Aleaciones Fe-C

Diagrama hierro-carbono

El diagrama $Fe - C$ es considerado el diagrama de aleaciones más importante por su amplio uso en distintas y variadas industrias. El acero es considerado el segundo material de ingeniería más importante en la actualidad. Es por ello por lo que este diagrama recibe otros nombres como diagrama de los aceros, diagrama hierro carbono o diagrama hierro carburo de hierro. La mayor parte de los aceros y hierros colados utilizados en la industria automotriz, construcción, puentes y engranajes se basan en este diagrama.

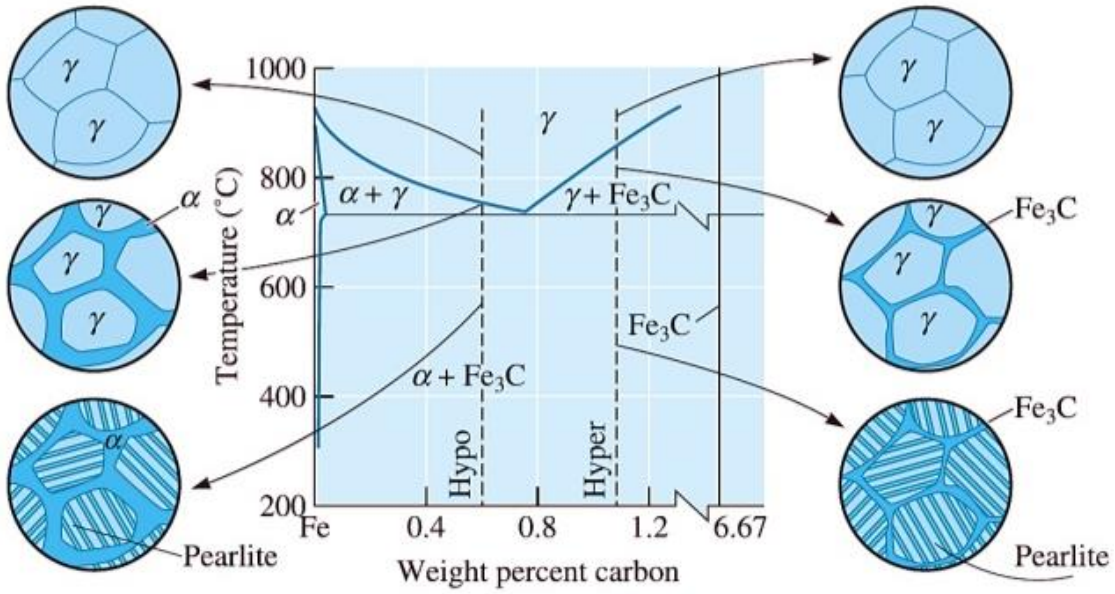

Figura 1. Diagrama metaestable hierro carbono.

Las fases que el diagrama presenta tienen una estrecha relación con las fases en las que se presenta el hierro puro. Así las aleaciones resultantes compartirán rasgos con la fase de hierro puro correspondiente a la temperatura dada.

Las fases de hierro puro son:

- **Hierro Alfa.** Se encuentra en un rango de temperaturas inferiores a 910° C. su estructura cristalina es cubica centrada en el cuerpo con una distancia entre átomos de 2.86 A°.

- **Hierro Gamma.** Se presenta en un intervalo de temperaturas entre 910°C y 1130°C. En esta fase, el hierro cambia su acomodo cristalino adoptando ahora una celda cubica centrada en las caras.

- **Hierro Delta.** Presente dentro del intervalo entre 1130°C y la temperatura de fusión del hierro (1539°C). esta fase presenta un acomodo ortorrómbico centrado en el cuerpo.

El límite de solubilidad de carbono en aleación con el hierro está definido por la fase de hierro en la cual se realiza la aleación. La mayor solubilidad se presenta en la fase gama, llegando a una solubilidad máxima de 2.11 % de carbono en peso y a una temperatura de 1148°C.
Las fases presentes en el diagrama Fe-C son las que se enlistan a continuación. Como se puede observar en la Figura 1, conllevan un cambio en la microestructura.

