

Fundiciones grises aleadas de alta resistencia

Ing. Manuel Vega Utrera

Docente de Ciencia e Ingeniería de Materiales y Metalurgia
Universidad de Montevideo, Facultad de Ingeniería

La fabricación de piezas en Fundición de hierro ocupa un campo muy extenso de la industria de maquinaria. Estos materiales son aleaciones de Hierro-Carbono con altos porcentajes y que se denominan bajo el nombre de fundiciones por ser este el procedimiento industrial de fabricación de las mismas. El mayor porcentaje de Carbono hace que la temperatura de fusión de estas sea mucho menor que la de los aceros y además se logra una mayor fluidez del material líquido, lo que permite el llenado de piezas de espesores menores y de formas complicadas, es decir, tienen una mejor colabilidad. Por otra parte, la menor temperatura de fusión permite que la interacción metal – molde sea menos agresiva y en consecuencia se pueden obtener piezas más sanas.

Su bajo costo, y esta excelente colabilidad, han dado lugar a un extenso desarrollo de estas aleaciones en aplicaciones como: bloques de motor, camisas de pistón, engranajes, cuerpos de válvula, piezas de automóvil, y otras muchas piezas para maquinaria.

En todos los materiales la elección se basa en las propiedades que puedan conseguirse en cada caso. En las fundiciones de alta resistencia buscamos los mejores valores en sus propiedades mecánicas, y estas derivan de la estructura constitutiva de las mismas. La ingeniería de materiales estudia los caminos para conseguir la estructura más adecuada para lograr esas propiedades utilizando los medios de técnicas de aleaciones y de procedimientos de fabricación adecuados. Hacemos hincapié en este último aspecto porque las propiedades mecánicas no son el producto de formulaciones de composición química más o menos sofisticada. La técnica de fabricación es tan importante y más que la adición de los elementos de aleación, o mejor dicho, la combinación de ambos aspectos es el camino para lograr los mejores resultados.

En el caso que nos ocupa, la fundición gris es un material metálico compuesto estructuralmente de un constituyente matriz y de un material disperso. La matriz puede considerarse que es acero, sea éste de tipo ferrítico, perlítico o ferrito-perlítico. El material disperso es la parte del carbono que no está disuelto en el acero y que toma la forma de grafito. Por tanto, el comportamiento mecánico de una fundición gris resulta parecido al de

un acero con numerosas microfisuras taponadas por grafito¹. Este grafito aparece como pequeñas partículas o láminas insertas en la matriz metálica. Si la estructura matriz es de tipo ferrítico, será mayor la cantidad de grafito, puesto que la ferrita apenas disuelve carbono. Si por el contrario es de tipo perlítico entonces será menor la cantidad de carbono libre puesto que habrá una parte del Carbono que se une a otra de Hierro formando la Cementita que constituye el conjunto perlítico. La cantidad, la forma y el tamaño del grafito, y por otra parte el tipo de estructura matriz que resulte serán los elementos determinantes de las propiedades que tenga esa fundición.

