

EL DIAGRAMA HIERRO CARBONO:

ANÁLISIS MICROGRÁFICO DE ACEROS AL CARBONO

El principal componente de aleación en las fundiciones y aceros es el carbono, pues es el que influye en mayor grado en la determinación de las propiedades del material. Es por lo tanto importante el estudio del diagrama de equilibrio hierro-carbono para el conocimiento de las propiedades de los diferentes materiales ferrosos.

Enfriando una solución de carbono en hierro, disminuye la solubilidad del primero y se separa carbono. Este carbono puede segregarse en dos formas diferentes:

- ✕ Carbono libre o sea grafito
- ✕ Compuesto hierro carbono, de fórmula CFe_3 llamado cementita.

El enfriamiento rápido favorece la separación del carbono como carburo de hierro (cementita) y el lento como grafito. De acá que tengamos dos diagramas de equilibrio diferentes: el diagrama hierro-cementita y el de hierro-grafito. En la figura N° 1 representamos ambos diagramas superpuestos.

Las líneas punteadas representan el diagrama hierro-grafito que es el del equilibrio estable. Se obtiene con enfriamiento lento de la aleación y actuando como catalizador el silicio. También puede llegarse a esta estructura por recocido del material cementítico.

El diagrama hierro-cementita es sin embargo industrialmente más importante, por lo cual lo hemos marcado en la figura N° 1 con líneas llenas. Se llama diagrama de equilibrio metaestable y se favorece con enfriamiento rápido del material y catalizador manganeso y elementos con funciones similares. La abscisa termina en un 100% de cementita, que corresponde a un **6.67 % de carbono**.

El hierro puro sufre transformaciones alotrópicas a diversas temperaturas en los puntos denominados: M, G, N, y A de la figura N° 1. Estas temperaturas de transformación se van desplazando a medida que se agrega carbono al sistema, desplazamiento que origina las líneas del diagrama. Veremos primero los distintos estados alotrópicos del hierro puro (0%C):

A temperatura ambiente la forma estable del hierro es el denominado $\text{Fe } \alpha$ cuya estructura cristalográfica es la de una red cúbica de cuerpo centrado, con átomos en los vértices y en el centro del cubo.

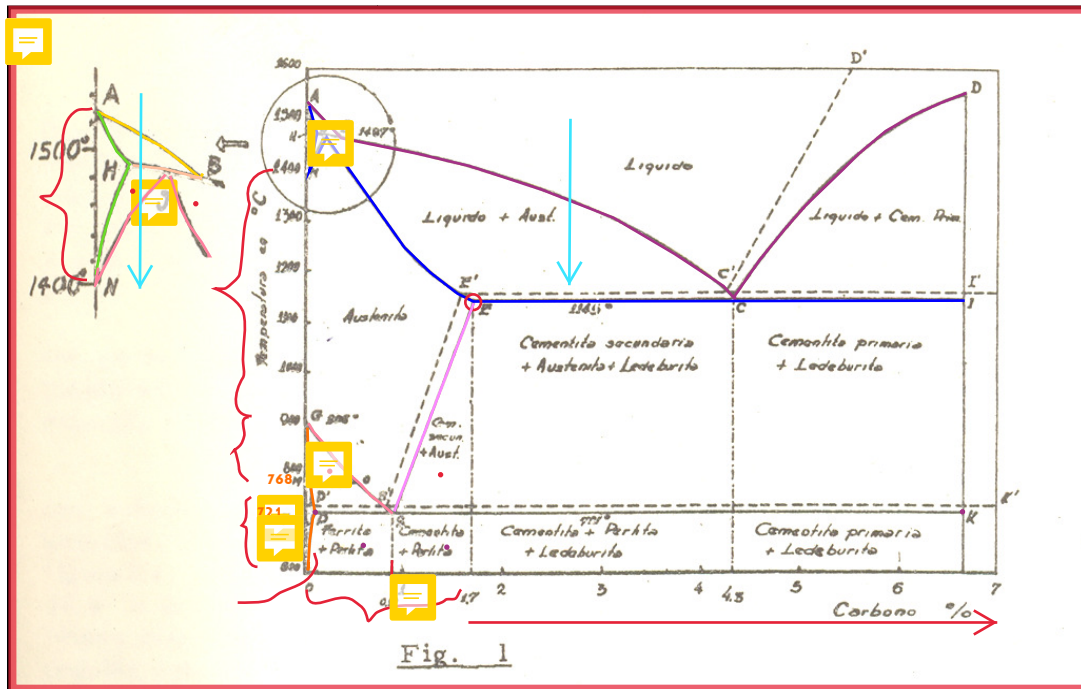
A 768° C sufre ciertas transformaciones físicas, como pérdida de sus propiedades magnéticas, etc. Esta nueva forma se denomina $\text{Fe } \beta$ que cristalográficamente es igual al $\text{Fe } \alpha$.

A su vez el $\text{Fe } \beta$ calentado a 900° C, se transforma en un nuevo estado alotrópico, denominado $\text{Fe } \gamma$. Este último posee una estructura cristalográfica distinta de los dos primeros. Presenta una red cúbica centrada en las caras, con átomos en los vértices y en los centros de las caras del cubo, o sea una estructura más compacta. Su carácter físico sobresaliente es la gran capacidad para disolver carbono, en estado sólido. La solución sólida de carbono en hierro gamma se llama "**austenita**".

A 1401°C. la estructura cristalográfica del hierro se transforma nuevamente en cubos centrados en el cuerpo obteniéndose el llamado $\text{Fe } \delta$. Finalmente, si seguimos calentando el $\text{Fe } \delta$, a 1528° C, nos encontramos con el punto de fusión del hierro.

Estas temperaturas de transformación se denominan A_1 , A_2 , A_3 y A_4 . Durante el calentamiento, los puntos de transformación se encuentran algo por encima de los hallados durante el enfriamiento. Los registrados durante el calentamiento se denominan A_{c1} , A_{c2} , A_{c3} y A_{c4} (c: del francés *chauffage*) y los registrados durante el enfriamiento A_{r1} , A_{r2} , A_{r3} y A_{r4} (r: del francés

refroidissement). La pequeña diferencia de temperatura entre A_{cl} y A_{r1} , entre A_{c2} y A_{r2} , etc., se llama **histéresis térmica**. Con calentamientos y enfriamientos muy lentos disminuye la histéresis y los puntos A_c y A_r se acercan a las temperaturas ideales mencionadas.



Estas temperaturas de transformación se desplazan con el contenido creciente en carbono del sistema dando lugar a las líneas del diagrama. hierro-carbono. En la figura 1 hemos representado dicho diagrama. ABCD es la línea del líquidus o sea del comienzo de solidificación, y AHNJEKI la línea del sólus, por debajo de la cual todo el material está en estado sólido. Las líneas que se encuentran por debajo de esta última, representan transformaciones en estado sólido. Daremos a continuación los detalles de estas transformaciones en el sistema metaestable que es el que corresponde a los aceros.

SISTEMA HIERRO- CEMENTITA (METAESTABLE)

Es el sistema de equilibrio metaestable, que se favorece con una solidificación más rápida y con catalizadores como por ejemplo el manganeso. Por ser el más frecuente e industrialmente más importante, especialmente para las aleaciones de bajo contenido en carbono (aceros), lo hemos trazado con líneas llenas en el diagrama de la figura 1.

Las aleaciones de concentraciones de carbono menores del 1,7% se denominan aceros y las de mayor concentración, fundiciones.

Analizaremos el caso de los aceros, o sea las aleaciones con menos de 1,7 % de C. Veremos primero a las comprendidas entre los puntos B Y E (fig. 1). Al enfriar la aleación hasta la línea BC (liquidus) comienza la solidificación en forma de solución sólida de C en Fe, llamada "austenita". La solidificación se completa al llegar a la línea JE durante el enfriamiento. La estructura obtenida es estable solo a alta temperatura pues el Fe γ se transforma posteriormente en Fe α . Más adelante trataremos de las transformaciones ulteriores de este componente.

