

con las caras interiores de las alas de forma redondeada. Se designan por su altura.

- **Carriles (f, g).** Son productos de sección especial que presentan una superficie de apoyo y una parte superior destinada a la rodadura.

■ ■ ■ Tubos

Productos huecos obtenidos por laminaciones especiales u otros procedimientos.

■ ■ ■ Alambres

Productos de sección muy pequeña y generalmente circular.

■ ■ 2.6.3. Materiales férreos. Hierro

Se denomina hierro a un producto siderúrgico cuya composición no contiene más elementos, o en caso de intervenir más elementos, estos solamente tienen carácter de impurezas. El hierro, se denomina puro cuando la cantidad de impurezas es insignificante y, por tanto, todos los átomos son iguales y el grano es de la misma naturaleza.



Figura 2.40. Mineral de hierro.

Presenta un color blanco azulado, es dúctil y maleable, con una densidad de $7,87 \text{ gr/cm}^3$ y con una temperatura de fusión de 1.539°C , reblandeciéndose antes de llegar a esta temperatura, lo que permite forjarlo y moldearlo con facilidad. Es buen conductor del calor y de la electricidad, y se imanta fácilmente.

La denominación *hierro dulce* corresponde casi a hierro puro, que contiene sólo cantidades mínimas de carbono ($< 0,008\%$ de carbono). A menudo se utiliza en trabajos ornamentales. Sin embargo, rara vez se emplea en los talleres de mecanizado, por su elevado coste. El hierro dulce responde bien al forjado, se dobla con facilidad en frío o en caliente y puede someterse a soldadura.

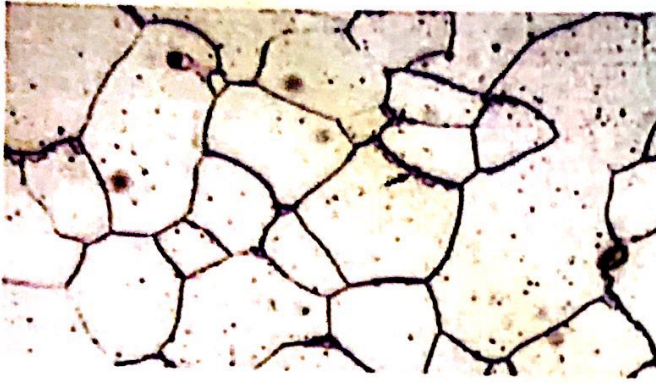


Figura 2.41. Microestructura del hierro dulce.

El hierro puro presenta varios estados alotrópicos (de estructura cristalina distinta) en la gama de temperaturas comprendidas desde la de fusión (1.539°C) hasta la temperatura ambiente. Estas formas alotrópicas, son:

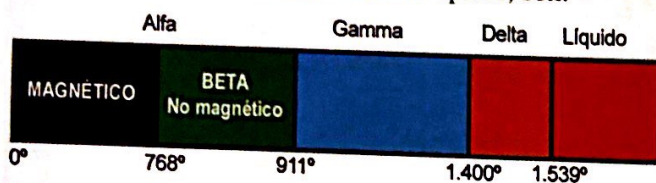


Figura 2.42. Estados alotrópicos del hierro.

- **Hierro alfa (α).** Esta forma existe por debajo de 911°C . La máxima concentración que se obtiene es la de 0,008% de carbono a la temperatura ordinaria y la de 0,025% a 723°C , que es la temperatura a la que se alcanza la mayor saturación. Es magnético hasta los 768°C y deja de serlo entre los 768° y los 911°C (hierro beta, β).
- **Hierro gamma (γ).** Corresponde al estado alotrópico comprendido entre las temperaturas de 911°C y 1.400°C . Puede disolver mayor cantidad de carbono (hasta un 2% a 1.130°C). Es más denso y dilatado que el hierro alfa, además de no ser magnético.
- **Hierro delta (δ).** Corresponde al estado alotrópico comprendido entre los 1.440°C y la temperatura de fusión 1.539°C . Disuelve como el alfa poco carbono, alcanzando la máxima solubilidad a 1.492°C (el 0,1%). Es débilmente magnético.

