

UNIDAD 5

Diagrama de Equilibrio de sistemas binarios

Análisis térmicos:

Se denomina **análisis térmico** al estudio de la variación de la temperatura experimentada por un metal o aleación durante su calentamiento o enfriamiento.

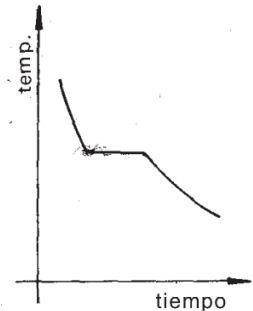
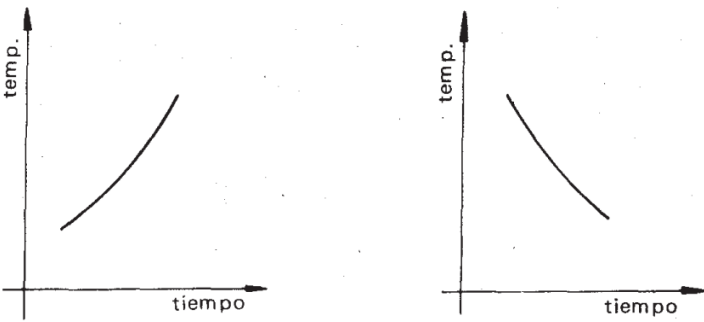
La variación de la temperatura en función del tiempo se define como curva de calentamiento – curva de enfriamiento.

Si durante el enfriamiento de un metal esta pasa por una temperatura por la cual experimenta una trasformación estructural entonces la gráfica presentara una inflexión.

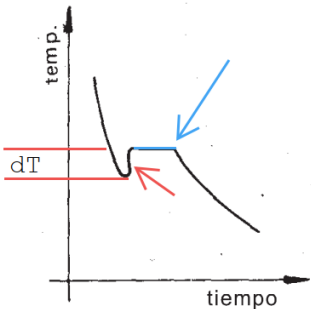
Así, por ejemplo, la gráfica de enfriamiento de un metal puro presenta una meseta que representa el cambio de fase durante la temperatura de solidificación.

Esto se debe a que el sistema desprende energía tras pasar del estado líquido al estado sólido y produce que la temperatura se mantenga constante.

Una vez completado el cambio de fase la curva continúa su descenso.



En la práctica no ocurre de esta manera tan ideal

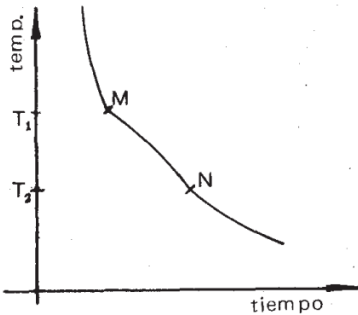


En la práctica se necesita un subenfriamiento para poder lograr el comienzo de la solidificación. Este dT es debido a que la nucleacion se produce de forma homogénea y necesitamos un gran dT para producir el cambio de fase porque la solución libera temperatura y necesitamos producir un subenfriamiento dT para que luego de la liberación de energía inicial se mantenga en la temperatura de cambio de fase.

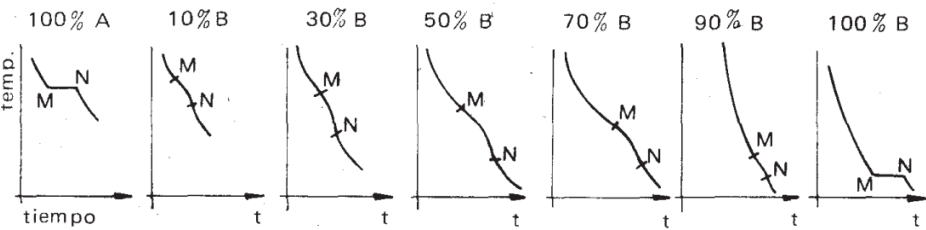
La flecha roja indica el comienzo de la cristalización donde se forman las primeras dendritas. Esta etapa se define como crecimiento dendrítico.

La flecha azul indica el crecimiento de granos columnares, se suele denominar como etapa de crecimiento columnar.