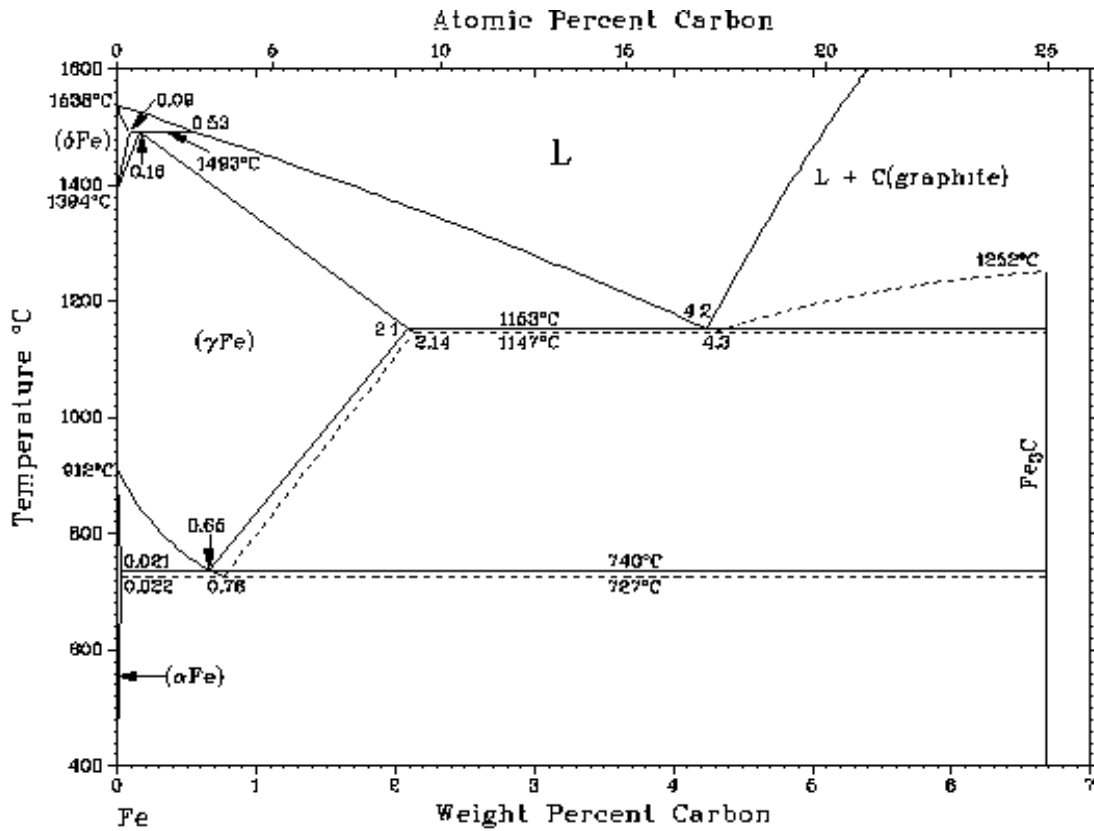
El grafito presente en la estructura hace que las fundiciones grises tengan alta maquinabilidad y buena resistencia al desgaste. El grafito las hace autolubricantes y a la vez amortigua las vibraciones. Además se obtiene una buena conductividad térmica y buena resistencia a temperaturas altas. Por el contrario, tendremos una baja tenacidad puesto que esas láminas de grafito son incipientes microfisuras, como dijimos anteriormente.

Estos materiales son fabricados como productos fundidos y en ese proceso es donde se dan las condiciones que dan lugar a la estructura final. Por tanto, el mejor conocimiento de los mecanismos de nucleación y solidificación, así como los de transformación en estado sólido nos darán las bases para estudiar los caminos que nos llevarán a obtener la estructura mas adecuada al uso que se busque. Aquí también se cumple el principio que rige en el caso de los aceros al carbono aleados: los elementos de aleación son factores que permiten obtener las mejores propiedades del acero en cuanto a conseguir las condiciones en que el carbono se manifiesta como el verdadero elemento de aleación. Es decir, los aleantes son elementos acondicionadores de la acción del carbono en el acero.

Al hablar de fundiciones de alta resistencia, básicamente se está hablando de una mayor resistencia a la tracción, y si bien por la estructura matriz podrían esperarse similares características a las de los aceros, la presencia del grafito dará lugar a que tengan un comportamiento frágil, de poco alargamiento, y con resistencias menores.

El diagrama Hierro – Carbono adjunto muestra que, en la zona de altos porcentajes de carbono, puede presentar dos formas: una de tipo estable Hierro – Carbono y otra de tipo metaestable: Hierro – Cementita². En el diagrama estable la reacción eutéctica tiene

lugar a 1153°C y para una composición de 4.2%, produciéndose Austenita de 2.1% de C y Grafito, mientras que la reacción metaestable se da a 1147°C para una composición líquida



de 4.3% y produciéndose Austenita de 2.14% y Cementita –o carburo de Hierro-. En condiciones normales estos materiales dan lugar a las llamadas Fundiciones Blancas donde el Carbono está todo combinado bajo la forma de Cementita y por tanto son materiales muy duros y frágiles, no aptos para piezas de maquinaria. Será necesario establecer unas condiciones adecuadas para que en lugar de generar Cementita, en esa zona de solidificación primaria, aparezca el grafito en forma libre. Los dos parámetros principales que hacen posible esa reacción son la presencia de Silicio y una lenta velocidad de enfriamiento. Tanto uno como el otro factor permiten la formación del grafito y evitan por tanto que aparezca la cementita.

En la zona de la transformación eutéctica es donde se forma el grafito primario y la matriz –Austenita con un alto porcentaje de Carbono-. El grafito ya formado será el constituyente disperso del material y aunque la cantidad presente puede variar en el curso del enfriamiento del material hasta la temperatura ambiente, esta parte de la solidificación es la determinante en la forma y tamaño de las láminas de grafito finales. La austenita formada sufrirá un proceso de transformación que tendrá dos etapas: una entre las

temperaturas eutéctica y eutectoide, es decir, entre los 1153°C y los 727°C. El enfriamiento en esta zona producirá una variación del contenido de Carbono de la Austenita. Hay una pérdida de solubilidad del Carbono desde los 2.1% hasta los 0.7%. El carbono es expulsado de la Austenita por pérdida de solubilidad y pasa a engrosar el Grafito presente –en el supuesto de que se den las condiciones antes mencionadas de Si y de velocidad de enfriamiento- o bien puede dar lugar a láminas más finas y dispersas. Finalmente a los 740°C –según el diagrama que tomamos de referencia- tendrá lugar la transformación en estado sólido de la Austenita, de la misma forma que se produce en los aceros. Nuevamente, según sean las condiciones en que se produce esta transformación, puede producirse o bien perlita, o bien ferrita y grafito, o una situación intermedia entre ambas. Las condiciones de enfriamiento y la presencia de elementos aleantes serán los determinantes de la estructura final que se obtenga. Así se formará la estructura matriz que rodeará al grafito ya formado y que completará la constitución de la fundición resultante.

Tenemos por tanto dos etapas bien definidas: la estructura primaria de solidificación donde se define la forma y cantidad del grafito y la producida por la transformación de la austenita en estado sólido que da lugar a la matriz de la fundición.

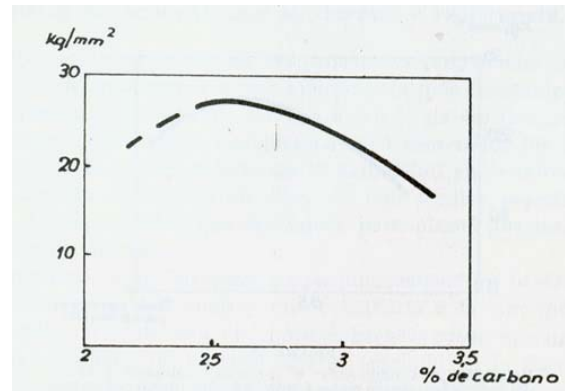
Las propiedades mecánicas finales del material serán la conjunción de ambos aspectos: la matriz y el grafito. Como se ha mencionado más arriba esos materiales al ser muy sensibles a la velocidad de solidificación requieren de un diseño adecuado por parte del fundidor para minimizar o evitar los efectos de sensibilidad al espesor. La formulación de la composición viene dada por la estructura final deseada y por los espesores que tenga la pieza en las distintas zonas. Las zonas delgadas tendrán tendencia a ser afectadas por la mayor velocidad de solidificación y en consecuencia se dice que “blanquean”, o en otras palabras se producirán zonas donde aparece la cementita y de ahí el color blanco, en contraste con el gris de las zonas con grafito libre. La presencia de zonas con carburos da lugar a zonas frágiles e inmecanizables.

Los factores que contribuyen por tanto a obtener la mejor resistencia serán:

- (1) una gran cantidad de austenita primaria,
- (2) una estructura de grafito fino –de tipo A según la clasificación ASTM-,
- (3) una matriz completamente perlítica y
- (4) una estructura de perlita muy fina.

Las dos primeras se obtienen en la solidificación primaria y las dos siguientes en el enfriamiento posterior donde se produce la transformación de la austenita³. La estructura perlítica le confiere una alta resistencia a la tracción y de la misma forma a los fenómenos de desgaste, mientras que la presencia de las láminas de grafito tienen el efecto de limitar la resistencia por el efecto de entalla a que dan lugar. La mayor finura del grafito mejorará las propiedades mecánicas.

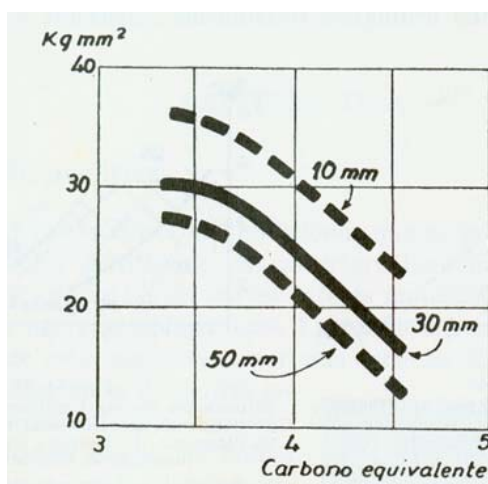
Hay una cierta correlación entre el porcentaje de carbono y las propiedades de resistencia. En la figura adjunta se indica esa relación para fundiciones perlíticas, esto se consigue porque estas fundiciones de menor porcentaje de carbono son las que tienen menor cantidad de láminas de grafito⁴.



Por otra parte, en cuanto a la formación de una matriz más o menos perlítica será función de la combinación de la cantidad de carbono y de silicio, y por supuesto del espesor de la pieza⁵.

Suele establecerse un parámetro llamado Carbono equivalente, que se define como la suma del carbono real presente más la influencia que tienen los elementos Silicio y Fósforo llamados grafitizadores en cuanto que favorecen la formación de grafito.

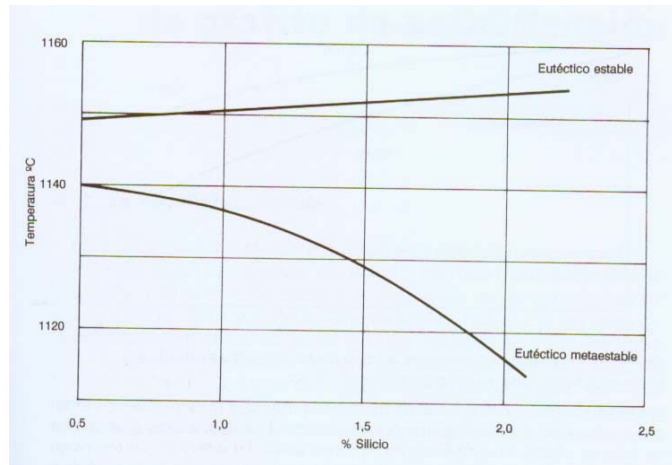
$$CE = \%C + \frac{\%Si + \%P}{3}$$



Cuando el carbono equivalente es igual a 4,3% el modo de solidificación es esencialmente 100% eutéctico³. Se da una cierta relación entre el valor del CE y la resistencia que se puede estimar en una aleación de hierro concreta, como se ve en el gráfico adjunto. También se ve la

influencia de la velocidad de enfriamiento bajo la forma de los distintos espesores de las piezas

La cantidad de Silicio presente será por tanto determinante del tipo de estructura que queremos obtener. La definición de la cantidad será un balance del Carbono equivalente resultante y del espesor de las piezas. El efecto grafitizador del Silicio se puede explicar observando como modifica las



temperaturas eutécticas en los diagramas estable y metaestable. La separación de ambas temperaturas da lugar a que la curva de solidificación típica de las aleaciones hipoeutécticas permita completar la solidificación sin que se haya atravesado la línea eutéctica metaestable y así obtener una estructura ausente de cementita. Es evidente que la velocidad de enfriamiento juega un papel fundamental en este proceso, y eso puede llevar al fundidor a variar el contenido de Silicio en el caso de tener espesores delgados o bien a utilizar otras técnicas localizadas para minimizar las velocidades en esos puntos.

