezado, trefilado), tanto en la zona de bajas temperaturas (trabajado en frío), como de las altas temperaturas (trabajado en caliente).



- La soldadura y soldabilidad

Recientemente, la investigación y desarrollo de los aceros inoxidable ha permitido lograr las siguientes mejoras:

- Alta resistencia a la corrosión y oxidación en diferentes ambientes de operación y procesos.
- Alta resistencia mecánica a alta temperatura
- Mayor tenacidad a bajas temperaturas. En particular los aceros inoxidable austeníticos no presentan transición dúctil-frágil.
- Alta soldabilidad
- Alto grado de conformabilidad

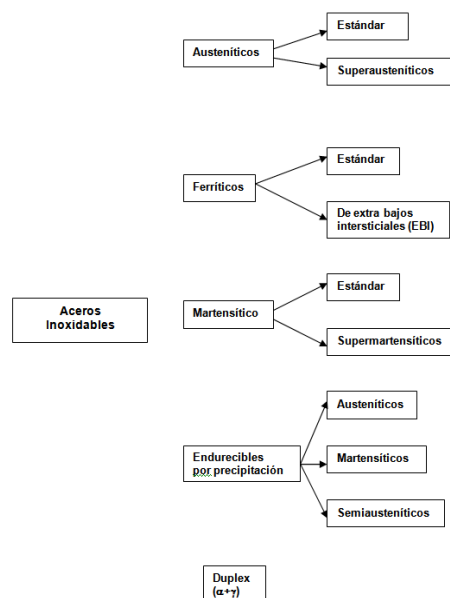
### Campo de aplicaciones

Aún cuando la producción no supera el 5 % del total de la producción mundial, los aceros inoxidable son el grupo de alta aleación más usado. Las aplicaciones de estos aceros son muy variadas. A continuación se presenta una lista de las principales aplicaciones:

- Tuberías, cañerías, bombas, válvulas, componentes de turbinas, tubos de condensadores y dispositivos de control en plantas generadoras de energía (térmicas, nucleares y de otros tipos).
- Turbinas hidráulicas, válvulas y compuertas en centrales hidráulicas.
- Cañerías, tuberías, bombas, válvulas, recipientes a presión, tubos de intercambiadores de calor y sistemas de control en plantas químicas y petroquímicas.
- Tuberías, cañerías, bombas, válvulas y sistemas de control en industrias farmacéutica, de procesamiento de bebidas, alimenticia y textil.
- Elementos decorativos y paneles de recubrimientos en arquitectura.
- Piezas de maquinaria (resortes, rodamientos, elementos de sujeción como espárragos y bulones, árboles, etc.), para uso en condiciones corrosivas y/o de alta temperatura.
- Diversos elementos en aplicaciones marinas (bulonería, propulsores, ganchos, cilindros hidráulicos, tubos de intercambiadores de calor, varios elementos sobre cubierta, etc).
- Elementos de cocina.

### Clasificación de aceros inoxidable

Lo más usual es clasificarlos de acuerdo a su microestructura, dado que este parámetro define las propiedades de cada grupo (Ver figura).

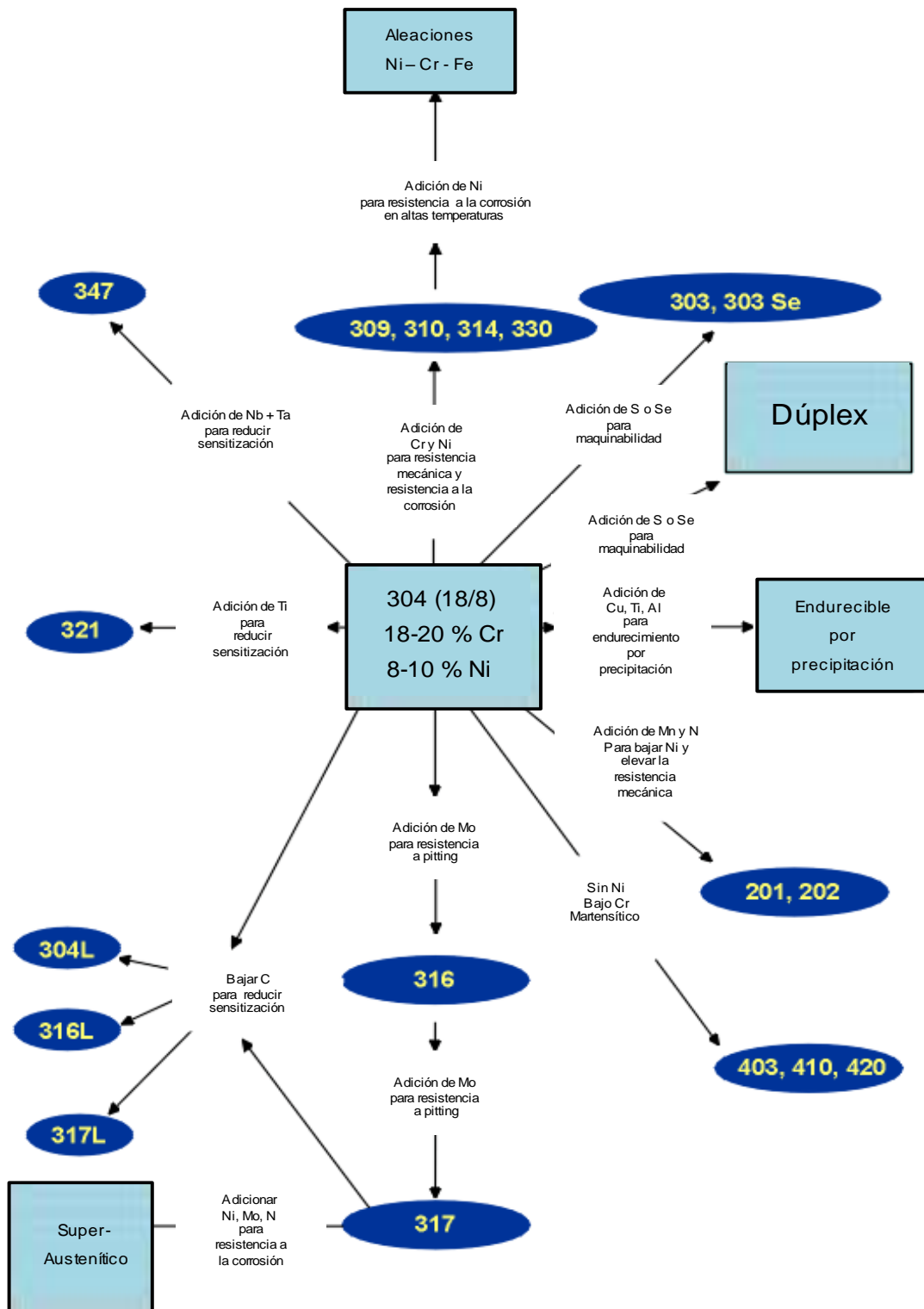


Clasificaciones de aceros inoxidable

Si bien la mayoría de estos aceros se utiliza en estado forjado o laminado, existen piezas intrincadas que requieren de fabricación por procesos de moldeo.

No se consideran los aceros de transformación controlada, que exclusivamente se fabrican para chapas de alta resistencia mecánica, soldadura y tratamiento térmico de temple y revenido para obtener martensita de alta resistencia mecánica. Estos aceros se utilizan en toberas de propulsión de aviones de combate y por lo tanto no es de interés tecnológico de la industria mecánica civil.

En la siguiente figura se presenta un esquema de la constitución de los aceros inoxidable.



Constitución de aceros inoxidable

## Resistencia a la Corrosión

Ya que la resistencia a la corrosión es la principal propiedad de estos aceros, es importante introducir conceptos básicos sobre el fenómeno de corrosión.

Por definición, la corrosión es el deterioro de los materiales por la acción química del medio que los rodea.

En general los metales y aleaciones son termodinámicamente inestables en contacto con el aire y reaccionan formando óxidos. En algunos casos esto genera un descenso de energía libre (por ejemplo en el caso del Al, Mg, Cr, etc.).

Desde el punto de vista cinético, hay casos donde esas reacciones con el medio son muy lentas y no ponen en peligro la integridad ni la aptitud de la pieza en servicio.

A partir de los conceptos analizados, se tiene que en un determinado medio y condiciones de servicio, es posible utilizar cualquier material siempre que la velocidad de pérdida de espesor sea reducida (menor que 0,1 mm/año).

La corrosión puede clasificarse de acuerdo a lo siguiente:

- Química: comprende casos donde el metal reacciona con un medio no iónico (por ejemplo el caso de la oxidación en aire a alta temperatura)

- Electroquímica: implica transporte simultáneo de cargas (iones y electrones) a través de un electrolito

De acuerdo a la forma, la corrosión puede ser:

- Generalizada o uniforme: macroscópicamente, la superficie del metal es atacada en forma uniforme. Es la forma más benigna pues es predecible y controlable. El volumen de material afectado guarda relación con el daño causado.

- Localizada: el daño se localiza en determinadas zonas de la superficie. La velocidad de ataque en esas zonas suele ser muy rápido y el volumen de material atacado no guarda relación con el daño causado. Es difícil de detectar. Es el tipo de corrosión que causa mayor cantidad de fallas y por lo tanto el más temido

## Estabilidad de la capa pasivante en aceros inoxidable

Los principales factores que inciden en la estabilidad de la capa pasivante son:

Composición química del acero, heterogeneidades y tratamientos térmicos.

- El contenido de Cr es el factor principal. Se necesita un 12 % mínimo para lograr la pasividad en soluciones acuosas neutras, a medida que el contenido de Cr del acero aumenta la capa será estable bajo condiciones de creciente severidad.

- El Ni no modifica el potencial de pasivación pero reduce la corriente crítica para la pasivación y en consecuencia mejora la resistencia a la corrosión en ciertos medios. A pesar de esto, el uso del Ni en los aceros inoxidable es fundamentalmente debido a su poder como elemento gamágeno y para mejorar la tenacidad.

- El Mo acompaña al Cr en varios aceros inoxidable en la formación y estabilización de la capa pasivante. El Mo reduce la corriente crítica para la pasivación aún más que el Ni. Esto se traduce en un aumento en la resistencia a la corrosión en ciertos medios ácidos no muy oxidantes (por ejemplo en soluciones de ácido sulfúrico) y en un aumento considerable de la resistencia al pitting y a la corrosión por rendijas, dos tipos de corrosión localizada muy frecuentes en los aceros inoxidable. Obviamente que para que el Mo ejerza estos efectos benéficos debe estar en solución sólida. Esto sucede en aceros austeníticos, ferríticos y dúplex. En cambio en los aceros inoxidable martensíticos, el Mo se encuentra formando carburos o carbonitruros y su efecto sobre la resistencia a la corrosión no es beneficioso. El propósito de su adición en estos aceros es el de mejorar la resistencia al revenido para lograr mayor resistencia mecánica.

- El Mo por encima de ciertos niveles genera inconvenientes en los aceros inoxidable austeníticos y ferríticos de modo que su cantidad debe ser limitada.

- Otros dos elementos que mejoran la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidable, en especial su resistencia a la oxidación a altas temperaturas, son el Al y el Si.

- En general las heterogeneidades presentes en el acero desmejoran la estabilidad y continuidad de la capa pasivante y dan lugar a diferentes tipos de corrosión localizada. La composición de la capa pasiva

está relacionada con la composición local del metal sobre el que se forma. Por lo tanto en sitios donde exista defecto de Cr por presencia de segregaciones, inclusiones no metálicas, precipitación de carburos u otras fases sin Cr, la capa será menos estable e incluso puede no formarse. Esto crea condiciones favorables para un ataque localizado. En este sentido la limpieza del acero y los tratamientos térmicos a que se somete (que controlan o determinan las fases presentes, su distribución, proporción, tamaño y forma), se transforman en factores fundamentales.

- Un ejemplo de corrosión localizada debido a heterogeneidades en el acero es la corrosión intergranular que se produce en ciertos medios cuando precipitan carburos de Cr en bordes de granos de los aceros inoxidable.

Un caso particular de gran importancia práctica es la llamada "contaminación" de los aceros inoxidables que ocurre cuando la superficie de los mismos es puesta en contacto con aceros al C o de baja aleación y ciertas partículas de estos aceros pueden quedar adheridas a la superficie del acero inoxidable. En este caso se generan puntos donde la corrosión puede avanzar. Esto ocurre por ejemplo por contacto con herramientas utilizadas para mecanizado. En estos casos, el decapado y pasivado posterior son fundamental para asegurar resistencia a la corrosión.

El cuidado del estado superficial es fundamental para mantener la buena resistencia a la corrosión de estos aceros. La rugosidad superficial, los residuos superficiales (grasas, aceites, detergentes, etc.), los óxidos de alta temperatura y la contaminación con partículas ferrosas se debe tratar de evitar para preservar la resistencia a la corrosión.

Características químicas del medio

El medio químico y físico-químico que influye en la integridad de los aceros inoxidables es muy variado y extenso. Por lo tanto requiere de estudios y tratamientos especiales. En este caso se presentan conceptos básicos para conocer las condiciones en que los aceros inoxidables presentan resistencia a la corrosión y en los casos en que pueden producirse problemas.

Ya que la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables depende de la formación de una fina capa de óxido ( $\text{Cr}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), la presencia de agentes oxidantes en el medio corrosivo ayudan a generar una capa continua y estable. Por el contrario, en medios poco oxidantes la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables disminuye. Incluso puede no formarse o desestabilizarse.

