

**ASIGNATURA: CIENCIA DE LOS MATERIALES**

**AÑO: 3ero CURSO DIURNO INGENIERÍA MECÁNICA.**

**PLAN DE ESTUDIO: E**  
**CONTENIDOS BÁSICOS**



---

**TEMA II: Materiales empleados en la industria metal - mecánica moderna.**

---

**TEMÁTICA 2. 1. Diagrama Fe - C. Aceros y fundiciones. Clasificación de los hierros fundidos. Clasificación general de los aceros.**

**OBJETIVOS:**

1. Describir las estructuras que componen el diagrama Fe – C y el enfriamiento de la aleación con diferentes concentraciones, utilizando las reacciones peritética, eutéctica y eutectoide como fuerzas motrices de los cambios estructurales.
2. Clasificar las aleaciones del diagrama Fe-C.
3. Describir los tipos de fundiciones o hierros fundidos que se utilizan en la práctica, relacionándolas con la estructura del diagrama estable Fe – C.

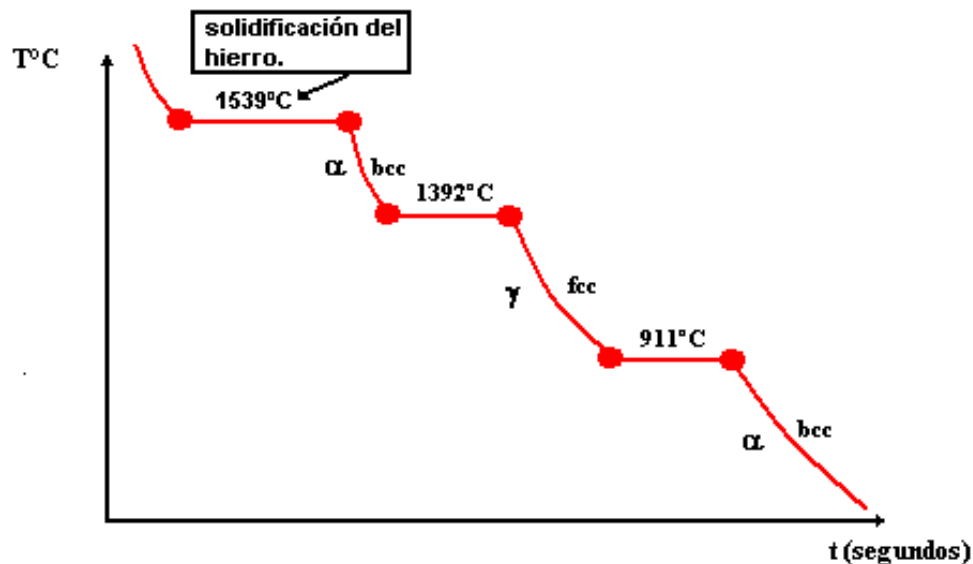
## DESARROLLO

- Caracterización del Fe y el C.

### Características del Hierro.

- Metal de color gris plateado.
- Temperatura de fusión 1539°C.
- Dureza  $\approx 80$  HB y elongación relativa = 50%.
- Presenta dos formas alotrópicas  $\alpha$  y  $\gamma$ .

Curva de enfriamiento del hierro.



Que el hierro exista en dos formas alotrópicas o redes cristalinas amplía las posibilidades de transformaciones de fases, lo que es lo aprovechado por el tratamiento térmico de las aleaciones de hierro con otros componentes y fundamentalmente con el carbono.

El hierro en unión del carbono tendrá la posibilidad de formar con este último soluciones sólidas en base a los hierros alfa (ferrita) y al hierro gamma (austenita) o también podrá formar compuestos químicos como la cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ).

## Caracterización del carbono (C).

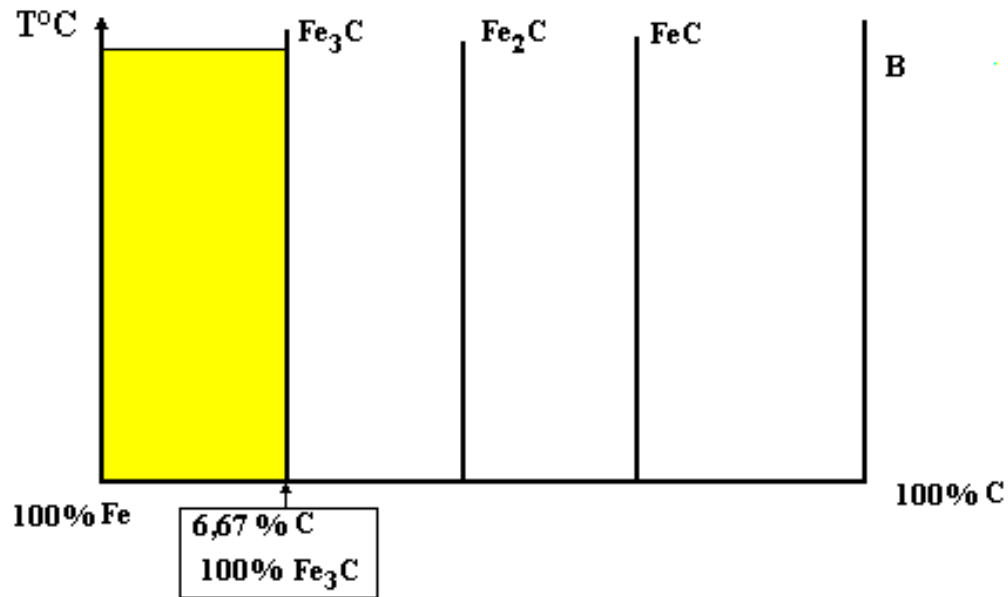
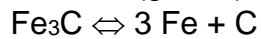
- Es el otro componente en la aleación Hierro Carbono.
- Es un elemento no metálico.
- En estado libre se denomina grafito.

Es muy interesante el hecho de que el carbono en su forma natural (grafito) puede servir para la fabricación de lápices y al combinarse con el hierro puede formar compuestos químicos de características totalmente diferentes como la cementita.

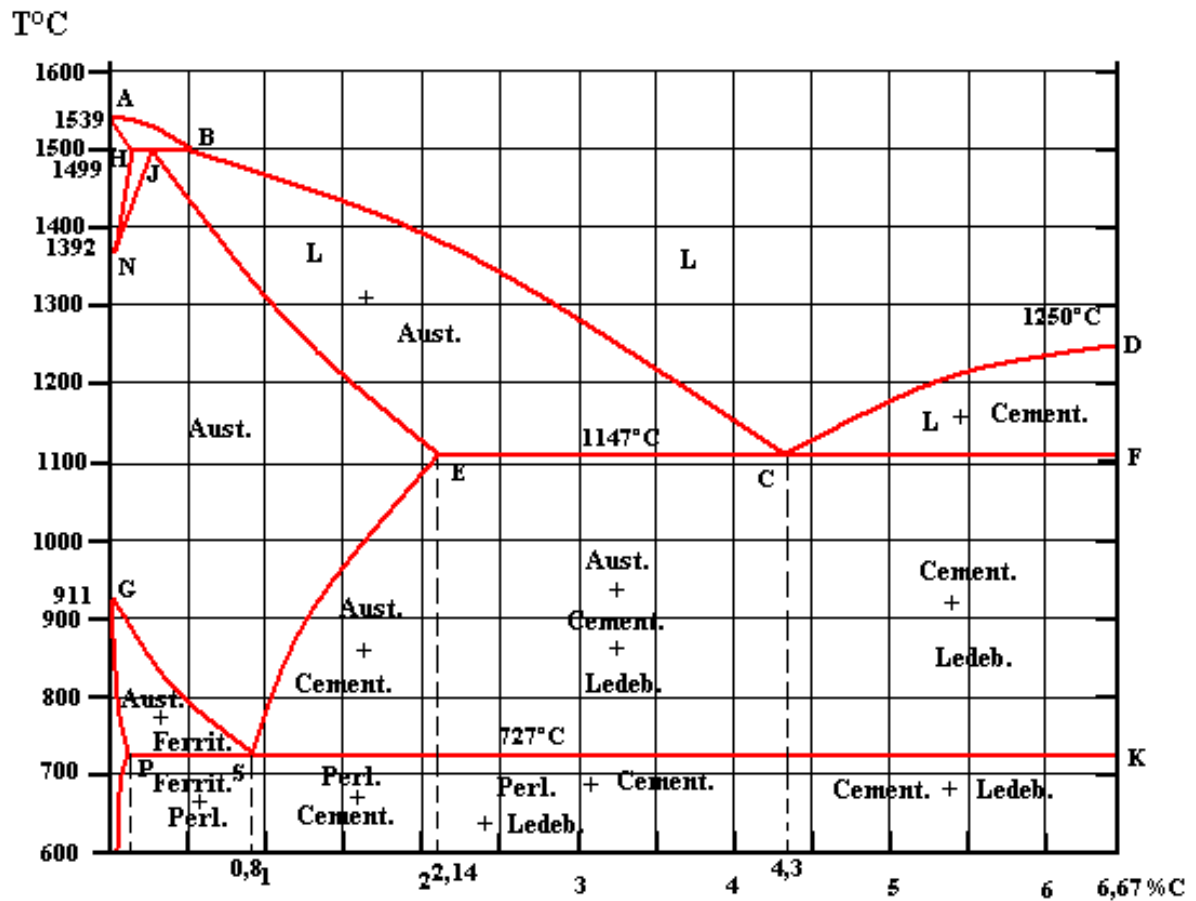
El diagrama de estado hierro carbono visto de manera general, debe extenderse desde el hierro hasta el 100% de carbono, pero como en la práctica solo empleamos aleaciones metálicas cuyo contenido de carbono no sobrepasa el 5%, solo se estudiará la parte del diagrama que va desde el hierro hasta la cementita la cual se forma a 6,67% de carbono. Por tanto los componentes del diagrama que se estudiará será el Hierro – Cementita.

### Caracterización de la cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ).

- Es un compuesto químico denominado carburo de hierro.
- Su temperatura de fusión es de aproximadamente  $1250^\circ\text{C}$ .
- Su dureza es de 800 HB y su elongación cercana al 0%.
- Con otros elementos forma soluciones sólidas denominadas cementitas aleadas.
- Es inestable termodinámicamente y se descompone en determinadas condiciones para dar carbono libre (grafito).



- Diagramas de estado Fe – C. Diagrama metaestable.



La línea ABCD es la línea del líquido y la AHJECF la del sólido.

Como el hierro además de formar con el carbono el compuesto químico  $\text{Fe}_3\text{C}$ , tiene dos transformaciones alotrópicas  $\alpha$  y  $\gamma$ , en el sistema existen las fases siguientes:

**Líquido:** Solución líquida de carbono en hierro. Existe por encima de la línea del líquido y se designa por L.

**Cementita:**  $\text{Fe}_3\text{C}$ , existe en la vertical DFKL se designa por su fórmula química o por C.

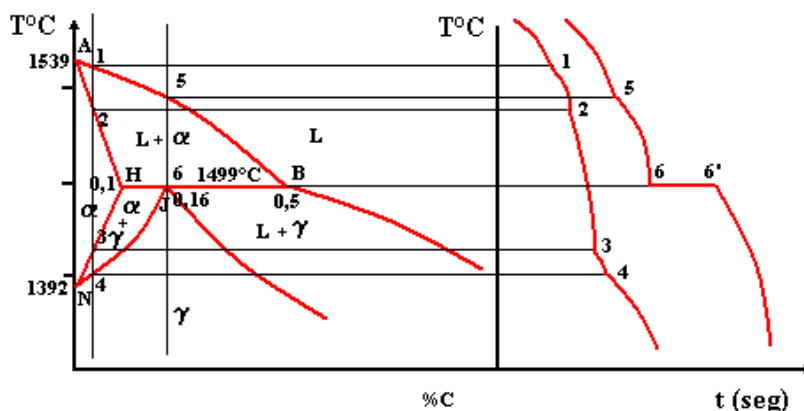
**Ferrita:** Constituyente estructural que es hierro  $\alpha$ , el cual disuelve el carbono en cantidades insignificantes. Se representa por  $\text{Fe}_\alpha$ , F ó  $\alpha$ . La región de la ferrita en el diagrama hierro carbono se encuentra a la izquierda de las líneas GPQ, y AHN.

**Austenita:** Estructura consistente en una solución sólida de carbono en hierro  $\gamma$ . La región de la austenita es NJESG. Se designa por A,  $\gamma$  ó  $\text{Fe}_\gamma$ .

Se estudiará el diagrama analizando fundamentalmente las tres reacciones principales que se representan en líneas horizontales, comenzando el análisis desde las temperaturas más altas hacia las inferiores.

⇒ Puede dibujarse con tizas de colores en la pizarra o usando retrotransparencias.

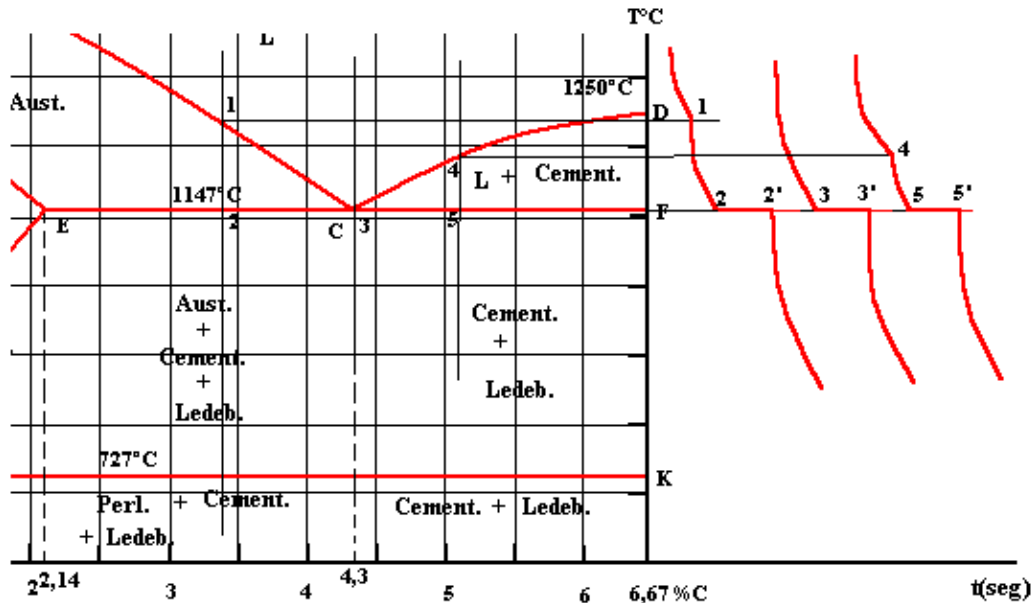
- Reacción Peritética  $\text{L} + \alpha \rightarrow \gamma$  ocurre a  $1499^\circ\text{C}$ .



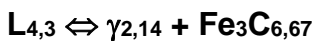
Como resultado de esta reacción se formará austenita. Ocurre para aleaciones entre  $0,1$  y  $0,5\%$  de Carbono.

⇒ Analizar las curvas de enfriamiento I y II.

⇒ Reacción eutéctica.  $L \rightarrow \gamma + \text{Fe}_3\text{C}$  (a 1147°C).



Como resultado de la reacción se formará la mezcla eutéctica. La mezcla eutéctica de  $\gamma$  y  $\text{Fe}_3\text{C}$  se llama ledeburita.

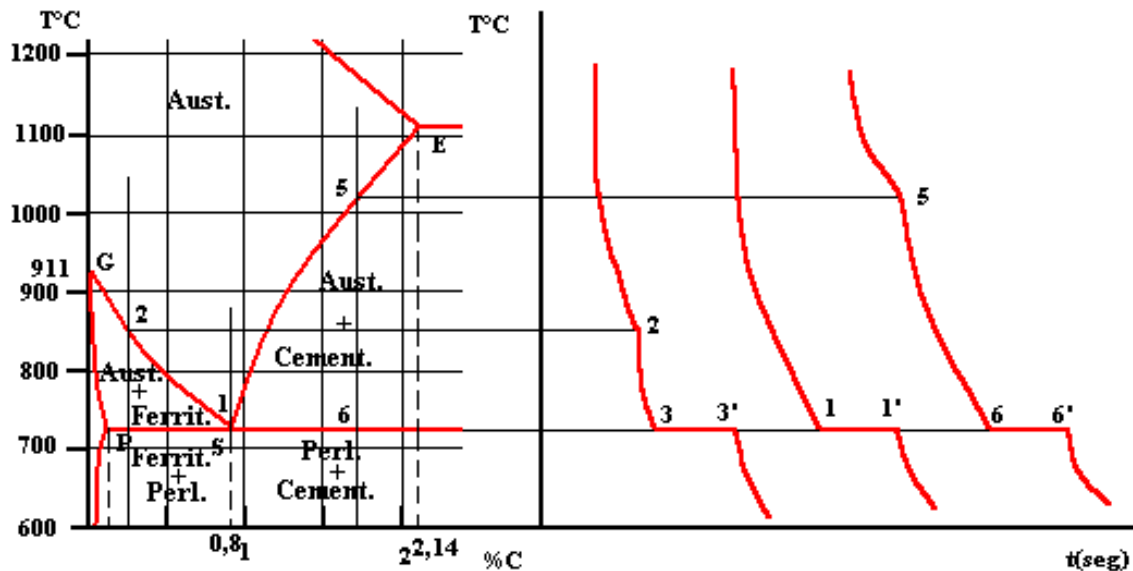


Ocurre esta reacción para todas las aleaciones con más de 2,14%C. En esta zona se observa además la línea de pérdida de solubilidad de la austenita.

A la cementita segregada de la austenita se le llama secundaria, siendo denominada la que solidifica desde el líquido cementita primaria (ambas estructuras son idénticas).

⇒ Analizar las curvas de enfriamiento I, II y III.

⇒ Reacción eutéctode.  $\gamma \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$  (a 1147°C).



El producto de la transformación es una mezcla eutéctode. La mezcla de  $\alpha$  y  $\text{Fe}_3\text{C}$  se llama perlita. Ocurre para aleaciones de más de 0,02%.

⇒ Explicar la pérdida de solubilidad de la ferrita, que conlleva a la segregación de la cementita terciaria.

- **Clasificación de los aceros al carbono de acuerdo a la microestructura.**

En el diagrama metaestable se destacan dos tipos de aleaciones técnicas de gran importancia que son los aceros y las fundiciones.

Los aceros al carbono se presentan con un contenido de hasta 2,14%C y las fundiciones desde este valor hasta 6,67%C, aunque en la práctica hasta 5%. Los aceros además de tener el Fe y el C poseen impurezas como Si, Mn, P y S, acerca de las cuáles puede estudiarse en el Metalografía de A.P. Guliáev; sobre todo su influencia en la estructura y propiedades de los aceros.



La introducción del carbono en el Fe modifica las propiedades de este de forma muy significativa y es necesario conocer que ocurre en los aceros al aumentar el % de C. La primera clasificación de los aceros la realizaremos de acuerdo a su estructura de equilibrio.

**Hipoeutectoides:** Menos de 0,8%C (estructura de ferrita y perlita).

**Eutectoides:** 0,8%C (Estructura de perlita).

**Hipereutectoides:** Mas de 0,8%C y menos de 2,14%C (estructura de cementita y perlita).

Producto de la variación de la estructura y de la composición de fases, a medida que aumenta el contenido de carbono ocurre mayor deformación en las redes cristalinas, en las soluciones sólidas y la aparición de cementita muy dura y frágil en mayor cantidad. Además esta se coloca en el borde del grano lo que tiende a fragilizar la estructura del acero de un 0,9 a 1,2%, lo que hace que la resistencia que iba en aumento hasta el momento disminuya mientras que la dureza siempre va a aumentar, disminuyen la resiliencia y el alargamiento relativo.

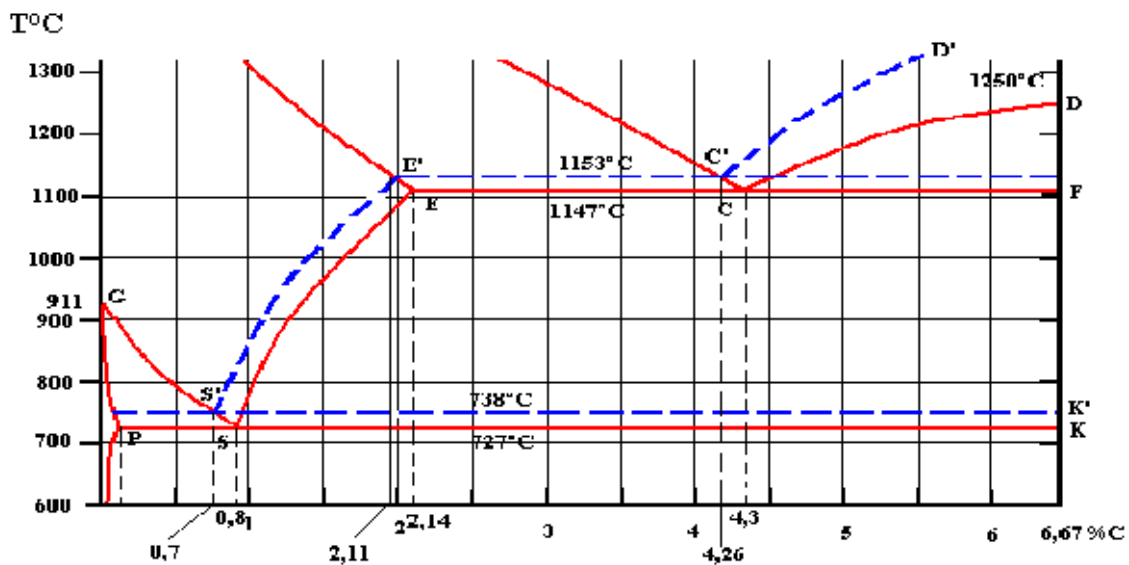
Es importante también la influencia del carbono en la tenacidad de los aceros. El aumento del contenido de carbono eleva el umbral de fragilidad en frío y hace que disminuya la resiliencia en la región de tenacidad (es decir a temperaturas superiores al umbral de fragilidad en frío).



- **Diagrama de estado Fe – Grafito.**

El diagrama de estado Fe – C caracteriza los procesos de cristalización de las aleaciones hierro – carbono cuyo resultado es el desprendimiento de del carbono en estado libre en forma de grafito. En este sistema las fases sólidas son la austenita, ferrita y el grafito. Las características de la austenita, ferrita, y el grafito. Las características de la austenita y de la ferrita fueron descritas al analizar el sistema Fe – Fe<sub>3</sub>C. Por consiguiente, la particularidad del sistema analizado es la formación de grafito.

La estructura metalográfica del grafito tiende a ser laminar. Su resistencia mecánica y plasticidad son sumamente bajas. A continuación se muestra el diagrama Fe – Grafito.



En el diagrama con líneas de trazos discontinuos se representa el diagrama Fe – Grafito. Como se ve las líneas horizontales E'C'F' y P'S'K' de este diagrama se encuentran ligeramente por encima y las curvas inclinadas C'D' y S'E' algo a la izquierda en comparación con las líneas correspondientes del diagrama hierro cementita.

Después del enfriamiento completo, la estructura estará compuesta de ferrita y grafito: eutéctico, secundario y eutectoide. Esta es la llamada fundición gris ferrítica gris.

Sin embargo en la mayoría de los casos es imposible distinguir en la microestructura todos los componentes estructurales enumerados. Esto se explica por el hecho de que en el proceso de cristalización primaria se forma gran cantidad de inclusiones gráficas. El grafito surgido durante la

descomposición de la austenita forma segregados independientes, sino que la deposita en forma de capas sobre las inclusiones gráficas existentes aumentando sus dimensiones.

- **Tipos de Fundiciones y Procesos de Grafitización.**

Las diferencias entre los aceros y los hierros fundidos, no solo están en el contenido de carbono, sino esencialmente en las características de cada uno de estos materiales, especialmente referidas a los procesos de deformación plástica y de fundición.

Las fundiciones presentan alta resistencia a la compresión y gran capacidad de absorber vibraciones, pero a su vez presentan poca aptitud para la deformación plástica.

A la utilización en piezas fundidas contribuyen:

- a) Buenas propiedades de fundición (fluidez, colabilidad, contracción).
- b) Bajo costo.
- c) Propiedades mecánicas y especiales comparables con los aceros en algunos tipos de fundiciones.

Clasificación de las fundiciones de acuerdo al aspecto de la fractura.

1. **Fundiciones blancas:** Presentan una fractura de color blanco mate. Todo el carbono se halla en forma de  $\text{Fe}_3\text{C}$ . Pueden ser al carbono o aleadas.
2. **Fundiciones grises:** Fractura de color gris. Hay grafito y cementita. Pueden ser al carbono y aleadas.

### **Clasificación de los hierros fundidos blancos:**

La estructura de los hierros fundidos se determina de acuerdo al diagrama metaestable. Según el % de carbono y el grado de eutecticidad (Se) se clasifican en:

- Hipoeutéticas ( $>2,14 - <4,3\% \text{ C}$ )  $\text{Se} < 1$
- Eutética =  $4,3\% \text{ C}$   $\text{Se} = 1$
- Hipereutética  $> 4,3\% \text{ C}$  y  $6,67 \text{ Se} > 1$

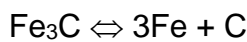
Donde el grado de eutecticidad en el sistema metaestable se determina como

**$\text{Se} = \text{C} - 2 / 2,3$**  donde C es el % de carbono de la fundición.

## Propiedades y utilización de los hierros fundidos blancos.

La fundición blanca es muy dura y frágil y de baja maquinabilidad. Su resistencia a la tracción es baja y su resistencia a la compresión es relativamente alta. Tienen elevada resistencia al desgaste. Se designan para piezas simples y resistentes al desgaste como bolas de molinos, cilindros de laminación, núcleos trituradores, etc.

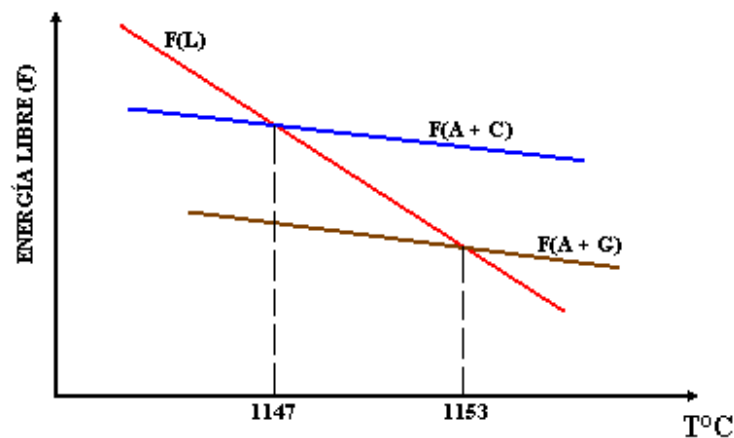
Utilizando elementos de aleación pueden lograrse otras combinaciones de estructuras y de propiedades y elevar la resistencia. La fundición blanca de bajo carbono se emplea mucho para producir, mediante recocido de grafitización o maleabilización la llamada fundición maleable, esto es posible gracias a las características de la cementita que tiende a descomponerse bajo ciertas condiciones en Fe y C para lograr su estabilidad termodinámica y estructural.



## Grafitización.

⇒ ¿Bajo qué condiciones tendrá lugar la grafitización?

El carbono se desprende en forma de grafito solo en un enfriamiento muy lento (condiciones cinéticas) pues es necesaria una gran difusión atómica para la formación del grafito (100% de C) a partir de otros constituyentes como pueden ser la cementita que tiene 6,67% o la austenita, cuyo máximo contenido es 2,14% C. Ahora bien, de acuerdo a lo estudiado en clase, cuando se den las condiciones cinéticas se favorecerá la grafitización ya que las características termodinámicas así lo determinarán.



Para lograr la grafitización se emplean inoculantes como el grafito en polvo, ferrosilicio y otros que sirven como centros de cristalización.

Ahora bien, puede favorecerse la grafitización mediante el empleo de elementos de aleación llamados grafitizantes como el silicio que tiende a disolver los carburos y en este caso la cementita descomponiéndola en Fe y C.

La fundición presenta grafito ya sabemos que se llama fundición gris. El contenido en la fundición gris de silicio debe superar el 2% para que se favorezca la formación de grafito.

El grafito en las fundiciones provoca:

- Buena maquinabilidad (viruta frágil).
- Buenas propiedades antifricción (lubricantes).
- Capacidad de absorber vibraciones.
- Baja sensibilidad a los defectos superficiales.
- Mala conductividad térmica.

Las fundiciones se clasifican según la estructura de su base o matriz metálica y de acuerdo a la forma del grafito. Por la estructura de la base o matriz metálica se dividen en:

- ❖ **Perlíticas (P + G):** El 0,8% C aparece en forma de  $\text{Fe}_3\text{C}$  pero el resto es grafito. Presenta dureza de  $\approx 200$  a 250 HB. Son las más duras y resistentes al desgaste.
- ❖ **Ferrito Perlíticas ( $\alpha + \text{P} + \text{G}$ ):** El % de carbono combinado es de  $< 0,8\%$ . Presenta dureza de  $\approx 180$  a 200 HB.
- ❖ **Ferrítica ( $\alpha + \text{G}$ ):** El % de carbono combinado es menor que  $< 0,01\%$ . Presenta dureza de  $\approx 120$  a 150 HB. Son las menos duras y resistentes al desgaste.



**MATRIZ PERLÍTICA**



**MATRIZ FERRITO  
PERLÍTICA**



**MATRIZ FERRÍTICA**

La resistencia a la compresión y la dureza dependen de la base metálica, por eso difieren poco de las propiedades correspondientes del acero.

De acuerdo a las formas del grafito. La fundición puede clasificarse en:

- ❖ Ordinaria (grafito laminar). Baja resistencia.  $\sigma_b = 120 \text{ Mpa}$ ,  $\delta = 0,30\%$ .
- ❖ Alta calidad (grafito compacto). Mediana resistencia.  $\sigma_b = 380 \text{ Mpa}$ ,  $\delta = 2 - 8 \%$ .
- ❖ Alta resistencia (grafito nodular). Alta resistencia.  $\sigma_b = 550 \text{ Mpa}$ ,  $\delta = 10 - 15\%$ .
- ❖ Maleable (grafito de roseta). Mediana resistencia.  $\sigma_b = 360 \text{ Mpa}$ ,  $\delta = 12 \%$ .



**GRAFITO LAMINAR**



**GRAFITO NODULAR  
O ESFEROIDAL**



**GRAFITO MALEABLE  
O ROSETA**

La resistencia a la rotura por tracción, flexión y torsión, dependen fundamentalmente de la cantidad, forma y tamaño de las inclusiones de grafito, en este caso las propiedades de la fundición son muy diferentes a las del acero.

Analizando la tabla se observa una diferencia considerable entre la  $\sigma$  y  $\delta$  de las distintas funciones se observa una desventaja en la FG laminar. Cuando las inclusiones de grafito tienen forma laminar, se estará en presencia de la fundición de menor  $\sigma$ . ¿Por qué es esto?

El grafito presenta muy bajas propiedades mecánicas (casi despreciables, por lo que las inclusiones de grafito pueden considerarse como huecos o grietas en el material. Si se analiza el grafito como una grieta o entalla se verá que las inclusiones rompen la continuidad de la base metálica y además su forma aguda sirve como un gran concentrador de tensiones. Recordando lo estudiado en el tema de propiedades mecánicas acerca de las roturas frágil y dúctil acerca de las características de las entallas y la concentración de tensiones.

Como es lógico a mayor cantidad, más grande y peor distribución tengan las láminas de grafito, peores serán las propiedades de la fundición.

### **Fundiciones con grafito esferoidal (Fundiciones de alta resistencia mecánica):**

Para obtener grafito en forma de inclusiones esferoidales, en la cuchara de fundición líquida se introduce magnesio metálico en los llamados evaporadores, es decir, cajas metálicas o de grafito

con orificios. Si se quiere obtener grafito esferoidal el contenido de magnesio en la fundición debe ser de 0,03 – 0,07%.

La estructura de la base metálica de las fundiciones con grafito esferoidal es la misma que la de la fundición ordinaria, o sea en dependencia de la composición química y de la velocidad de enfriamiento (del espesor de pared de la pieza fundida) pueden obtenerse fundiciones de la siguiente estructura: ferrita + grafito esferoidal, ferrita + perlita + grafito esferoidal, perlita + grafito esferoidal.

Las fundiciones inoculadas con magnesio tienen propiedades mecánicas más altas que la fundición gris ordinaria, acercándose por sus propiedades al acero. Las fundiciones con grafito esferoidal se utilizan para piezas de máxima responsabilidad, por ejemplo cigüeñales, árboles de levas, etc.

Esta sustitución es ventajosa desde el punto de vista económico, por ejemplo para la eficacia económica de la sustitución del cigüeñal de acero de motor diesel por otro fabricado de fundición resultará que la pieza bruta para el cigüeñal de fundición con alta resistencia mecánica es tres veces más ligera que la de acero aleado. El gasto total para la fabricación de fundición es 3,5 veces menor que el necesario para la fabricación de la misma pieza pero en acero.

### **Fundición maleable.**

La fundición maleable se obtiene como resultado de un recocido prolongado de la fundición blanca. Durante el recocido tiene lugar la descomposición de la cementita formándose grafito, es decir se desarrolla el proceso de grafitización, esta es la razón por la cual semejante recocido recibe el nombre de grafitizante. Por cuanto en el caso dado el grafito se obtiene durante el recocido y tiene una forma característica de forma de copos.

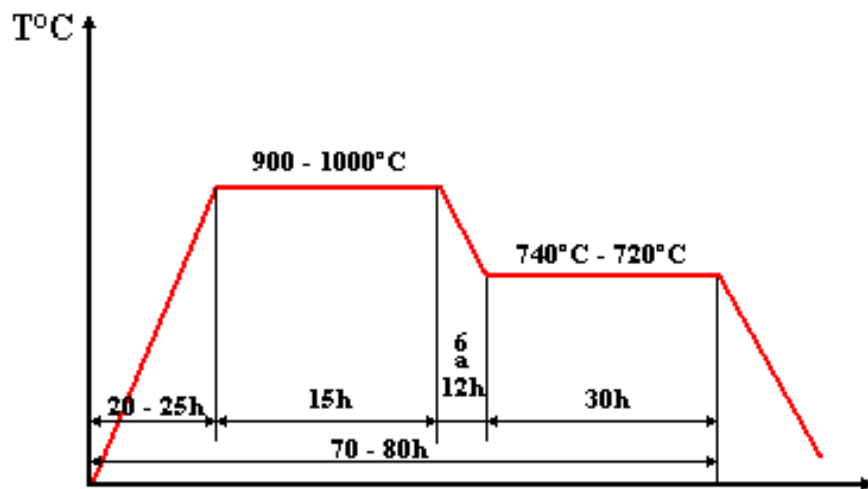
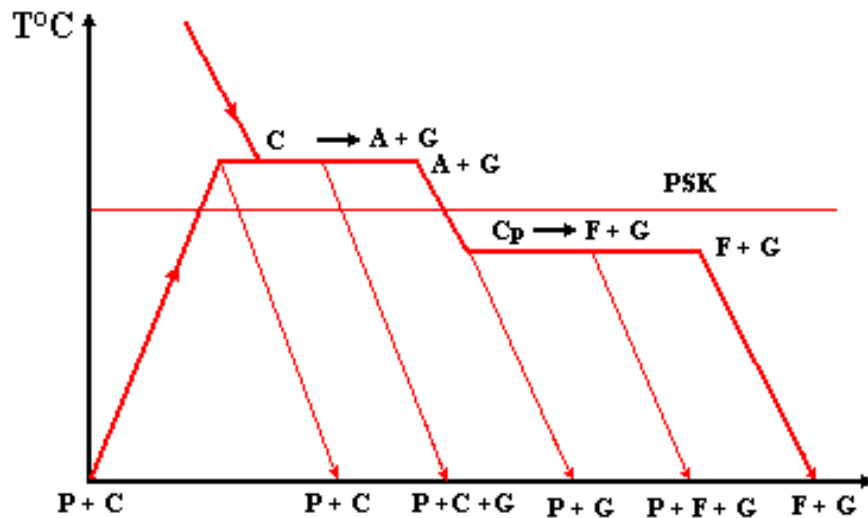
Por su composición química, la fundición blanca que se somete al recocido para la obtención de fundición maleable es hipoeutéctica y tiene la estructura formada de ledeburita + cementita + perlita.

Para obtener la estructura de ferrita + carbono de recocido deben descomponerse la cementita de la ledeburita, la cementita secundaria, y la cementita eutectoide, o sea, aquella que forma parte de la perlita. La descomposición de la cementita de la ledeburita y de la cementita secundaria (parcialmente) ocurre en la primera etapa de la grafitización, que se lleva a cabo a una temperatura superior a la crítica (de 950 a 1000°C); la descomposición de la cementita eutectoide se desarrolla en una segunda etapa de grafitización que se realiza por medio de mantenimiento a una temperatura inferior a la crítica (de 740 a 720°C) ó durante el enfriamiento lento en el intervalo a temperaturas críticas (de 760 a 720°C)

La fundición maleable ferrítica es un material de construcción blando ( $HB \leq 163$ ), de alta plasticidad ( $\delta$  hasta 12%) acompañado de una resistencia mecánica satisfactoria ( $\sigma_b \approx 300 - 370$  Mpa).

En algunos casos, especialmente para piezas sometidas al desgaste se requiere fundición maleable con estructura de perlita + ferrita + carbono de recocido, o bien con la de perlita + carbono de recocido.

Para obtener semejantes estructuras, la segunda etapa de grafitización no se realiza al final, obteniéndose entonces una parte de la perlita no descompuesta, o bien se prescinde de la segunda etapa, llevando a cabo el enfriamiento al aire desde el estado austenítico.





## CONCLUSIONES.

1. En la conferencia anterior hemos visto los aspectos más importantes relativos al diagrama metaestable y se estudiaron los aspectos principales de la microestructura, propiedades y otros aspectos del mismo.
2. El tema tiene gran importancia para la asignatura y el ejercicio de la profesión, por los que se hace necesario tener un buen dominio de la materia. En algunas oportunidades se presentarán situaciones en las cuales es necesario conocer la relación existente entre la composición química y las propiedades de una determinada aleación así como el papel que juegan las distintas fases.
3. Las propiedades y la distribución que tienen las fases, nos permitirá seleccionar aceros y hierros fundidos adecuadamente.
4. Las principales diferencias estructurales entre los diagramas estables y metaestables de hierro y carbono, están las temperaturas de las reacciones eutécticas y eutectoides y la diferencia de solubilidad entre el grafito y la cementita.
5. Los principales tipos de fundiciones empleadas en la práctica son la blanca, la gris, las de alta resistencia o nodular y las maleables.
6. La forma y distribución del grafito en las fundiciones tiene gran importancia en la resistencia a la tracción y en la plasticidad, no así en la dureza que depende fundamentalmente de la matriz metálica.
7. En el marcado de las fundiciones el elemento fundamental es la resistencia a la tracción.

### **Bibliografía.**

CALLISTER, WILLIAM D. Materials Science and Engineering. An Introduction. Fifth Edition. Department of Metallurgical Engineering. University of Utah. John Wiley & Sons, Inc., 1999. 8195 pp. ISBN 0-471-32013-7

CALLISTER, WILLIAM D. Ciencia e Ingeniería de Materiales. Una Introducción. Quinta Edición. Departamento de Ingeniería Metalúrgica. Universidad de Utah. John Wiley & Son, Inc, 1999. 8195 pp. ISBN 0-471-32013-7

GULIAEV, A P. Metalografía. Tomos I y II. Editorial Mir. Moscú. 1983. p 186 188.

KOZLOV, Y. Ciencia de los Materiales – 1 ed -. Editorial MIR. Moscú. 1986. p 76 – 78.

LAJTIN, Y. Metalografía y tratamiento térmico de los metales – 1 ed -. Editorial MIR. Moscú. 1973. p 359 – 360.