Las temperaturas a las que tienen lugar los cambios estructurales de los diferentes estados alotrópicos, se denominan *puntos críticos*.

Las modificaciones alotrópicas del hierro presentan diferencias en el sistema cristalino; a saber:

- Hierro alfa cúbica centrada.
- Hierro beta cúbica centrada.
- Hierro gamma cúbica de caras centradas.
- Hierro delta cúbica centrada.

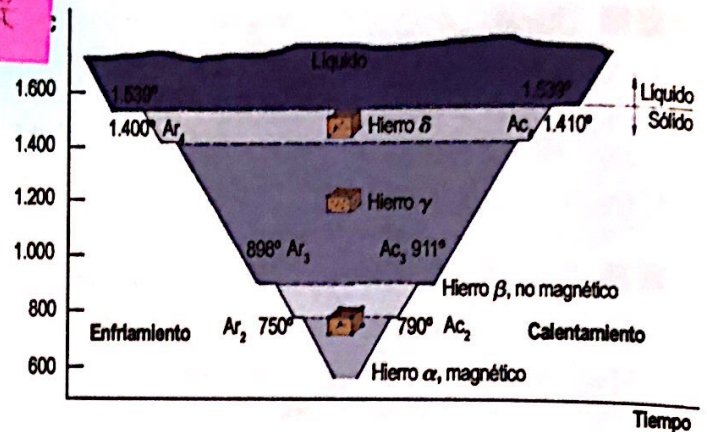


Figura 2.43. Puntos críticos de modificación de los estados alotrópicos.

2.6.4. Aleación hierro-carbono

El carbono es un metaloide¹ que suele presentarse en varias formas alotrópicas diferentes:

- **Diamante.** Es el material más duro que se conoce. Industrialmente se utiliza para fabricar herramientas de corte o rayado.
- **Grafito.** Al contrario que el diamante, el grafito es un material muy blando, untuoso y de color gris oscuro. Su estructura forma una especie de láminas que resbalan fácilmente entre sí en las fundiciones grises. En cambio en las fundiciones maleables se presenta en forma de nódulos, y en forma esferoidal en algunas fundiciones especiales.
- **Carbono amorfo.** Se denomina así al carbón simple en el que los átomos se encuentran «desordenados» (sin formar una red cristalina).

En las aleaciones del hierro y el carbono suelen entrar también pequeñas cantidades de silicio, manganeso, azufre y fósforo. En estas aleaciones, el carbono, unas veces está en forma de cementita (carburo de hierro), otras veces se encuentra disuelto en el hierro formando ferrita, austenita o martensita, y por último, se puede encontrar libre formando láminas o nódulos de grafito. Las aleaciones con alto contenido en carbono son muy duras y frágiles, por lo que no tienen ningún interés industrial. Por lo general, la dureza y la fragilidad de estas aleaciones aumentan con la cantidad de carbono, mientras que la ductilidad y la capacidad de deformación plástica disminuyen.

Principales constituyentes de las aleaciones hierro-carbono

Una vez solidificadas, las aleaciones dan lugar a la formación de constituyentes estructurales no homogéneos.

¹ Los elementos metaloides son aquellos que presentan las características externas de un metal, pero pueden comportarse indistintamente como metal o como elemento no metálico.

porque en las mismas existen granos de distinta composición (en los metales puros todos los granos son de igual composición). A temperatura ambiente y en estado normal (sin haber sufrido tratamiento térmico alguno), los constituyentes fundamentales de las aleaciones hierro-carbono son: la ferrita, la cementita y la perlita.

- **Ferrita.** Es uno de los principales constituyentes de los hierros y de los aceros, y debido a su bajo límite de solubilidad a temperatura ambiente (0,008% de C), se puede considerar como hierro alfa puro. La ferrita es blanda, poco resistente, dúctil y magnética, perdiendo esta última propiedad a temperaturas superiores a 768 °C.