En base a lo indicado, los aceros inoxidables resisten muy bien la acción de medios oxidantes (por ejemplo la corrosión atmosférica, soluciones de ácido nítrico, etc.). En cambio son atacados, incluso en forma severa cuando se los somete a servicios en medios no oxidantes (por ejemplo ácidos clorhídrico, fluorhídrico o sulfúrico). En el caso del ácido sulfúrico, la presencia de Mo ayuda a aumentar la resistencia a la corrosión.

Una consecuencia de lo anterior es que la presencia de agentes oxidantes en un medio poco oxidante hace que se eleve la resistencia a la corrosión que presentan los aceros inoxidables en ese medio. Por ejemplo la presencia de oxígeno (soluciones aireadas) o ácido nítrico en soluciones de ácido sulfúrico, amplía el rango de condiciones en que se pueden usar los aceros inoxidables (concentración de ácido sulfúrico y temperatura). La presencia de agentes reductores como el H tiene el efecto contrario.

Un factor que afecta intensamente la estabilidad de la capa pasivante es la presencia de iones de los elementos halógenos. Los más frecuentes son los cloruros ( $\text{Cl}^-$ ). Estos iones desestabilizan localmente la capa y generan fenómenos de corrosión localizada (pitting, corrosión en rendijas, corrosión bajo tensiones). Este tipo de corrosión es más peligrosa que la corrosión generalizada por ser menos previsible y controlable.

Otra variable muy importante es el índice pH del medio. Para medios ácidos ( $\text{pH} < 7$ ), la pasivación se hace más difícil dado que aumenta la corriente crítica y el potencial de pasivación.

Variables operativas

- Otras variables del medio que afectan la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidable son la temperatura y la velocidad de movimiento relativa entre el medio y el acero.

- La temperatura afecta la formación de la capa pasivante pues su aumento hace crecer la corriente crítica y el potencial de pasivación con lo que restringe las condiciones en que se espera una buena resistencia a la corrosión. Además, aumenta el llamado potencial de transpasividad por lo que pueden generarse fenómenos de corrosión localizada. La resistencia al pitting disminuye fuertemente al aumentar la temperatura.

- La velocidad relativa entre medio y superficie metálica influye marcadamente en la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidable, particularmente cuando se trata de un medio no muy oxidante. A mayor velocidad de circulación del medio (por ejemplo dentro de una tubería o entre los álabes de una bomba o hélice), será mayor el aporte de oxígeno o del agente oxidante para que se forme la capa y se mantenga estable. La resistencia a la corrosión de los aceros inoxidable aumenta con la velocidad de circulación del medio, hasta un límite tal que comienzan a producirse fenómenos de erosión o erosión-corrosión.
- Una velocidad de circulación alta también ayuda a evitar que decanten ciertas partículas que pueden estar en suspensión en el medio y que podrían ser causa de corrosión localizada si se depositan sobre la superficie del metal.
- Un ejemplo de lo anterior se presenta en el caso de intercambiadores de calor (en particular condensadores) que trabajan con agua de mar. El acero inoxidable austenítico AISI 316 (con 2-3% de Mo) solo puede usarse si se asegura una velocidad de circulación del agua de más de 1,5 m/s, de otro modo se produce pitting y deben usarse otros aceros inoxidable de mayor aleación u otro tipo de aleaciones metálicas usualmente más caras (cuproníqueles, monel, latones aleados o aleaciones de Ti).

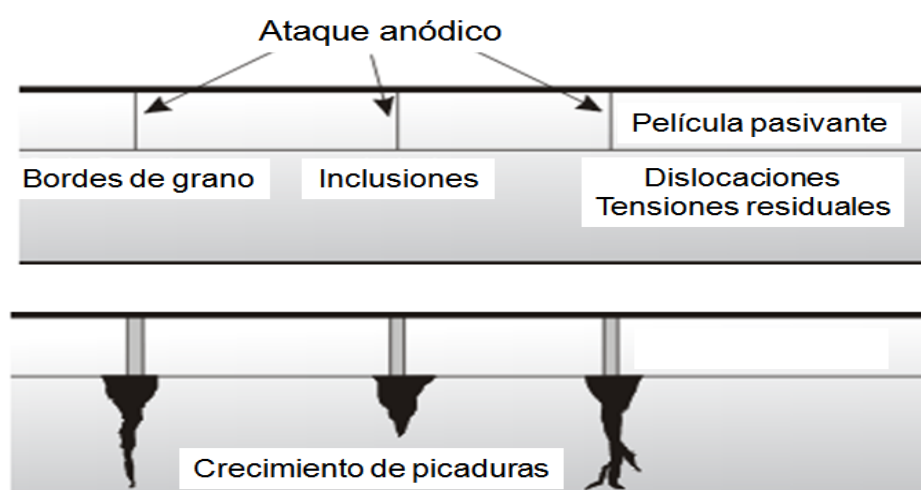
### Factores de diseño y fabricación

- La resistencia a la corrosión de los aceros inoxidable se ve fuertemente afectada por la geometría de las piezas o partes que se exponen al ambiente corrosivo. La presencia de rendijas o zonas de flujo muerto en sitios como juntas soldadas, uniones entre bridas, etc., puede causar corrosión localizada aún cuando el acero elegido y su estado metalúrgico sean los óptimos.
  - Los procesos de fabricación como el conformado en caliente y la soldadura también ejercen una gran influencia en la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidable. Esto se debe a sus efectos sobre la estructura del acero, sobre la geometría y sobre el estado superficial.
- De lo expuesto, surge que la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidable es efectiva en determinadas condiciones. En caso contrario el ataque que se produce es del tipo intenso y localizado.

### Mecanismos de corrosión en aceros inoxidable

Si bien existen varias clases de mecanismos de corrosión localizada en aceros inoxidable, los tipos más frecuentes son los siguientes:

Corrosión por picado (pitting). Este mecanismo se presenta en la siguiente figura:



Mecanismo de corrosión pitting

Si la capa pasivante se desestabiliza localmente y se impide que se vuelva a formar, la corrosión se concentra y avanza rápidamente. Se origina una celda electroquímica entre la pequeña zona no pasivada (que se comporta como zona anódica o activa) y el resto de la superficie que permanece pasivada (que se comporta como cátodo o zona pasiva). Este tipo de corrosión genera pozos en forma de túneles que

avanzan verticalmente hacia el interior del metal y pueden perforarlo en un tiempo relativamente corto en casos de espesores delgados. Para mayores espesores estos túneles constituyen el inicio de una fisura que luego puede propagarse por otro mecanismo que involucre tensiones (por ejemplo fatiga, corrosión-fatiga o corrosión bajo tensiones).

La gran relación entre las áreas de la zona pasiva y de la zona activa ayuda a acelerar la corrosión, pero además las condiciones electroquímicas dentro del pozo hacen que se produzca un efecto autocatalítico que acelera aún más la velocidad de corrosión de la zona anódica.

La presencia de iones  $\text{Cl}^-$ , una alta temperatura, y una baja velocidad de circulación del fluido son las variables que aumentan la probabilidad y severidad de este tipo de corrosión localizada.

El Cr, Mo y el N aumentan la resistencia al pitting. Existe un índice de pitting que representa la susceptibilidad del acero. Se calcula de la siguiente manera, correlacionando casos reales en servicio y experiencias en laboratorio:

Índice de picado IP =  $\%Cr + 3,3 \%Mo + X \%N$  (% en peso)

X=0 para aceros inoxidable ferríticos

X=16 para aceros inoxidable dúplex

X=30 para aceros inoxidable austeníticos

Corrosión rendija (crevice).

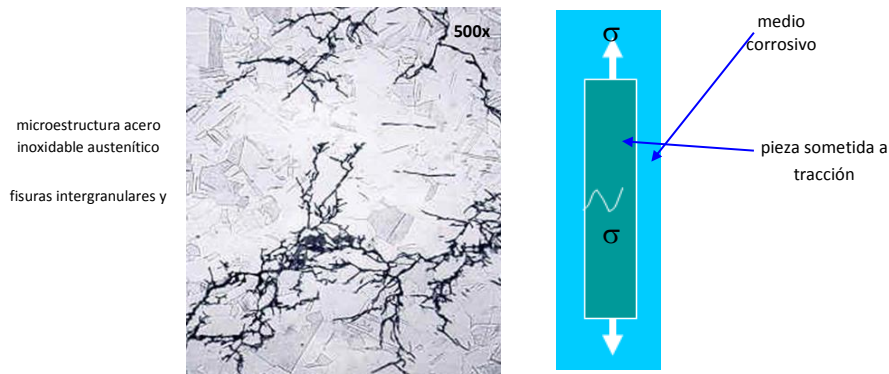


Corrosión rendija (crevice)

Este tipo de ataque se produce dentro de las rendijas que se forman por el propio diseño o geometría de las piezas del componente (por ejemplo uniones soldadas de penetración incompleta, juntas roscadas entre tubos, zonas entre bridas de unión, etc.), o bien debido a partículas sólidas (metálicas o no) depositadas sobre la superficie del metal. En estas zonas la circulación del fluido es muy dificultosa por lo que la renovación del mismo es muy lenta y cuando el oxígeno necesario para la formación de la capa se consume, se crea una celda llamada de aereación diferencial entre la zona de la rendija y el resto de la superficie metálica. La corrosión se localiza en esa pequeña área pues la rendija se comporta como ánodo y el resto de la superficie (generalmente de tamaño mucho mayor) lo hace como cátodo.

Los iones  $\text{Cl}^-$  y una alta temperatura ayudan a que se produzca este fenómeno, mientras que el Mo mejora la resistencia a la corrosión en rendijas. Sin embargo, las mejores soluciones dependen principalmente de un adecuado diseño de la pieza o componente que trate de evitar la formación de zonas donde el fluido se estanque o tenga una circulación muy deficiente. La mantención de una alta velocidad de circulación del fluido también ayuda a evitar la deposición de partículas sólidas sobre la superficie del acero.

Corrosión bajo tensión CBT (Stress Corrosion Cracking, SCC) (Ver figura).



Stress Corrosion Cracking. Por acciones combinadas de medio corrosivo más esfuerzos de tracción

La acción conjunta de tensiones de tracción y de un medio específico generan un fenómeno de fisuración denominado corrosión bajo tensiones que es peligroso y en consecuencia puede ocasionar fallas catastróficas. Si el medio es el adecuado, las tensiones necesarias pueden estar por debajo de la tensión de fluencia. Las fisuras se propagan de modo frágil sin requerir de deformación plástica previa generalizada (aunque la misma desmejora fuertemente la resistencia al fenómeno), esto hace que en general la corrosión bajo tensiones de lugar a fallas catastróficas sin ninguna evidencia previa que indique que el componente ha disminuido drásticamente su capacidad para soportar las tensiones a que está sometido. En la mayoría de los casos tampoco existe evidencia de una fuerte corrosión generalizada en la superficie expuesta.

Los aceros inoxidable austeníticos y los martensíticos son los más susceptibles, los ferríticos son mucho más resistentes, y los dúplex tienen una resistencia intermedia que depende de la proporción de ferrita de la estructura.

Existe un gran volumen de investigación dedicada a la CBT en los aceros inoxidable austeníticos. En el caso de estos aceros existen varios medios que contienen iones específicos que causan este tipo de fisuración, dos de los tipos más conocidos de CBT en aceros inoxidables austeníticos son la fisuración transgranular ramificada que producen las soluciones que contienen cloruros de Na, Mg, Ca, Zn o Li a temperatura mayores de 60°C, y la fisuración intergranular que causan las soluciones cáusticas de no menos de 20% de concentración cuando están a alta temperatura (>130°C).

La acción de cloruros, presencia de deformación plástica en frío, altas temperatura en servicio, elevadas tensiones de trabajo y un pH entre 3 y 8, aumentan considerablemente la probabilidad de fisuración.

En relación a la influencia de la composición química, se ha encontrado que la susceptibilidad a la corrosión en aceros inoxidables es máxima para contenidos de Ni entre 5 y 30%. Todos los aceros inoxidables austeníticos tienen contenidos entre 8% y 25% de Ni, de manera que se encuentran en el rango de máxima susceptibilidad.

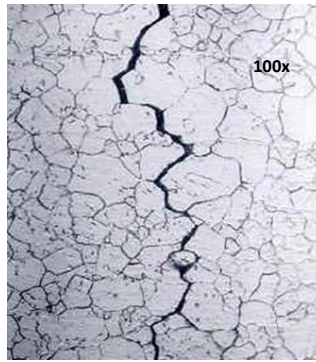
Desde hace más de unos 20 años se han venido desarrollando nuevos aceros inoxidable austeníticos con resistencia a la corrosión en medios de creciente severidad. Esto se logra principalmente incrementando el contenido de Cr y Mo y en consecuencia necesariamente también el Ni. Lamentablemente estos aceros inoxidables austeníticos de mayor aleación siguen siendo susceptibles a la CBT en presencia de cloruros debido a la deficiencia en Ni.

En cambio, en el caso de las superaleaciones base Fe (como algunos Incoloy) o las superaleaciones base Ni (por ejemplo los Inconel), el Ni es lo suficientemente alto como para que presenten mayor resistencia a la CBT. En estos casos, se trata de materiales de costo elevado dado que el Ni es un material caro.

- Corrosión intergranular

Este tipo de corrosión está asociado a un fenómeno de precipitación de carburos de Cr en bordes de grano de la estructura del acero. Se genera en la zona afectada por el calor, en aplicación de soldadura de arco eléctrico.





Fisura por corrosión intergranular

## Aceros inoxidables austeníticos (AIA)

### Denominación de aceros inoxidables según AISI

La nomenclatura que se utiliza en tecnología fue implementada por AISI (American Iron and Steel Institute). No se trata de una especificación sino solo de una manera de denominar los diferentes tipos de aceros inoxidables. Esto significa que cuando se hace referencia al acero AISI 304, esto implica que debe cumplir con una determinada composición química. Esto no impone otros requisitos al acero en cuestión.

En Argentina la norma IRAM-IAS U 500-690 rige la clasificación y designación de los aceros inoxidables. Por último, desde hace algunos años existe una denominación unificada (Unified Numbering System o UNS) que asigna un número a cada aleación metálica estandarizada. Esta denominación respeta la nomenclatura AISI para los aceros inoxidables aunque agrega algunos dígitos que preceden a los ya vistos. La IRAM-IAS U 500-690 también usa la nomenclatura UNS.

La denominación AISI consiste en un número de tres cifras al que puede seguirle una o más letras. Para aceros inoxidables y aceros para alta temperatura que no llegan a ser inoxidables pero que son aleados con Cr, existen 4 series diferentes:

Serie 2xx: aceros inoxidables austeníticos al Cr-Mn-N o Cr-Mn-N-Ni.

Serie 3xx: aceros inoxidables austeníticos al Cr-Ni.

Serie 4xx: aceros inoxidables ferríticos o martensíticos.

Serie 5xx: aceros al Cr-Mo para uso a alta temperatura. No son aceros inoxidables.

Las letras más comunes que pueden usarse después del número de tres cifras son:

L: para denominar a los aceros inoxidables austeníticos de bajo C (0,03% máximo)

N: para aceros inoxidable austenítico con adición de N

LN: para aceros inoxidable austenítico de bajo C y adición de N que compensa el descenso de resistencia causado por el menor contenido de C

H: para aceros inoxidables austeníticos cuya composición química y/o tratamiento térmico se ajusta de modo de optimizar su resistencia a alta temperatura.

F: para aceros resultados de maquinabilidad mejorada.

Los aceros inoxidables austeníticos de mayor aplicación en el campo de la tecnología, se presentan en la siguiente tabla:

Aceros inoxidables de uso frecuente en la industria

AISI Nº	Composición nominal (%)				
	C	Mn	Cr	Ni	Otros
301	0.15 máx	2.0	16-18	6.0-8.0	...
302	0.15 máx	2.0	17-19	8.0-10	...
304	0.08 máx	2.0	18-20	8.0-12	...
304L	0.03 máx	2.0	18-20	8.0-12	...
309	0.20 máx	2.0	22-24	12-15	...
310	0.25 máx	2.0	24-26	19-22	...
316	0.08 máx	2.0	16-18	10-14	2-3 Mo
316L	0.03 máx	2.0	16-18	10-14	2-3 Mo
321	0.08 máx	2.0	17-19	9-12	(5 x %C) Ti mín
347	0.08 máx	2.0	17-19	9-13	(10 x %C) Nb-Ta mín



Aunque no poseen alta resistencia mecánica, este grupo de aceros inoxidable es el que mejor combina buenas propiedades mecánicas y tecnológicas con una excelente resistencia a la corrosión. En consecuencia es el grupo más usado y conocido.

El Cr es el elemento principal en los inoxidables. Este elemento es ferritizante y en consecuencia para la obtención de aceros inoxidables austeníticos, es necesario recurrir a otros elementos para que la austenita sea estable a bajas temperaturas. Los elementos que estabilizan la austenita son Ni, N, Mn, C. El Níquel es el elemento que generalmente se utiliza debido a que forma solución sólida sustitucional y confiere al acero alta resistencia al impacto en un amplio rango de temperaturas.

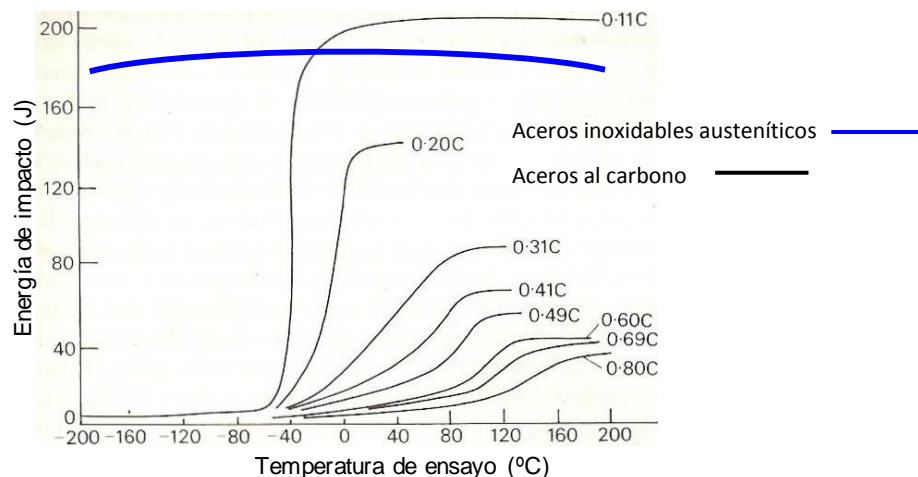
El Nitrógeno forma solución sólida intersticial y por lo tanto es un fuerte endurecedor y tiende a fragilizar al acero. Existen acero con nitrógeno, pero siempre contiene una alta proporción de níquel. El Carbono tiene el mismo comportamiento que el Nitrógeno por lo que se limita su contenido a tenores muy bajos (< 0.06 %)

El Manganeso forma solución sólida sustitucional pero produce alto endurecimiento por deformación. Por lo tanto se limita su presencia en estos aceros. Es conocido el caso del acero Hadfield que tiene 12 % de manganeso y 1 % de C. Es austenítico (no es inoxidable). En servicio, por roce e impacto en equipos de molienda de minerales, aumenta su resistencia al desgaste.

### Estructura cristalina

La estructura cristalina de los AIA es de tipo fc. Tiene 12 sistemas de deslizamiento, lo que hace que este material tenga gran ductilidad. Esto se traduce en una alta capacidad para el conformado plástico (conformabilidad). La gran cantidad de sistemas de deslizamiento hace que la tensión de fluencia sea generalmente reducida. Si bien esto mejora la conformabilidad, en el diseño de componentes exigen el uso de mayores secciones.

En el ensayo de impacto, estos aceros no presentan no presentan transición dúctil-frágil conservando una alta tenacidad hasta temperaturas muy bajas (Ver figura). Esto confiere aptitud para uso en aplicaciones en criogenia. En estas aplicaciones los aceros ferríticos de estructuras bc no pueden ser utilizados debido a su comportamiento frágil en presencia de cargas de impacto o concentraciones de tensiones.



Resistencia al impacto en aceros AIA (comparación con aceros al Carbono)

La estructura fc es inherentemente más resistente a la fluencia a alta temperatura (creep) que las bc. Esto se debe a su menor energía de falla de apilamiento lo que suele controlar los procesos de recuperación dinámica que ocurren durante el fenómeno y en consecuencia controlan la velocidad de deformación que experimenta el material a una tensión y temperatura constantes. Si bien la resistencia a la fluencia a alta temperatura depende varios factores microestructurales, la resistencia de la matriz de fc es alta. De hecho casi todas las aleaciones metálicas usadas a alta temperatura son de matriz cf.

Los intersticiales tienen mayor solubilidad en una red fc debido a que los intersticios de la misma son de mayor tamaño que los de una red bc a igualdad de radio atómico. Por otro lado, los coeficientes de difusión de los intersticiales son menores en una red cf ya que se trata de una red compacta. La conjunción de una alta solubilidad y una baja difusividad para los intersticiales (C y N principalmente) en los aceros inoxidables austeníticos es de gran importancia ya que esto hace que la precipitación de

carburos de Cr sea lenta e incluso que pueda ser evitada en otros casos. De hecho la precipitación de estos carburos genera una deficiencia en Cromo disuelto y deteriora la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidable en diferentes medios.

En el sistema Fe-Ni-Cr la estructura  $\gamma$  es no magnética. Esto es ventajoso en ciertas aplicaciones. Sin embargo, al deformarse la austenita puede transformar parcialmente a martensita y esta fase es magnética. Un mecanismo de endurecimiento denominado TRIP (transformation induced plasticity), justamente se utiliza para inducir la formación de martensita de bajo carbono.

### Propiedades mecánicas de los aceros inoxidable austeníticos

Aún cuando la resistencia a la corrosión sea la principal propiedad que se utiliza para la selección de los aceros inoxidable, no dejan de ser fundamentales las propiedades mecánicas y tecnológicas. Existen aplicaciones de aceros inoxidable austeníticos donde las propiedades mecánicas suelen ser tan importantes como resistencia a la corrosión. Esto sucede en criogenia y en aplicaciones de alta temperatura. A continuación se describen brevemente las principales propiedades mecánicas de estos aceros.

#### - Tensión de fluencia y mecanismos de endurecimiento

En estado de hipertemple, los inoxidable austeníticos comunes tienen una baja tensión de fluencia (200 a 300 MPa). Los métodos de endurecimiento que pueden usarse en estos aceros son restringidos pues no deben afectar demasiado la resistencia a la corrosión.

La disminución del tamaño de grano en los austeníticos no es tan fácil de obtener como ocurre en los aceros de baja aleación o al C, pero además la influencia del tamaño de grano austenítico en la tensión de fluencia es mucho menor que para los aceros ferríticos de baja aleación. El coeficiente  $k_y$  de la ecuación de Hall-Petch tiene un valor cercano a la mitad del que corresponde a aceros ferríticos (esto tiene que ver con la magnitud del apilamiento de dislocaciones en los bordes de grano al producirse la deformación), por lo que el refinamiento de grano (que es altamente dificultoso), es menos efectivo que en el caso de los aceros ferríticos de baja aleación.

La dispersión de fases microscópicas puede elevar la tensión de fluencia. En este sentido las dos fases que pueden aparecer en los inoxidable austeníticos son la ferrita  $\delta$  y la martensita que se produce en algunos inoxidable austeníticos a causa de la deformación en frío. Si la cantidad de ferrita  $\delta$  es importante, el acero se transforma en un inoxidable dúplex, una de cuyas ventajas es justamente tener una mayor tensión de fluencia respecto a los austeníticos.

Se debe tener en cuenta que la ferrita  $\delta$  presenta inconvenientes en ciertos tipos de servicio (por ejemplo en algunos medios corrosivos la ferrita  $\delta$  presenta corrosión. Preferencialmente a alta temperatura esta fase se transforma en la fase  $\sigma$  que produce fragilización cuando el material pasa cierto tiempo en el rango de 500 a 800°C). En las proporciones usuales en que se encuentra en los aceros inoxidable austeníticos (desde trazas hasta no más de un 10% en los aceros trabajados), su influencia en la tensión de fluencia es muy reducida.

En el caso de la martensita el endurecimiento es mayor aunque la resistencia a la corrosión se ve muy afectada.

La formación de martensita durante la deformación en frío de los aceros inoxidable austeníticos tiene gran influencia en el endurecimiento por deformación que presentan estos aceros. Esta propiedad a su vez controla la conformabilidad en varios tipos de procesos de conformado en frío.

En el caso de los AIA, las dos variables que determinan el coeficiente de endurecimiento por deformación son el tamaño de grano y la energía de falla de apilamiento (EFA). A menor EFA se tiene mayor coeficiente de endurecimiento por deformación pues las dislocaciones de hélice se disocian en dislocaciones parciales y dejan una zona de falla de apilamiento entre ellas haciendo más difícil la ocurrencia del deslizamiento cruzado y elevando así el endurecimiento por dislocaciones.

En los inoxidable austeníticos, la transformación de la austenita en martensita a medida que aumenta la deformación es otro factor que afecta sensiblemente el coeficiente de endurecimiento por deformación. La temperatura  $M_s$  de estos aceros se encuentra por debajo de la temperatura ambiente, en cambio la  $M_d$  (temperatura de formación de martensita por deformación), puede estar por encima de dicha temperatura. Esto hace que puede aparecer martensita durante la deformación a temperatura ambiente.

El principal elemento que se usa en los aceros inoxidable austeníticos para controlar la Md y el coeficiente de endurecimiento es el Ni dado que tiene gran influencia sobre la Md y además baja la EFA. Por esta causa, el grado AISI 301, que tiene bajo Ni y alto coeficiente de endurecimiento, es usado especialmente para flejes que se endurecen por laminación en frío. En cambio, los grados AISI 305 y 384 tienen mayor contenido de Ni y un bajo coeficiente de endurecimiento, lo que los hace más aptos para los procesos de estampado y forja.

Otro mecanismo de endurecimiento que puede usarse en los aceros inoxidable austeníticos es el endurecimiento por solución sólida. Si los elementos se eligen adecuadamente, este mecanismo desmejora poco la resistencia a la corrosión y de hecho puede optimizar esta propiedad. El principal endurecedor de una estructura austenítica por solución sólida intersticial es el N. Se debe tener en cuenta que el N afecta negativamente a la tenacidad.