Por enfriamiento, de las aleaciones líquidas de concentración en carbono menor que la correspondiente al punto B, se separa primero una solución sólida llamada δ (solución sólida de carbono en hierro delta) cuya composición varía a lo largo de AH, mientras la concentración del

líquido remanente se desplaza según la línea AB. Es decir que tenemos el caso de una solución sólida de línea de sólidos AH y de líquidos AB. Al llegar a la temperatura de 1487°C, se produce una transformación peritética. La solución sólida de composición H reacciona con el líquido remanente de concentración B, para dar otra solución sólida llamada austenita de concentración J.

Es decir que la solubilidad del carbono en el hierro aumenta del valor H al J. Si la concentración original del líquido ha correspondido exactamente a la del punto J, no quedará después de la transformación peritética ni solución δ , ni líquido B; todo se habrá transformado en solución sólida γ . Pero si la concentración original del líquido estuvo comprendida entre A y J, además de solución sólida γ quedará en el sistema algo de solución sólida δ remanente.

Por el otro lado, tratándose de una concentración original comprendida entre J y B, luego de la transformación tendremos solución sólida γ más líquido B.

Al seguir bajando la temperatura todo el material se transforma en solución sólida γ . La transformación del líquido remanente B en solución sólida se realiza a lo largo de la línea JE y la transformación de la solución sólida δ remanente en γ según la línea JN.

Por debajo de la línea NJE (fig. 1), nos encontramos pues con una solución de carbono en hierro γ denominada austenita como en el caso anterior. **El aspecto metalográfico de la austenita es de cristales blancos poligonales, característicos de las soluciones sólidas y metales puros.** De acuerdo a lo descrito, durante el enfriamiento, se llega a la austenita por dos caminos distintos: por solidificación directa a partir del líquido cuando la concentración original del baño está comprendida entre los puntos B y C, y por transformación indirecta pasando primeramente por la solución sólida δ en caso de contenidos originales de carbono menores al correspondiente al punto B. La capacidad del hierro γ para disolver carbono varía con la temperatura. Alcanza su valor máximo de 1,7 % a 1145° C, punto E (fig. 1).

Si tenemos una solución sólida en estas condiciones y bajamos su temperatura, la solubilidad del carbono disminuye y se separa cementita a lo largo de la línea ES, a partir del sólido. La línea ES indica la variación de la solubilidad del C en el Fe con la temperatura.

Los cristales separados son de cementita, compuesto químico de fórmula definida: CFe_3 y la solución sólida remanente se va empobreciendo en carbono, variando su composición a lo largo de ES. Al llegar a la temperatura de 721° C la concentración de la austenita remanente será de 0,89 % de carbono. **En este momento cesa la segregación de cementita, y la solución sólida homogénea de austenita se convierte en un material heterogéneo, semejante a los eutéticos.** Por provenir de un sólido se llama eutectoide. Si en cambio la concentración original de la austenita está entre G y S (fig. 1) o sea. un contenido en carbono menor de 0,89 % llegaremos durante el enfriamiento a la línea GS, donde se separa ferrita, solución sólida de carbono (de muy baja concentración) en hierro α .

La composición de la ferrita separada varía de acuerdo a la curva GP y la de la austenita remanente, de acuerdo a GS.

Alcanzando el punto S, a la temperatura de 721° C, la austenita remanente se convierte en el mismo eutectoide anteriormente mencionado, llamado **perlita**, que es una yuxtaposición de láminas de ferrita y cementita (0,89 % C). Por lo tanto, los aceros hipoeutectoides o sea de concentración en carbono menor del 0,89 %, presentan al microscopio metalográfico cristales poligonales de perlita, rodeados de una matriz de ferrita.

Los hipereutectoides (más de 0,89 % e), en cambio, muestran cristales de cementita blancos, a menudo en redes, con una matriz de perlita (ver figuras 3, 4, 5 Y 6).

- **Como puede apreciarse en estas figuras, tanto la ferrita en los aceros hipoeutectoides, como la cementita en los hipereutectoides forman polígonos que encierran regiones de perlita.** Esto se debe a

que los granos primitivos de austenita al irse enfriando y segregando, ya sea ferrita o cementita, lo han hecho en los bordes de grano, puesto que son éstos los sitios de mayor energía interna, y por lo tanto, de mayor facilidad para crear una fase nueva.

Posteriormente, el grano de austenita encerrado entre la ferrita y/o cementita, se ha convertido en el eutectoide perlita. Por lo tanto el tamaño de estos polígonos de perlita da idea del tamaño de grano austenítico anterior. Este es un dato muy importante para deducir propiedades mecánicas de material.

Casos prácticos:

Para facilitar la comprensión de todo lo antedicho, analizaremos tres casos prácticos de aceros de diferente concentración en carbono que solidifican según el sistema hierro-cementita (fig. 2).



Caso I:

Aleación de 0,4 C. Como vemos es un acero hipoeutectoide. Al ir enfriando la aleación líquida vamos a la línea HC (fig. 2), donde comienza a solidificar una solución sólida, llamada austenita en forma de dendritas. Alcanzada la línea HE, toda la aleación se encuentra en forma de sólido austenita que forma cristales blancos poligonales. Esta austenita que en un principio tenía una concentración variable, se homogeniza por difusión. Si seguimos bajando la temperatura, llegamos a la línea GS donde comienza la segregación de los cristales de ferrita. Estos cristales se forman en los bordes de los granos de la austenita, que son los sitios de mayor energía interna y por lo tanto los más propicios para nuclear fases nuevas.

Mientras se segrega la ferrita, la austenita remanente va enriqueciendo en carbono, variando su composición a lo largo de la línea GS. No obstante tal variación, su aspecto metalográfico sigue siendo de polígonos blancos.

Alcanzada la línea PS, la austenita remanentemente tiene 0,89 % de C o sea la composición del eutectoide perlita. Acá se produce la transformación eutectoide: toda la austenita remanente se desdobra en dos componentes: láminas de ferrita de composición P y láminas de cementita de composición K. La yuxtaposición de ambos componentes forma el eutectoide perlita (en el microscopio se presenta en forma de láminas claras y oscuras semejantes a una impresión digital).

De modo que a temperatura ambiente atacado con un reactivo mital se observa al microscopio: zonas más o menos poligonales de cristales claros y oscuros de perlita, rodeados de grupos de cristales blancos de ferrita (polígonos blancos más irregulares que la austenita).



Caso II:

Aleación de 0,89 % C. Es un acero eutectoide. Cuando se enfría, la aleación líquida, al llegar a la línea HC, al igual que en el caso anterior, solidifica en cristales de solución sólida austenita en forma de dendritas de composición variable que posteriormente se homogeneiza por difusión.