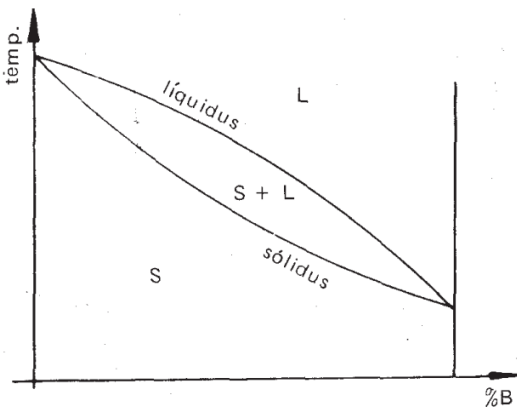
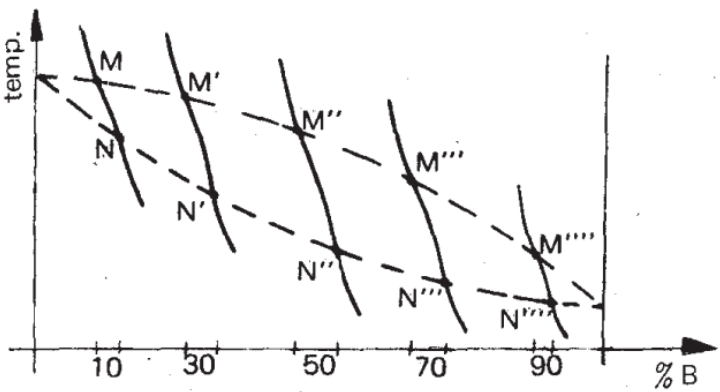
Las curvas de enfriamiento de las aleaciones son distintas. Una aleación de dos metales que se disuelven mutuamente en estado sólido en todas las proporciones presenta una curva de enfriamiento de este tipo:



El intervalo de solidificación toma distintos valores de acuerdo a la concentración de los metales que componen la aleación:



Si representamos esta serie de curvas en un solo diagrama indicando las temperaturas y las concentraciones de cada metal podemos obtener:



Así obtenemos el diagrama de transformación de la aleación que se compone principalmente por dos curvas, la superior que se denomina **Liquidus** y la inferior que se denomina **Solidus**.

Se define como diagrama de equilibrio si las transformaciones se hacen a velocidades bajas, ya que se debe mantener un equilibrio estable la mayor parte del tiempo y se obtienen ***yuxtaponiendo** las curvas de enfriamiento que se supone se obtuvieron de forma cuasiestática para distintas concentraciones. Se debe considerar que las curvas de enfriamiento son una proyección de la misma en un plano perpendicular a la hoja que contiene el diagrama.

Yuxtaponer: Poner una cosa junto a otra sin interposición de ningún nexo o elemento de relación, es decir, solo junto a ella.

Estudiaremos los diagramas de:

1. Aleaciones binarias de componentes

- a) Solubles en estado líquido e insolubles en estado sólido.
- b) Solubles en estado líquido y solubles en estado sólido.
- c) Solubles en estado líquido y parcialmente solubles en estado sólido.
- d) Insolubles en estado líquido e insolubles en estado sólido.
- e) Insolubles en estado líquido y parcialmente solubles en estado sólido.
- f) Que contienen compuestos intermetálicos.
- g) Que contienen reacciones peritéticas.
- h) Que contienen transformaciones en estado sólido.

Aleaciones binarias solubles en estado líquido e insoluble en estado sólido:

Diagrama Eutético:

Analizaremos la aleación de Cadmio-Bismuto [Cd-Bi]. Esta aleación presenta una única temperatura de solidificación al igual que los metales puros. Este tipo de aleaciones se denominan **Aleación Eutética**. Su temperatura de solidificación se denomina **Temperatura Eutética** y la concentración donde convergen las curvas de Liquidus y Solidus se denomina **Concentración Eutética**.

La curva del diagrama se forma al unir los puntos de comienzo de solidificación. Es decir, la temperatura a la que se forma el primer cristal para una determinada concentración.

Existe una ley muy importante, **La ley de Raul** que nos dice que **“La temperatura de solidificación de un líquido disminuye con el agregado de una sustancia soluble en estado líquido e insoluble en estado sólido.”**

Por lo tanto, la aleación de ambos solidificará a una temperatura menor.

Suponemos que nos encontramos por encima de la curva en solidificación, es una concentración menor a la eutética. Ahora disminuimos la temperatura hasta cortar a la curva de líquido. Mientras más alta sea la temperatura a la que la cortamos mayor será el tamaño de grano, ya que tendrán mucho más tiempo para crecer que si, por ejemplo, disminuyéramos la temperatura en la concentración eutética. Una vez que lleguemos a la temperatura eutética vamos a tener cristales de Cd y líquido remanente. Luego de esta temperatura no puede existir líquido, a partir de esta temperatura cada cristal de Cd precipitado produce a su alrededor una sobresaturación de Bi produciendo una estructura de grano muy fino denominado Grano eutético y son del compuesto A y B, es decir que se forman granos finos y laminares de Cd y Bi. Durante la formación de grano eutético la temperatura se mantiene constante durante un determinado tiempo, mientras más cerca del punto eutético nos encontremos mayor será el tiempo en el que la temperatura se mantenga constante.