- Resistencia a la tracción

Los aceros inoxidable austeníticos poseen mayor coeficiente de endurecimiento por deformación que los aceros al C y de baja aleación, lo que junto con su gran ductilidad hace que la resistencia a la tracción sea alta en comparación con la tensión de fluencia. La relación  $R_{p0,2}/R_m$  para los inoxidable austeníticos en estado recocido está entre aproximadamente 0,4 y 0,5; la cual es muy baja si se la compara con la que presentan los aceros al C y de baja aleación (entre 0,6 y 0,9 dependiendo del tratamiento térmico).

La resistencia a la tracción de los aceros inoxidable austeníticos estándar en estado recocido es de unos 550 a 600 MPa.

- Ductilidad

La ductilidad de los inoxidable austeníticos es excelente. En estado de hipertemple, el alargamiento porcentual es de 45 y 60% y la reducción de área de 50 y 70%.

Esta gran ductilidad, combinada con un adecuado coeficiente de endurecimiento por deformación y una baja tensión de fluencia hace que sean aceros de alta conformabilidad en todos los procesos de trabajado conformado en frío.

La presencia de fases intermetálicas induce fenómenos de fragilización que deterioran esta ductilidad (y más aún la tenacidad).

- Tenacidad

En estado de hipertemple la tenacidad de estos aceros es excelente y se mantiene en valores altos aún a muy bajas temperaturas. Esto hace que sean materiales muy usados en aplicaciones criogénicas (un ejemplo típico de aplicación es en la producción, transporte y almacenaje de gases líquidos).

La aparición de pequeñas cantidades de ciertas fases intermetálicas (fase  $\sigma$ , fases de Laves, fase  $\chi$  y otras) pueden fragilizar fuertemente el acero, disminuyendo la tenacidad hasta valores que ponen en riesgo la integridad del componente (un recipiente a presión, una tubería, etc.). Estas fases aparecen luego de cierto tiempo en servicio, a temperaturas relativamente elevadas (por ejemplo 500 a 800°C).

- Resistencia a la fluencia lenta (creep) y rotura por fluencia lenta

La estructura cf es más resistente a la fluencia lenta que la bc debido a que al tener una energía de falla de apilamiento menor se hacen más lentos y dificultosos los procesos de recuperación dinámicos que son los que controlan la velocidad de deformación en la etapa estacionaria del proceso de fluencia lenta.

Debido a su excelente resistencia a la fluencia lenta (creep resistance) y a la rotura por fluencia lenta (creep rupture strength), así como a su alta resistencia a la oxidación en caliente y también a ciertos tipos de corrosión de alta temperatura, los inoxidable austeníticos son ampliamente usados como materiales de alta temperatura.

El Cr y el Mo en solución sólida aumentan la resistencia a la fluencia lenta, mientras que los carburos que forman el Nb y el Ti también hacen lo mismo cuando precipitan en forma fina y homogénea.

En el campo de la generación de energía, principalmente en centrales térmicas y nucleares, se los utiliza en cañerías, tubos y válvulas (por ejemplo tubos de sobrecalentadores de calderas, tubos de generadores de vapor, varios componentes del circuito primario de las centrales nucleares, cañería de vapor principal en centrales térmicas, etc).

En las plantas químicas y petroquímicas los aceros inoxidable austeníticos son ampliamente utilizados y constituyen un porcentaje importante dentro de la repartición de diferentes metales en este tipo de plantas. De hecho, una de las primeras aplicaciones de alta temperatura de estos aceros fueron lo tubos

de craqueo de las refinerías en 1928. La variedad de aplicaciones en estas plantas es muy grande y comprende recipientes a presión, cañerías, tubos de intercambiadores de calor, cladding de recipientes a presión, chapas de recubrimiento de aislaciones, válvulas, bombas y sistemas de control, etc.

Existen algunos tipos de aplicaciones donde el acero es sometido a altas temperaturas pero a muy bajas tensiones (por ejemplo es el caso de colectores de gases de salida de turbinas, chimeneas y ductos de gases de escape, etc). En estos casos al existir muy bajas cargas, solo se requiere que la parte o pieza soporte su propio peso a la temperatura de servicio sin experimentar una excesiva distorsión que haga perder su funcionalidad.

De este modo, en estos casos la propiedad fundamental es la resistencia a la oxidación a alta temperatura y no la resistencia a la fluencia lenta. Esto hace que los aceros inoxidable austeníticos (así como algunos inoxidables ferríticos de alto Cr) puedan ser usados a temperaturas de entre 800 y hasta 1200°C, temperaturas que son impensables para estos aceros en piezas metálicas estructurales que soportan cargas importantes.

### Precipitación de fases intermetálicas a alta temperatura

Durante el servicio a altas temperaturas, en los aceros inoxidables austeníticos (así como en los ferríticos e inoxidables dúplex), aparecen una serie de fases intermetálicas de características muy frágiles que desmejoran la ductilidad, tenacidad, resistencia a la rotura por fluencia lenta y resistencia a la corrosión, además de elevar la dureza y resistencia a la abrasión.

El descenso en la ductilidad y tenacidad puede ocasionar fallas cuando el componente que trabaja a alta temperatura se enfría durante una parada.

En el diagrama de equilibrio Fe-Cr aparece una fase llamada fase  $\sigma$  que tiene estructura tetragonal pero con 30 átomos por celda, posee aproximadamente 50% de Cr (aunque no es de composición fija), es no magnética y es muy frágil. El rango de temperaturas donde es estable está entre 515 y 815 °C. Esta fase también aparece en el diagrama ternario Fe-Cr-Ni de modo que puede formar parte de la estructura de los aceros inoxidables austeníticos. En general precipita en borde de grano, adoptando diferentes morfologías: láminas continuas, (esta parece ser la forma más fragilizante), placas o bloques.

Debido a su compleja estructura cristalina y a la baja difusividad del Cr en este sistema en el rango de temperaturas en que aparece esta fase, la cinética de precipitación a partir de una estructura completamente austenítica en ausencia de deformación plástica es lenta y normalmente se necesitan desde varias decenas hasta varios miles de horas para que precipite, esto hace que se trate de un problema de deterioro de propiedades durante el servicio y no durante los tratamientos térmicos a que se someten estos aceros. Sin embargo, aún en pequeñas cantidades y cuando precipita con ciertas morfologías, la fase  $\sigma$  baja sensiblemente la tenacidad y ductilidad del acero.

El mayor descenso de ductilidad y tenacidad se produce cuando la fase  $\sigma$  precipita en bordes de grano, formando una red más o menos continua.

Los factores que ejercen mayor influencia en la cinética de precipitación de la fase  $\sigma$ , son:

- Los elementos de aleación Cr, Mo, Ti, Nb, Si, Al y P. estos intensifican su efecto. Los aleantes también influyen en el rango de composiciones y temperaturas en que la fase es estable.
- La deformación plástica (ya sea previa o en servicio, por ejemplo durante la fluencia a alta temperatura), acelera la precipitación de esta fase.
- La presencia de ferrita  $\delta$  acelera la aparición de la fase  $\sigma$ . La ferrita delta se transforma rápidamente a fase  $\sigma$ . De todas maneras, aún en estos casos se necesitan varias horas para que esto ocurra.

Además de afectar en forma adversa a la ductilidad y tenacidad, la fase  $\sigma$  no es resistente a la corrosión en medios fuertemente oxidantes como el ácido nítrico concentrado a alta temperatura.

En ciertos casos la presencia de fase  $\sigma$  puede dar lugar a corrosión intergranular, aún en ausencia de carburos de Cr.

En el caso de aceros inoxidables austeníticos que contienen otros elementos de aleación, además de la fase  $\sigma$  aparecen otras fases intermetálicas que también tienen efectos fragilizantes. Por ejemplo en aceros que contienen Mo aparece una fase llamada fase  $\chi$  o algunas fases de Laves ( $\eta$ ).

En general la adición de más aleantes hace que se multipliquen las fases intermetálicas posibles.

## Propiedades tecnológicas de los aceros inoxidable austeníticos

Las propiedades tecnológicas de los AIA son complejas. Las principales son la conformabilidad y la soldabilidad.

### Conformabilidad

En estado recocido, la gran ductilidad (tanto uniforme como total) y la baja tensión de fluencia hacen que estos aceros tengan en general muy buena conformabilidad en los procesos de estampado en frío.

En operaciones de conformado donde intervienen tensiones de tracción, un elevado coeficiente de endurecimiento asegura un retraso en la localización de la deformación (aparición de la inestabilidad plástica) y permite aplicar mayores deformaciones que se distribuyen uniformemente en la pieza a conformar. Sin embargo cabe aclarar que existe en esto un inconveniente ya que un alto coeficiente de endurecimiento implica la necesidad de recocidos intermedios entre los diferentes pasos o etapas en el conformado.

En el caso de procesos que involucran tensiones de compresión con grandes deformaciones, se necesita una baja tensión de fluencia inicial y un bajo coeficiente de endurecimiento para evitar roturas en el metal que se está conformando y disminuir el desgaste en el herramental usado.

Mediante el control de los aleantes en los aceros inoxidable austenítico (principalmente el Ni), se puede hacer variar este coeficiente y obtener aceros aptos para operaciones específicas.

En cuanto a la conformabilidad en caliente, los aceros inoxidable austeníticos, junto con las superaleaciones cf base Ni, presentan ciertas dificultades asociadas con su alto contenido de solutos, bajas temperaturas de sólidos, gran resistencia en caliente, precipitación de ciertas fases (ferrita  $\delta$ , carburos), y un rango bastante amplio de tendencia a la fisuración intergranular.

Uno de los factores aislados más significativos en el deterioro de la ductilidad en caliente de estos aceros es la presencia de ferrita  $\delta$  y en este sentido los elementos aleantes alfégenos (en especial el Mo) tienen gran influencia.

### Soldabilidad

Si bien los inoxidable austeníticos son los de mejor soldabilidad entre los diferentes grupos de aceros inoxidable, presentan ciertos problemas que afortunadamente son salvables con relativa facilidad. Los dos problemas principales y más frecuentes son la sensibilización en la zona afectada por el calor (ZAC) y la llamada fisuración en caliente.

El uso de aceros inoxidable austeníticos de bajo C evita los problemas de la sensitización en la soldadura la mayoría de los AIA, pero no previene la precipitación de carburos de Cr si es que el acero va a ser usado a una temperatura dentro del rango de precipitación. En este caso se deben utilizar aceros estabilizados.

La fisuración en caliente es la manifestación de un fenómeno habitual en muchas aleaciones metálicas y que no solo se produce durante la soldadura sino también durante la solidificación de una pieza fundida. Este fenómeno consiste en la aparición de fisuras intergranulares o interdendríticas tanto en la zona fundida como en la ZAC muy cercana a la línea de fusión y se produce cuando el material aún no ha terminado de solidificar.

La fisuración es causada por las deformaciones locales establecidas por la acción conjunta de la contracción y la restricción que actúa sobre el cordón y se opone a esa libre contracción. Estas deformaciones localizadas tienden a separar partes sólidas del metal que están unidas por zonas o películas finas de metal que está aún en estado líquido.

La solución eficaz y económica para este problema, se basa en la presencia de una baja fracción de ferrita  $\delta$  en el metal del cordón. Esto hace que la posibilidad de fisuración durante la solidificación sea prácticamente nula. Dependiendo del tipo de acero inoxidable austenítico y de otras variables, la fracción de ferrita necesaria evitar la fisuración en caliente varía entre 3 y 8% en volumen. La cantidad de ferrita  $\delta$  en el cordón se controla mediante el balance entre los elementos gamágenos y alfégenos del líquido.

El diagrama de Schaeffler (Ver figura), se utiliza para determinar las fases que aparecerán en la estructura de los cordones de soldadura en función de la competencia entre elementos gamágenos (representados mediante el Ni equivalente) y alfégenos (representados mediante el Cr equivalente). Se

trata de un diagrama de fases que sirve para ciertas condiciones de enfriamiento y cierto rango de composiciones químicas.

Dada la importancia de la ferrita  $\delta$  en las soldaduras, también se utiliza el diagrama modificado de De Long.

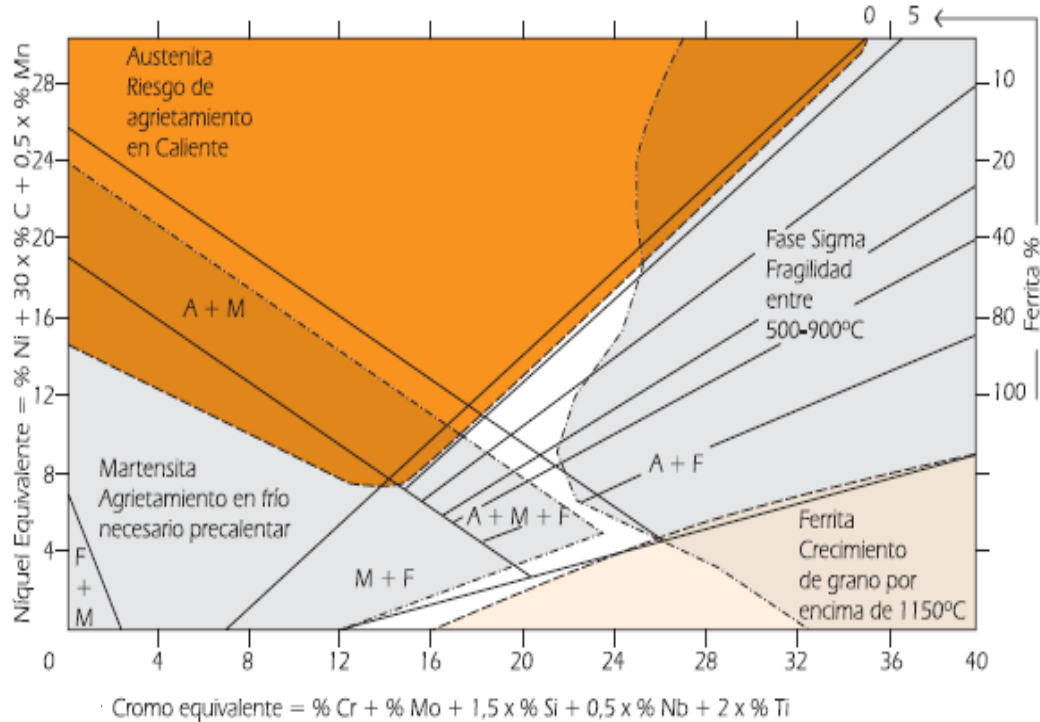


Diagrama de Schaeffler

#### Aceros inoxidables austeníticos de uso frecuente

**AISI 304:** Es el grado que se produce en mayor proporción. Más del 50% del total de aceros inoxidables producidos (de todos los tipos) es de este grado. La composición química que posee logra el mejor balance de resistencia a la corrosión, propiedades mecánicas y costo para una gran cantidad de aplicaciones. El grado AISI 304L se usa cuando está involucrada la soldadura en la fabricación y además cuando es mandatorio evitar completamente la sensibilización. El descenso de la tensión de fluencia debido al menor contenido de C se puede compensar con la adición de N en el grado AISI 304LN.

**AISI 316:** La adición de 2 a 3% de Mo, junto con un ligero aumento del Cr y el necesario balance con mayor cantidad de Ni respecto del AISI 304, eleva la resistencia a la corrosión en la mayoría de los medios, pero en especial aumenta la resistencia al picado, a la corrosión en rendijas, y a la corrosión en ciertas soluciones de ácidos no muy oxidantes (caso típico de soluciones de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Además, el Mo hace elevar la resistencia a la fluencia a alta temperatura. Este grado es el segundo más popular elevándose su producción al 20% del total de aceros inoxidables.

Al igual que para el grado AISI 304, existen las variantes L, N y LN.

**AISI 347 y 321:** Estos grados se denominan estabilizados pues contienen Nb (el 347) y Ti (el 321) para formar los carburos MC que minimizan la formación de los carburos  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  ricos en Cr. Además de lograr evitar la sensibilización durante la soldadura, estos aceros son más resistentes a la sensibilización durante el servicio en el rango de temperaturas de precipitación de los  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  y también poseen mayor resistencia mecánica que los grados L tanto a temperatura ambiente como a altas temperaturas. Por otra parte, a pesar de que la sensibilización no se produce, estos grados presentan otras dificultades durante la soldadura.

**AISI 309 y 310:** Son grados de mayor cantidad de Cr fundamentalmente para aumentar la resistencia a la oxidación y a la corrosión a altas temperaturas. El Ni necesariamente también debe ser mayor para lograr el balance alfégenos-gamágenos. A este último respecto el AISI 309 normalmente posee cierta cantidad de ferrita  $\delta$  en su estructura mientras que el AISI 310 es casi totalmente austenítico, es por esta razón que deben tomarse precauciones especiales durante la soldadura de este último grado. El

contenido de C de estos dos aceros es mayor que el del resto de los inoxidables austeníticos, esto, junto con el mayor porcentaje de Cr, le confieren una excelente resistencia a la fluencia lenta a alta T.

AISI 303 y 303Se: Son grados de maquinabilidad mejorada mediante el aumento del contenido de S y la adición de Se. Se usan frecuentemente en tornillería (mecanizada en máquinas automáticas) y para la fabricación de otras piezas pequeñas que requieren alta maquinabilidad y donde los requerimientos de resistencia a la corrosión no son severos. También son usados para disminuir ciertos tipos de desgaste adhesivo.

#### Aplicaciones

- Equipos para la industria química y petroquímica
- Equipos para la industria alimenticia y farmacéutica
- Construcción civil
- Vajillas y utensilios domésticos

### Aceros inoxidables ferríticos

El diagrama Fe-Cr indica que para porcentajes mayores al 12,5% las aleaciones tiene estructura ferrítica en todo el rango sólido, debido a que el Cr es un alfégeno. En consecuencia para este tipo de aceros inoxidables es posible incrementar el contenido de Cr para lograr mayor resistencia a la corrosión sin que se necesite balancear la composición química con otros elementos de aleación. Esto hace que los aceros inoxidables ferríticos sean más económicos que los austeníticos.

Otra gran ventaja de este tipo de aceros inoxidable es su excelente resistencia a la CBT.

Estas dos ventajas son de importancia en la selección de elegir aceros inoxidables, pero los aceros inoxidables ferríticos sufren inconvenientes debido a la intensa precipitación de carburos y nitruros durante su enfriamiento desde altas temperaturas. Esto produce sensibilización y un marcado deterioro en la ductilidad, tenacidad, y soldabilidad, lo cual condiciona su uso como materiales estructurales. La causa del deterioro de la tenacidad y soldabilidad es la presencia de intersticiales (C y N). Este problema se agrava con el incremento del contenido de Cr.

Para resolver el problema, se han desarrollado una nueva serie de aceros inoxidables ferríticos llamados EBI (extra bajo intersticial). La disminución de los intersticiales hasta límites muy reducidos evita o disminuye la precipitación y sus inconvenientes asociados, permitiendo producir aceros de muy alto Cr con adiciones de Mo y otros aleantes. Estos aceros tienen buenas propiedades mecánicas, buena soldabilidad y excelente resistencia a la corrosión (comparable a la de los inoxidables austeníticos de mayor aleación), aunque su costo es similar al de los aceros inoxidables austeníticos. Un problema central es la disponibilidad de aceros EBI.

Por otra parte, los aceros inoxidables ferríticos sufren de algunos fenómenos de fragilización cuando se los somete durante un cierto tiempo a alta temperatura y esto también es causa de limitaciones en sus aplicaciones. Este problema no puede ser resuelto con la disminución de los intersticiales.

#### Composición química (Ver Tabla)

AISI N°	Composición nominal (%)				
	C	Mn	Cr	Ni	Otros
410	0.15 máx	1.0	11.5-13.0	...	...
420	0.15 máx	1.0	12.0-14.0	...	...
431	0.20 máx	1.0	12.0-14.0	1.2-2.5	...
440A	0.60-0.75	1.0	16.0-18.0	...	0.75 Mo máx
440B	0.75-0.95	1.0	16.0-18.0	...	0.75 Mo máx
440C	0.95-1.20	1.0	16.0-18.0	...	0.75 Mo máx

En general se trata de aleaciones Fe-Cr con bajo contenido de C y con la adición de algunos otros aleantes.

El Cr está entre 12 y 27 % en los grados estándar de los inoxidables ferríticos comunes. Este elemento es el que mayor contribución tiene en la resistencia a la corrosión y la misma aumenta con el contenido de Cr tal como en todos los grupos de inoxidable.

El nivel de intersticiales (C+N) en los aceros inoxidables ferríticos comunes está entre 500 y 2000 ppm en peso, y particularmente el C no supera en general el 0,1% en peso. En el caso de los aceros inoxidables EBI el nivel de C+N está entre 80 y 300 ppm y en estos aceros el Cr puede alcanzar valores de 30%.

Al igual que en los aceros inoxidables austeníticos, el Ti y el Nb se pueden utilizar para estabilizar al acero frente a la precipitación de carburos de Cr.

### Sensibilización y fragilización de alta temperatura en aceros inoxidables ferríticos

Estos dos fenómenos constituyen el principal inconveniente en el uso de este tipo de aceros inoxidables como materiales estructurales.

La solubilidad de los intersticiales C y N es mucho menor en los aceros inoxidables ferríticos que en los austeníticos debido a que en los primeros el tamaño de los intersticios es menor. Por otra parte, la difusividad de estos dos elementos es mayor en los ferríticos. Por lo tanto, cuando un acero inoxidable ferrítico común es calentado hasta una temperatura donde se solubiliza todo el C y N (normalmente se trata de una temperatura mayor a los 950°C) y luego se enfría, la precipitación es tan rápida que es casi imposible evitarla aún con los temple más enérgicos de que se dispone en la práctica real.

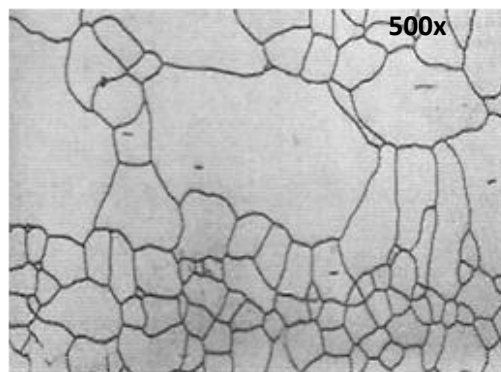
Si bien los bordes de grano siempre son los sitios preferenciales para la nucleación, la fuerza impulsora para la precipitación de carburos y nitruros de Cr es lo suficientemente grande como para que estas fases precipiten también dentro de los granos en forma muy fina y homogénea.

Los carburos precipitados en los bordes de grano generan sensibilización de manera similar que los aceros inoxidables austeníticos, mientras que los nitruros y carburos precipitados en borde de grano (que bien también deterioran la resistencia a la corrosión), son los responsables de cierto endurecimiento y un fuerte descenso en la tenacidad y ductilidad de la aleación. En la ZAC de una soldadura se dan las condiciones como para que se produzcan los dos fenómenos por lo que la soldabilidad de estos aceros es pobre.

A igualdad de contenido de C+N se comprueba que la sensibilización es tanto más intensa cuando menor sea el contenido de Cr del acero. Esto se debe al menor nivel de Cr que queda en la zona empobrecida que rodea a los carburos y que es la responsable de la sensibilización. En cambio, la fragilización es más intensa cuanto mayor sea el contenido de Cr del acero. Esto se debe a que la solubilidad de los intersticiales disminuye al crecer el porcentaje de Cr y en consecuencia es mayor la precipitación de carburos y nitruros.

### Propiedades mecánicas de los aceros inoxidables ferríticos

Teniendo en cuenta que la microestructura de estos aceros se asemeja a los aceros de bajo carbono, la microestructura es ferrítica.



Microestructura de aceros inoxidables ferríticos

Dado que las propiedades mecánicas tienen relación con la microestructura, se tiene lo siguiente:

- La tensión de fluencia tiene un valor mayor en 50-100 MPa que en los inoxidables austeníticos. Esto constituye una ventaja en el dimensionamiento de las piezas. En cambio, la resistencia a la tracción es



menor que la de los austeníticos, lo que se debe al menor coeficiente de endurecimiento por deformación en los ferríticos.

- La ductilidad de los aceros inoxidable ferríticos es menor que la de los aceros inoxidable austeníticos, aunque sigue siendo alta en estado recocido. Esta elevada ductilidad y el bajo coeficiente de endurecimiento por deformación hacen que la conformabilidad sea excelente en operaciones de conformado en frío donde el material sufre grandes deformaciones bajo la acción de tensiones de compresión (acuñado, recalado, repujado, forja en frío, laminación de roscas, etc).

- En operaciones donde intervienen tensiones de tracción la conformabilidad de los aceros inoxidable ferríticos es sensiblemente menor que la de los inoxidable austeníticos.

- En cuanto a la tenacidad, estos aceros presentan el problema de fragilización de alta temperatura que deteriora esta propiedad.

Existen dos fenómenos de fragilización extensamente estudiados que condicionan el uso de estos aceros a alta temperatura:

- Fragilización por presencia de fase  $\sigma$

- Fragilización de 475 °C

La pérdida de tenacidad de los aceros inoxidable ferríticos (en especial de aquellos que poseen alto Cr), junto con los problemas que surgen en la soldadura, limitan la aplicación de estos aceros.

### Soldabilidad de los aceros inoxidable ferríticos

La soldadura de los aceros inoxidable ferríticos mediante procesos de arco eléctrico presenta numerosos inconvenientes por lo que en estos casos se deben tomar varias precauciones.

Los dos problemas principales son los siguientes:

- Fragilización debido a la precipitación de carburos y nitruros (fragilización de alta temperatura)

- Sensibilización debido a la precipitación de carburos de Cr en los bordes de grano.

Ambos fenómenos hacen necesario un tratamiento luego de la soldadura (llamado tratamiento post soldadura), para restituir la resistencia a la corrosión y parte de la tenacidad que se pierde en el cordón y la ZAC.

En los aceros de alto Cr la tenacidad no alcanza valores aceptables ni aún luego del tratamiento post soldadura (o de un recocido).

Otra solución es el uso de elementos aleantes estabilizadores como el Nb o Ti. Sin bien se evita el problema de sensibilización, para que la tenacidad en estado soldado sea aceptable se necesita que el acero tenga un nivel bajo de intersticiales (por ejemplo  $C+N < 500$  ó  $600$  ppm) y además que el espesor del producto sea reducido.

Los aceros inoxidable ferríticos EBI tienen mejor soldabilidad, dado que no se produce ni la sensibilización ni la fragilización para las velocidades de enfriamiento involucradas en ciertos procesos de soldadura por arco.

### Aplicaciones de aceros inoxidable ferríticos

- Construcción civil

- Electrodomésticos (cocinas, heladeras, etc.)