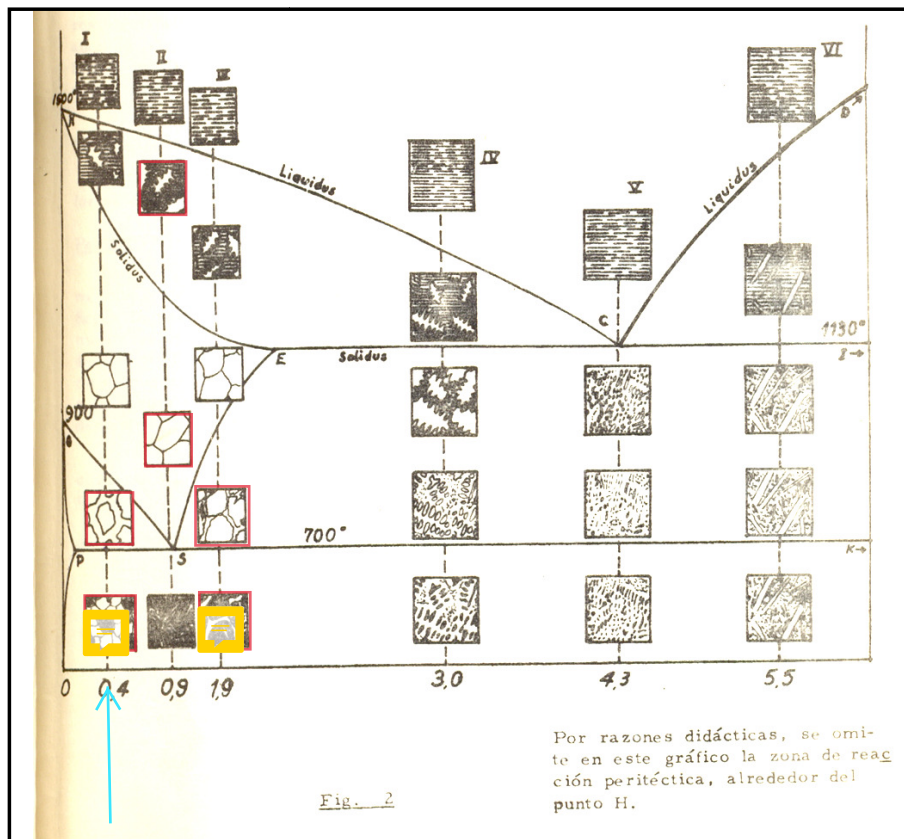
Al llegar a la línea HE, se completa la solidificación, y de allí en adelante, tenemos un sólido homogéneo compuesto de una sola fase: la austenita, que se presenta en forma de polígonos blancos. Una vez alcanzado el punto S, ocurre una transformación a temperatura constante: el sólido austenita se transforma en una yuxtaposición de dos componentes; ferrita y cementita, dando el eutectoide anteriormente mencionado: perlita. De modo que a temperatura ambiente, todo el material está formado por perlita.

La orientación de las láminas de perlita cambia bruscamente en los límites de los anteriores granos de austenita. Es así como influye en las propiedades mecánicas del material el tamaño de grano austenítico, hasta en los casos en que quede un solo constituyente metalográfico.

✚ Caso III:

Aleación de 1,3 % C: Este es un acero hipereutectoide, que al llegar a la línea del líquidus HC solidifica, como en los dos casos anteriores, en forma de austenita. En el intervalo de temperaturas comprendido entre las líneas del líquidus y sólidos, van engrosando los dendritos de austenita, completándose la solidificación al atravesar la línea HE. Por debajo de esta línea, nos encontramos nuevamente con la solución sólida **equiaxial** de austenita. La composición de la misma se va homogeneizando por difusión. Cuando llegamos a la línea SE comienza a disminuir la solubilidad del carbono en hierro gama, de acuerdo a lo indicado por la misma línea SE. Por lo tanto la solución sólida comienza a segregar carbono de su seno, en forma de cementita o carburo de hierro de composición K. Esta cementita se forma en los límites de los granos de austenita, que poseen la mayor energía interna. Por lo tanto, hasta aquí tenemos cristales poligonales blancos de austenita, rodeados por una red fina de cementita.

Cuando llegamos a la línea PK toda la austenita (que fue variando su composición según ES) se transforma en perlita según la transformación citada en los casos anteriores. Esta aleación presenta pues al microscopio polígonos más o menos regulares de perlita, rodeados de una red de cementita (fig. 6).



CONSTITUYENTES ESTRUCTURALES DE LOS ACEROS AL CARBONO RECOCIDOS:

■ **Ferrita:** Es hierro α (hierro casi puro) obtenido en la zona crítica, durante el enfriamiento por transformación alotrópica del hierro γ . **Es la forma del hierro estable a temperatura ambiente.** Puede tener en solución sólida pequeñas cantidades de Si, Mn, P, S y otras. En los aceros aleados puede tener en solución cantidades variables de Ni, Mn, Cu, Si, Al, etc. **El carbono** es retenido por la ferrita en un máximo de 0.008 % a temperatura ambiente.

Cristaliza en el sistema cúbico a cuerpo centrado. Al microscopio se observa como granos blancos de contornos negros, cuando es atacada con reactivos de nital o picral. Es el más blando de los constituyentes metalográficos del acero, tiene aproximadamente 80 Brinell de dureza; es poco tenaz; 28 kg/mm² a tracción; 35 % de alargamiento.

Es muy dúctil y magnética.

■ **Cementita:** Es el carburo de Fe: CFe₃ conteniendo 6,67 % de C y 93,33 % de Fe. Es el constituyente más duro (más de 68 Rc.), y frágil de los aceros. Cristaliza formando un paralelepípedo ortorrómbico. No es coloreado ni atacado por los reactivos ácidos comunes (picral o nital), apareciendo siempre blanco brillante. El picrato de sodio en caliente lo colorea de gris oscuro. A temperatura debajo de 218° C es magnética, luego pierde su magnetismo.

Con la ferrita forma un eutectoide llamado perlita, propio de los aceros hipo e hipereutectoides.

Aparece libre en los aceros hipereutectoides generalmente en forma de red.

■ **Perlita:** Es un eutectoide formado por capas alternadas de ferrita y cementita. Tiene composición química constante y definida de 0,89 % de carbono. Según la velocidad de enfriamiento las láminas tienen distintas separaciones; a mayor velocidad de enfriamiento láminas más juntas y su dureza puede variar de 250 a 300 Brinell; a menor velocidad de enfriamiento las láminas resultan más gruesas y separadas dando dureza de 200 a 250 Brinell. La resistencia a la rotura es de alrededor de 80 kg/mm². y su alargamiento 15 % aproximadamente.

Los reactivos ácidos la colorean en general de oscuro como consecuencia de las sombras y claros que proyectan los elementos que la constituyen. El microscopio la muestra muy similar a una impresión digital.

CARACTERISTICAS MECANICAS DE LOS ACEROS AL CARBONO RECOCIDOS:

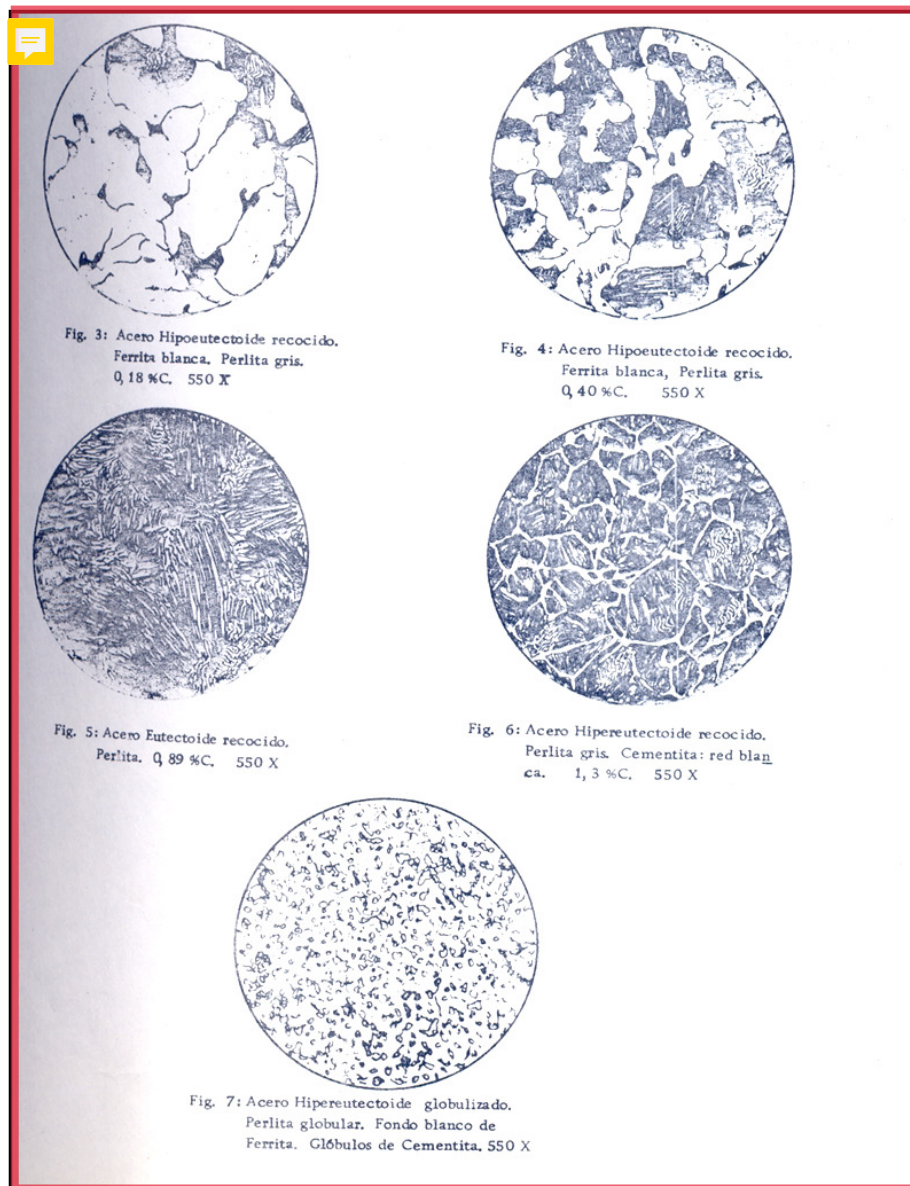
Los aceros al carbono según su tenor de carbono pueden clasificarse en:

► **Aceros hipoeutectoides:** aquellos que tienen menos de 0,89 % de C, cuya estructura metalográfica al estado de recocido está formada por ferrita como matriz del eutectoide perlita. Las propiedades mecánicas de estos aceros dependen pues de las propiedades intrínsecas que los constituyentes aportan en la proporción de sus cantidades relativas, o sea de su % de C. (fig. 3 Y 4).

► **Aceros eutectoides:** aquellos cuyo tenor de carbono es de 0,89 %. El único constituyente que está presente es la perlita, luego sus propiedades mecánicas son las del acero (fig. 5)

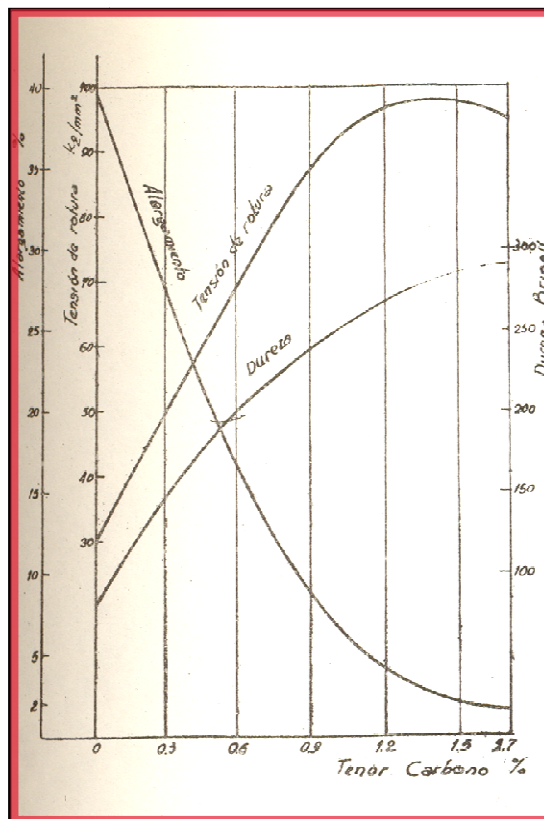
► **Aceros hipereutectoides:** de composición superior al 0,89% de carbono hasta 1,7%. Su estructura está constituida por perlita y cementita en forma de red o de nódulos según sea la cementita presente: laminar o globular (fig. 6 y 7).

Los aceros al carbono en estado de recocido, o sea los obtenidos enfriando lentamente desde el punto crítico superior, presentan propiedades mecánicas acordes con su composición química (% de C).



Con la variación continua del tenor de carbono varían paulatinamente los porcentajes relativos de los constituyentes metalográficos presentes; ferrita-perlita o perlita-cementita. Por consiguiente varían paulatinamente las características mecánicas del acero con la variación del tenor de carbono, según se muestra en el gráfico N° 8, donde puede apreciarse que:

- La resistencia a la tracción aumenta hasta alcanzar el máximo para aproximadamente 1 % de C y luego desciende nuevamente por efecto de la red frágil de cementita que envuelve los granos de perlita.
- La dureza se eleva continuamente con el tenor de carbono.
- El alargamiento disminuye rápidamente alcanzando valores muy bajos con 1 % C.



DETERMINACIÓN MICROSCÓPICA DEL TENOR DE CARBONO EN ACEROS RECOCIDOS:

Del diagrama Fe-C sabemos:

- 1°.) La ferrita puede contener, en solución sólida, un máximo de 0.008 % C.
- 2°.) La perlita tiene un tenor de carbono constante de 0,89 % C.
- 3°.) La cementita es un compuesto químico de composición definida de 6,67 %C a temperatura ambiente.

Con estos conocimientos podemos determinar el tenor de carbono de un acero al carbono al estado recocido. Para ello, tomamos una muestra del acero, pulida y atacada con reactivo de nital o picral, y mediante el microscopio, con un aumento cualquiera, proyectamos la estructura sobre el vidrio despulido de la cámara fotográfica. Mediante un papel milimetrado transparente calcamos la estructura delimitando un área representativa del conjunto. Luego se determinan las áreas ocupadas por la perlita y ferrita (acero hipoeutectoide) perlita y cementita (acero hipereutectoide) y se procede al cálculo como sigue:

$$\text{Carbono de la perlita} = \frac{\text{Sup. Perlita} \times 0,89\%}{\text{Sup. Total}} = \%C_{\text{Perlita}}$$

$$\text{Carbono de la ferrita} = \frac{\text{Sup. Ferrita} \times 0,008\%}{\text{Sup. Total}} = \%C_{\text{Ferrita}}$$

$$\text{Carbono de la cementita} = \frac{\text{Sup. Cementita} \times 6,67}{\text{Sup. Total}} = \%C_{\text{Cementita}}$$

El carbono total del acero será :

$$\%C_{\text{Total}} = \%C_{\text{Perlita}} + \%C_{\text{Ferrita}} \quad \text{si el acero es hipoeutectoide}$$

$$\%C_{\text{Total}} = \%C_{\text{Perlita}} + \%C_{\text{Cementita}} \quad \text{si el acero es hipereutectoide}$$

SISTEMA NUMERAL DE ESPECIFICACIONES SAE

Se emplea este sistema de índices numerales para determinar la composición química de los aceros bajo especificación.

El primer número indica la clase de acero a que pertenece, de esta forma:

- ❑ “1” indica aceros al carbono simple
- ❑ “2” aceros al níquel
- ❑ “3” aceros al cromo níquel
- ❑ “4” aceros al molibdeno
- ❑ “5” aceros al cromo
- ❑ “6” aceros al cromo vanadio
- ❑ “7” aceros al tungsteno

En el caso de los aceros de aleación, el segundo número indica el porcentaje del elemento de aleación predominante.

Normalmente las dos o tres últimas cifras indican el promedio de contenido de carbono en centésimo de 1%. Así por ejemplo:

- ✓ “2340” indica un acero al níquel con aproximadamente 3%Ni (3,25-3,75) y 0,40 (0,35-0,45) de C
- ✓ “71360” indica un acero al tungsteno con 13% de Tungsteno (12-15%) y 0,60% de C(0,50-0,70%)
- ✓

Los aceros primarios son los que se emplean en grandes cantidades.

Los aceros secundarios son los que se consideran esenciales para ciertos usos industriales.

ANÁLISIS MICROGRÁFICO DE FUNDICIONES

Nociones Generales:

Las fundiciones son aleaciones **Fe-C** con una concentración en C mayor del 1,7%. Además del C contienen como elementos constitutivos: Si, Mn, S y P (estos dos últimos se consideran impurezas). Las cantidades relativas de Si y Mn influyen sobre las propiedades de la fundición.

Existen dos tipos fundamentales de fundición. La **fundición blanca**, donde todo el carbono se halla combinado en forma de cementita (un compuesto intermetálico Fe_3C de dureza elevada) y la **fundición gris** en la cual parte del carbono se encuentra en forma libre: como grafito. La primera se obtiene con enfriamiento rápido y catalizador **Mn**, y su solidificación se efectúa según el diagrama Fe-C metaestable (marcado en líneas llenas en la fig. 9), llamado diagrama hierro-cementita. La segunda, o sea la **fundición gris** solidifica de acuerdo al diagrama estable, o sea de hierro-grafito (señalado en la fig. 9 con líneas punteadas). La fundición gris es la industrialmente más usada. Su formación se cataliza con la presencia de mayores cantidades de Si (+2 %) y con enfriamiento lento.

Diagrama De Equilibrio Metaestable

■ **Fundición blanca:** Tomaremos tres ejemplos típicos de fundición blanca.

- a) **3 % C:** Si tomamos una aleación de este tenor en carbono en estado líquido y la enfriamos, llegaremos al punto M (fig. 9) de la línea del líquidus o sea de l comienzo de la solidificación. Acá comenzará a separarse sólido de la composición del punto M_1 : (dendritas de austenita 0,6 % C). Al proseguir el enfriamiento y llegar por ejemplo al punto M_2 los dendritas separados tendrán la composición del punto M_3 (1,1 % C). El líquido remanente tendrá a esta temperatura la composición que corresponde al punto M_4 (3,8 % C). Si el enfriamiento fuera suficientemente lento los porcentajes en carbono de los dendritas precipitados se equilibrarían, pues el C difunde a estas temperaturas. Pero esto no ocurre completamente en las fundiciones blancas pues para su obtención se utilizan enfriamientos relativamente rápidos.

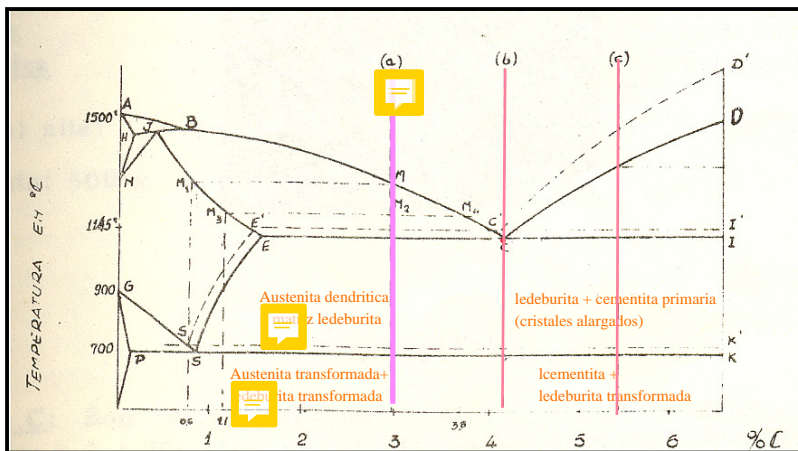


Fig. 9: Fundiciones en el diagrama Fe-C

Cuando la temperatura alcanza los 1145° todo el líquido remanente, que ahora tiene la composición del punto C (4,3 % C) solidifica en forma de un eutéctico: yuxtaposición de pequeños cristales de cementita (Fe_3C de 6.67% c) y la austenita de composición correspondiente al punto E (1,7% C).

De modo pues que esta aleación presenta cristales de austenita en forma de dendritas, en una matriz de eutéctico llamado ledeburita. En un enfriamiento posterior, tanto la austenita de los dendritas primarios como la constitutiva del eutéctico, va perdiendo carbono, de acuerdo a lo indicado por la línea de solubilidad SE, quedando finalmente con la composición S (0,9%C). Este carbono se segrega de la austenita en forma de carburo de hierro y pasa a engrosar las áreas de cementita. De modo que finalmente, la fundición blanca hipoeutéctica (3%C) estará constituida por dendritas de austenita transformada (perlita) en una matriz de ledeburita transformada (eutéctico: fondo de cementita y lagunas pequeñas de perlita); fig. 10.

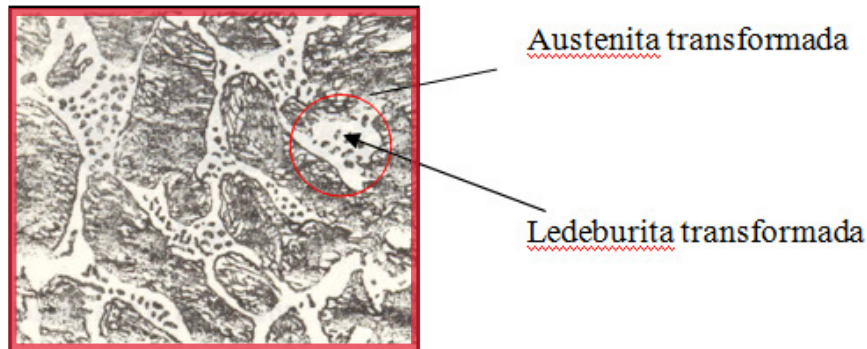


Fig. 10. Fundición Blanca hipoeutéctica. Ataque: nital. Aumento 500x

- b) **4,3% C**: Este es el caso de la **fundición eutéctica**. Si tomamos (Fig.9) una aleación líquida con este tenor de C y la enfriamos no ocurre nada hasta llegar al punto C cuya temperatura (1145°C) solidifica toda la masa metálica en la forma de eutéctico ledeburita (austenita de 1,7 %C y cementita). En el enfriamiento posterior la austenita del eutéctico va perdiendo carbono como lo mencionamos en el caso anterior y a 721°C posee la composición correspondiente al eutectoide S (perlita). A esta temperatura los cristales blancos poligonales de austenita se convierten en perlita (estructura laminar de ferrita y cementita). Por lo tanto, obtendremos a temperatura ambiente como estructura metalográfica de la fundición blanca eutéctica: la ledeburita transformada (cementita y lagunas muy pequeñas de perlita), fig.11. El caso V de la fig. 2: corresponde a esta aleación.

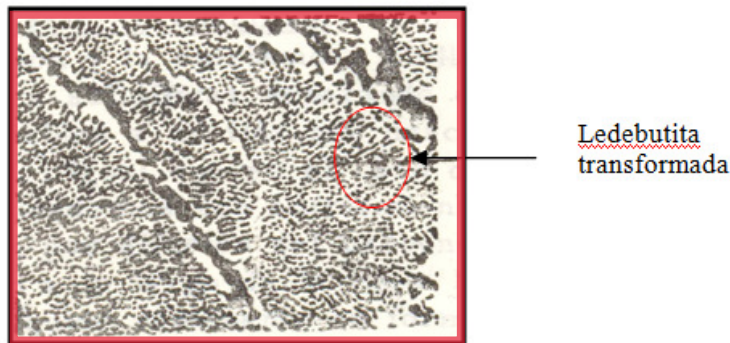


Fig. 11: Fundición Blanca Eutéctica. Ataque: nital. Aumento: 500x

- c) **5,5% C**: Son las **fundiciones blancas hipereutécticas**. Acá entre las líneas del líquidus y sólidos no se separan dendritas, sino cristales largos de cementita primaria de 6,67 % C. Como puede observarse en el caso C de la fig. 9, el líquido residual se va empobreciendo en C según la línea DC. A la temperatura de 1145°C todo el líquido remanente tiene la composición eutéctica, y solidifica en forma de ledeburita. Esta ledeburita se convierte en un

enfriamiento posterior en ledeburita transformada. De manera que en las fundiciones de este tipo tendremos cristales grandes duros del compuesto intermetálico cementita en una matriz de ledeburita transformada: fig. 12 (En la fig. 2 el caso VI corresponde a esta aleación). -.