Además, con este diagrama tenemos que tener en cuenta que:

Estructura de grano eutético es una estructura de grano fino laminar (Se dibuja como granos con rayitas o simplemente rayitas)

Mientras más cerca este del punto eutético voy a tener un tamaño de grano chico. Las propiedades mecánicas de estas aleaciones son buenas porque tienen una buena colabilidad. **Es útil para lingotes** porque este tipo de aleaciones son muy fluidas en estado líquido dado que posee una temperatura de fusión es la mínima y evita la formación de fisuras.

Esta es su aplicación más importante.

Los granos que se formen por encima de la temperatura eutética se denominan **granos proeutecticos** y van a ser más grandes que los granos eutéticos

Ademas

Cant. líquido

Cant. sólido

=

MN

NP

Cant. líquido

Cant. líq. + Cant. sól.

=

MN

MP

% líquido

=

MN

MP

x 100

% sólido

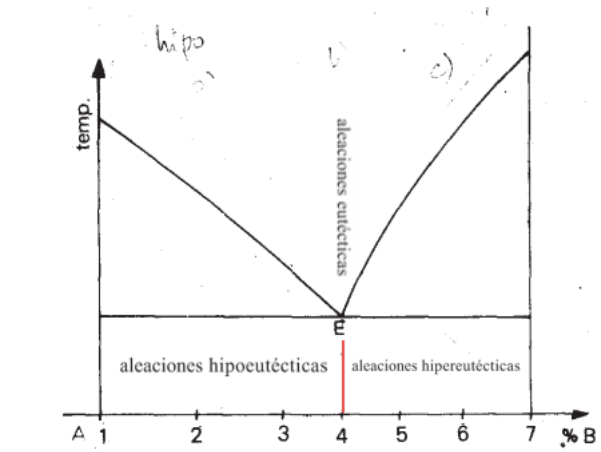
=

NP

MP

x 100

En un diagrama eutético destacan 3 tipos de estructuras metalográficas con sus propiedades.

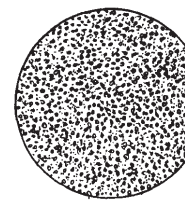
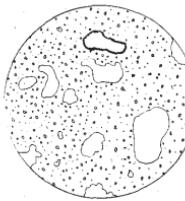
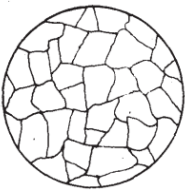
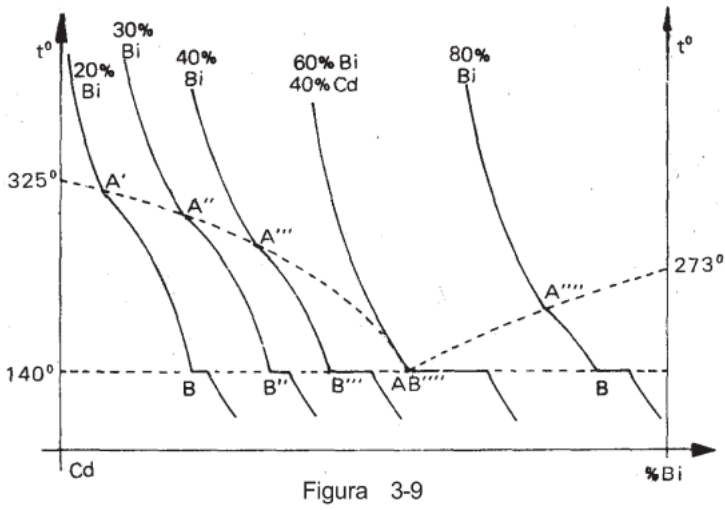


- **Estructura de metal puro:** Por lo general presentan granos equiaxiales o poligonales. Además, suelen presentar gran plasticidad y buena conductividad eléctrica, poca dureza y poca resistencia mecánica. Debido a que se encuentra en una sola fase no presenta fragilidad
- **Estructura de aleaciones Hipoeutecticas:** Este tipo de aleaciones presenta una estructura cristalográfica compuesta por cristales primarios de metal puro A rodeados por eutéticos formado por los compuestos A y B. Mientras más lejos del punto eutético, mayor el tamaño de granos. En estas estructuras disminuye la plasticidad y aumenta la resistencia mecánica. Para **granos muy grandes vamos a tener problemas de cohesión lo que puede resultar en fragilidad** para ciertas aleaciones.
- **Estructura de aleaciones Eutecticas:** Las estructuras eutéticas presentan una estructura fina de grano eutético, los cuales son homogéneos y muy pequeños. Sus principales propiedades son la ausencia de plasticidad, buena resistencia mecánica, Mayor dureza y buena resistencia ante esfuerzos dinámicos.
- **Estructura de aleaciones Hipereutecticas:** Sus propiedades se asemejan a las aleaciones hipoeutecticas.

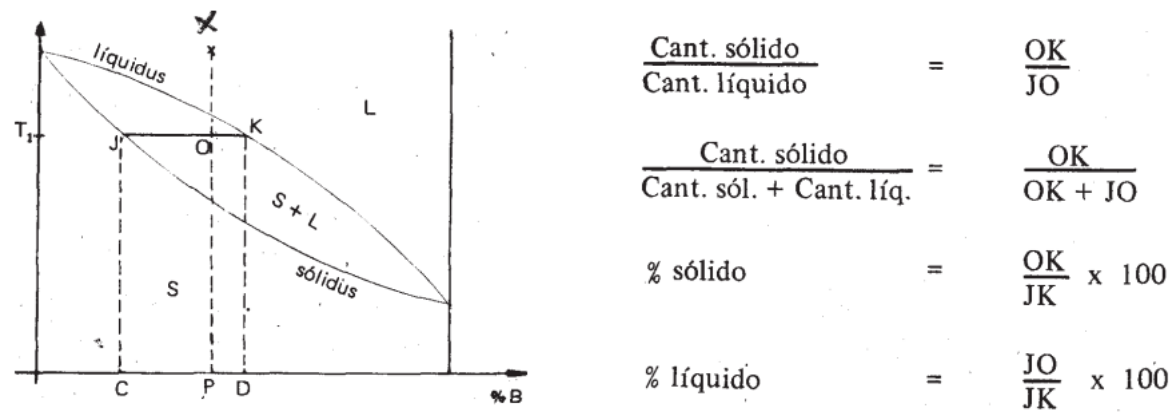
Aleaciones binarias completamente solubles en Estado SOLIDO Y LIQUIDO

También denominados como diagrama de fases binario **isomorfo**. En este tipo de aleaciones se tienen dos metales, uno denominado **Solvente**, el cual conserva su red cristalina y otro denominado **Soluto**, el cual posee sus átomos en los intersticios del solvente o reemplazando átomos de la red del solvente. En ambos casos la aleación consta de una sola fase y sus diagramas de fase son similares.

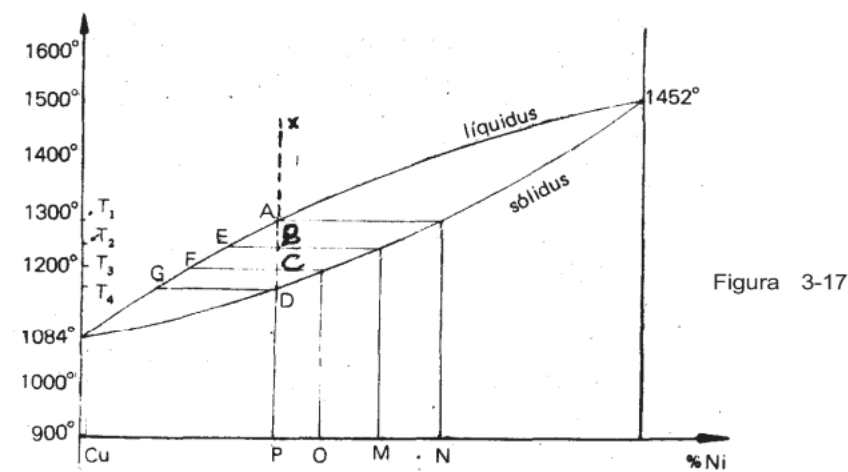
Durante la solidificación podemos determinar para cada temperatura las cantidades de líquido y sólido presentes, y sus composiciones.



Podemos obtener:



Trabajamos con un diagrama ideal de Aleaciones binarias completamente solubles en Estado SOLIDO Y LIQUIDO del Cobre-Níquel:

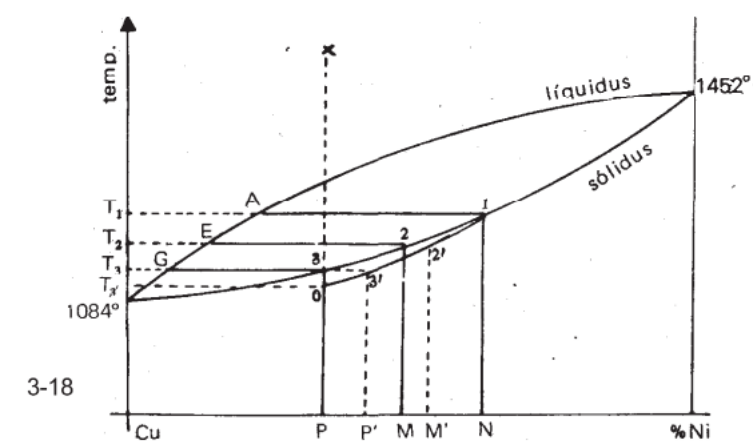


Para una composición P, suponemos que estamos en el punto B a cierta temperatura.

En este punto se producirá una precipitación de sólido de composición M% Ni y 100-M% Cu

Estos sólidos precipitarán sobre los sólidos anteriores de composición N. Además habrá líquido de composición absisa de E.

Esto se cumple solo de forma ideal.



En la realidad ocurre otra cosa debido a la difusión deficiente, es decir, por falta de desplazamientos atómicos. Los cristales se irán formando de acuerdo a su composición teórica ideal, pero los que se formaron previamente no modifican su concentración tanto como se desearía teóricamente, por lo tanto el promedio de la composición de sólido existente no será M, si no que será M', ya que suele haber más cantidad del elemento de mayor punto de fusión en el centro.

Esto se repetirá dando como resultado que la solidificación se termine en un punto debajo de la curva teórica.

Como dijimos previamente, los granos formados serán más ricos en composición del metal que posee un mayor punto de fusión, dando como resultado un gradiente de composiciones. Por esta razón no basta con un enfriamiento lento para producir una composición homogénea.

Con recocido puedo lograr una composición más homogénea, por esta razón se suele efectuar un enfriamiento rápido seguido de un tratamiento térmico de recodo.

La estructura y propiedades mecánicas de las aleaciones solubles en líquido y sólido son granos poligonales semejantes a los metales puros. Cuentan con gran plasticidad, pero a medida que nos acercamos a una composición de 50% obtendremos mayor resistencia mecánica con una pérdida de plasticidad.

No presenta fragilidad porque presenta una sola fase.

El tamaño de grano depende de la velocidad de enfriamiento, a mayor velocidad de enfriamiento obtendremos granos más finos.

Recordamos la importancia del tamaño de grano: **A menor tamaño de grano obtenemos mayor resistencia mecánica. (A temperatura ambiente)**

Aleaciones binarias de componentes PARCIALMENTE SOLUBLES EN ESTADO SOLIDO y solubles en estado líquido.

En este caso poseemos dos metales los cuales **disuelven solo una cantidad limitada del otro**. El diagrama presenta dos zonas de solución sólida en sus extremos, siendo: **α, β y un Eutectico** en su región intermedia.

El punto G indica la máxima cantidad de metal B que puede disolverse en A

A temperatura ambiente solo puede disolverse M% de B en A.

El punto H indica la mayor cantidad de metal A (100-R)% que puede disolverse en B.

El punto E indica la existencia de un eutéctico y O la composición química que le corresponde.

En este caso **el Eutectico NO ES UNA YUXTAPOSICION DE DOS METALES PUROS A y B**. Esto se debe a que para esta temperatura ya hay N% y (100-R)% de metal diluido.

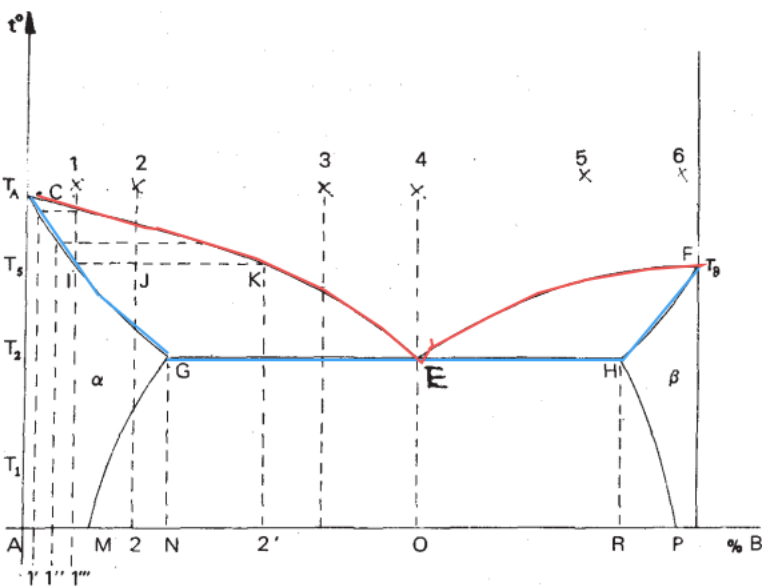
En este caso **el Eutéctico es una YUXTAPOSICION DE SOLUCION SOLIDA α de composición N y DE SOLUCION SOLIDA β de composición R%.**