- Mostradores frigoríficos

- Industria automovilística

### Disponibilidad

Es muy reducida la disponibilidad de los diferentes grados de aceros ferríticos. Habitualmente en plaza solo se consigue el acero AISI 430. En caso de requerir otro grado, se debe encargar al fabricante la producción de una colada que implica varias toneladas de acero, con el consiguiente problema de las medidas y formas del producto terminado.

## Aceros inoxidable martensíticos

Composición química (Ver Tabla).

AISI N°	Composición nominal (%)				
	C	Mn	Cr	Ni	Otros
410	0.15 máx	1.0	11.5-13.0	...	...
420	0.15 máx	1.0	12.0-14.0	...	...
431	0.20 máx	1.0	12.0-14.0	1.2-2.5	...
440A	0.60-0.75	1.0	16.0-18.0	...	0.75 Mo máx
440B	0.75-0.95	1.0	16.0-18.0	...	0.75 Mo máx
440C	0.95-1.20	1.0	16.0-18.0	...	0.75 Mo máx

### Microestructura

Al analizar el diagrama Fe-Cr (Figura 7.11), puede verse que existe un rango de Cr para el que las aleaciones pueden ser austenizadas (lazo  $\gamma$ ). En esta condición es posible lograr transformación martensítica por enfriamiento rápido. Esto da la posibilidad de obtener aceros inoxidable con propiedades mecánicas comparables a la de los aceros de baja aleación templados y revenidos.

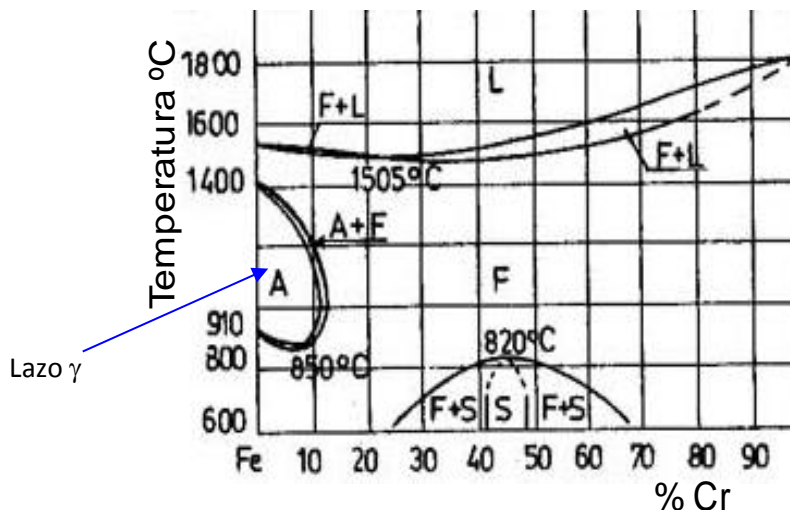


Diagrama de fases Fe-Cr. Aceros inoxidable martensíticos

De esta manera, los aceros inoxidable martensíticos adquieren alta resistencia mecánica y elevada dureza. La dureza y resistencia de la martensita en este caso, depende principalmente de nivel de C del acero por lo que este elemento debe estar presente en mayor proporción que en los inoxidable ferríticos o austeníticos. Además el C es necesario para poder obtener aceros inoxidable martensíticos de mayor contenido de Cr y por lo tanto de mayor resistencia a la corrosión.

La necesidad de un mayor porcentaje de C y la aplicación del revenido luego de la obtención de la martensita, hacen que siempre estén presentes numerosos carburos en la estructura de estos aceros. En consecuencia el nivel de Cr disuelto en la matriz disminuye con el consiguiente efecto negativo sobre la resistencia a la corrosión.

En consecuencia, los aceros inoxidable martensíticos son aceros de alta resistencia mecánica, pero con menor resistencia a la corrosión.

### Tratamientos térmicos de los aceros inoxidable martensíticos

#### Temple

La gran proporción de Cr asegura una alta templabilidad por lo que estos aceros podrían templarse en aire aún en piezas de gran sección. Sin embargo para evitar la precipitación de carburos y la oxidación excesiva se prefiere el temple en aceite en la mayoría de los casos. Otra alternativa usada a menudo es el tratamiento de martempering.

En la elección de la temperatura de austenización deben tenerse en cuenta varios factores en competencia. Para lograr una adecuada templabilidad la temperatura de austenización debe ser suficientemente alta como para disolver los carburos. Además, una alta temperatura de austenización hace que los tiempos del tratamiento sean más cortos.

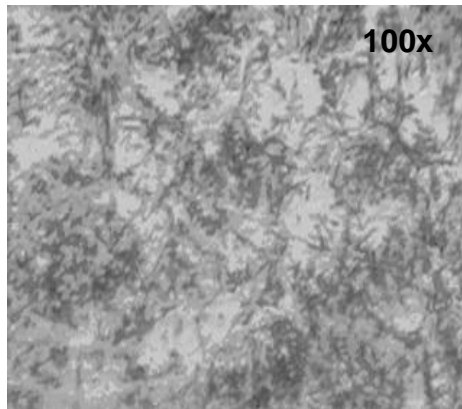
Sin embargo, si la temperatura de austenización es muy alta se produce la transformación parcial de la austenita en ferrita dado que se entra en el campo bifásico. Esta ferrita no se revierte a austenita durante el enfriamiento del temple y en consecuencia la dureza de temple sube con la temperatura de austenización hasta alcanzar un máximo y luego decae. La ferrita producida de esta forma se denomina ferrita  $\delta$ . La tendencia a formar ferrita  $\delta$  durante la austenización aumenta con el incremento de Cr y Mo. El C actúa en sentido contrario.

Otro tema de importancia durante el temple de estos aceros es la aparición de austenita retenida en la estructura de temple. Esta fase es más frecuente en el caso de los aceros de mayor C y Cr.

Debido a su alta templabilidad, estos aceros se someten a menudo al tratamiento de martempering, en especial los de mayor contenido de C. En cambio, no se aplica austempering debido al tiempo excesivo que tarda la transformación bainítica.

### Revenido

Además del balance entre la resistencia mecánica y la tenacidad, durante el revenido de estos aceros es necesario preservar la resistencia a la corrosión. Por esta razón la elección de los rangos de temperaturas a utilizarse debe ser más cuidadosa que para el caso de los aceros al C y de baja aleación.



Martensita revenida de un acero inoxidable AISI 420

La estructura de temple de estos aceros se compone de lo siguiente:

- Matriz martensítica
- Carburos no han sido disueltos durante la austenización o que pueden haber precipitado durante el temple (esto es más probable en el caso de los aceros inoxidables martensíticos de alto C).
- Ferrita  $\delta$  (en especial en aceros de alto Cr y Mo o cuando la temperatura de austenización ha sido elevada)
- Austenita retenida (cuya proporción puede llegar a ser muy alta en el caso de aceros de alto C y alto Cr).

Debido a la presencia de un alto porcentaje de Cr, durante el revenido de estos aceros precipitan varios carburos de transición que pueden coexistir en determinados rangos de temperatura, pero en general hay una tendencia a que un tipo de carburo sea reemplazado por otro. Para un acero de 12% de Cr sin otros aleantes formadores de carburos el primero en precipitar es el carburo  $M_3C$  de estructura ortorrómbica. Este carburo es rico en Fe, contiene aproximadamente 18% de Cr, y se conserva estable hasta unos 450°C. Debido a la baja difusividad del C y del Cr en este sistema para estas temperaturas, el crecimiento de estos precipitados es muy lento y en consecuencia la dureza obtenida en el temple no decae demasiado hasta unos 500°C; en otras palabras estos aceros tienen una resistencia al revenido mayor que los aceros de baja aleación. A partir de unos 480°C comienza a aparecer el carburo  $M_7C_3$  que también es bastante fino pero contiene hasta un 50% de Cr. La resistencia a la corrosión generalizada disminuye a consecuencia del Cr que se extrae de la matriz cuando la precipitación de este carburo está bien desarrollada, sin embargo la dureza se conserva debido a que el tamaño de los precipitados es aún

bastante fino y además hay cierta cantidad de C aún en la matriz martensítica en equilibrio metaestable con los precipitados. Algunos investigadores han encontrado que juntamente con el carburo  $M_7C_3$ , precipita además un carbonitruro de Cr muy fino y que denominan  $M_2X$  donde X es C y N. Se cree que esta fase tiene una incidencia fundamental en la mantención de la dureza durante el revenido.

Cuando precipita el carburo  $M_{23}C_6$  la dureza comienza a decaer fuertemente debido a que su tamaño es bastante más grande que el de los carburos anteriores y además, al ser un carburo más estable extrae todo el C que quedaba en solución en la matriz martensítica. Si bien esto comienza desde los  $480^\circ\text{C}$ , este carburo se vuelve preponderante a los  $540^\circ\text{C}$ .

La precipitación del  $M_{23}C_6$  también produce un fuerte descenso en la resistencia a la corrosión generalizada debido a que su contenido de Cr es de alrededor del 85%. Sin embargo, si el revenido se hace a una temperatura alta o bien durante un tiempo prolongado, las zonas empobrecidas en Cr alrededor de los  $M_{23}C_6$  tienden a homogeneizarse y la resistencia a la corrosión se mejora aunque no alcanza el valor que tiene para temperaturas de revenido menores a  $480^\circ\text{C}$  pues el nivel de Cr que queda en la matriz es menor a causa del gran contenido de Cr del carburo  $M_{23}C_6$ . Es evidente que cuanto mayor sea la cantidad de C del acero, mayor será la cantidad de carburos precipitados y menor la cantidad de Cr que quedará en solución. Es por esto que a mayor contenido de C se necesita mayor porcentaje de Cr.

La adición de aleantes fuertes formadores de carburos como el Mo y el V hace que se modifiquen los rangos de temperatura en que aparecen los diferentes carburos y la fase  $M_2X$ . Estos aleantes intervienen en la composición de esas fases y en general hacen que se conserve una precipitación fina hasta mayores temperaturas de revenido con lo que se retiene mayor resistencia mecánica hasta altas temperaturas de revenido.

Otro fenómeno que influye marcadamente en la elección de la temperatura de revenido es la fragilización por revenido que presentan todos los aceros inoxidable martensíticos. Esta fragilización ocurre entre  $370$  y  $630^\circ\text{C}$ , aunque su efecto mayor se da entre  $400$  y  $570^\circ\text{C}$  y es máxima para una temperatura de alrededor de los  $480^\circ\text{C}$ . Tal como en los aceros de baja aleación, este fenómeno deteriora fuertemente la tenacidad del acero.

Coincidentemente, en este rango de temperaturas de revenido aumenta sensiblemente la susceptibilidad a la fragilización por H que en estos aceros es la causa de la CBT.

Por lo expuesto, los rangos de revenido más usuales en los aceros inoxidable martensíticos son:

- $200-370^\circ\text{C}$ . Se obtiene alta resistencia mecánica, alta dureza, poca ductilidad, baja tenacidad y alta resistencia a la corrosión. Este rango se usa principalmente en aceros inoxidable martensíticos de alto C y alto Cr (por ejemplo los grados AISI 420 y 440), donde se preserva la alta dureza que otorga el alto C y se impide que la precipitación de carburos de Cr deterioren la resistencia a la corrosión. En esta situación la tenacidad debe sacrificarse, siendo esto admisible solo en ciertas aplicaciones.
- $550-650^\circ\text{C}$ . Se logran resistencias mecánicas y durezas menores que para el rango anterior, pero mayor ductilidad y tenacidad junto con una resistencia a la corrosión que resulta adecuada para muchas aplicaciones. También se obtiene alta resistencia a la CBT. Este rango se usa en aceros inoxidable martensíticos de menor tenor de C utilizados en piezas estructurales (en grados AISI 410, 403 y 416). La presencia de elementos que incrementen la resistencia al revenido es fundamental cuando se usan temperaturas muy altas de revenido.

### Recocido

Con el objeto de que los procesos de fabricación como el mecanizado o conformado en frío sean posibles o más económicos, es necesario disminuir la dureza de los aceros inoxidable martensíticos, particularmente en los de alto C.

Debido a la alta templabilidad de estos aceros, el recocido de regeneración (también llamado recocido total) es muy costoso y solo se aplica cuando es imperativo conseguir la mínima dureza. En este tipo de recocido el acero es calentado hasta la temperatura de austenización recomendada (entre  $830$  y  $900^\circ\text{C}$  para la mayoría de los grados comunes) y luego es enfriado a una velocidad no mayor a  $25^\circ\text{C}/\text{h}$  y muchas veces aún menor, hasta los  $600^\circ\text{C}$ . Esto implica un tiempo de enfriamiento no menor a las 10 horas que debe sumarse al tiempo de set point a la temperatura de austenización y al tiempo de calentamiento que puede ser también muy prolongado.

Una variante más económica es el recocido isotérmico que disminuye el tiempo necesario para el tratamiento en aproximadamente un 50% y además no necesita de un sistema de control que asegure una baja velocidad de enfriamiento. Sin embargo la dureza obtenida es ligeramente mayor que la del recocido con enfriamiento continuo. Esto se debe a que para conseguir un menor tiempo de tratamiento es necesario bajar la temperatura de transformación con lo que la dureza de las microestructuras obtenidas es inevitablemente mayor. Aún así este tratamiento permite obtener un resultado aceptable en muchos casos.

Otra posibilidad para obtener estructuras de baja dureza es el temple seguido de un revenido a alta temperatura. Este tratamiento consigue una estructura de ferrita y carburos globulares relativamente gruesos, cuya dureza es un poco mayor que la que se obtiene en cualquiera de los dos recocidos vistos anteriormente, pero el tiempo necesario para esta combinación de tratamientos es menor que el requerido para los recocidos.

Los recocidos descritos se usan como tratamientos intermedios en procesos de fabricación de piezas hechas de aceros inoxidable martensíticos. En cualquiera de las tres variantes se obtiene una estructura de ferrita con carburos de Cr gruesos. La coalescencia de estos carburos es la base del ablandamiento que se obtiene en estos tratamientos. Durante la austenización para el temple y revenido final que debe realizarse en la pieza, estos carburos son difíciles de disolver. Esto se debe tener en cuenta en la elección de la temperatura y tiempo de austenizado.

#### Aplicaciones

- Cuchillería
- Instrumentos quirúrgicos
- Discos de frenos
- Rodamientos
- Cuchillas de corte (razor blades)
- Moldes de Inyección
- Moldes de Compresión
- Moldes de Soplado
- Moldes para Hule
- Moldes de Extrusión
- Moldes para Vidrio
- Válvulas

## 8 - Aceros para herramientas

### Introducción

Se caracterizan principalmente por tener alta resistencia al desgaste. Con estos aceros se fabrican herramientas de corte, matrices de estampado y extrusión, herramientas de mecanizado, etc.

Los primeros aceros para herramientas fueron aceros al carbono, pero con el tiempo se fueron desarrollando aceros con alto contenido de elementos de aleación (W, Mo, Cr, V, Co, etc.). Con estos aceros de alta aleación, se logró incrementar el rendimiento en condiciones severas de servicio.

La mayoría de las herramientas están sujetas a cargas extremadamente altas que son aplicadas rápidamente. Los aceros deben soportar estas cargas un gran número de veces sin romperse, desgastarse o deformarse. En muchos casos estos aceros deben mantener estas propiedades a altas temperaturas en la herramienta.

Los aceros destinados a la fabricación de herramientas, además de contener elementos de aleación, deben ser de alta calidad en relación al grado de limpieza. Esto implica que se debe lograr un bajo nivel de impurezas y homogeneidad en el producto terminado. Por lo tanto los procesos de producción son de alta complejidad comparados con el caso de aceros estructurales o de construcción mecánica. Un aspecto excluyente es que para lograr herramientas de alto grado de durabilidad, se aplican procesos de aceración secundaria tales como ESR o VAR, acompañados de forja en prensas hidráulicas.

En estos aceros, la obtención de las propiedades de alta resistencia al desgaste requiere de la aplicación de tratamientos térmicos. Por lo tanto las piezas sometidas a este tipo de tratamientos deben tolerar distorsión y rotura.

La norma AISI define una codificación para estos aceros, en base a sus propiedades, tratamientos térmicos principales y composición química de acuerdo a lo siguiente:

Codificación AISI de aceros para herramientas

Propiedad	Grado AISI	Características
Water-hardening	W	
Cold-working	O	Oil-hardening
	A	Air-hardening
	D	High carbon; high chromium
Shock resisting	S	Tungsten base
High speed	T	Tungsten base
	M	Molibdenum base
Hot-working	H	H1-H19: Chromium base
		H20-H39: Tungsten base
Plastic mold	P	
Special purpose	L	Low alloy
	F	Carbon tungsten

### Aceros P/M

Existe un grupo aceros de herramientas que se obtienen a partir de la pulvimetalurgia (P/M Tool Steels). Se aplica el proceso HIP (hot isostatic pressing). Se sinterizan carburos de Cr, W, Mo, V, conjuntamente con partículas de cobalto (Co).

### Superalaciones P/M

También existe un grupo de materiales que se denominan carburos sinterizados. No son aceros. Son superaleaciones. Básicamente mediante P/M + HIP se conforman piezas de carburos de tantalio (Ta), hafnio (Hf), niobio (Nb) y titanio (Ti).

Los aceros para herramientas se utilizan para mecanizado y conformado de diversos materiales (aceros, plásticos, cerámicos, etc.). Por lo tanto el diseño de estos aceros se basa en lograr herramientas de alta resistencia al desgaste y durabilidad, en condiciones severas de servicio.

El tratamiento térmico de los aceros para herramientas es similar al de los aceros de construcción mecánica. Por lo tanto incluye las etapas de austenizado, temple, revenido. Dado que se trata de aceros de alta aleación, se deben tomar precauciones para lograr un equilibrio entre los carburos aleados y la matriz que es martensita revenida.

Los aceros para herramientas constituyen un grupo de de aleaciones de alta complejidad que se fabrican para aplicaciones en frío y en caliente.

La importancia de estos aceros es tal que existen manuales en los que se indican las propiedades y aplicaciones de las distintas clases.

El objetivo de este tratado es exponer los principios de diseño de los aceros para herramientas, describiendo el rol de los tratamientos térmicos en la evolución de la microestructura y las propiedades. También se detallan las aplicaciones de las distintas clases de aceros.

### Clasificación

En la descripción de los aceros para herramientas de uso más frecuente se indica la composición química.

Water hardening (temple en agua)

AISI W1: C 0.60 %

Aplicaciones: Herramientas para trabajo de Madera

Cold work, oil hardening (trabajo en frío, temple en aceite)

AISI O1: C 0.90 % - W 0.50 % - Cr 0.50 % - Mn 1.0 %

Aplicaciones: Matrices para moldeo de plásticos, punzones

El AISI O1, conocido también con el nombre de "amutit", es muy utilizado para punzonado en frío.

Cold work (high carbon, high chromium)

AISI D2: C 2.25 % - Mo 1.0 % - Cr 12 % - V 1.0 %

AISI D3: C 2.25 % - Cr 12.0 %

Aplicaciones: cuchillas de corte para guillotinas

Estos aceros prácticamente no sufren deformaciones y con frecuencia después del temple y revenido quedan con dimensiones idénticas a las que tenían antes del tratamiento. Estos aceros templean con un simple enfriamiento al aire o en aceite. El más utilizado es el D3, conocido comercialmente como "Special k", se lo utiliza para cizallas de chapas, brocas, cuchillos de alta resistencia.

Shock resisting (resistente al impacto)

AISI S2: C 1.10 % - Mo 0.5 %

Mandriles, punzones.

Debido al suficiente contenido de elementos de aleación es posible conseguir endurecimientos totales en secciones por encima de los 100 mm de diámetro por enfriamiento en aire desde la temperatura de austenización. Debido al medio de enfriamiento, aire, presentan la menor tendencia al agrietamiento durante el endurecimiento.

Hot work (Chromium)

AISI H 13: C 0.40 % - Mo 1.50 % - Cr 5.0 % - V 1.0 %

Aplicaciones: Matrices de extrusión de aluminio y cobre

El acero H13, que es un acero fácil de trabajar, de buena soldabilidad, coeficiente de expansión relativamente bajo, aceptable conductividad térmica y una resistencia a la oxidación y corrosión por encima del promedio para estos aceros. Por estas razones, también se lo utiliza en algunas estructuras. Se lo utiliza en matricería para extrusión de aluminio.

High speed (Molibdenum)

AISI M2: C 1.0 % - W 6.0 % - Mo 5.0 % - Cr 4.0 % - V 2.0 %

Aplicaciones: Fresas, brocas, creadoras.

Estos aceros son diseñados para herramientas de corte que trabajan a alta velocidad (de ahí su nombre). La característica fundamental de estos aceros es conservar su filo en caliente, pudiendo trabajar con las herramientas casi al rojo (600° C) sin disminuir su rendimiento. La dureza que se pueden obtener estos aceros varían con su composición, pero los valores están en el orden de los 65 a 70 HRC.

AISI M6: AISI M2 + Co 12.0 %

Aplicaciones: Creadoras para servicios de altas exigencias.

Plastic Molds (moldeo de plásticos)

AISI P20: C 0.35 % - Ni 4.0 %

Aplicaciones: Matrices para moldeo de plásticos de alta calidad.

Estos aceros se caracterizan por su condición de ser altamente "pulibles", de manera tal que su superficie queda como un espejo. El AISI P20 es el más utilizado. En la fabricación de moldes para inyección o moldeo por compresión de plásticos.

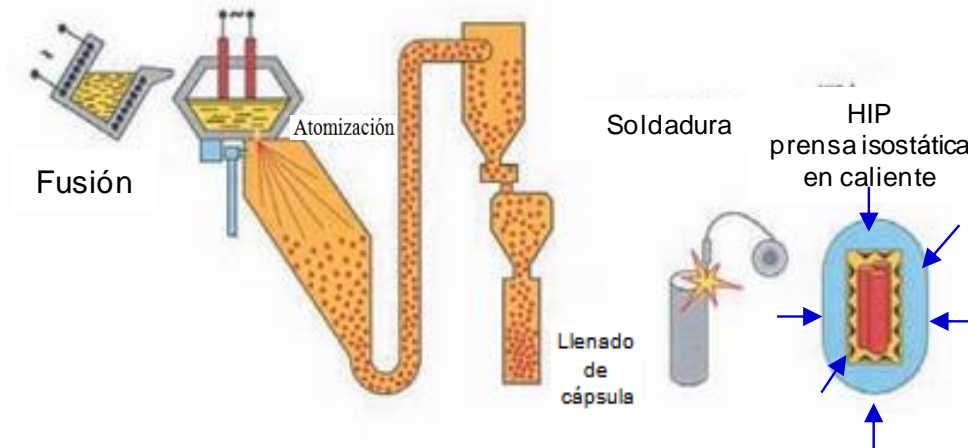
De acuerdo a lo descripto, las calidades de aceros para herramientas que se utilizan en la tecnología son muy pocas. Esto es congruente con los criterios de racionalización que se utilizan en base a acuerdos entre fabricantes y usuarios. Evidentemente la globalización también es incidente. Concretamente la idea es disponer de pocas tipos de aceros, con costos competitivos, a fin de utilizar herramientas de alta calidad.

## Elaboración de aceros para herramientas

La calidad de las herramientas, en el campo de la tecnología altamente competitiva, depende de las características del acero.

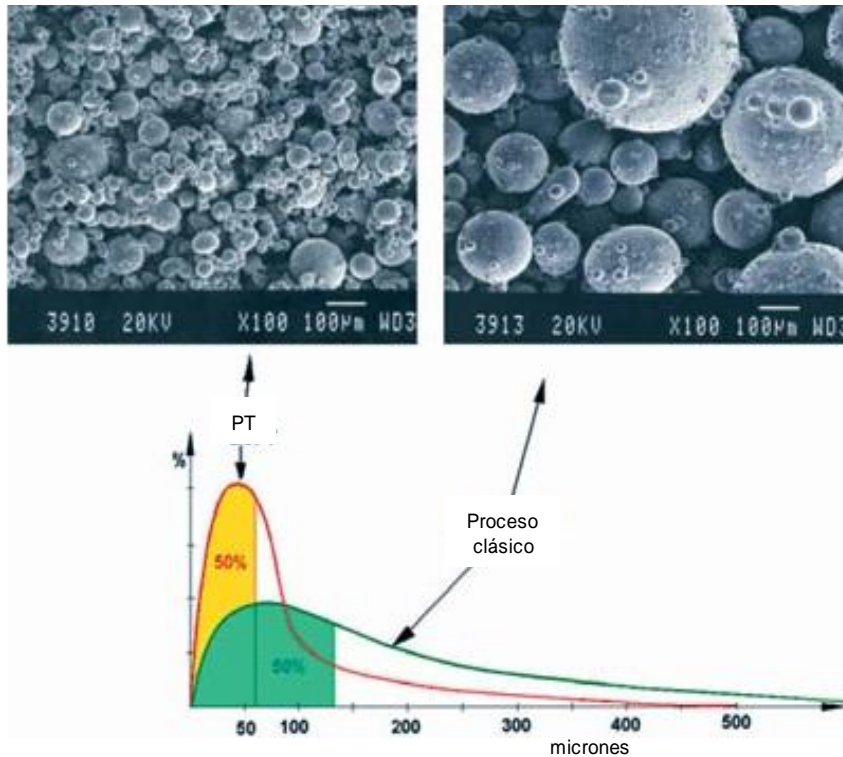
Por tratarse de aceros de alta aleación, es indispensable recurrir a procesos de aceración que aseguren una distribución homogénea de elementos químicos y microfases (carburos e inclusiones no metálicas). Para resolver el problema existen dos alternativas:

- Procesos de metalurgia secundaria (ESR o VAR) mas forja o laminación. Para estos aceros, este es un proceso convencional.
- Procesos de pulvimetalurgia mas HIP (hot isostatic pressing).



Proceso PM + HIP. Elaboración aceros para herramientas

En la siguiente figura se observa la distribución de partículas de procesos PM (Powder Technology) y procesos convencionales



Distribución de partículas PM

### Tratamientos térmicos

Las propiedades de los productos fabricados a partir de estos aceros se obtienen mediante la aplicación de tratamientos térmicos.

La aplicación de tratamientos térmicos es compleja debido a que se trata de aceros de alta aleación.



Un aspecto técnico a resolver es la distorsión que resulta de someter a estos aceros a sucesivos calentamientos y enfriamientos.

Dada la complejidad de este proceso, a modo de ejemplo se describe el proceso que se utiliza para el caso del acero AISI H13.

Se debe seleccionar correctamente la temperatura de temple y el tiempo de mantenimiento a dicha temperatura para asegurar la suficiente disolución de los carburos complejos.

Se debe evitar el crecimiento de grano por excesiva temperatura de calentamiento a fin de no perjudicar la tenacidad.

En caso que la herramienta deba soportar altas temperaturas en servicio, es conveniente emplear el límite superior de la temperatura de temple.

El calentamiento hasta llegar a la temperatura de temple se debe realizar lentamente a fin de evitar la distorsión y fisuración. Esta condición es válida también para el revenido, dado que luego del temple estos aceros son sensibles a la fisuración por tensiones internas. El primer escalón del calentamiento debe ser de 500 a 600 °C. El segundo a 800 °C. El tiempo de precalentamiento se determina en función del volumen de la herramienta, para permitir un calentamiento uniforme.

El tiempo de mantenimiento se determina según la siguiente ecuación:

$$20 + \frac{D(\text{mm})}{2} = \text{tiempo en minutos} \quad (D: \text{Diámetro de la pieza en mm.})$$

Para herramientas sometidas a golpes, se debe seleccionar el límite inferior de la temperatura de temple. Luego del temple, cuando la herramienta se encuentra entre 50 y 100 °C, debe llevarse a horno de revenido. Esto evita la formación de fisuras o la rotura de la herramienta.

Si la herramienta lo permite, es conveniente realizar el temple en medios calientes.

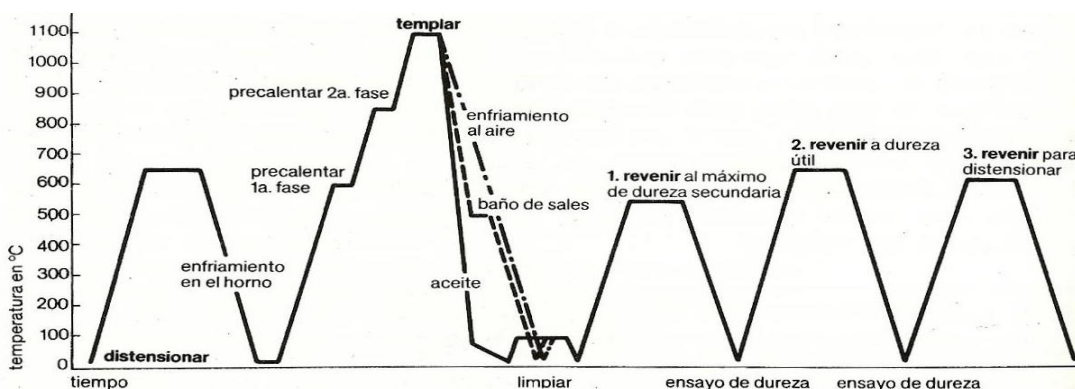
Si no se dispone de hornos con atmósfera controlada, se recomienda proteger la superficie de trabajo de la herramienta con carbón molido de tamaño 3 a 5 mm. Esto evita oxidación o decarburación. El material de protección debe ser neutro para que no se altere la composición química del acero.

El revenido en aceros para trabajo en caliente, debe aplicarse al menos dos veces. En herramientas de gran porte, destinados a servicios bajo severas solicitaciones, es necesario aplicar un tercer revenido a una temperatura inferior en 30 a 50 °C, respecto del segundo revenido.

El tiempo de duración del revenido se determina según la siguiente ecuación:

$$\frac{1 + \text{espesor en mm}}{20} = \text{horas}$$

Las temperaturas de trabajo deben ser inferiores a las de revenido, para evitar pérdidas de la resistencia mecánica. En la siguiente figura se presenta un esquema de tratamiento térmico del acero AISI H13.



Ciclo completo de tratamiento térmico AISI H13

### Carburos aleados de aceros para herramientas

Los carburos aleados constituyen la base de las propiedades de los aceros para herramientas. Por lo tanto no solo interesa la obtención de microestructuras con distribución homogénea de estas microfases, sino que se debe conocer los tipos de carburos que se forman y sus propiedades.

Por ejemplo un acero rápido contiene hasta un 30 % en volumen de carburos en una mezcla de MC,  $M_{23}C_6$  y  $M_6C$ . (En la siguiente Tabla se presentan los carburos que se encuentran en los aceros para herramientas).

Tipo de carburo	Tipo de red	Características
$M_3C$	Ortorrónica	Se trata de un carburo de tipo cementita M puede ser Fe, Cr, W, Mo, V
$M_7C_3$	Hexagonal	Se encuentra en aceros aleados con Cromo Resistente a la disolución a altas temperaturas Alta dureza y resistente a la abrasión. Aparece como producto del revenido en aceros rápidos
$M_{23}C_6$	cúbica de caras centradas	Se presenta en aceros rápidos con alto Cr
$M_6C$	cúbica de caras centradas	Forma carburos de W y Mo. También contiene moderadas cantidades de Cr, V, Co. Se encuentra en todos los aceros rápidos Son carburos de alta resistencia a la abrasión
$M_2C$	Hexagonal	Forma carburos de W y Mo. Aparece después del revenido. Disuelve grandes cantidades de Cr
MC	Cúbica de caras centradas	Forma carburos de V que tienen alta resistencia a la disolución. Produce endurecimiento secundario

Parece lógico que la gran cantidad y complejidad de los carburos aleados presentes en los aceros para herramientas, deba ser tratada en procesos no convencionales tales como VAR (Vaccum Arc Remelting) o ESR (Electroslag Remelting) o con mejores resultados mediante PT (Powder Technology), asistida por HIP (Hot Isostatic Pressing).

En la siguiente figura se presenta la dureza de los diferentes carburos presentes en aceros para herramientas.

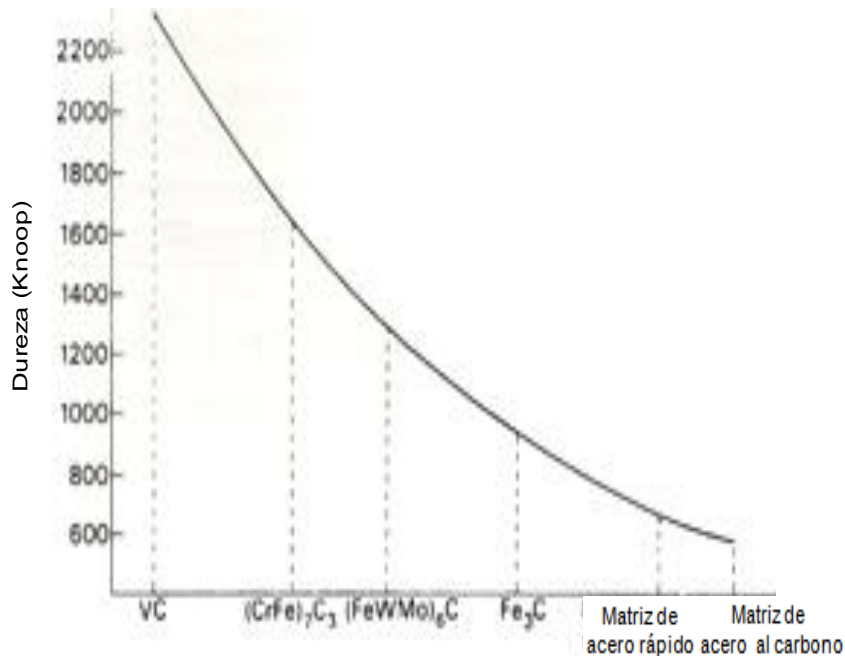


Fig. 7.3 – Dureza de carburos aleados

En el caso de aceros rápidos tipo AISI M2, en la figura 7.4, se observa el nivel de dureza de los carburos presentes y la matriz (martensita)

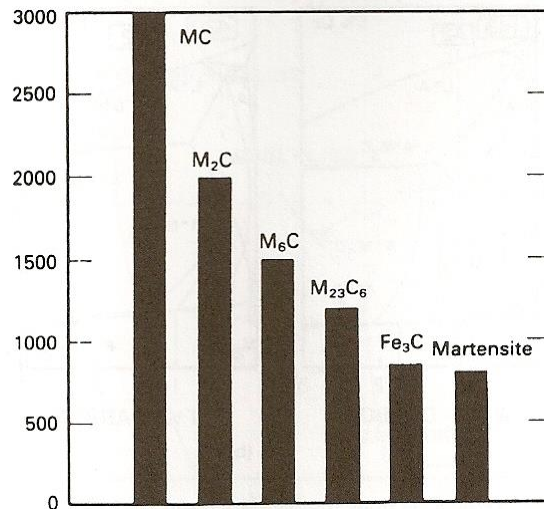


Fig. 7.4 – Dureza relativa de carburos aleados, cementita y martensita en aceros rápidos

## 9 - Fundiciones

### Definición

Cuando el contenido en carbono es superior a un 2% en peso, la aleación se denomina fundición. El carbono puede encontrarse disuelto, formando cementita o en forma libre. En general las fundiciones son duras y frágiles. Hay distintos tipos de fundiciones:

### Clasificación, microestructura-propiedades

- Gris
- Esfeoridal o dúctil
- Blanca

### Fundiciones grises

Se denomina fundición gris por el aspecto que presenta la superficie de fractura, donde la mayor parte del Carbono se encuentra en forma de grafito. El grafito se forma durante la solidificación. El Silicio es el elemento que impulsa la formación del grafito, mientras que el tamaño depende de la velocidad de enfriamiento (tiempo de desmoldeo).

El carbono en forma de grafito tiene mayor volumen que la cementita del acero. Por lo tanto las fundiciones grises tienen una densidad de  $7.25 \text{ gr/cm}^3$  (menor que la del acero). Esto genera un aumento de volumen de las fundiciones grises en el enfriamiento entre  $1000$  y  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  (en el rango de temperaturas de formación del grafito).

Es importante el efecto del Fósforo, dado que altos contenidos de este elemento dan lugar a la presencia del microconstituyente esteadita, muy duro y frágil. Esto hace a la calidad de la fundición.

Composición típica (% en peso): C 3.6 – S 0.15 máx – Si 2.5 – Mn 0.3 – 0.8 – P 0.5 máx.

Resistencia mecánica: 300 MPa (mín)

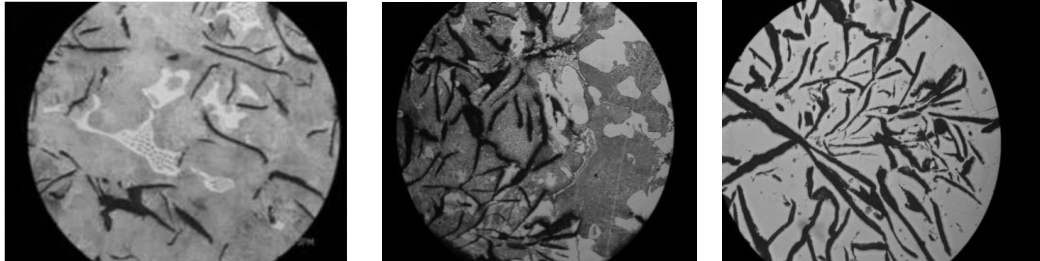
Dureza: 150 HB

### Fundiciones grises

- Fundiciones eutectoides o perlíticas. Contienen el Carbono necesario para la formación de perlita con todo el hierro existente. Se denomina fundición tenaz por sus buenas propiedades mecánicas. Es la fundición preferida por los fabricantes de piezas de construcción mecánica. Los

constituyentes microestructurales son la perlita (con 0.8 % de C) y el grafito. La resistencia mecánica de estas fundiciones varía entre 200 a 350 MPa y una dureza de 180 – 250 HB, con alta resistencia al desgaste.

- Fundiciones eutectoides o ferríticas. Contiene menos carbono combinado que las fundiciones perlíticas. Los constituyentes microestructurales son ferrita y grafito. Estas fundiciones tienen excelente resistencia a la corrosión, comparado con los aceros.



Fundiciones grises ferríticas y perlíticas

### Fundiciones nodulares

Estas fundiciones tienen grafito en forma de nódulos o esferoidal. Se obtiene a partir de la elaboración de fundiciones grises comunes, agregando alrededor de 200 gr/tn de mish metal (Iron 19%; Cerium 38%; Lanthanum 22%; Neodymium 4%; Praseodymium 4%; Magnesium 4%).

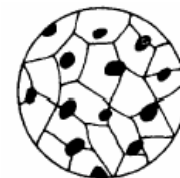
El tratamiento térmico que se aplica es similar al de los aceros. Se realiza temple entre 850 y 925 °C. Se enfría en aceite. El revenido disminuye la dureza pero mejora la tenacidad. Estas fundiciones en estado de temple y revenido alcanzan una resistencia máxima de 900 MPa, con 4 % de alargamiento.

Composición típica (%): C 3.6 - S 0.04 máx - Mg 0.08 - Si 2.5 - Mn 0.1 máx - P 0.1 máx.

Resistencia mecánica: 400 MPa (mín). Dureza: 280 HB.



*Fund. Nodular  
Perlítica*



*Fund. Nodular  
Ferrítica*

### Fundiciones blancas

La denominación se debe a que la superficie de fractura presenta color blanco. Estas fundiciones se caracterizan por tener todo el Carbono en estado combinado formando  $Fe_3C$ . Son de alta dureza pero muy frágiles. No tiene aplicaciones industriales.



*Fundición  
Blanca*