- **Ferrita.** Obtenida al agregar carbono en hierro alfa. Se trata de una aleación del tipo intersticial. Conserva el carácter BCC de hierro alfa y tiene una solubilidad máxima de carbono de 0.025% C en peso a una temperatura de 723°C. este bajo punto de solubilidad hace que esta fase sea considerada como hierro puro. Aparece con una microestructura de granos monofásicos, con límites de grano irregulares. Se trata de la fase más blanda y dúctil de los aceros.
  - Al ser observada al microscopio. Esta fase presenta límites de grano más irregulares que la austenita. Debido a que su origen es la solidificación de material.
- Se tiene:
  - Cristales mezclados con cristales de perlita (0.55%C) que forman una red que limita los granos de perlita (0.55% - 0.85% C)
  - Agujas en dirección de los planos cristalográficos de la austenita.

- **Austenita**. Solución solida por inserción sobre hierro gamma. Presenta un acomodo del tipo cubico centrado en las caras. Con esta fase se logra la mayor

solubilidad de carbono en hierro. Se trata del constituyente más denso de entre los aceros. La estructura austenítica puede ser obtenida en los aceros enfriando súbitamente, Sin embargo, esta fase no es estable a temperatura ambiente.

- **Cementita** (Fe_3C: Carburo de hierro) tiene una temperatura de fusión de aproximadamente 1250°C. Se trata de un compuesto termodinámicamente inestable.

  La presencia de algunos constituyentes en la estructura de los aceros es consecuencia de llevar a cabo la manufactura de los aceros bajo condiciones no cuasi estáticas. Entre estos constituyentes se encuentran:

- **Perlita:** Compuesta por 86.5% de ferrita y 11.5% de austenita, formada por láminas o placas alternadas de estas dos fases.

- **Martensita:** Formada de la transformación de fase gama a acero alfa, Cuando las condiciones no permiten que el carbono se difunda correctamente. Originando una solución solida sobresaturada de carbono en un acomodo tetragonal centrado en el cuerpo.

La martensita es un constituyente muy duro de los aceros. Tiene una apariencia bajo el microscopio de agujas.

Algunos puntos importantes en el diagrama son:

- **Punto Eutéctico** (1147°C, 4.3% C). En este punto, se obtiene una transformación de la fase liquida a una mezcla entre austenita $+ Fe_2C$.
- **Punto Eutectoide** (727°C, 0.76% C). En este punto se obtiene una transformación desde un estado formado únicamente por austenita hasta uno conformado por la combinación de acero en fase ferrita + Cementita.
- **Punto peritéctico** (1493°C, 0.17% C). en el cual se puede pasar de una fase consistente en la mezcla de acero δ y líquido, para formar austenita.

Diagramas TTT

Es necesario recordar que una de las condiciones bajo las cuales se obtiene el diagrama de fase implican que el proceso de enfriamiento sea llevado a cabo a unas pequeñas velocidades. Cumplir esta condición resultaría poco viable en la práctica industrial. Fue esta razón la que impulsó el estudio de procesos considerando como variable el tiempo en la cual es llevada a cabo la transformación.

Con el fin de estudiar transformaciones cinéticas de nucleación y crecimiento, los diagramas de transformación-tiempo-temperatura o diagramas de transformación isotérmica son utilizados (Figura 2). Especialmente para el estudio de tratamientos térmicos.

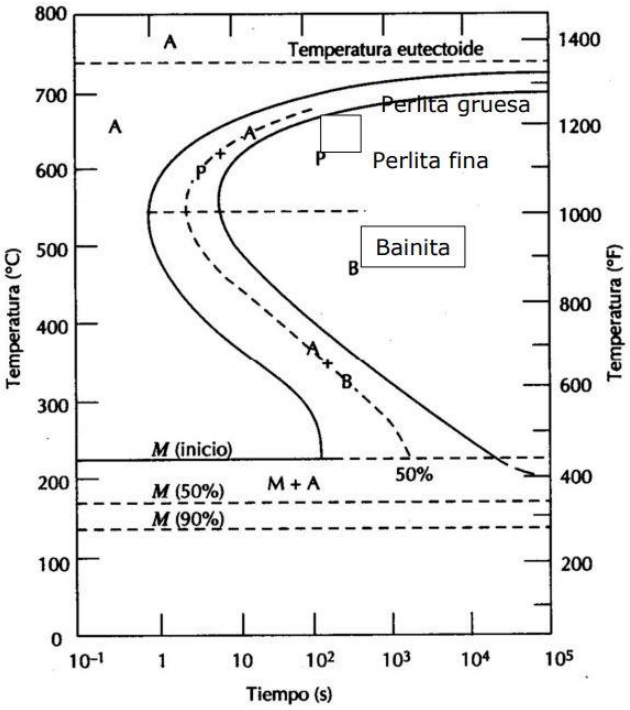

Figura 2. Diagrama TTT para aceros con composición eutectoide [UPV].

Por encima de la temperatura eutectoide la austenita es estable. Partiendo desde este punto y al cruzar este límite podemos observar que del lado izquierdo de la gráfica encontraremos un área en el diagrama correspondiente a austenita inestable. A continuación, la banda delgada que atraviesa de manera de abajo a arriba la mayor parte del diagrama corresponde a la transformación.

Del lado derecho se encuentra el área correspondiente a ferrita más carburo. El punto dentro de la zona de la transformación, más cercano al eje izquierdo suele ser llamado nariz del diagrama.

La línea recta horizontal $M_{(inicio)}$ representa el inicio de la transformación de la austenita en martensita. Mientras tanto la recta horizontal $M_{(90\%)}$ representa que se ha llegado a un 90% de la transformación realizada. Estas temperaturas dependen de la cantidad de carbono presente en la aleación.

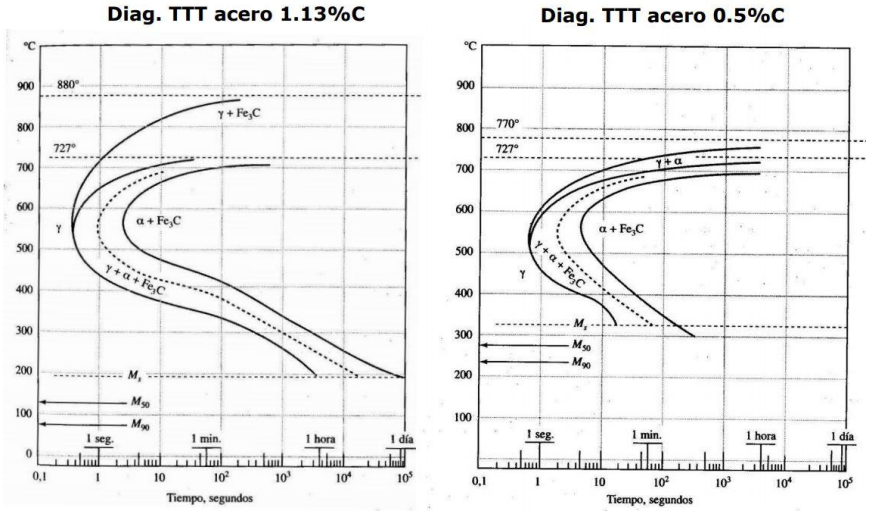

Figura 3. Diagramas TTT para aceros de dos diferentes composiciones [UPV]

La incorporación de algunos aleantes desplazan la gráfica hacia la derecha, sin alterar la estructura del diagrama. En los procesos de enfriamientos de este tipo de aleaciones es posible realizar el enfriamiento sin tocar en ningún momento la zona de transformación.

Transformación Austenita - Perlita

Si una aleación de composición eutectoide es enfriada por debajo de la temperatura eutectoide, entonces se puede formar Perlita. La transformación comienza en el límite de grano austenítico y continua hacia el interior del grano dejando partículas lamelares a su paso. Los límites de grano en forma de esquina, seguidos de bordes

de grano, límites de grano e inclusiones son los lugares donde se favorece a transformación.

La región en la cual se encuentra la perlita está comprendida entre la temperatura Eutectoide (727°C) y la que corresponde a la nariz del diagrama TTT (550°C). En las zonas cercana a la temperatura eutectoide, el subenfriamiento del material es pequeño, por lo cual se requieren de mayores tiempos para la formación de núcleos estables de Ferrita y Cementita. Sin embargo, una vez que el compuesto comienza a crecer, las altas temperaturas favorecen la difusión por lo cual se forma la denominada ferrita gruesa.

Mientras menor es la temperatura de transformación, se favorece la nucleación de las componentes de la perlita, sin embargo, el fenómeno de difusión se ve entorpecido. Esta combinación de factores hace que las láminas características de la perlita tengan un menor grosor. Aun cuando en estas condiciones la velocidad de crecimiento se ve disminuida, el aumento de en la velocidad de nucleación hace que el tiempo de transformación total sea menor.

Transformación Austenita - Bainita

La fase compuesta denominada Bainita se encuentra entre la temperatura de la nariz del diagrama TTT (550°C) y hasta 400°C aproximadamente, en la cual se presenta la fase Martensita. Continuando con el comportamiento presentado por la perlita, La velocidad de nucleación aumenta, La velocidad de nucleación y difusión disminuyen haciendo que nuevamente la zona de transformación se mueva hacia la izquierda del diagrama.

La apariencia de la estructura de la bainita es la de agujas delgadas de Ferrita rodeadas de una matriz de ferrita. Conforme la temperatura decrece, también lo hace el tamaño y espesor de las placas de carburo.

Transformación Austenita - Martensita

martensita es un compuesto presente en el rango de temperatura (215°C, -20°C). esta transformación es diferente en varios aspectos con las vistas anteriormente. Para llevar a cabo esta transformación es necesario enfriar rápidamente el acero desde la zona austenítica, hasta una una temperatura inferior a 150°C.

En contraste con la transformación de nucleación y crecimiento de la perlita y la bainita, en la transformación martensítica la distancia que recorren los átomos respecto a su posición original es menor a una distancia atómica. Es por esto por lo que los cambios son debidos únicamente a un reacomodo en la estructura cristalina y no en la composición de fases. Esta transformación es la que se lleva a cabo en los procesos de endurecido por temple.

Templabilidad

Se define como la capacidad que tiene un acero para endurecerse a profundidad por medio de temple. También es definido como la capacidad para transformar a Martensita sin la formación de perlita aun cuando se presenta enfriamiento “lento”.

El criterio bajo el cual se logra la obtención de martensita es la velocidad de enfriamiento. Solo en aquellas regiones de la pieza en las cuales se logre sobrepasar la velocidad critica de enfriamiento, se dará satisfactoriamente.
No obstante, dada su composición, en algunos aceros no aleados la velocidad es tan alta que solo se obtiene martensita en una capa relativamente delgada.

Otro factor importante en la templabilidad es la relación Volumen / área superficial de la pieza. Ya que el calor disipado por la masa de la pieza es transferido por al medio principalmente por sus paredes.
Los factores que afectan la templabilidad de un acero son:

- Composición Química
- Severidad del enfriamiento.
- Tamaño de la pieza

- Tamaño de grano austenítico.

Con la finalidad clasificar y calificar los procesos temple, es usado una clasificación en función de las condiciones bajo las cuales se lleva a cabo el temple. Esta escala asigna un valor numérico a la “Severidad del temple” en función de las condiciones bajo las cuales es llevado a cabo (Tabla 2).

Ensayo Jominy

Es un ensayo que permite tener una medida de comparación normalizada (ASTM A255-48T). La prueba consiste en enfriar una probeta de 2in de diámetro y 4in de largo inicialmente austenítica. La pieza es enfriada mediante el impacto directo de un chorro de agua, cuyas condiciones son reguladas por la norma, en uno de los extremos de la pieza. Así, cada sección de la probeta presentara distintas velocidades de enfriamiento lo cual causa que la dureza de la superficie sea distinta en cada una de las secciones (Figura 4)

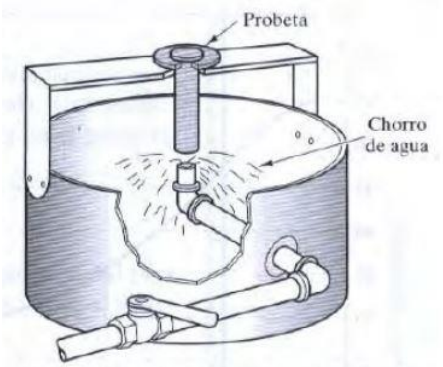

Figura 4. Esquema del ensayo Jominy de templabilidad

A continuación, la dureza de la pieza es medida sobre alguno de los bordes, realizando mediciones que se van espaciando conforme la distancia desde la primera aumenta. Estos resultados de dureza pueden ser relacionados con la velocidad de enfriamiento, la cual ya ha sido determinada y definida como se muestra en la tabla.

Tabla 1. Datos de relación típicos para un ensayo normalizado Jominy

Distancia Jominy	Velocidad de enfriamiento
$\left[\frac{1}{16}\ in\right]$	$\left[\frac{°C}{s}\right]$
1	315
2	110
3	50
4	36
5	28
6	22
3	17
8	15
10	10
12	8
16	5
20	3
24	2.8
28	2.5
36	2.2

Un acero aleado, con buena templabilidad, muestra una curva que asemeja una recta, mientras que, para un acero con templabilidad limitada, la curva caerá drásticamente

Tabla 2. Escala cualitativa de severidad de temple

Severidad del temple	Condiciones del temple
0.2	Temple pobre en aceite-sin agitación
0.35	Buen temple en aceite-agitación moderada.
0.5	Muy buen temple en aceite-buena agitación.
0.7	Fuerte temple en aceite-agitación violenta.
1.0	Pobre en temple en agua-sin agitación.
1.5	Muy buen temple en agua-agitación fuerte.
2.0	Temple en salmuera-sin agitación.
5.0	Temple en salmuera-agitación violenta.
∞	Temple ideal.

La influencia del tamaño de grano austenítico (TG) se observa como:

- TG pequeño brinda más lugares para la nucleación de perlita.
- TG grande propicia la aparición de grietas y/o fisuras debido al choque térmico.

Resumen

La aleación más importante y estudiada es la aleación hierro carbono. Como base de la obtención del acero, el diagrama hierro carbono es el más estudiado. Se conoce de forma muy cercana cada una de las fases presentes en el diagrama. Este diagrama describe transformaciones hechas bajo condiciones muy específicas. Para aplicaciones prácticas, como los tratamientos térmicos es necesario tomar en cuenta cambios de temperatura fuera de las condiciones ideales.

Referencias

- Torres, E.. (2004). Apuntes acerca del tratamiento térmico y la clasificación general de los aceros. Junio 01, 2019, de universidad de matanzas sitio web: http://monografias.umcc.cu/monos/2004/quimec/um04qm02.pdf
- Shackelford J.. (2005). Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros. Madrid: pearson prentis hall.
- (2004). Aceros: aleaciones hierro-carbono. Junio 10, 2019, de universidad autonoma de madrid sitio web: https://www.uam.es/docencia/labvfmat/labvfmat/practicas/practica4/fases%20del%20acero.htm#perlita
- Castillo, F.. (2015). Tecnología de materiales. Mayo 30, 2019, de universidad nacional autónoma de méxico sitio web: http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m8/apuntes_tecnologia_materiales.pdf