La línea CEF corresponde al liquidus mientras que la línea CGEHF corresponde al solidus.

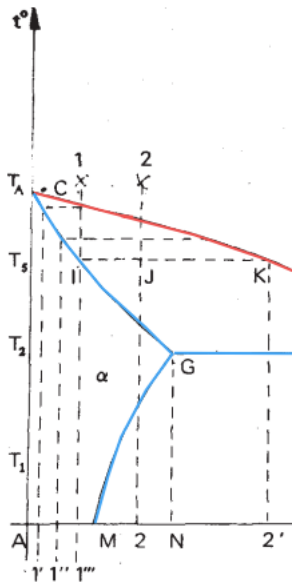
La línea GM corresponde a la solubilidad de B en A

La línea HP corresponde a la solubilidad de A en B.

Los procesos de solidificación dependen de la zona del diagrama.



- **Solución sólida pura:**



Analizamos la **aleación 1**:

Al enfriarse desde el estado líquido corta la línea de liquidus formando el primer cristal de composición 1'

A medida que enfriamos la aleación van precipitando otros cristales de composición 1'' y finalmente precipita un último cristal de composición 1''' dando como resultado una solución sólida α .

Con un tratamiento de recocido podemos obtener un material de composición homogénea con cristales poligonales equiaxiales.

Si no se efectúa el tratamiento térmico se puede presentar heterogeneidad.

Analizamos la **aleación 2**:

Al igual que la aleación 1 la aleación 2 produce una solución sólida α pero una vez sólida cruza la línea GM, la cual limita la zona de solubilidad de B en A. Por lo tanto, comienza a segregarse material de Beta en los bordes de granos y sobre los planos cristalográficos de la estructura de α .

Así, un material que solidificaba en una estructura casi homogénea se separa durante su enfriamiento posterior.

La línea GM se ve afectada por la velocidad de enfriamiento, tal que, si realizamos un enfriamiento lo suficientemente rápido podemos obtener una estructura mucho más homogénea.

Si la solubilidad se adopta a la forma GM entonces podemos adoptar un tratamiento térmico muy útil llamado **envejecimiento artificial o endurecimiento por precipitación**.

La estructura se considera una estructura bifásica ya que se compone por la solución sólida A y componentes de B

La colabilidad en estos casos es mala por no tener componentes de eutéctico.

Durante el proceso de enfriamiento podemos obtener la cantidad y concentración de sólido precipitado y de líquido remanente.

Por ejemplo, para la T5 tendrá:

$$\frac{JK}{IK} \times 100 = \% \text{ de sólido de composición } 1'''$$

y

$$\frac{IJ}{IK} \times 100 = \% \text{ de líquido de composición } 2'$$

- **Solución sólida rodeada de eutéctico:**

Analizamos la **aleación 3**:

Al enfriarse la aleación llega a la línea de liquidus en la cual se forma el primer cristal de solución sólida α . La diferencia con los casos anteriores es luego se llega a la temperatura eutéctica cuando aún hay líquido remanente rodeando los cristales de sólido formado. Las distintas composiciones del líquido están dado por la curva CE.

Una vez que se llega a la temperatura eutéctica el líquido solidifica de forma isotérmica cristales alternados de soluciones sólidas α y β . De composición N y R respectivamente.

Hay que tener en cuenta que la solubilidad de B en A disminuye con la temperatura siguiendo la línea GM y por lo tanto segregará un N%-G% de B de la solución sólida ya formada. Este componente va hacia los bordes de granos con la posibilidad de nuclearse.

En la realidad no segregará B puro, sino una concentración P% de solución sólida β , debido a que a temperatura ambiente el metal puro B disuelve una pequeña cantidad de metal A.

La estructura se considera una estructura bifásica ya que se compone eutéctico y solución sólida A

RECORDAMOS QUE: Cuanto mayor sea la cantidad y tamaño de los granos, más blanda será. Y a mayor composición eutéctica, mayor resistencia mecánica y dinámica.

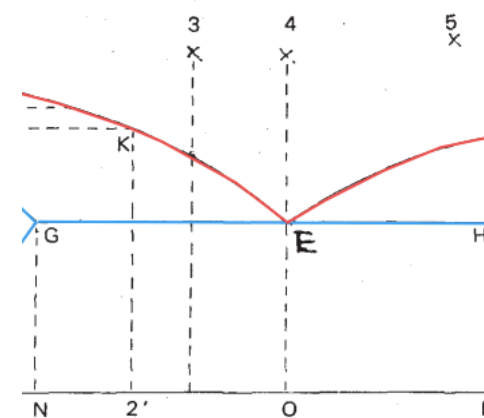
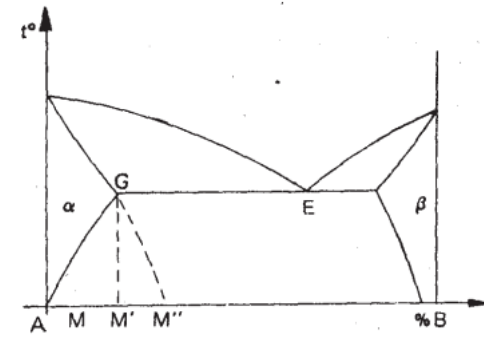
- **Eutéctico:**

Analizamos la **aleación 4**.

La aleación no se verá alterada al enfriarla hasta llegar a E. Una vez que se llega a la temperatura eutéctica comienza la precipitación del primer cristal eutéctico compuesto por solución sólida de α y β de composición N y R respectivamente. Luego, en el enfriamiento posterior se produce una segregación del material opuesto en los bordes de grano de tal forma que finalmente la solución sólida α queda con una composición de M y la solución sólida β queda con una composición de P.

Su estructura es de grano fino dando propiedades de dureza y resistencia ante tensiones estáticas y dinámicas. De hecho, es la de más dureza de esta aleación.

Además tiene una excelente colabilidad debido a que no presenta fisuras de solidificación.



La velocidad de enfriamiento es muy influyente en estos procesos. Se pueden obtener metales con propiedades especiales si realizamos la solidificación con procesos complejos como precipitación interrumpida o mediante subenfriamiento. Generalmente se llevan a cabo con enfriamientos lentos.

En la práctica suele ser muy difícil obtener las velocidades de enfriamiento que vemos en la teoría dando como resultado una "heterogeneidad de colada"

ALEACIONES BINARIAS QUE CONTIENEN COMPUESTOS INTERMETALICOS [DIAGRAMA PUNTO CONGRUENTE]

Los metales que componen una aleación pueden formar un compuesto químico definido denominado **intermetalico**.

Por ejemplo, una aleación A-B puede formar un compuesto Am-Bn.

El compuesto intermetalico se comporta como un componente puro y solidifica a temperatura constante.

El compuesto intermetalico divide al diagrama en dos partes: El siguiente diagrama se compone por los diagramas **A-AmBn** y **AmBn-B** yuxtapuestos

La aleación **A-AmBn** presenta una solución solida parcial α , un eutéctico y un compuesto intermetalico. La aleaciones comprendida entre las concentraciones **G y E** finalizaran su solidificación estable con **cristales de solución solida α de composición F rodeados de eutéctico** compuesto por cristales mixtos de **A y AmBn**. Al momento de alcanzar la temperatura eutéctica los cristales de A tienen una composición G. Pero luego del posterior enfriamiento el compuesto de A tiene una composición F, esto se debe a que la solubilidad de B en A disminuye con la temperatura siguiendo la línea IF.

La aleaciones que contengan una concentración menor a F se conformaran solamente por solución solida α

Las aleaciones que contengan una concentración igual a E, es decir la concentración eutéctica, se conformaran solamente por eutéctico ($\alpha + \text{AmBn}$).

Para composiciones mayores a E obtendremos cristales del compuesto intermetalicos rodeados de eutéctico E.

Luego, en la otra parte del diagrama, para concentraciones entre **5 y E'** obtendremos **cristales primarios del compuesto intermetalico AmBn rodeados de eutéctico de cristales de AmBn y metal puro B (Por ser lo que tenemos a la derecha)**

Finalmente, entre los puntos E' y B, obtendremos cristales primarios de metal puro con **eutéctico de AmBn y B**.
Se trabaja como si fueran dos diagramas eutecticos

Las principales propiedades de los **compuestos intermetalicos es la gran dureza que adquiere junto a su gran resistencia a la abrasión**

La **DUREZA** está relacionada con los **granos de compuesto intermetalico**, por lo que a **mayor cantidad y tamaño de dichos granos mayor será la dureza** del material.