Figura 2.44. Microestructura de un acero al carbono A285 (0,18 C, 0,43 Mn, 0,009 P, 0,026 S). Ferrita (gris claro) y perlita (gris oscuro).

- **Cementita.** Es la denominación usual del carburo de hierro (Fe_3C). Forma el constituyente más duro y frágil de los aceros al carbono. Presenta una composición del 6,67% de carbono y 93,3% en hierro. Es magnética a temperatura ambiente, perdiendo esta propiedad en torno a los 210°.

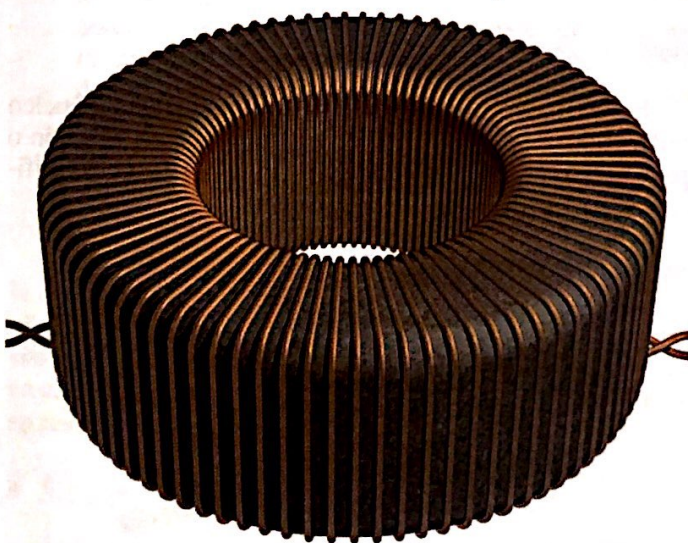


Figura 2.45. Transformador de ferrita.

- **Perlita.** Es un constituyente eutectoide formado por 86,5% de ferrita y 13,5% de cementita. Tiene un 0,89% de carbono y se presenta, generalmente, bajo forma laminar, alternando placas de cementita y ferrita. Es más dura y resistente que la ferrita, pero más blanda y maleable que la cementita.

■ ■ ■ Otros constituyentes

- **Austenita.** Es una solución sólida de carbono en hierro gamma. Puede contener desde 0 a 1,7% de carbono. Solo es estable a elevadas temperaturas (cuando el hierro α se transforma en hierro γ). La propiedad más importante es su gran plasticidad, por lo que se trabaja fácilmente (forja, estampación, etc.).
- **Martensita.** Es el constituyente habitual de los aceros templados. Se obtiene mediante una transformación demasiado rápida de la austenita en hierro α , debido a un enfriamiento brusco, lo que origina la aparición de una estructura un tanto desordenada. Es un constituyente que presenta una gran dureza y resistencia, aunque es poco dúctil y maleable.
- **Ledeburita.** Es una aleación con un 35,5% de Fe y un 64,5% de Fe_3C . Es la que tiene el punto de fusión más bajo. Su principal característica, es su gran fluidez. Sus propiedades mecánicas no son interesantes. Dado su alto contenido en carbono (4,3%) no es un componente de los aceros sino de las fundiciones.

Además existen otros constituyentes como la troostita, sorbita, bainita, etc.

■ ■ ■ Diagrama hierro-carbono

Como se ha visto anteriormente, el carbono se encuentra en los productos siderúrgicos en varias formas distintas: en disolución con el hierro gamma formando *austenita*, en menor proporción con hierro alfa formando *ferrita*, combinado con el hierro delta formando *cementita*, y en estado libre formando *grafito*.

El diagrama hierro-carbono representa el diagrama de fases para el acero y la fundición, en el cual se indican los constituyentes que existen a cualquier temperatura y para cualquier contenido en carbono cuando la aleación se enfría y calienta con la suficiente lentitud para que aquellos permanezcan en estado de equilibrio.

A continuación se muestra un diagrama Fe-C (simplificado), sobre el que podemos realizar ciertas consideraciones: