

Universidad de Chile
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Departamento de Ingeniería Mecánica
ME42A – Metalurgia General



Laboratorio 1: Antecedentes Teóricos

Autor:

Eduardo Pérez V.

Agosto de 2004

1.- Introducción

En ingeniería se necesitan muchas veces piezas para algún mecanismo o estructura que cumplan con ciertos requisitos específicos (dureza, elasticidad, peso, etc.), los cuales no siempre son fáciles de cumplir.

Frecuentemente las propiedades físicas y, en particular, el comportamiento mecánico de un material dependen de su microestructura. La microestructura puede ser observada microscópicamente mediante microscopios ópticos o electrónicos. En las aleaciones metálicas la microestructura se caracteriza por el número de fases y por la proporción y distribución de estas. La microestructura de una aleación depende del número de aleantes, de la concentración de cada uno de ellos y del tratamiento térmico que haya recibido.

1.1.- Microestructura del Acero, Diagrama de Fases Hierro-Carburo de Hierro

El sistema de aleaciones binario más importante es el hierro-carbono. Los aceros y las fundiciones son esencialmente aleaciones hierro-carbono.

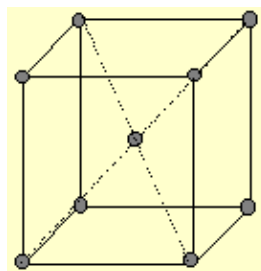


Figura 1.1.1: Hierro α , cubo de cuerpo centrado

Es la estructura que tiene el hierro a temperatura ambiente

El hierro puro, al calentarse, experimenta dos cambios en la estructura cristalina antes de fundir. A temperatura ambiente, la forma estable se llama *ferrita* o hierro α (ver figura 1.1.1) y tiene la estructura BCC (cúbica centrada en el cuerpo). Al alcanzar los 912°C la ferrita experimenta una transformación polimórfica a *austenita* (ver figura 1.1.2) FCC (cúbica centrada en las caras) o hierro γ . La austenita persiste hasta 1394°C, temperatura a la que vuelve a convertirse en una fase BCC llamada *ferrita* δ , que funde a 1538°C.

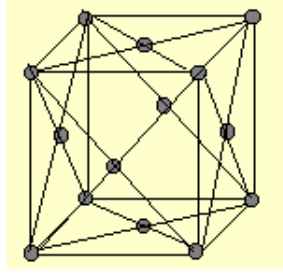


Figura 1.1.2: Hierro γ , cubo de cara centrado

Aparece cuando su temperatura se eleva a aproximadamente 910°C

Los diagramas de fases de hierro-carbono llegan normalmente hasta 6.7% en peso de C, concentración que coincide con la del compuesto intermedio carburo de hierro o *cementita*.

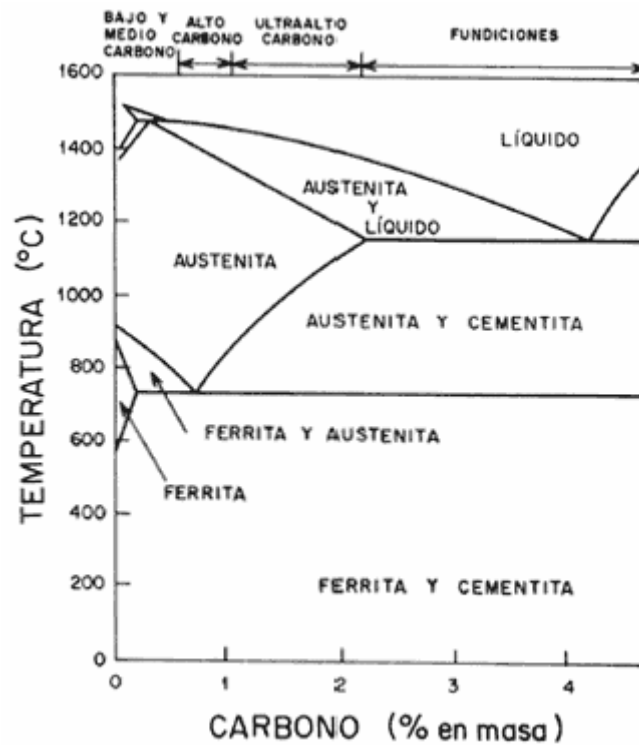


Figura 1.1.1: Diagrama de fases Hierro-Carbono

El carbono es un soluto intersticial en el hierro y forma disoluciones sólidas con la ferrita α , con la ferrita δ y con la austenita γ . En la ferrita α BCC sólo son solubles muy pequeñas concentraciones de carbono; la solubilidad máxima es de 0.022% en peso y corresponde a 727°C. Esta pequeña solubilidad se debe al tamaño y forma de las posiciones intersticiales de la estructura BCC, que dificultan las acomodaciones de los átomos de carbono. El carbono ejerce gran influencia en las propiedades mecánicas de la ferrita, incluso en baja proporción. Esta fase H-C es relativamente blanda, con una densidad de 7.88 [g/cm³].

La austenita, al estar aleada con carbono, no es estable por debajo de los 727°C. La máxima solubilidad del carbono en austenita es 2.11% en peso a 1148°C. Las transformaciones de fase de la austenita son muy importantes en los tratamientos térmicos de los aceros.

La ferrita δ es como la ferrita α , y sólo se diferencian en el tramo de temperaturas en el cual existen.

Se forma cementita cuando se excede el límite de solubilidad del carbono en ferrita α por debajo de 727°C. La cementita también coexiste con la fase γ entre 727 y 1148°C. La cementita es dura y frágil, y su presencia aumenta considerablemente la resistencia de algunos aceros.

1.2.- Observación Microscópica

A veces conviene examinar los elementos estructurales y defectos que modifican las propiedades de los materiales. La importancia de realizar estas investigaciones radica en asegurar la comprensión de la asociación entre propiedades y estructura (y defectos), y en predecir las propiedades de los materiales una vez establecidas estas relaciones.

Algunos elementos estructurales son de dimensiones macroscópicas y se observan a simple vista. Sin embargo en la mayoría de los materiales los granos constituyentes son de dimensiones microscópicas, con diámetros del orden de micrómetros, y sus detalles deben ser observados mediante algún tipo de microscopio. El tamaño y la forma de los granos sólo son dos características de la microestructura.

1.2.1.- Microscopia

En microscopia normalmente se utilizan el microscopio óptico y el electrónico. Estos instrumentos contribuyen a la investigación de las características microestructurales de todo tipo de materiales. La mayoría de estas técnicas llevan acoplado un equipo fotográfico, la fotografía que recoge la imagen microscópica se llama fotomicrografía o simplemente micrografía.

1.2.1.1.- Microscopia óptica

Con el microscopio óptico se utiliza la luz para estudiar la microestructura; sistemas ópticos y de iluminación son los principales elementos. En materiales que son opacos a la luz visible (todos los metales y muchos cerámicos y polímeros) sólo la superficie se puede observar, y la luz del microscopio se debe utilizar en reflexión. Las

distintas regiones de la microestructura originan diferencias en la reflexión y éstas producen contrastes en la imagen. Esta investigación se suele llamar metalográfica, ya que fueron los metales los primeros en ser examinados con esta técnica.

Para revelar los detalles de la microestructura es necesario preparar cuidadosamente la superficie de la muestra. La superficie debe desbastarse y pulirse hasta que quede como un espejo. Esta condición se consigue utilizando papeles abrasivos y polvos cada vez más finos. Se revela la microestructura tratando la superficie con un reactivo químico apropiado en un procedimiento llamado *ataque*. La reactividad química de los granos de un material monofásico depende de la orientación cristalográfica. Por esta razón, en una probeta policristalina las características del ataque varían de un grano a otro.

A lo largo de los límites de grano se forman pequeños surcos por causa del ataque. Los átomos situados a lo largo de los límites de grano son más reactivos y se disuelven con mayor velocidad que los granos. Estos surcos se hacen visibles en la observación microscópica debido a que reflejan la luz en un ángulo diferente al de los granos.

Para la examinación de la microestructura de una aleación bifásica, se escoge un reactivo que produzca diferentes texturas en cada fase de modo que se puedan distinguir con facilidad.

1.2.1.2.- Microscopia electrónica

El límite de aumentos del microscopio óptico es de aproximadamente 2000 diámetros. Algunos elementos estructurales son demasiado finos o pequeños para observarlos mediante un microscopio óptico. En estas circunstancias se utiliza el microscopio electrónico, capaz de conseguir aumentos mucho mayores.

La imagen de la estructura investigada se genera utilizando haces de electrones en lugar de radiación lumínica. De acuerdo con la mecánica cuántica, un electrón a elevada velocidad actúa como una onda. Los electrones, acelerados mediante altos voltajes, pueden conseguir longitudes de onda del orden de 0.003 [nm] (nanómetros). Estos microscopios tienen grandes aumentos y elevado poder resolutivo como consecuencia de la corta longitud de onda del haz de electrones. Lentes magnéticas focalizan el haz de electrones y forman la imagen. La geometría de los componentes del microscopio electrónico es, esencialmente, igual a la del óptico. Existe la microscopia electrónica de transmisión y de reflexión.

Microscopia electrónica de transmisión. La imagen formada en un microscopio electrónico de transmisión (TEM) está formada por un haz de electrones que atraviesa una probeta. Se observan detalles de la microestructura interna; los contrastes de la imagen se consiguen por diferencias del haz difractado o dispersado por varios elementos de la microestructura o defecto. La probeta se debe preparar de forma muy delgada para asegurar la transmisión del haz incidente a través de ella. El haz transmitido se proyecta en una pantalla fluorescente o película fotográfica a fin de conseguir la imagen. Con el microscopio de transmisión se logran aproximadamente 1000000 de aumentos, y se utiliza frecuentemente en el estudio de dislocaciones.

Microscopia electrónica de barrido. El microscopio electrónico de barrido (SEM) es una innovación extremadamente útil para la investigación. La superficie de la probeta a examinar se barre con un haz de electrones y el haz reflejado de electrones se recoge y se muestra con la misma velocidad de barrido en un tubo de rayos catódicos (una pantalla similar a la TV). La imagen que aparece en la pantalla puede ser fotografiada y representa las características de la probeta. La superficie debe ser eléctricamente conductora, esté o no pulida y atacada. Son posibles aumentos de 10 a 50000 diámetros, con gran profundidad de campo. Equipado con accesorios, consigue el análisis químico elemental cualitativo y semicuantitativo de áreas superficiales muy localizadas.

La examinación microscópica es muy útil para el estudio y caracterización de materiales.

1.2.2.- Determinación del Tamaño de Grano

Al considerar las propiedades de un material policristalino generalmente se determina el tamaño de grano. Existen técnicas que especifican el tamaño de grano en función del promedio del volumen de grano, del diámetro o del área. Se puede calcular el tamaño de grano utilizando el método de intersección: en varias micrografías que muestren la estructura granular, se trazan líneas rectas de la misma longitud. Se cuentan los granos cortados por cada uno de los segmentos; se divide la longitud de la línea por el número medio de granos cortados por cada segmento. El diámetro medio de grano se obtiene dividiendo este resultado por los aumentos lineales de las micrografías.

El método más utilizado es el desarrollado por la *American Society for Testing and Materials* (ASTM). ASTM tiene preparadas 10 cartas normalizadas, con granos de diferente tamaño medio. Se ha asignado un índice a cada una de estas cartas, del 1 al 10, denominado *índice de tamaño de grano*; el mayor índice tiene el menor tamaño de

grano. Las probetas se deben preparar cuidadosamente para revelar la estructura granular, que se fotografía a 100 aumentos. El tamaño de grano se asigna por comparación con el índice del tamaño de grano de la carta más parecida a la micrografiada. El índice del tamaño de grano es muy utilizado en siderurgia.

La asignación del tamaño de grano mediante las diferentes cartas se realiza como sigue: El índice del tamaño de grano se designa por n y el número medio de granos por pulgada cuadrada a 100 aumentos por N . Ambos parámetros se relacionan por la expresión de la ecuación (1).

$$N = 2^{n+1} \quad (1)$$

Tabla Nº 1. Reactivos de ataque para examen microscópico*

Reactivo	Composición	Usos	Observaciones
Ácido nítrico (nital)	Ácido nítrico blanco: 1-5 ml Alcohol metílico o etílico (98% o absoluto) (También alcohol amílico): 100 ml	En aceros al carbón: a) para oscurecer perlita y dar contraste entre colonias de perlita, b) para revelar fronteras de perlita, c) para diferenciar la ferrita de la martensita.	La rapidez de ataque aumenta; la selectividad disminuye y se incrementan los porcentajes de HNO_3 . El reactivo 2 (ácido pícrico) generalmente es superior. El tiempo de ataque es de unos cuantos segundos a un minuto.
Ácido pícrico (picral)	Ácido pícrico: 4 g etil o alcohol de metilo (95% o absoluto): 100 ml	Para todos los grados de aceros al carbón recocidos, templados y revenidos, normalizados, esferoidizados, austenizados. Para todos los aceros de baja aleación atacados por este reactivo.	Ocasionalmente útiles para soluciones más diluidas. No revela las fronteras de grano de ferrita tan fácilmente como el nital. Tiempo de ataque de unos cuantos segundos a un minuto o más.
Cloruro férrico y ácido hidrocórico	Cloruro férrico: 5 g Ácido hidrocórico: 50 ml Agua: 100 ml	Aceros austeníticos al níquel y aceros inoxidable.	
Hidróxido de amonio y peróxido de hidrógeno	Hidróxido de amonio: 5 partes Peróxido de hidrógeno: 2-5 partes	Generalmente empleado para cobre y muchas de sus aleaciones.	El contenido de peróxido varía directamente con el contenido de cobre de la aleación que será atacada. Inmersión o frotamiento por casi un minuto. Usar peróxido fresco para buenos resultados.
Persulfato de amonio	Persulfato de amonio: 10 mg Agua 90 mg	Cobre, latón, bronce, plata, níquel, bronce aluminico.	Utilizarlo frío o hirviendo; inmersión.
Reactivo de Palmerton	Oxido crómico: 200 g Sulfato de sodio: 15 g Agua: 1000 ml	Reactivo general para zinc y sus aleaciones.	Inmersión con agitación moderada.
Molibdato de amonio	Ácido molibídico(85%): 100 g Hidróxido de amonio (gr. esp. 09): 140 ml Agua: 240 ml Filtrar y añadir al ácido nítrico (gr. esp. 1.32): 60 ml	Ataque rápido para plomo y sus aleaciones; muy apropiado para remover la capa gruesa de metal trabajado.	Frotar la muestra y lavar bajo chorro de agua de manera alternada.
Ácido hidrofúorico	Ácido hidrofúorico: 0.5 ml (conc) H_2O : 99.5 ml	Examen microscópico general para aluminio y sus aleaciones.	Frotar con algodón suave por 15 s.

* De "Metals Handbook", 1948, American Society for Metals, Metals Park, Ohio.

2.- Aceros

2.1.- Normalizado

Los aceros que se han deformado plásticamente, por ejemplo por laminación, constan de granos de perlita. Estos granos son relativamente grandes, de forma irregular y de tamaño muy variable; por ello, se les aplica un tratamiento térmico llamado normalizado para afinarlos. Los aceros perlíticos de grano fino son más tenaces que los de grano grande. El normalizado se realiza calentando 55 a 85°C por sobre la temperatura crítica superior, que depende de la composición del acero (ver figura 6.1.1). Después del tiempo suficiente para conseguir la completa transformación a austenita (austenización) el tratamiento termina enfriando al aire.

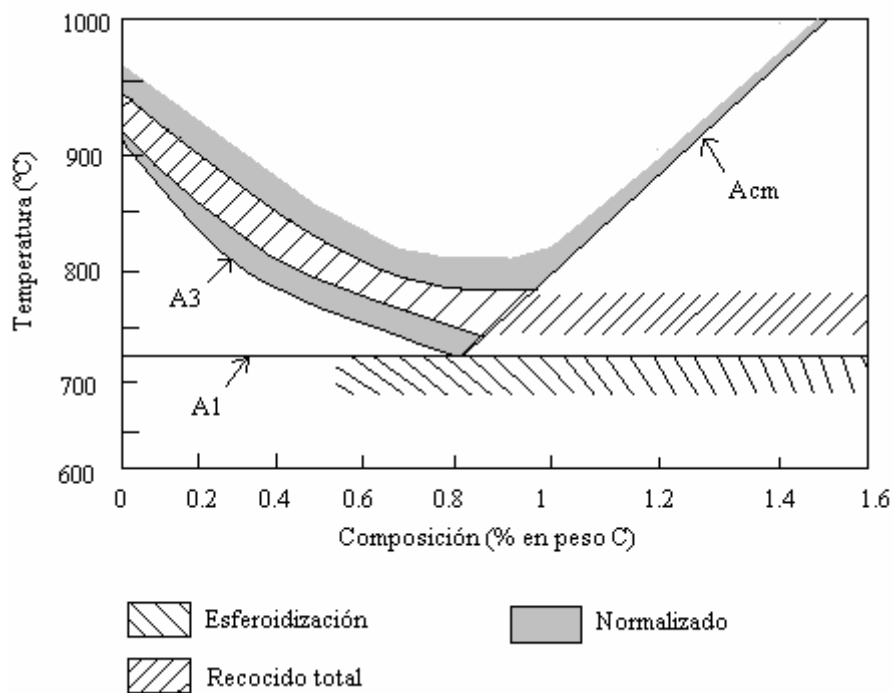


Figura 6.1.1: Sección del diagrama de fases hierro-carburo

2.2.- Clasificación de los aceros

2.2.1.- Introducción

Es muy difícil establecer una clasificación precisa y completa para todos los tipos de acero existentes. Más difícil aún, es establecer una equivalencia exacta entre los aceros de diferentes denominaciones, ya que el ordenamiento de estos materiales en clasificaciones y normas difiere según el país de origen. En el caso de los aceros al Carbono comunes, los sistemas usuales de

clasificación –SAE, AISI, COPANT, DIN, etc.- cubren apenas aquellos aceros hasta un porcentaje de Carbono del 1%.

En el caso de los aceros aleados, la elaboración de sistemas de clasificación es más dificultosa aún, debido al constante nacimiento de nuevos tipos de acero, con la presencia de nuevos elementos de aleación. Aún así, para los tipos más comunes de aceros y las cantidades relativamente bajas de elementos aleantes, tanto la SAE, AISI y otras asociaciones técnicas, elaboraron sistemas de clasificación que atienden satisfactoriamente las necesidades de nuestro medio.

Del mismo modo, ya se establecieron los sistemas de clasificación para algunos tipos de aceros especiales – aceros de herramienta, aceros inoxidable, aceros resistentes al calor, etc.

Todas estas clasificaciones especifican principalmente las composiciones químicas de los aceros, subdivididos en un sinnúmero de grupos e incluyendo decenas de análisis químicos diferentes.

En Chile existe un sistema de normalización para aceros ordenado según un criterio basado en las aplicaciones más comunes de este material; como ejemplo se pueden citar las normas NCh 203. Of 77, para aceros de uso estructural, la NCh 204. Of78 para barras laminadas en caliente para hormigón armado, etc.

2.2.2.- Clasificación de los aceros por composición química

Este sistema de clasificación de los aceros considera como base la composición química de los aceros, los que a su vez, podrían ser considerados en los siguientes subgrupos:

- **Aceros al Carbono:** aquellos aceros en los que está presente el Carbono y los elementos residuales, como el Manganeso, Silicio, Fósforo y Azufre, en cantidades consideradas como normales.
- **Aceros aleados de baja aleación:** aquellos aceros en que los elementos residuales están presentes arriba de cantidades normales, o donde están presentes nuevos elementos aleantes, cuya cantidad total no sobrepasa un valor determinado (normalmente un 3,0 al 3,5%). En este tipo de acero, la cantidad total de elementos aleantes no es suficiente para alterar la microestructura de los aceros resultantes, así como la naturaleza de los tratamientos térmicos a que deben ser sometidos.
- **Aceros aleados de alta aleación:** aquellos aceros en que la cantidad total de elementos aleantes se encuentra, en el mínimo, de un 10 a 12%. En estas condiciones, no sólo la microestructura de los aceros correspondientes puede ser profundamente alterada, sino que igualmente los tratamientos térmicos comerciales sufren modificaciones, exigiendo técnicas, cuidados especiales y frecuentemente, múltiples operaciones.
- **Aceros aleados de media aleación:** aquellos aceros que pueden ser considerados un grupo intermedio entre los dos anteriores.

Una de las clasificaciones por composición química más generalizadas y que inclusive, sirvió de base para el sistema adoptado en Chile, corresponde a la empleada por la American Iron and Steel Institute – AISI y la Society of Automotive Engineers – SAE.

La tabla 6.2.2.1, extraída del Databook 1988 y editada por la American Society for Metals, muestra la designación adoptada por la AISI y SAE, las cuales a su vez, coinciden con el sistema de numeración Unified Numbering System – UNS, de la American Society for Testing Materials – ASTM y la SAE.

En este sistema, las letras XX o XXX corresponden a las cifras que indican las cantidades porcentuales de Carbono. Por ejemplo, en las designaciones AISI – SAE, la clase 1023 significa acero al Carbono, con un 0,23% de Carbono en promedio y en la designación UNS, la clase G10230, significa la misma cantidad de Carbono promedio.

Por otra parte, los dos primeros dígitos distinguen las variedades de aceros entre sí, con la presencia sólo del Carbono como principal elemento de aleación (además, claro está, de las impurezas normales como el Silicio, Manganeso, Fósforo y el Azufre) o de otros elementos aleantes, como el Níquel, Cromo, etc. Además del Carbono.

De este modo, cuando los dos primeros dígitos son 10, los aceros son al Carbono; cuando son 11, son aceros de fácil maquinabilidad con alto contenido en Azufre; cuando son 40, los aceros son al Molibdeno con un 0,25 % de Molibdeno en promedio, y así sucesivamente.

Los aceros de alto contenido aleante, como los inoxidables, refractarios, para herramientas, etc. Son clasificados según su composición química empleando una codificación diferente: por ejemplo, un acero al Carbono con un contenido medio de Carbono de 0,45 % como C45; 37 MnSi5, corresponde a un acero con un contenido medio de Carbono igual a 0,35 % y con cantidades medias en Manganeso y Silicio de 1,25%.

Tabla 2.2.2.1: Clasificación de los aceros
Sistemas SAE, AISI y UNS para clasificar aceros

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%
40XX	G40XXX	Aceros al Molibdeno, con 0,25% Mo
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
46XX	G46XXX	Aceros Ni-Mo, con 0,7 a 2% Ni y 0,15 a 0,3% Mo
47XX	G47XXX	Aceros Ni-Cr-Mo, con 1,05% Ni, 0,45% Cr y 0,2% Mo
48XX	G48XXX	Aceros Ni-Mo, con 3,25 a 3,25% Ni y 0,2 a 0,3% Mo
51XX	G51XXX	Aceros al Cromo, con 0,7 a 1,1% Cr
E51100	G51986	Aceros al Cromo (horno eléctrico), con 1,0% Cr
E52100	G52986	Aceros al Cromo (horno eléctrico), con 1,45% 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
87XX	G87XXX	Aceros Ni-Cr-Mo, con 0,55% Ni, 0,5% Cr y 0,25% Mo
88XX	G88XXX	Aceros Ni-Cr-Mo, con 0,55% Ni, 0,5% Cr y 0,3 a 0,4% 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
81B45	G81B51	Aceros Ni-Cr-Mo, con 0,3% Ni, 0,45 de Cr, 0,12% Mo y 0,0005 a 0,003% B
94BXX	G94XXX	Aceros Ni-Cr-Mo, con 0,45% Ni, 0,4 de Cr, 0,12% Mo y 0,0005 a 0,003% B

**Tabla 2.2.2.2: Composiciones de aceros al Carbono aplicables
a productos semiterminados para laminación en caliente**

SAE N°	Límites de composición química, %				N° AISI
	C	Mn	P, max	S, max	correspondiente
1005	0,06 max	0,35 max	0,040	0,050	-
1006	0,08 max	0,25-0,40	0,040	0,050	1006
1008	0,10 max	0,30-0,50	0,040	0,050	1008
1010	0,08-0,13	0,30-0,60	0,040	0,050	1010
1012	0,10-0,15	0,30-0,60	0,040	0,050	1012
1013	0,11-0,16	0,50-0,80	0,040	0,050	-
1015	0,13-0,18	0,30-0,60	0,040	0,050	1015
1016	0,13-0,18	0,60-0,90	0,040	0,050	1016
1017	0,15-0,20	0,30-0,60	0,040	0,050	1017
1018	0,15-0,20	0,60-0,90	0,040	0,050	1018
1019	0,15-0,20	0,70-1,00	0,040	0,050	1019
1020	0,18-0,23	0,30-0,60	0,040	0,050	1020
1021	0,18-0,23	0,60-0,90	0,040	0,050	1021
1022	0,18-0,23	0,70-1,00	0,040	0,050	1022
1023	0,20-0,25	0,30-0,60	0,040	0,050	1023
1024	0,19-0,25	1,35-1,65	0,040	0,050	1024
1025	0,22-0,28	0,30-0,60	0,040	0,050	1025
1026	0,22-0,28	0,60-0,90	0,040	0,050	1026
1027	0,22-0,29	1,20-1,50	0,040	0,050	1027
1029	0,25-0,31	0,60-0,90	0,040	0,050	-
1030	0,28-0,34	0,60-0,90	0,040	0,050	1030
1035	0,32-0,38	0,60-0,90	0,040	0,050	1035
1036	0,30-0,37	1,20-1,50	0,040	0,050	1036
1037	0,32-0,38	0,70-1,00	0,040	0,050	1037
1038	0,35-0,42	0,60-0,90	0,040	0,050	1038
1039	0,37-0,44	0,70-1,00	0,040	0,050	1038
1040	0,37-0,44	0,60-0,90	0,040	0,050	1040
1041	0,36-0,44	1,35-1,65	0,040	0,050	1041
1042	0,40-0,47	0,60-0,90	0,040	0,050	1042
1043	0,40-0,47	0,70-1,00	0,040	0,050	1043
1044	0,43-0,50	0,30-0,60	0,040	0,050	-
1045	0,43-0,50	0,60-0,90	0,040	0,050	1045
1046	0,43-0,50	0,70-1,00	0,040	0,050	1046
1047	0,43-0,51	1,35-1,65	0,040	0,050	-
1048	0,44-0,52	1,10-1,40	0,040	0,050	1048
1049	0,46-0,53	0,60-0,90	0,040	0,050	1049
1050	0,48-0,55	0,60-0,90	0,040	0,050	1050

3.- Bibliografía Recomendada

- 1.- Ciencia e Ingeniería de los Materiales, William D. Callister, Jr., Editorial Reverté,
- 2.- Metals Handbook
- 3.- “Principios de la Metalurgia Física”, R.E. Reed Hill, Editorial CECSA.
- 4.- Compendio de Normas Para Productos de Acero, Gerdau Aza, Primera Edición, 2002 (www.aza.cl)

* NOTA: Pueden ocupar cualquier libro extra a los de esta lista, o buscar material adicional en la web.