

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA



LABORATORIO DE TECNOLOGÍA DE MATERIALES

LECTURAS DE INGENIERÍA 3

HIERROS FUNDIDOS



M. en I. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez.

CUAUTITLÁN IZCALLI 2007

ÍNDICE

Pág.

| | |
|--|-----------|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1. HIERROS FUNDIDOS (FUNDICIONES DE HIERRO) | 2 |
| 1.1. MICROCONSITUYENTES DE LAS FUNDICIONES | 6 |
| 2. HIERROS FUNDIDOS BLANCOS | 6 |
| 3. HIERROS FUNDIDOS GRISES | 8 |
| 4. HIERROS FUNDIDOS NODULARES | 14 |
| 5. HIERRO FUNDIDO MALEABLE | 16 |
| 6. HIERRO FUNDIDO ENDURECIDO LOCALMENTE (CHILLED IRON) | 19 |
| 7. FUNDICIONES ALEADAS | 20 |
| 7.1. EFECTOS DE LOS ELEMENTOS DE ALEACIÓN EN LAS FUNDICIONES .. | 20 |
| 7.2. CLASIFICACIÓN DE LAS FUNDICIONES ALEADAS | 22 |
| 7.2.1. Fundiciones de baja y media aleación | 22 |
| 7.3. FUNDICIONES MARTENSÍTICAS RESISTENTES AL DESGASTE | 23 |
| 7.4. FUNDICIONES RESISTENTES AL CALOR CON 1% DE CROMO | 24 |
| 7.5. FUNDICIONES DE ALTA DUREZA CON 1 A 3 % DE CROMO | 24 |
| 7.6. FUNDICIONES ALEADAS AL ALTO CROMO | 25 |
| 7.7. FUNDICIONES ALEDAS CON ALUMINIO | 26 |
| BIBLIOGRAFÍA | 27 |

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la Ciencia y Tecnología actuales implican la generación y aplicación del conocimiento en muchas áreas y consecuentemente el estudiante de Ingeniería debe estar al tanto de los mismos, sin embargo, debido a la actualización poco frecuente de los programas y planes de estudio y más que nada por las limitaciones propias de semestres de apenas cuatro meses de actividades académicas, es difícil la actualización del estudiante en dichos conocimientos, de esa manera, además, dejar trabajos de investigación no funciona de la manera deseada, ya que en muchas ocasiones se descargan de Internet y se imprimen sin siquiera leerlos, de ese modo, surge la idea de crear una serie de apuntes de temas básicos para el ingeniero actual como son: el endurecimiento superficial del acero, las fundiciones de hierro, la tribología y el desgaste, la superplasticidad, los avances en la industria siderúrgica, etc.

En esta tercera lectura se presenta el tema de las fundiciones de hierro, incluyendo temas como su clasificación, microestructuras, propiedades y aplicaciones, esperando que sea de utilidad e interés para los alumnos y personas interesadas en el tema.

Como siempre cualquier comentario o corrección será bienvenido.

ATTE.

Mtro. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez.

1.- HIERROS FUNDIDOS (FUNDICIONES DE HIERRO)

La industria de la producción de hierro fundido es una de las principales a nivel internacional. Anualmente son producidas piezas que son ensambladas y empleadas como componentes de equipos y maquinarias. La producción de hierro fundido es el triple al resto de las producciones de metales ferrosos y no ferrosos juntos, superado solo por la producción de acero laminado según datos obtenidos [1],[2]

Los hierros fundidos, como los aceros, son básicamente aleaciones de hierro y carbono. Con relación al diagrama Fe-Fe₃C (figura 1), los hierros fundidos contienen más carbono que el necesario para saturar la austenita a la temperatura eutéctica, por tanto, contienen entre 2 y 6.7 % de carbono. Como el alto contenido de este elemento tiende a hacer muy frágil al hierro fundido, la mayoría de los tipos manufacturados están en el intervalo de 2.5 a 5 % de carbono, además, contienen silicio del 2 al 4%, manganeso hasta 1%, bajo azufre y bajo fósforo.

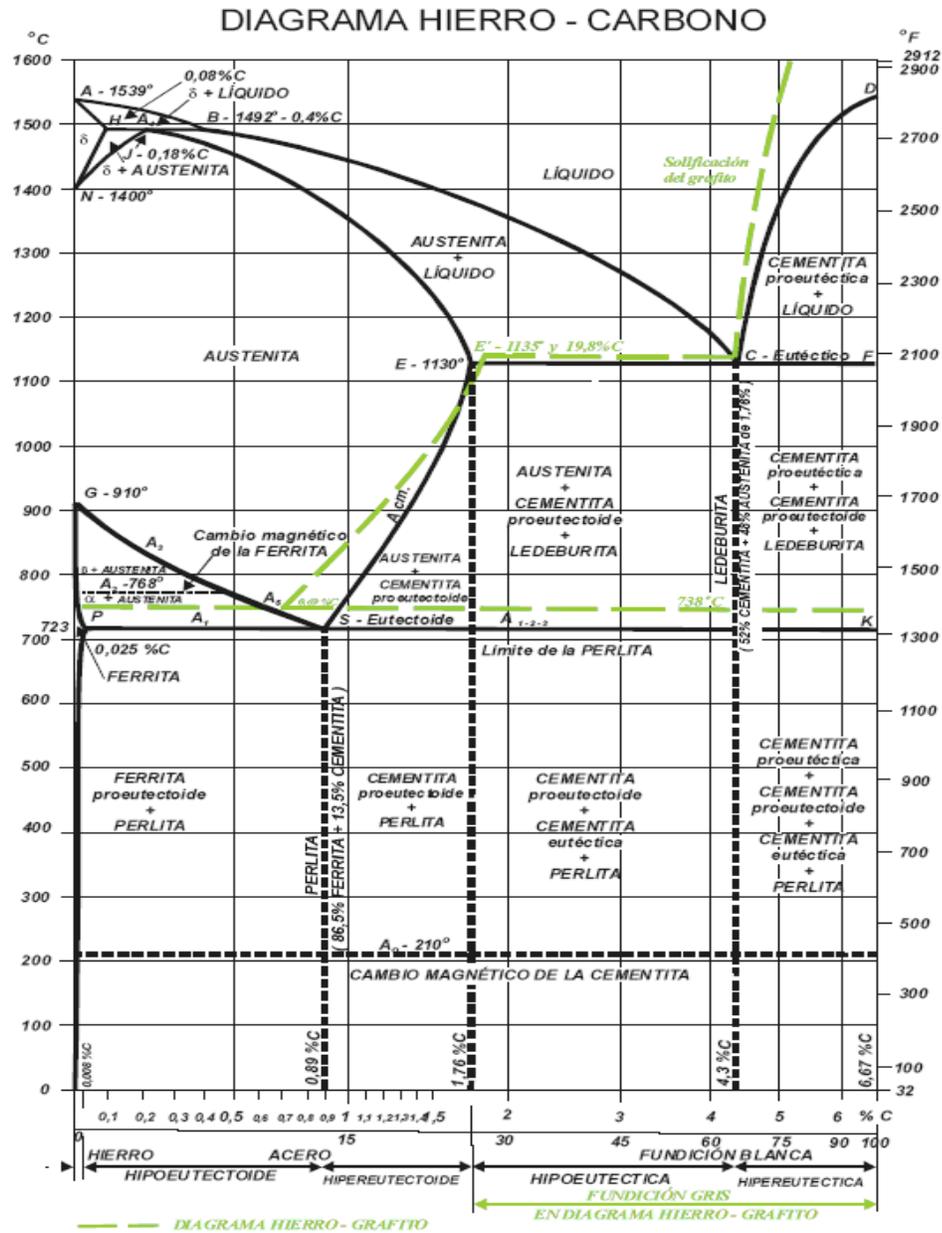
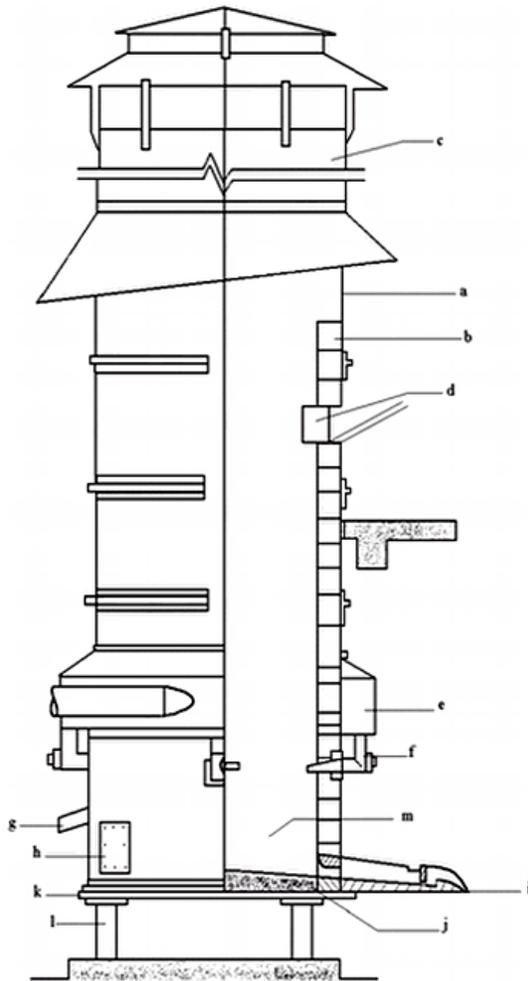


Figura 1.- Diagrama de Fases del Sistema Binario de Aleaciones Hierro-Carbono

La ductilidad del hierro fundido es muy baja y no puede laminarse, estirarse o trabajarse en frío o en caliente. Pero, se pueden vaciar de un horno de cubilote como el mostrado en la figura 2, para obtener piezas de muy diferente tamaño y complejidad siendo poco soldables pero sí maquinables, siendo relativamente duras y resistentes a la corrosión y al desgaste. Como la fundición de piezas es el único proceso aplicable a estas aleaciones se conocen como hierros fundidos, fundiciones de hierro o, hierros colados.



A pesar de que la primera patente de lo que se considera el cubilote moderno cumplió en 1994 doscientos años de ser otorgada a John Wilkinson (Inglaterra), se puede decir que el cubilote mantiene su diseño fundamental hasta nuestros días. Naturalmente, ha sufrido variaciones estructurales, se le han incorporado aditamentos, se han rediseñado algunas de sus partes, particularmente el sistema de toberas, pero su concepción inicial de horno tubular, en posición vertical, con la entrada de la carga metálica por la parte superior y un contacto directo entre el combustible sólido y dicha carga metálica, se ha mantenido inalterable.

Figura 2. El horno de cubilote y sus partes a) envoltura cilíndrica b) revestimiento interno c) Chimenea d) boca de carga e) Cámara de aire f) Toberas g) piquera de escoria h) Puerta lateral de encendido i) canal de colada j) Solera l) columnas de apoyo m) crisol

Aunque los hierros fundidos son frágiles y tienen menores propiedades de resistencia que la mayoría de los aceros, son baratos y pueden fundirse más fácilmente mostrando también las ventajas siguientes:

- Son más fáciles de maquinar que los aceros.
- Se pueden fabricar piezas de diferente tamaño y complejidad.
- En su fabricación no se necesitan equipos ni hornos muy costosos.
- Absorben las vibraciones mecánicas y actúan como autolubricantes.
- Son resistentes al choque térmico, a la corrosión y de buena resistencia al desgaste.

Además, mediante una aleación adecuada, buen control de la fundición y un tratamiento térmico adecuado, las propiedades de un hierro fundido pueden modificarse ampliamente. Los significativos progresos desarrollados en el control de la fundición han dado lugar a la producción de grandes tonelajes de hierros fundidos, cuyas propiedades suelen ser muy consistentes.

El mejor método para clasificar el hierro fundido es de acuerdo con su estructura metalográfica, así, las variables a considerar y que dan lugar a los diferentes tipos de hierros fundido son:

- El contenido de carbono
- El contenido de elementos aleantes e impurezas
- La rapidez de enfriamiento, durante y después de la solidificación y
- El tratamiento térmico posterior

Estas variables controlan la fundición, o sea la condición del carbono y también su forma física. El carbono puede estar combinado en forma de carburo de hierro (Fe_3C) o existir como carbono libre en forma de grafito. La forma y distribución de las partículas de carbono sin combinar influye en forma determinante sobre las propiedades mecánicas del hierro fundido. Estas aleaciones se clasifican por lo tanto, según el estado en que se encuentra el carbono en la microestructura, así como por la microestructura de la matriz, siendo los principales tipos los siguientes:

| | |
|---|--|
| a) Hierro fundido blanco. El carbono se encuentra en gran porcentaje, formando una red de Fe_3C | + <i>matriz de acero</i> (<i>ferrita, perlita,</i> <i>martensita, etc</i>) |
| b) Hierro fundido gris. El carbono se encuentra libre en la matriz, en forma de hojuelas de grafito | |
| c) Hierro dúctil o nodular. El carbono se encuentra libre en forma de nódulos o esferas | |
| d) Hierro maleable. El grafito se encuentra en forma de terrones o nódulos informes (carbono recocido) | |
| e) Hierros fundidos aleados. | |

1.1. MICROCONSTITUYENTES DE LAS FUNDICIONES

Las fundiciones de hierro pueden presentar los mismos constituyentes de los aceros, más el eutéctico ledeburita, compuesto de austenita y cementita, el eutéctico ternario de cementita, ferrita y fósforo de hierro (esteadita) y el carbono en forma de láminas, nódulos o esferitas de grafito, su microestructura se basa en el diagrama hierro carbono estable.

Ledeburita. Una reacción eutéctica ocurriendo a 1148 °C y una composición de 4.3 %C. A esta temperatura y composición la fase líquida esta en equilibrio con la fase sólida cementita, con 6.7 %C y austenita saturada conteniendo 2.11 %C. El producto de esta reacción se conoce como “ledeburita”.



La ledeburita no existe a temperatura ambiente en las fundiciones ordinarias debido a que en el enfriamiento se transforma en cementita y perlita; sin embargo en las fundiciones se pueden conocer la zonas donde existió la ledeburita por el aspecto eutéctico con que quedan las agrupaciones de perlita y cementita.

Esteadita. Es un constituyente de naturaleza eutéctica duro, frágil (300 a 350 Vickers) y de bajo punto de fusión (960 °C), que aparece en las fundiciones de alto contenido en fósforo (más de 0.15 % P)

2. HIERROS FUNDIDOS BLANCOS

Se les da este nombre por la apariencia que tiene el material fracturarse. Se forma al enfriar rápidamente la fundición de hierro desde el estado líquido, siguiendo el diagrama hierro-cementita metaestable; durante el enfriamiento, la austenita solidifica a partir de la aleación fundida en forma de dendritas. A los 1148 °C el líquido alcanza la composición eutéctica (4.3%C) y se solidifica como un eutéctico de austenita y cementita llamado ledeburita. Este eutéctico aparece en su mayor parte como cementita blanca que rodea las dendritas de forma de helecho. Figura 3

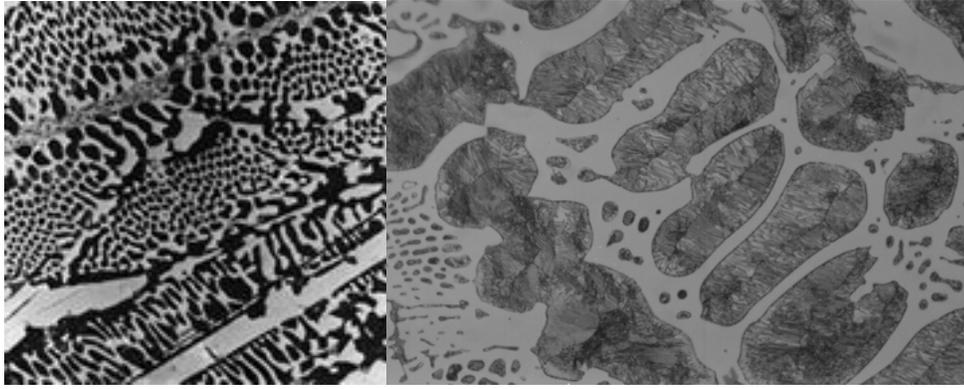


Figura 3. Microestructura de la fundición blanca

La fundición blanca se produce en el horno de cubilote, su composición y rapidez de solidificación separa coladas que se transformarán con tratamiento térmico en hierro maleable. La fundición blanca también se utiliza en aplicaciones donde se necesita buena resistencia al desgaste tal como en las trituradoras y en los molinos de rodillos.

Al enfriarse las fundiciones desde 1130 °C hasta 727 °C el contenido de carbono de la austenita varía de 2 a 0.8%C al precipitarse cementita secundaria que se forma sobre las partículas de cementita ya presentes, a los 727 °C la austenita se transforma en perlita, el eutectoide de los aceros.

La fundición blanca se utiliza en elementos de molienda por su gran resistencia al desgaste, el enfriamiento rápido evita la grafitización de la cementita pero si se calienta de nuevo la pieza colada a una temperatura de 870 °C el grafito se forma lentamente adoptando una forma característica conocida como carbono de revenido, resultando la fundición maleable, debiéndose mencionar que un gran tonelaje de hierro fundido blanco se emplea como materia prima para la manufactura de hierro fundido maleable.

La matriz de la fundición puede ser ferrítica o perlítica si la aleación se enfría más rápidamente a partir de los 727 °C al final del tratamiento de maleabilización. Las fundiciones maleables se utilizan en la fabricación de partes de maquinaria agrícola, industrial y de transporte.

3. HIERROS FUNDIDOS GRISES

Para explicar el hierro fundido gris es necesario entender que el carburo de hierro es básicamente una fase metaestable y que con un enfriamiento anormalmente lento (o en presencia de ciertos aleantes como el silicio) se cristalizará el grafito (carbono puro) y el hierro (figura 4). Además, si se calienta el carburo de hierro por un periodo prolongado se descompondrá de acuerdo a la reacción siguiente:



Figura 4. Hojuelas de grafito en el hierro fundido gris.

Por lo tanto, el diagrama de equilibrio verdadero es el sistema hierro-grafito que se muestra con línea discontinua en la figura 1. No es necesario un nuevo diagrama, porque para todos los propósitos prácticos solamente hay que sustituir el grafito por el carburo de hierro en las regiones de dos fases, como se indica en la figura 1 y mover la línea vertical de la derecha hasta el 100 %.

Los principales elementos de aleación son carbono y silicio. El alto contenido de carbono incrementa la cantidad de grafito o de Fe_3C e incrementando el contenido de carbono y silicio incrementa el potencial de grafitización y fluidez del hierro fundido, sin embargo su resistencia se ve afectada, ya que se promueve la formación de ferrita y el engrosamiento de la perlita.

La influencia combinada del carbono y el silicio normalmente se evalúa mediante la expresión siguiente:

$$CE = \%C + 0.3 (\%Si) + 0.33 (\%P) - 0.027 (\%Mn) + 0.4 (\%S)$$

El contenido de manganeso varía en función de la matriz deseada, típicamente, puede ser tan baja como 0.1% para hierros ferríticos y tan alta como 1.2% para hierros perlíticos, ya que el manganeso es un fuerte promotor de la perlita.

El efecto del azufre puede ser balanceado con el manganeso, sin manganeso en el hierro el indeseable compuesto sulfuro de hierro (FeS) se formará en el límite de grano. Si el azufre se balancea con manganeso, se formara sulfuro de manganeso (MnS), el cual es menos dañino ya que se distribuye dentro del grano. La relación óptima entre el manganeso y azufre para una estructura libre de sulfuro de azufre y máxima cantidad de ferrita es:

$$\%Mn = 1.7x(\%S) + 0.15$$

En la práctica es más difícil regular la cantidad de carbono que la de silicio, por eso, se elige un contenido tal de carbono que garantice relativamente buenas propiedades de colada, esto es, fluidez y poca contracción. La relación entre el contenido de carbono y silicio y la estructura de la fundición se presenta en forma gráfica en el diagrama estructural de la figura 5a). El campo del diagrama está dividido en cinco zonas estructurales, según sea el contenido de silicio (por la línea horizontal) y carbono (por la línea vertical). El diagrama está construido para lingotes con un espesor de pared constante, que corresponde al bloque de prueba de 30 mm de diámetro; en él no se toma en consideración el efecto de la velocidad de enfriamiento sobre la estructura de la fundición. El enfriamiento retardado eleva el grado de formación de grafito.

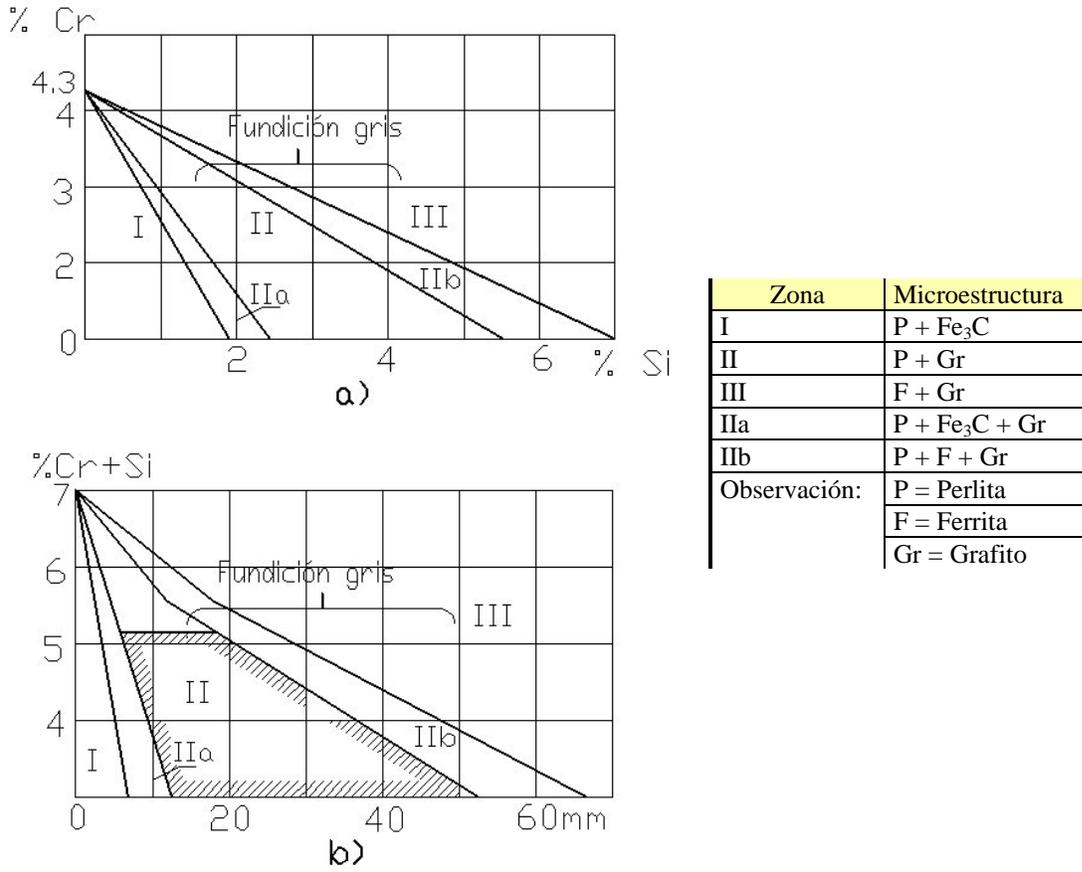


Figura 5. a) Influencia del contenido de C y Si b) efecto del espesor de la pieza moldeada

El diagrama estructural de la figura 5b) muestra la relación entre la estructura de la fundición y el contenido total de carbono y silicio (C+ Si) y el espesor de las paredes del lingote, es decir de la velocidad de enfriamiento. En este diagrama el eje de las abscisas indica los espesores de las paredes de los lingotes y el de las ordenadas, la suma de carbono y silicio, pudiéndose observar que el campo de este diagrama está dividido también en cinco zonas estructurales de igual manera que en el anterior.

La zona de las fundiciones perlíticas de alta calidad en el diagrama de la figura 5b) está limitada por la horizontal del 5.3 % de la suma de C + Si , en el diagrama ésta zona esta sombreada . Se ha establecido que al disminuir el contenido de estos elementos por debajo del límite establecido, la resistencia de la fundición aumenta notablemente a costa de la reducción del grafito. Ambos diagramas muestra la influencia del contenido en C y Si y la velocidad de enfriamiento sobre la estructura de las fundiciones de hierro.

Una característica distintiva del hierro gris es que el carbono se encuentra en general en forma de grafito adoptando formas irregulares descritas como “hojuelas”, este grafito es el que da la típica coloración gris a las superficies de fractura en las piezas elaboradas con esta aleación. Las propiedades físicas y en particular las mecánicas varían dentro de amplios intervalos respondiendo a factores como la composición química, rapidez de enfriamiento después del vaciado, tamaño y espesor de las piezas, práctica de vaciado, tratamiento térmico y parámetros microestructurales como la naturaleza de la matriz y la forma y tamaño de las hojuelas de grafito. Las hojuelas adoptan diferentes patrones irregulares o tipos. El tipos y tamaño de hojuela se determina de manera tradicional por simple comparación contra el patrón ASTM (American Society for Testing and Materials), norma A247. Esto se realiza mediante observaciones de microscopía óptica a 100X sobre probetas pulidas a espejo, sin ataque químico. En general, se habla de 5 tipos de hojuelas, denominados A, B, C, D y E como se aprecia en la figura 6.

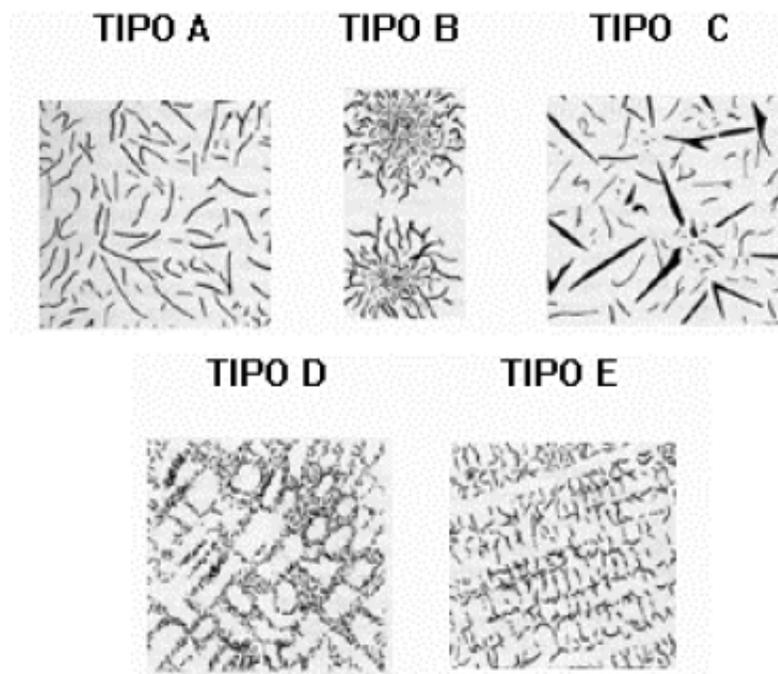


Figura 6. Tipos de hojuelas en los hierros grises, según clasificación de ASTM

Las normas hacen referencia a ocho tamaños de hojuelas, asignándoles números del 1 al 8 como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Tamaños de hojuelas AFS*-ASTM**

| Tamaño | Long. de las hojuelas más largas en pulg. A 100X. |
|--------|---|
| 1 | 4 o más |
| 2 | 2-4 |
| 3 | 1-2 |
| 4 | ½ - 1 |
| 5 | ¼ - ½ |
| 6 | 1/8- ¼ |
| 7 | 1/16-1/8 |
| 8 | 1/16 o menos |

* American Foundrymen Society

** American Society for Testing of Materials

En general para la mayoría de las aplicaciones se prefieren las hojuelas del tipo A de tamaño “pequeño”, los tamaños grandes reducen la resistencia y ductilidad del hierro como resultado de interrumpir seriamente la continuidad del material.

Las propiedades mecánicas en general de las fundiciones grises son variables y están en función directa de la microestructura; por lo general poseen una resistencia a la compresión de dos a tres veces mayor que su resistencia a la tensión, siendo su ductilidad bastante pequeña. Muchos de los grados de hierro gris tienen mayor resistencia al corte torsional que algunos tipos de acero. Estas características junto con una baja sensibilidad a la presencia de muescas (concentradores de esfuerzo) hacen del hierro gris un material adecuado para diversos tipos de flechas y ejes.

La capacidad de amortiguación del hierro gris es una propiedad que no se mide muy a menudo, pero que vale la pena considerar, ya que estas aleaciones tienen la habilidad de absorber la energía y por lo tanto de detener la vibración. Por ejemplo una barra de acero produce un sonido metálico, un abarra de hierro fundido no lo produce. Esta característica explica las muchas armazones de máquinas que se hacen de hierro fundido gris.

El hierro gris es fácil de maquinar, debido a la presencia de carbono libre (grafito), pero no es fácil de soldar. La soldadura puede hacerse pero requiere de una técnica especial y generalmente queda confinada a reparaciones.

El hierro fundido gris por lo general no se trata térmicamente como el acero, pero muchas de sus propiedades pueden variar con tratamientos térmicos. El recocido puede liberar los esfuerzos, ablandar el hierro y hacerlo fácil de maquinar.

El hierro gris se utiliza ampliamente para guarniciones y marcos alrededor de maquinaria peligrosa. Muchos tipos cajas para engranes, recintos para equipo eléctrico, carcasas para bombas y turbinas, engranes, monobloques para motor y muchas otras piezas automotrices.

El sistema de identificación de ASTM para los hierros fundidos grises establece que el número que lo identifica corresponda a la resistencia a la tensión mínima en miles de libras/pul², de tal manera que hierro gris ASTM No. 20 tiene una resistencia mínima a la tensión de 20000 lb/pul².

Tabla 2. Designación y propiedades de los hierros fundidos grises.

| CLASE ASTM | RESISTENCIA MÁXIMA (ksi) | RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (ksi) | RESISTENCIA AL CORTE (ksi) | MODULO DE ELASTICIDAD | | LIMITE A LA FATIGA (ksi) | DUREZA BHN |
|---------------|--------------------------------|--|----------------------------------|--------------------------|------------------|--------------------------------|---------------|
| | | | | TENSIÓN (Msi) | TORSIÓN (Msi) | | |
| 20 | 22 | 83 | 26 | 9.6-14 | 3.9-5.6 | 10 | 156 |
| 25 | 26 | 97 | 32 | 11.5-14.8 | 4.6-6.0 | 11.5 | 174 |
| 30 | 31 | 109 | 40 | 13.0-16.4 | 5.6-6.6 | 14 | 201 |
| 35 | 36.5 | 124 | 48.5 | 14.5-17.2 | 5.8-6.9 | 16 | 212 |
| 40 | 42.5 | 140 | 57 | 16-20 | 6.4-7.8 | 18.5 | 235 |
| 50 | 52.5 | 164 | 73 | 18.8-22.8 | 7.2-8.0 | 21.5 | 262 |
| 60 | 62.5 | 187.5 | 88.5 | 20.4-23.5 | 7.8-8.5 | 24.5 | 302 |

Nota. Multiplique la resistencia en ksi por 6.89 para obtener MPa.

4. HIERROS FUNDIDOS NODULARES

También se conoce como hierro dúctil, hierro de grafito esferoidal, hierro esferulítico; en este tipo de hierro fundido el grafito se encuentra presente como pequeñas bolas o esferoides las cuales interrumpen con menor brusquedad la continuidad que las hojuelas de grafito en de un hierro gris, dando como resultado una mayor resistencia y tenacidad, comparada con una estructura semejante a la del hierro gris. El hierro fundido nodular difiere del maleable en que generalmente se obtiene como resultado de la solidificación y no requiere de tratamiento térmico. Las esferorides son más redondas que los agregados irregulares de carbono revenido encontrados en el hierro maleable.

El grafito esferoidal es producido por la adición de uno más elementos al metal fundido: magnesio, cerio, calcio, litio, sodio, bario y otros elementos producen también grafito esferoidal. De éstos, el magnesio y el cerio son comercialmente importantes y como el contenido total de carbono en el hierro nodular es el mismo que en hierro gris, las matrices ferríticas y perlíticas se obtienen de manera similar a la de los hierros fundidos grises.

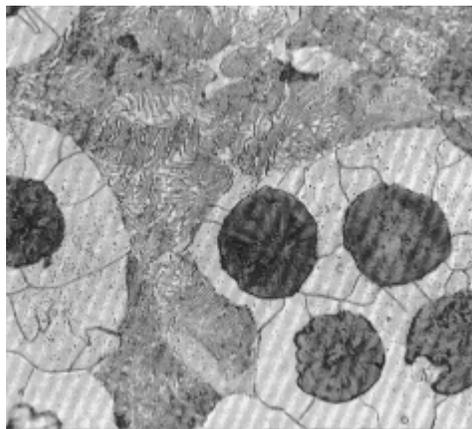


Figura 7. Microestructura de la fundición nodular ferrítico-perlítica

Los hierros perlíticos nodulares son más fuertes pero menos dúctiles que los ferríticos. También se puede obtener una matriz martensítica templando en aceite o en agua desde una temperatura de 870 a 930 °C, figura 8. Las estructuras templadas generalmente se revenen después del endurecimiento a los niveles de resistencia y dureza deseados.

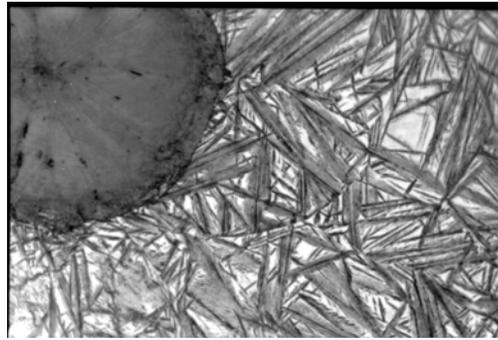


Figura 8. Matriz martensítica en un hierro nodular.

Poseen mayor resistencia a la tensión que los hierros grises, resistencia al desgaste y dureza similares, poseen alta resistencia al impacto térmico y mayor maquinabilidad.

Algunas aplicaciones típicas del hierro nodular son:

- Cigüeñales, pistones, y cabeza de cilindros para automóviles y motores diesel
- En acerías, rodillos de trabajo, puertas para horno, rodetes de mesa y cojinetes.
- Llaves para tuercas, palancas, manivelas, marcos de sujeción y chucks.
- Troqueles diversos para dar forma al acero, aluminio, bronce, latón y titanio.

Cada día se están sustituyendo muchos elementos de máquinas que tradicionalmente eran de fundición gris o acero por fundición nodular.

Finalmente, en la tabla 3 se presentan las propiedades mecánicas de este tipo de hierro según ASTM.

Tabla 3. Clasificación de la fundición nodular teniendo en cuenta sus características mecánicas de acuerdo con la norma ASTM A-536.

| Clase | Resistencia | Lím. fluencia | Dureza brinell | alargamiento |
|-----------|-------------|---------------|----------------|--------------|
| | psix1000 | | | (%) |
| 60-40-18 | 42000 | 28000 | 149-187 | 18 |
| 65-45-12 | 45000 | 32000 | 170-207 | 12 |
| 80-55-06 | 56000 | 38000 | 187-255 | 6 |
| 100-70-03 | 70000 | 47000 | 217-267 | 3 |
| 120-70-02 | 84000 | 63000 | 240-300 | 2 |

5. HIERRO FUNDIDO MALEABLE

La materia prima para poder producir éste tipo de hierro fundido, es el hierro fundido blanco, en donde el carbono se encuentra en forma de carburo (Fe_3C). Aprovechando que el carburo de hierro es una fase metaestable y que su descomposición en $\text{Fe} + \text{C}$ se ve favorecida por las altas temperaturas se lleva a cabo lo que se conoce como proceso de maleabilización y consta de dos etapas principales:

En la primera fase del recocido, la fundición blanca se calienta lentamente a una temperatura comprendida entre 840 y 980 °C. Durante el calentamiento, la perlita se transforma en austenita al alcanzar la línea crítica inferior y, a medida que aumenta la temperatura, la austenita formada disuelve algo más de cementita.

La segunda fase del recocido consiste en un enfriamiento muy lento al atravesar la zona crítica en que tiene lugar la reacción eutectoide. Esto permite a la austenita descomponerse en las fases estables de ferrita y grafito. Una vez realizada la grafitización, la estructura no sufre ninguna nueva modificación durante el enfriamiento a temperatura ambiente, quedando constituida por nódulos de carbono de revenido (rosetas) en una matriz ferrítica, figura 9.

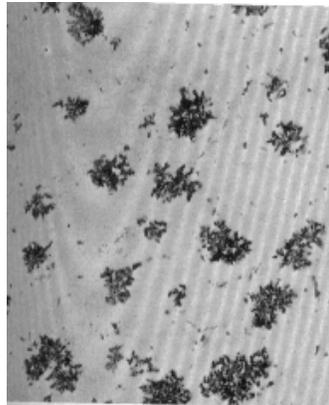


Figura 9. Microestructura de la fundición maleable ferrítica

De ésta manera se obtiene una matriz ferrítica más carbono recocido, conociéndose como hierro ferrítico maleable o estándar. En la figura 10 se muestra en forma esquemática los cambios en la microestructura durante el ciclo de maleabilización

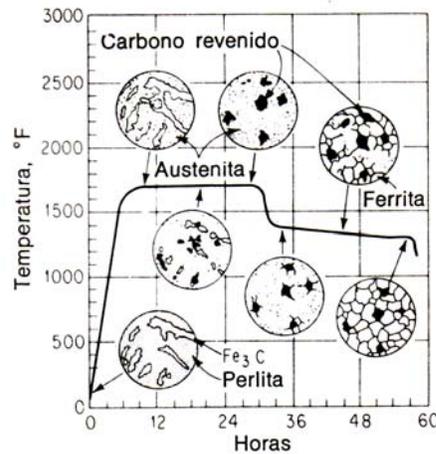


Figura 10. Cambios de microestructura como función del ciclo de maleabilización

Para obtener una estructura perlítica, se puede agregar manganeso durante el ciclo regular para retener carbono combinado por toda la matriz o se puede variar la segunda etapa del proceso, es decir se varía la velocidad de enfriamiento a partir de la temperatura de 760 °C. La cantidad de perlita formada depende de la temperatura a que empiece el enfriamiento y la rapidez de éste. Las altas temperaturas de temple y la rapidez de enfriamiento (aire en ráfaga) dan como resultado mayor cantidad de carbono retenido o perlita. Si el temple es en aire produce una rapidez de enfriamiento suficientemente grande a través del intervalo eutectoide y la matriz será perlítica completamente

Las características de estos hierros fundidos se pueden considerar intermedias entre los hierros grises y los hierros fundidos nodulares, siendo los hierros maleables con matriz perlítica los más resistentes, pero un poco menos dúctiles. Poseen buena resistencia al desgaste, al impacto térmico, excelente maquinabilidad y poca capacidad de ser soldados especialmente los de matriz perlítica.

Sus principales aplicaciones son:

Para la clase ferrítica, en equipo automotriz, agrícola y ferroviario; juntas de expansión y piezas fundidas para barandales de puentes; ensambles de grúas de cadena y rodetes industriales; conexiones para tuberías y muchas aplicaciones en ferretería general.

Algunas aplicaciones del hierro perlítico maleable son: cajas para ejes y diferenciales, ejes de levas y cigüeñales para automóviles, engranes, catarinas, pernos de unión para cadenas y ménsulas elevadoras en equipo transportador, etc.

Finalmente, debe decirse que actualmente ha decrecido de manera sustancial el tonelaje producido de hierro maleable como consecuencia de lo costoso del tratamiento térmico necesario para obtener las rosetas de grafito.

En las tablas 4 y 5 se presentan las propiedades mecánicas de los hierros fundidos maleables, según ASTM:

Tabla 4. Propiedades mecánicas de los hierros maleables ferríticos.

| Designación | Diámetro de la probeta mm | Resistencia máxima N/mm ² | Resistencia a la fluencia N/mm ² | % ϵ ($L_0 = 3d$) % min | Dureza BHN |
|-------------|------------------------------|---|--|---|---------------|
| W 35-04 | 9 - 15 | 340 - 360 | - | 5 - 3 | 230 |
| W 38-12 | 9 - 15 | 320 - 380 | 170 - 210 | 15 - 8 | 200 |
| W 40-05 | 9 - 15 | 360 - 420 | 200 - 230 | 8 - 4 | 220 |
| W 45-07 | 9 - 15 | 400 - 480 | 230 - 280 | 10 - 4 | 220 |

Tabla 5. Propiedades mecánicas del hierro fundido maleable perlítico

| Designación | Diámetro de la probeta mm | Resistencia máxima N/mm ² | Resistencia a la fluencia N/mm ² | % ϵ ($L_0 = 3d$) % min | Dureza BHN |
|-------------|------------------------------|---|--|---|---------------|
| B 30-06 | 12 - 15 | 300 | - | 6 | 150 max |
| B 32-12 | 12 - 15 | 320 | 190 | 12 | 150 max |
| B 35-10 | 12 - 15 | 350 | 200 | 10 | 150 max |
| P 45-06 | 12 - 15 | 450 | 270 | 6 | 150-200 |
| P 50-05 | 12 - 15 | 500 | 300 | 5 | 160-220 |
| P 55-04 | 12 - 15 | 550 | 340 | 4 | 180-230 |
| P 60-03 | 12 - 15 | 600 | 390 | 3 | 200-250 |
| P 65-02 | 12 - 15 | 650 | 430 | 2 | 210-260 |
| P 70-02 | 12 - 15 | 700 | 530 | 2 | 240-290 |
| P 80-01 | 12 - 15 | 800 | 600 | 1 | 270-310 |

6. HIERRO FUNDIDO ENDURECIDO LOCALMENTE (CHILLED IRON)

Cuando un área localizada de hierro gris se enfría rápidamente desde el estado líquido, en ese lugar se forma hierro fundido blanco, el cual se conoce como chilled iron, figura 11.

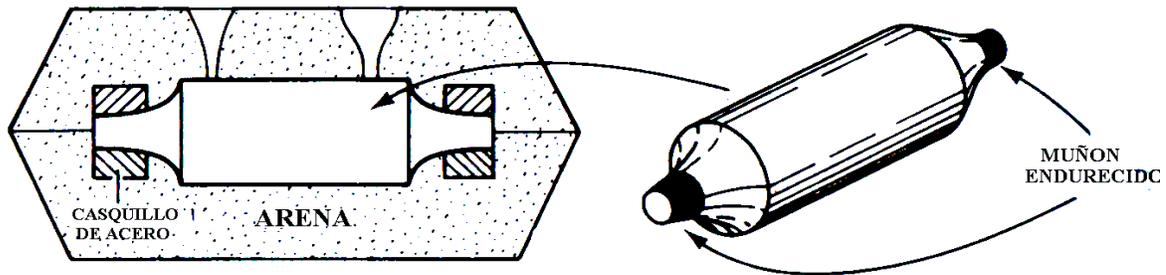


Figura 11. Endurecimiento local del hierro fundido (chilled iron)

Este tipo de fundición también puede producirse ajustando el contenido de carbono del hierro fundido blanco, de tal modo, que la velocidad de enfriamiento en la superficie sea lo suficientemente rápido para formar hierro fundido blanco, mientras que debajo de la superficie donde se tienen menores velocidades de enfriamiento se forma hierro gris. Al aumentar el contenido de carbono, la profundidad del temple se reduce y aumenta la dureza de la zona endurecida

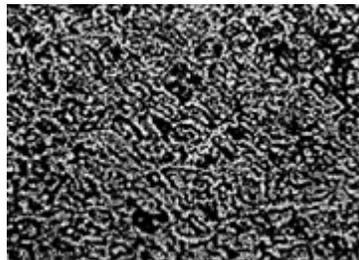


Figura 12. Estructura típica en las fundiciones endurecidas localmente

El cromo se utiliza en pequeñas cantidades para controlar la profundidad del temple. Como consecuencia de la formación de carburos de cromo, se utiliza en cantidades de 1 al 4 % para incrementar la dureza y mejorar la resistencia a la abrasión. También estabiliza al carburo y suprime la formación de grafito en secciones gruesas. Cuando se agrega en cantidades del 12 al 35 % proporciona resistencia a la corrosión y oxidación a temperaturas elevadas.

7. FUNDICIONES ALEADAS

Las fundiciones aleadas son aquellas que contienen Ni, Cr, Mo, Cu, etc., en porcentaje suficiente para mejorar las propiedades mecánicas de las fundiciones ordinarias o para comunicarles alguna otra propiedad especial, como alta resistencia al desgaste, alta resistencia a la corrosión, al calor etc.

7.1. EFECTOS DE LOS ELEMENTOS DE ALEACIÓN EN LAS FUNDICIONES

Los elementos de aleación modifican la microestructura de las fundiciones y con ello su dureza y resistencia, estando en ocasiones estos cambios influenciados, además, por una variación de la templabilidad.

Los elementos de aleación modifican también como en los aceros, la situación de los puntos críticos y además ejercen una acción muy importante y compleja de la grafitización.

En la tabla 6 se señala la influencia que los diversos elementos aleados ejercen sobre la formación del grafito y de los carburos y sobre las características de la matriz, y en la tabla 7 se señala la influencia que tienen sobre los puntos críticos.

Tabla 6. Influencia que los diversos elementos aleados ejercen sobre la formación del grafito y de los carburos y sobre las características de la matriz,

| Elemento. | Grafitización y coeficientes de grafitización. | Efecto sobre los carburos a alta temperatura. | Efecto en la estructura del grafito. | Efecto en el carbono combinado de la perlita. | Efecto que produce en la matriz. |
|------------|--|---|--------------------------------------|---|--|
| Carbono. | Favorece | Decrece estabilidad | Engruesa | Decrece fuertemente | Ablanda y favorece la formación de ferrita |
| Silicio. | Favorece +1 | Decrece estabilidad | Engruesa | Decrece fuertemente | Ablanda y favorece la formación de ferrita |
| Aluminio. | Favorece +0.5 | Decrece estabilidad | Engruesa | Decrece fuertemente | Ablanda y favorece la formación de ferrita |
| Titanio. | Favorece +0.4 | Decrece estabilidad | Afina fuertemente | Decrece | Ablanda y favorece la formación de ferrita |
| Níquel. | Favorece +0.35 | Decrece ligeramente estabilidad | Afina ligeramente | Decrece y estabiliza la perlita | Afina la perlita y da dureza |
| Cobre. | Favorece +0.20 | Indiferente | Indiferente | Decrece ligeramente | Da dureza |
| Manganeso. | Se opone -0.25 | Estabiliza | Afina ligeramente | Aumenta | Afina la perlita y da dureza |
| Molibdeno. | Se opone -0.30 | Indiferente | Afina fuertemente | Aumenta ligeramente | Afina la perlita y da resistencia |
| Cromo. | Se opone -1 | Estabiliza fuertemente | Afina ligeramente | Aumenta | Afina la perlita y da dureza |
| Vanadio. | Se opone -2.5 | Estabiliza fuertemente | Afina | Aumenta | Afina la perlita y da dureza |

Tabla 7. Influencia que tienen los diversos elementos de aleación sobre los puntos críticos

| Modificación Que se produce. | Si. | Mn. | Ni. | Cr. | Al. | Mo. |
|---|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------|
| Desplazamiento del punto eutéctico | Hacia la izquierda | Hacia la derecha | Hacia la izquierda | Hacia la izquierda | | |
| Desplazamiento de la temperatura eutectoide | Hacia arriba | Hacia abajo | Hacia abajo | Hacia abajo | Hacia arriba | |
| Templabilidad | | Aumenta | | Aumenta | Reduce | Aumenta |
| Desplazamiento del punto eutectoide | Hacia la izquierda | |

Ciertos elementos como el silicio, aluminio, níquel y cobre, que se disuelven en la ferrita, la endurecen y la hacen aumentar su resistencia, siendo elementos que favorecen la grafitización.

Otros elementos como el cromo, manganeso, y molibdeno son formadores de carburos, esto es, son elementos que tienden a formar fundición blanca en vez de gris y dificultan la grafitización

La influencia que ejercen diversos contenidos de cromo, así como las microestructuras y características que se obtienen en cada caso, se describen a continuación:

El cromo en porcentajes de 0.10 a 0.20% afina la perlita y el grafito de las fundiciones ordinarias.

Con 1% de cromo se provoca ya la aparición de carburos de gran dureza, que, además, son muy estables a altas temperaturas.

Con 2% de cromo desaparece el grafito. La fundición gris se convierte en blanca y la proporción de carburos de cromo aumenta.

Con 6% la matriz es perlítica y la cantidad de carburos que aparecen en la microestructura es ya muy importante.

A partir de 12% de cromo, los carburos se afinan y se disponen en red apareciendo austenita en la microestructura.

Cuando se llega a 30% de cromo, se observa que la matriz es ya ferrítica y que en ella hay pequeñas cantidades del eutéctico (ferrita y carburo de cromo).

Estas fundiciones no tienen ya puntos de transformación en el calentamiento y en su estructura aparecen carburos de cromo fino incrustados en la matriz.

Las fundiciones de muy alto porcentaje de cromo pueden resistir bien a la oxidación y a la corrosión. Se consigue buena resistencia a la oxidación cuando el contenido en cromo es por lo menos igual a 10 veces el del carbono, además resistirán también a la corrosión cuando el cromo es más de 15 veces el carbono.

7.2. CLASIFICACIÓN DE LAS FUNDICIONES ALEADAS.

De una forma general, se pueden clasificar las fundiciones aleadas en dos grupos:

1. Fundiciones de baja y media aleación, que se caracterizan por tener pequeñas cantidades de Ni, Cr, Mo, y Cu, generalmente en porcentajes inferiores a 5%. En general, son fundiciones de alta resistencia a la tracción, de 25 a 50 kg/mm², muy superior a la de las fundiciones ordinarias. Suelen ser de estructura perlítica, bainítica y martensítica. También pertenecen a este grupo de fundiciones de baja aleación las fundiciones con 1 a 2% de cromo resistente al calor y las fundiciones martensíticas muy resistentes al desgaste.
2. En esta familia, se suelen agrupar las fundiciones muy resistentes al desgaste, al calor y a la corrosión y cuya microestructura suele ser austenítica o ferrítica.

7.2.1. Fundiciones de baja y media aleacion.

Estas fundiciones suelen contener cantidades de níquel, cromo, molibdeno y cobre en porcentajes generalmente inferiores al 1.5%. En estas fundiciones de gran resistencia, es frecuente que los elementos aleados estén en la proporción de una parte de cromo y dos o tres partes de níquel. El cobre y el molibdeno, en general, suelen encontrarse en cantidades relativamente pequeñas, empleándose estos elementos unas veces solos y otras con níquel o cromo, o con ambos a la vez. En ocasiones mucho menos frecuentes, estas fundiciones contienen también pequeñas cantidades de titanio y vanadio, que son añadidos

principalmente para conseguir disminuir el tamaño de las laminas de grafito o para afinar la matriz, y para mejorar también la resistencia al desgaste.

7.2.2. Fundiciones de alta resistencia a la tensión.

En este grupo se incluyen una gran variedad de fundiciones de composiciones muy diversas y resistencia a la tracción, variables de 25 a 50 kg/mm². A este grupo pertenecen ciertas fundiciones al níquel, fundiciones al cromo, al cromo-níquel, al cobre etc.

En estas fundiciones, una de las ventajas mas importantes del empleo de los elementos de aleación, es que con ellos se evita la formación de grandes laminas de grafito y se aumenta la resistencia de la matriz.

También es importante señalar que la presencia de esos elementos reducen la susceptibilidad de las fundiciones a las variaciones de sección. Es decir, se consiguen que las propiedades sean más constantes en piezas de diferentes espesores. Además, la matriz de las fundiciones aleadas tienen más resistencia y dureza que la matriz de las fundiciones ordinarias.

Como es tan grande el numero de fundiciones que pertenecen a este grupo y tan numerosas y particulares sus aplicaciones, es difícil señalar las características propias de cada composición. En algunos aspectos puede decirse que en ellas la influencia de los elementos de aleación es la misma que en la de los aceros.

7.3. FUNDICIONES MARTENSÍTICAS RESISTENTES AL DESGASTE.

Para la fabricación de piezas que deban tener gran resistencia al desgaste, o que exijan muy altas durezas o deban sufrir grandes presiones, se emplean fundiciones martensíticas al níquel y al manganeso. Las fundiciones martensíticas más utilizadas son las blancas. Sin embargo, también se fabricaban fundiciones martensíticas que son de usos mas restringidos.

Fundiciones martensíticas blancas al níquel:

Estas fundiciones suelen contener 4.5% de níquel, 2% de cromo, y bajo silicio, 0.50%, alcanzándose con ellas durezas variables de 500 a 700 BHN. En América estas fundiciones martensíticas al níquel que son fundiciones blancas son conocidas con la denominación Ni-hard.

Fundiciones martensíticas grises:

Estas fundiciones un bruto de colada estructura martensítica por simple enfriamiento en arena. Suelen conocerse a veces con la denominación de fundiciones autotemplables por la elevada dureza 400 a 450 BHN que adquieren directamente de la colada sin ningún tratamiento. No pueden ser mecanizadas con herramientas ordinarias.

7.4. FUNDICIONES RESISTENTES AL CALOR CON 1% DE CROMO.

Una de las dificultades del empleo de las fundiciones ordinarias para ciertos usos es el hinchamiento que experimentan cuando sufren calentamiento a temperaturas superiores a 4500 .Para muy elevadas temperaturas de servicio y en ocasiones en que no importa mucho el precio, se emplean fundiciones austeníticas con 15 o 20% de níquel. Pero cuando el calentamiento del material no pasa de los 700 °C y no se pueden emplear materiales caros, se pueden usar las fundiciones aleadas con pequeños porcentajes de cromo y bajo contenido en silicio, con las que se obtienen muy buenos resultados.

Se pueden usar de 0.6 a 1.25% de cromo que actúa como elemento estabilizador de carburos y contenidos bajos en silicio de 1.5 a 2% para limitar la grafitización, que es una de las causas del hinchamiento.

7.5. FUNDICIONES DE ALTA DUREZA CON 1 A 3% DE CROMO.

Empleando contenidos de cromo variables de 1 a 2% se obtienen fundiciones blancas de dureza muy elevada. Estas fundiciones se emplean bastante poco, casi exclusivamente en casos en que interesa gran resistencia al desgaste y a la abrasión, y no importa mucho la tenacidad del material. Para la fabricación de placas de blindaje, piezas de rozamiento,

zapatas de freno, guías de rodadura, son muy empleadas fundiciones blancas de 2 a 3% de cromo, con durezas variables 400 a 450 BHN.

7.6. FUNDICIONES ALEADAS AL ALTO CROMO.

Las fundiciones con alto porcentaje de cromo se pueden clasificar en dos familias:

1. Fundiciones con 6 a 25% de cromo, que son fundiciones blancas de muy elevada dureza: 400 a 550 BHN.
2. Fundiciones con 33% de cromo, que son de estructura ferrítica.

Las primeras son de gran resistencia al desgaste y buena resistencia al calor, y las segundas tienen muy buena resistencia a la oxidación a temperaturas muy elevadas.

En la tabla 8 se proporcionan la composición química de algunas fundiciones al cromo y al silicio de uso frecuente.

Tabla 8. Composiciones de algunas fundiciones al cromo y al silicio de uso frecuente.

| Fundiciones al | Carbono | Silicio | Cromo | DUREZA |
|-----------------------|----------------|----------------|--------------|---------------|
| Cr. | (%) | (%) | (%) | (%) |
| | 3.25 | 1.75 | 0.50 | 275 |
| | 3.6 | 2 | 1 | 300 |
| | 3.6 | 2 | 1.75 | 350 |
| | 3.25 | 2.70 | 2.50 | 390 |
| | 1.75 | 1.75 | 6 | 390 |
| | 1.80 | 1.75 | 16 | 450 |
| | 1.80 | 1.75 | 25 | 450 |
| | 1 | 1.75 | 30 | 265 |
| Fundiciones al | | | | |
| silicio | 2.40 | 6.5 | | 290 |
| | 0.7 | 15 | | 500 |

7.7. FUNDICIONES ALEADAS CON ALUMINIO.

Recientemente se han comenzado a fabricar y emplear ciertas fundiciones con aluminio. Sin embargo, en la actualidad todavía su empleo es muy limitado, porque su fabricación es muy difícil. La adición de cantidades de aluminio superiores al 6.5% hace desaparecer el grafito en las fundiciones y hace que aparezca la matriz formada por ferrita y carburos complejos. Esta estructura ferrítica como la de las fundiciones al silicio es inoxidable y resistente al calor.

Las dos clases más importantes son:

1. Las fundiciones con 7% de aluminio que tienen buena resistencia al calor y pueden utilizarse hasta 950 °C . Se mecanizan bastante bien. Su resistencia a la tracción es de unos 18 kg/mm² y su dureza de 300 BHN.
2. Las fundiciones con más de 8% de aluminio que tienen muy buena resistencia a la oxidación y pueden ser utilizadas a más altas temperaturas, hasta unos 1000 °C. Son difíciles de mecanizar salvo con ruedas abrasivas. Su resistencia a la tracción es de unos 13 kg/mm² y su dureza suele variar de 250 a 500 BHN.

BIBLIOGRAFÍA

- 1.- <http://www.turkdokum.com/turkishfoundryindustry.htm>
- 2.- <http://webs.advance.com.ar/eupages/estmun.htm>
- 3.- *Ciencia e ingeniería de los materiales*
Donald R. Askeland
Ed. Internacional Thomson. México. 3ª edición
- 4.- *Tecnología de los metales*
A. Malishev, G. Nikolaiev y Y. Shuvalov.
Ed. Mir. Moscú. 1988.
- 5.- *Ciencia de materiales para Ingeniería.*
Carl A. Keyser
Ed. Limusa. México. 1992.
- 7.- <http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2001/adi/cast.iron.html>
- 8.- http://en.wikipedia.org/wiki/Cast_iron
- 9.- *Hojuelas de grafito en hierro fundido gris: análisis fractal y estadístico*
Fabiola Sánchez, Moisés Hinojosa y Virgilio González.
- 10.- *Introducción a la Metalurgia Física*
Sydney H. Avner
Mc. Graw Hill. México. 1984