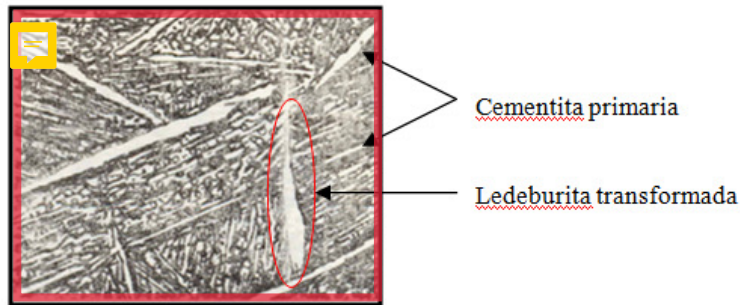


Fig. 12: Fundición Blanca Hipereutéctica. Ataque : nital. Aumento: 500x

Las fundiciones blancas tienen una dureza elevada debido a la presencia de la cementita. Por esta razón son poco o nada maquinables y deben usarse "brutos de colada". Presentan además gran fragilidad debido a las interfaces entre constituyentes de propiedades mecánicas muy diferentes. Son apreciados por su gran resistencia a la abrasión. Para aprovechar esta propiedad se cueban en coquilla (enfriamiento brusco de la superficie) composiciones de fundición intermedias entre la gris y la blanca (% de Si y Mn).

De este modo la periferia resultará de fundición blanca y el núcleo de fundición gris.

DIAGRAMA DE EQUILIBRIO ESTABLE:

Este diagrama se ha marcado con líneas punteadas en la fig.9. La fundición gris que responde parcialmente a este diagrama, corresponde a la aleación más usada en la industria por su bajo costo y sus propiedades mecánicas (buena maquinabilidad, dureza entre 150 y 250 Brinell, buena absorción de vibraciones, buena colabilidad, etc.).

Analizaremos los mismos tres casos tomados para las fundiciones blancas: (Fig.9):

- a) **3 % C: Fundición gris hipoeutéctica.** Si tenemos una aleación líquida de esta concentración y la enfriamos, al llegar al punto M (línea del líquidus) comienza a solidificar separando dendritas de austenita de composiciones variables a medida que desciende la temperatura (cada vez con mayor %C) igual que en el caso de las fundiciones blancas.

Pero como acá procedemos con enfriamiento muy lento, estas composiciones se igualan por difusión del carbono. El líquido remanente variará su composición a lo largo de la línea MC'. Al llegar al punto C' precipita todo el líquido remanente en forma de eutéctico ledeburita de la fundición. Lo veremos luego en detalle. La austenita precipitada se homogeniza por difusión y durante el enfriamiento va perdiendo carbono al igual que en la fundición blanca llegando finalmente a tener la composición del eutectoide perlita. A esta temperatura se transforma íntegramente en perlita (láminas de ferrita y cementita).

El carbono que la austenita ha ido perdiendo durante su enfriamiento ha ido a formar láminas de grafito (fig.13). Durante el enfriamiento lento puede descomponerse parte de la perlita a causa de los agentes grafitizantes como el Si, que descomponen algunas de sus láminas de C_3Fe en ferrita y grafito. Este grafito va a engrosar las láminas existentes de grafito y un grano poligonal de ferrita aparece al lado de algunas láminas de grafito. A esta fundición que contiene perlita, algo de ferrita y grafito se la denomina fundición gris de fondo hipoeutectoide (fig .14) por parecerse a un acero hipoeutectoide al que le hubieran

agregado grafito. Del mismo modo se denomina fundición gris de fondo eutectoide al formado por perlita y grafito. Existe además en las fundiciones otro constituyente denominado **steadita**. Es un eutéctico fosforoso formado por fosfuro de hierro y ferrita. Puede también contener cementita.

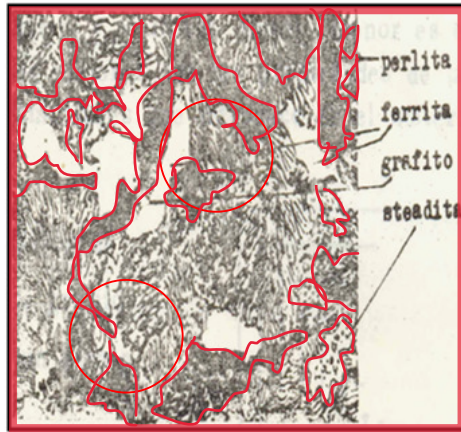


Fig. 13: Fundición Gris con matriz perlita.
Ataque: nital. Aumento: 500x

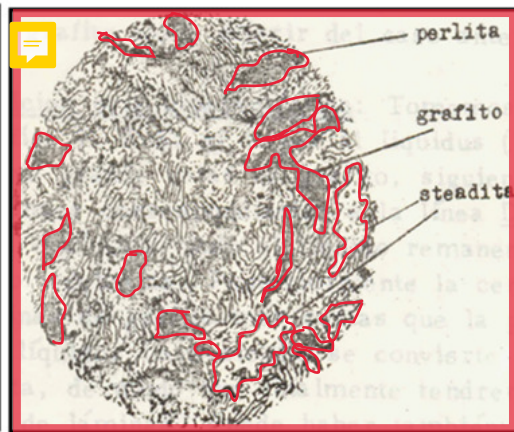


Fig. 14: Fundición Gris con matriz perlítico- ferrítica.
Ataque: nital. Aumento: 800x

- b) **4,3 % C: Fundición gris eutéctica:** En las fundiciones grises el eutéctica no se encuentra en el punto correspondiente al 4,3 % C. La presencia del Si hace disminuir el tenor de C del eutéctico en 0,3 %C por cada 1 % Si.

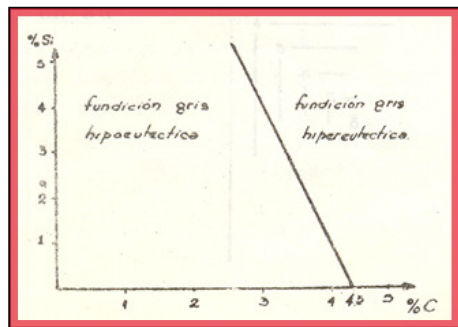


Fig. 15: Variación del tenor de C del eutéctico en función del tenor en Si en las fundiciones grises

Si consideramos una aleación líquida de composición eutéctica y la enfriamos (fig.9), no habrá variación hasta la temperatura eutéctica: 1145°C, donde coinciden el líquidus con el sólidus (el principio y el fin de la solidificación). A esta temperatura solidifica todo el líquido en forma de eutéctico: ledeburita (austenita y cementita). Posteriormente la cementita de este eutéctico se descompone dando láminas de grafito.

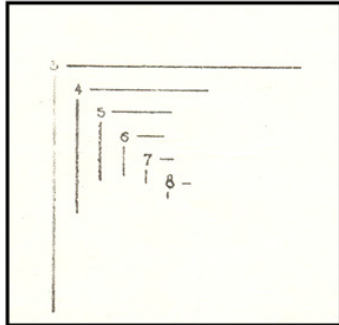
A su vez la austenita difunde algo de su carbono hacia las láminas de grafito, y a la temperatura eutectoide (721°C) se convierte en perlita. Tendremos por consiguiente perlita y grafito. Eventualmente pueden aparecer steadita y ferrita como lo mencionamos previamente. La forma y tamaño de las vetas de grafito suele diferir del caso anterior.

- c) **5,5% C: Fundición gris hipereutéctica:** Tomemos la concentración de 5,5 % C de la fig. 9. Acá, al llegar al liquidus (línea punteada) se separan primeramente grande vetas de grafito, siguiendo el líquido remanente las composiciones correspondientes a la línea **D 'C'** '. Al llegar al punto **C'** ', temperatura eutéctica, todo el líquido remanente se solidifica en forma del eutéctico ledeburita. Posteriormente la cementita se descompone y aparecen láminas de grafito más cortas que la primeramente precipitada a partir del líquido. La austenita se

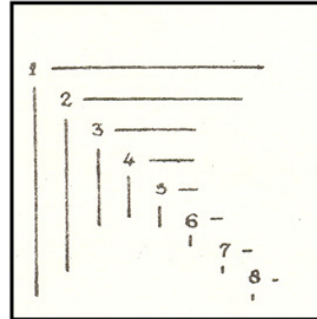
convierte como en los casos descriptos en perlita, de modo que finalmente tendremos perlita y grafito en dos tamaños de láminas. Puede haber también steadita y ferrita.

GRAFITO: FORMAS Y TAMAÑO

Debido a la gran influencia que la forma y tamaño de las láminas de grafito ejercen sobre las propiedades de la fundición gris la ASTM ha hecho una tipificación que también fue adoptada por la AFA (American Foundrymen Association) y el IRAM. Cuanto menor es el tamaño y más uniforme la distribución mejores son las propiedades de la fundición, pues son menores las discontinuidades que introduce en el material.

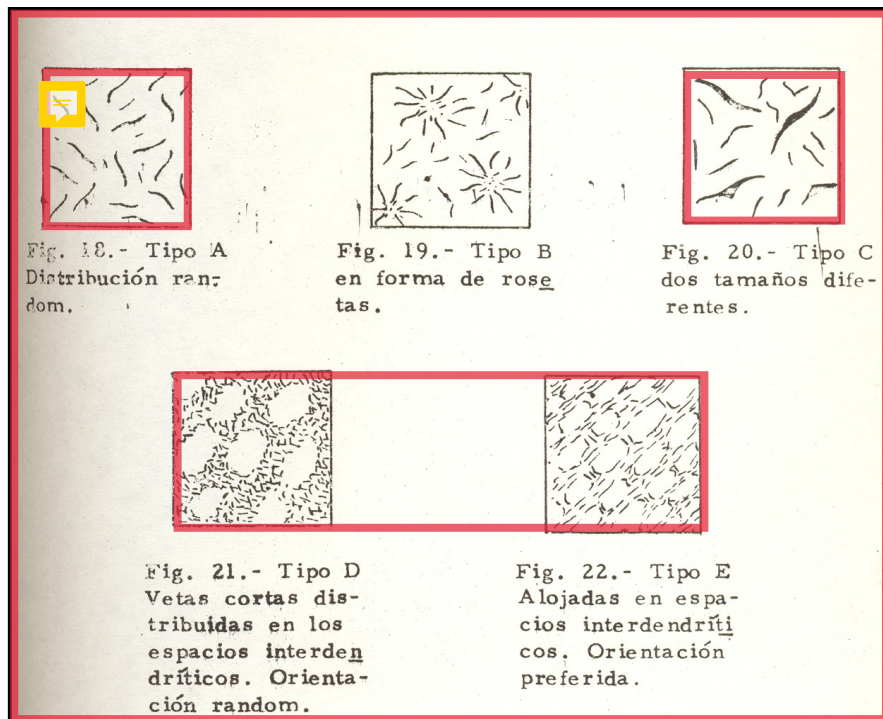


Tamaños patrón de las vetas de grafito vistas con un aumento de 25x



Tamaño patrón de las vetas de grafito vistas con aumento de 100x

Tipos De Grafito Según Su Forma Y Distribución



Ya mencionamos los dos tamaños de vetas de grafito que aparecen en las fundiciones grises hipereutéticas. Corresponden al tipo C. En las fundiciones grises hipoeutéticas, cuando la

concentración de carbono es baja se forman grandes dendritas (la austenita y los espacios que dejan entre sí son muy reducidos).

Cuando el líquido alojado en estos espacios debe solidificar en forma de eutéctico puede dar origen a los tipos de grafito D y E. En cambio con concentraciones en carbono más cercanas al eutéctico los dendritas de austenita precipitados en una primera instancia son pequeños y el líquido del cual el eutéctico deberá precipitar ocupa un lugar muy grande. Aquí puede formarse el muy apreciado "grafito de tipo A".

Estas condiciones son modificadas por la composición química del material, pues hay elementos que aceleran y otros que retardan la grafitización con lo que, se alteran las condiciones del sistema. La composición química influye también sobre el tamaño de las vetas. Así los retardadores de grafitización acortan las vetas, actuando principalmente sobre la tensión interfacial hierro-grafito.

La observación de las láminas de grafito se hace mejor sobre la muestra pulida sin ataque.

OTROS TIPOS DE FUNDICIÓN

● **Fundición atruchada:** Cuando en una misma pieza se presentan partes de fundición gris y partes de fundición blanca, ésta se llama atruchada.



Blanco: perlita
Gris: cementita
Negro: grafito

Fig. 23: Fundición atruchada. Ataque: nital. Aumento: 100x

● **Fundición maleable:**

Esta aleación ha sido creada para superar la fragilidad de las fundiciones comunes debido a la presencia de cementita en las fundiciones blancas y a la presencia de las vetas de grafito en las fundiciones grises. La fundición maleable se obtiene por un tratamiento térmico o químico prolongado de una fundición blanca de composición química adecuada. Es un proceso costoso, pero las propiedades del material en cuanto a la resistencia a la tracción y a la corrosión, maquinabilidad, colabilidad, poca dilatación (crecimiento), etc. lo hacen apto para sustituir a muchas piezas de acero. Se lo utiliza en conexiones, piezas de automóviles, de vagones ferroviarios, en implementos agrícolas, en partes de máquinas textiles, etc. Existen dos procesos de maleabilización:

Por **grafitización** en el que toda la cementita inclusive la de la perlita se convierte en ferrita y grafito en forma de nódulos. Se obtiene un producto maleable, puesto que lo es la ferrita, y el grafito en forma de nódulos no compromete la cohesión de la pieza como lo hace en forma de vetas. Se lo conoce con el nombre de fundición maleable de corazón negro (por el color oscuro que el grafito da a la fractura) o fundición maleable americana.

Por **descarburación**, acá el carbono de la cementita y de la perlita se ha eliminado en la superficie de la pieza por oxidación. El carbono del interior difunde hacia el borde y en las piezas de poco espesor llega a descarburarse todo el material quedando solamente ferrita. En las piezas de mayor volumen queda perlita en el interior y algunos nódulos de grafito. Esta fundición se llama maleable de corazón blanco (fractura clara) o fundición maleable europea.

Fundición maleable de corazón negro:

Es muy importante la composición química del material base puesto que debe solidificar blanco en todo su espesor y luego poder grafitizar durante el tratamiento térmico. La fundición blanca base debe tener la siguiente composición:

Carbono combinado	2,2 – 2,8%
Carbono	0,70- 1,00%
Manganeso	0,25 – 0,35%
Azufre	0,03- 0,08%
Fósforo	Menos del 0,20%

Las piezas se rodean de un material inerte como sílice, cenizas, etc. y se colocan en cajas (de fundición, acero resistente al calor, etc.) dentro de un horno. Se sube lentamente la temperatura. La estructura del material está formada por cementita y perlita. Al llegar a 721°C, la perlita se transforma en austenita. Luego, al seguir aumentando la temperatura esta austenita comienza a disolver cementita hasta la saturación indicada por la curva S. E. del diagrama (fig. 9). Llegado a 900°C se mantiene la temperatura durante muchas horas (desde algunas horas hasta 2 días, según la composición química y el espesor de las piezas). En este interior la cementita se descompone poco a poco en grafito y austenita. En efecto durante el calentamiento la austenita ha ido disolviendo cementita de acuerdo a su curva de solubilidad S.E., pero como el grafito es algo menos soluble en la austenita: curva S'E' (fig. 9), a una misma temperatura la austenita disuelve cementita y precipita algo de grafito. Este grafito precipitado ha dejado la austenita de la cual proviene, no saturada respecto de la cementita. Por lo tanto puede disolver otra cantidad de cementita. De este modo va disolviendo cementita y precipitando grafito.

La temperatura se mantiene constante hasta que desaparece toda la cementita. Corresponde a la meseta 1 de la figura 24. Cuando la estructura contiene solamente grafito y austenita, se comienza a bajar la temperatura a razón de 5 – 10°/hora. Como la solubilidad disminuye de acuerdo a la curva S'E' de la fig. 9, la austenita va segregando carbono de su seno, en forma de nódulos de grafito. El segmento N°. 2 de la fig. 24 representa esta etapa. Al llegar a 721° la austenita se transforma en perlita. Se mantiene estacionaria la temperatura (segmento N°. 3 de la fig. 24) con lo cual la perlita se descompone en grafito (nódulos) y ferrita.

Esta es la estructura que se observa a temperatura ambiente. Los nódulos son conglomerados de pequeñas partículas de grafito.

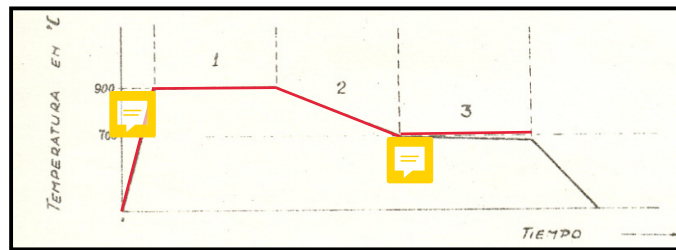


Fig 24

- 1) Grafitización de la cementita libre
- 2) Grafitización de la cementita que se segrega de la austenita
- 3) Grafitización de la cementita perteneciente a la perlita

La fig. 25 muestra una estructura metalográfica de fundición maleable de corazón negro.



Fig. 25: Fundición maleable de corazón negro. Ataque: nital. Aumento 500x

En este material se alcanza una resistencia a la tracción de 35-40 kg/mm² y una dureza Brinell de 100-150. A pesar de la protección de las piezas con el material inerte (SiO₂) existe siempre una oxidación superficial del C y del Si que origina una franja exterior decarburada (sin nódulos de grafito) y una segunda franja de perlita. Esta última se debe a la ausencia de silicio en la periferia, lo cual impidió la grafitización de la cementita perlítica. Luego de estas dos pequeñas franjas, el material está formado por ferrita y nódulos de grafito.

El proceso de maleabilización descrito es muy largo. Actualmente existen métodos más cortos, en los que varían también algunas características mecánicas de las piezas. Para aumentar la resistencia de los materiales se procura obtener una grafitización incompleta. Esto puede hacerse:

- Interrumpiendo la grafitización de la perlita, por acortamiento de la meseta de los 721°C (fig. 24).
- Agregando a los componentes químicos algún estabilizador de la cementita como el Cr.
- Calentando las piezas ya terminadas para disolver algo del grafito y luego temprar y revenir.
- Este aumento de la resistencia mecánica va aparejado a una disminución de la ductilidad.

Fundición maleable de corazón blanco:

En este caso la composición química es un poco distinta del anterior.

Carbono combinado	3,00 a 3,50 %
Silicio	0,50 a 0,80 %
Manganeso	0,10 a 0,40 %
Azufre	0,20 a 0,45 %
Fósforo	me nos de 1 O, 15 %

Las piezas de fundición blanca se colocan en cajas. Dentro de las cajas las piezas se rodean de un material capaz de ceder oxígeno como hematita (Fe₂O₃) o cascarilla de laminación. Las cajas se colocan en un horno y se sube la temperatura lentamente. Se mantiene la temperatura a 900-1000°C durante un tiempo largo que depende del espesor de las piezas, el tamaño de las cajas y la temperatura. Se produce la descarburación de las piezas comenzando por el borde. El carbono del centro migra hacia la periferia. En espesores menores de 4mm la descarburización es total. En espesores mayores queda cementita libre en el centro, que se grafitiza en esta etapa: segmento N° 1 (fig. 26). Luego sigue un enfriamiento lento de 10°C/hora hasta llegar a 600°C después de lo cual puede enfriarse más rápidamente.

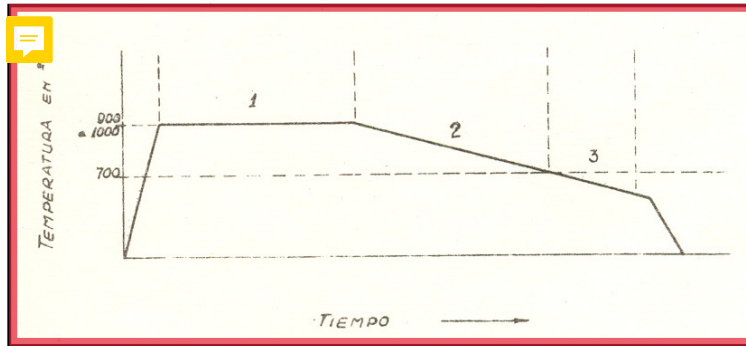


Fig 26

1. Descarburización intensa y grafitización de la cementita libre
2. Descarburización y grafitización de la cementita segregada por la austenita.
3. Formación de perlita en caso de haber quedado algo de carbono en solución.

La temperatura no debe subir de los 1000°C para evitar un excesivo crecimiento de grano y la adherencia de materiales del envoltorio que pueden fundir a esa temperatura. La forma de los nódulos de grafito (cuando existen) en esta aleación es más compacta y de bordes más regulares y nítidos que en la fundición maleable de corazón negro. Parece que la proporción entre los tenores de S y Mn influye en la forma de los nódulos.

La estructura metalográfica en los espesores finos es de ferrita. En los espesores mayores, en el centro aparecen perlita y nódulos de grafito. Es por esto que a pesar de ser esta en general una fundición más dúctil que la americana, en las secciones gruesas ocurre lo contrario. Con descarburación completa presenta una **resistencia a la tracción** de 30-35 kg/mm². y una dureza de 100-130 Brinell. La fundición maleable de corazón blanco no se temple pues carece del % C mínimo para tomar temple.



Fundición nodular:

Es posible obtener en estado de colada una fundición con el grafito en forma de esfera.

Para ello se agrega al baño líquido una vez salido del cubilote (generalmente en la cuchara) un aditivo llamado nodulizante que retarda la grafitización. Las dos sustancias más utilizadas para esto son el magnesio y el cerio. A continuación se agrega una grafitizante como por ejemplo el ferrosilicio que hace precipitar el grafito (sin el grafitizante el magnesio y el cerio producirían fundición blanca). El grafito así obtenido presenta el aspecto de los nódulos que se encuentran en los espesores gruesos de la fundición maleable de corazón blanco. La fundición nodular tiene muchas ventajas sobre la fundición gris. Sus propiedades mecánicas son superiores, pues hay menor superficie de discontinuidad en el material, generalmente se obtiene con matriz perlítica, pero puede recocerse y templarse, y obtener así fundición nodular de matriz ferrítica o martensítica.

BIBLIOGRAFÍA

- Tratamientos térmicos de los aceros. José Apraiz Barreiro.
- Metalografía micrografía y micrográfica. Hubertua Colpaert.
- Principles of heat treatment. M.A. Grossman.
- La fundición gris. Navarro Alcázar.
- Fundiciones. José Apraiz Barreiro.

- Metalografía - Boletín N° 40 IPT. Brasil.
- Practical microscopical metallography. Greaves y Wrighton.
- The metallography and heat treatment of iron and steel. A. Sauver.
- Precis de metallographie microscopique et macrographie. Guillet y Portevin.