Los elementos de aleación influyen de diversas formas en el equilibrio de las temperaturas eutécticas del Hierro – Grafito y del Hierro – Cementita como se indica en forma esquemática.

$\frac{\Downarrow (\gamma + Ceutectico)}{\Uparrow (\gamma + Cem)} [Cr, V, Ti]$	$\begin{matrix} \Uparrow \\ \Downarrow \end{matrix} [Si, Ni, Cu]$
$\begin{matrix} \Uparrow \\ \Uparrow \end{matrix} [Al]$	$\begin{matrix} \Downarrow \\ \Downarrow \end{matrix} [Mn, Mo, W, Sn, Sb]$
<ul style="list-style-type: none"> ■ la flecha superior se refiere a la forma de desplazar la temperatura eutéctica del diagrama estable ■ la flecha inferior se refiere a la forma de desplazar la temperatura eutéctica del diagrama metaestable 	

El Cromo, el Vanadio y el Titanio acortan la distancia entre ambas temperaturas y por tanto tienen un efecto carburizante, es decir, favorecen la cementita e impiden la

formación de grafito. El factor de influencia crece en el orden indicado en esos elementos. Será el Cromo el que debe tenerse más en consideración por su mayor presencia en las aleaciones de hierro. El siguiente grupo de elementos formado el Cobre y el Níquel además del Silicio tendrán un efecto grafitizante. En este caso su influencia es decreciente, mayor para el Silicio y menor para los otros dos. Hemos dejado de lado los efectos del Azufre y el Fósforo pues aunque también tienen este mismo efecto sus contenidos están limitados por los otros efectos perniciosos que tienen en el comportamiento del material. Los otros elementos indicados en el esquema influyen en menor medida por desplazar ambas temperaturas.

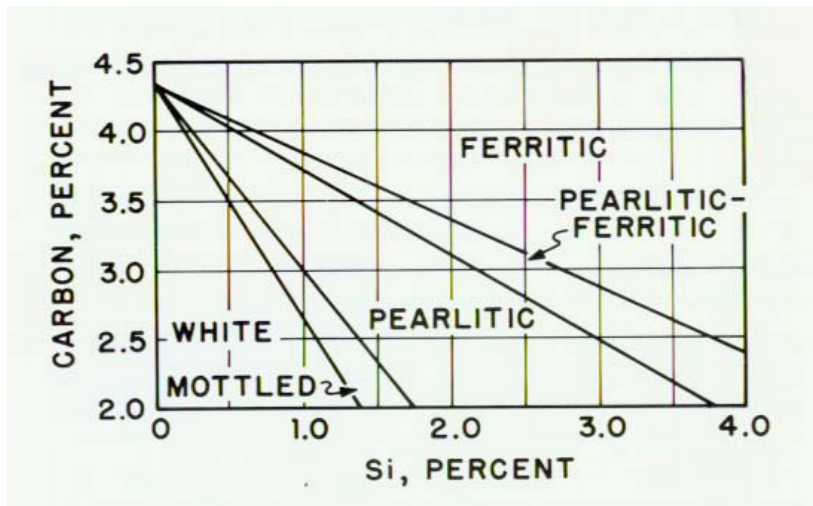
Una vez obtenida la estructura primaria, la austenita formada difunde parte del Carbono disuelto al descender la temperatura, como se observa en el diagrama de equilibrio. Hay además un proceso llamado de ferritización directa, en las zonas contiguas al grafito de solidificación. Ello es debido a que algunos átomos de carbono de la austenita emigran por difusión y se depositan sobre aquel grafito –sobre todo si se trata de los tipos B o D- con lo cual la austenita se empobrece en carbono y se transforma localmente en ferrita¹. Se observa cómo en las fundiciones ferrito-perlíticas las zonas de grafito están rodeadas de una aureola blanca de ferrita. Esto es más probable para altos porcentajes de carbono y de silicio.

La transformación de la austenita se rige por las mismas leyes que se presentan en los aceros con la influencia que ejercen los elementos de aleación presentes. El Silicio tiende a que la Austenita se transforme en Ferrita y Grafito, evitando así la transformación natural de la Austenita en Perlita –ferrita y cementita-, es decir, nuevamente tenemos el compromiso entre la transformación estable y metaestable. También en este caso la velocidad de enfriamiento juega un papel fundamental en los productos de esta transformación: enfriamiento lento dará lugar a una estructura matriz ferrítica y por consiguiente blanda, enfriamiento más rápido dará lugar a una estructura perlítica y de mayor resistencia.

En esta transformación de la austenita hay algunos elementos que facilitan la formación de perlita como son: el cobre, el níquel y el manganeso. El cobre es interesante porque además de gammageno, retrasa la ferritización antes mencionada por un efecto barrera en la difusión del carbono. Hay otros elementos que actúan de la misma forma

como son el bismuto, el plomo y el estaño. Este último resulta más efectivo que el cobre pero le da fragilidad a la fundición. En cuanto promotor de la perlita se debe usar en pequeñísimas cantidades –algunos recomiendan del 0.04-0.1%⁶- por el efecto debido al exceso.

Se puede concluir que el objeto de los elementos de aleación en las fundiciones es conseguir las mejores condiciones estructurales para su comportamiento. Pero estas formulaciones o recomendaciones de aleación deben acompañar y complementar las características de la pieza a fundir, ya que el componente de la sensibilidad al espesor debe ser ponderada por el fabricante según las condiciones de fabricación: tipo de molde, diferencias de espesores, dinámica de la solidificación, posicionamiento de los montajes y ataques, etc..



También hay dos aspectos a considerar en la conformación de la estructura final: la matriz, sea ésta ferrítica, perlítica o mixta, y la forma, tamaño y distribución del grafito. Asimismo, considerar la ausencia de

puntos “acoquillados” y de carburos, producidos por zonas de pequeño espesor o de mayor velocidad de enfriamiento, estos carburos serán cementita o bien según los elementos añadidos pueden ser de cromo o de manganeso. Todo ello lleva a que sea corriente hacer una formulación que contemple la adición de dos aleantes para considerar el efecto sobre los dos aspectos considerados.

La influencia de los elementos de aleación comunes en las transformaciones en el estado sólido son individuales y únicas. Algunos elementos son más efectivos en evitar la presencia de ferrita libre, mientras que otros son más efectivos en el afinamiento de la perlita. El Cromo, Cobre, Manganeso, Vanadio y Níquel son efectivos en ambos casos: como inhibidores de la formación de ferrita libre, así como en obtener una perlita más fina. El Molibdeno y el Vanadio son los más poderosos en este segundo objetivo, y no tienen

prácticamente influencia sobre inhibir la formación de ferrita libre. Por tanto una combinación de varios elementos de aleación pueden tener un efecto sinérgico para conseguir una alta resistencia con la menor cantidad de aleantes.

También se pueden producir Fundiciones de alta resistencia con una muy baja cantidad de aleantes cuando estos han sido elegidos en forma adecuada. Quizás el camino más económico de conseguir un Hierro fundido gris resistente sea reducir el contenido de Silicio manteniendo un CE adecuado. Asimismo esta reducción debe ir balanceada por la influencia que puedan tener los otros posibles elementos de aleación elegidos.

¹ J.Pero-Sanz, Fundiciones férreas; Ed. Dossat 1994, Madrid

² Diagrama tomado de [-http://cyberbuzz.gatech.edu/asm_tms/phase_diagrams/#Fe](http://cyberbuzz.gatech.edu/asm_tms/phase_diagrams/#Fe)

³ J.F.Janowak; R.B.Gundlach; A Modern Approach to Alloying Gray Iron; AFS Transactions, Volume 90; 1982

⁴ J. Apraiz, Fundiciones; Ed. Dossat 1977, Madrid

⁵ Idem.

⁶ J.F.Janowak; R.B.Gundlach; A Modern Approach to Alloying Gray Iron; AFS Transactions, Volume 90; 1982