Por lo tanto, en caso de buscar obtener dureza, se buscara obtener cristales intermetalicos como compuesto primario.

Algo importante a analizar es la **FRAGILIDAD**. Los cristales individuales de intermetalico poseen una gran resistencia mecánica, pero dentro de una matriz de cristales estos tienen problemas de cohesión en las interfaces. Por esta razón produce **FRAGILIDAD EN INTERFASES EXTENSAS**.

Las **INTERFASES EXTENSAS** se producen cuando el compuesto intermetalico en el primer constituyente que precipita en el líquido, es decir, es el grano primario. Poseen el siguiente aspecto:



Una forma de evitar la fragilidad es obtener el compuesto intermetalico en el compuesto eutéctico E o E', donde los granos intermetalicos aportan resistencia mecánica pero no aportan tanta fragilidad.

También se puede obtener compuesto intermetalico como segregación en borde de grano a partir de disminuir la solubilidad del metal B en el metal A, como en el caso de la aleación de composición 1'. En estos casos se produce una extensa red de granos intermetalicos en los bordes de granos de la solución solida lo que produce una **gran fragilidad al material debido a su falta de cohesión. Y poseen el siguiente aspecto**

Por lo tanto, ya sean los compuestos intermetalicos primarios como los constitutivos de redes intergranulares aportan gran dureza pero mucha fragilidad.



NO SON UTILES PARA MECANIZADO NI TRABAJOS DONDE INFLUYA LA DEFORMACION PLASTICA.

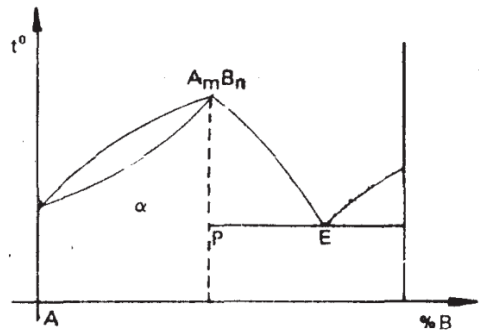
CONDUCTIVIDAD ELECTRICA.

La **presencia de los compuestos intermetalicos disminuye la conductividad eléctrica del material.**

El compuesto intermetalico es un enlace covalente, no es un enlace metálico el cual es el responsable de la conductividad eléctrica, por lo tanto es lógico concluir que la aleación no será una buena conductora.

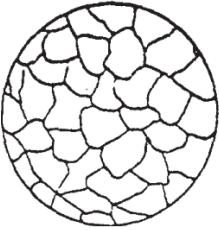
Una característica importante es que los compuestos intermetalicos pueden formar aleaciones con otros tipos de constituyentes.

Por ejemplo



Donde la aleación se compone desde A a P por una solución solidad homogénea.

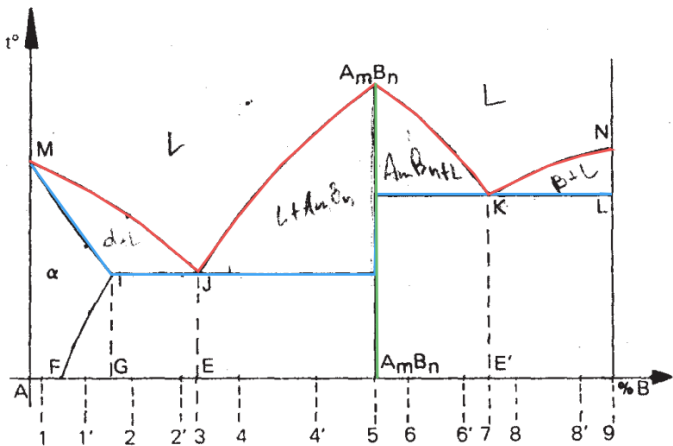
ESTRUCTURA Y PROPIEDADES MECANICA.



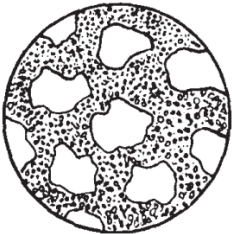
La aleación 1 es una solución solida. Como bien sabemos, las soluciones solidas poseen una estructura homogénea de granos equiaxiales poligonales tal como muestra la figura de la izquierda.

Sus propiedades son similares a la del metal puro tal que tiene buena plasticidad, es blanda de poca resistencia mecánica y tiene mucha tenacidad.

Ademas, puede recrystalizarse por deformación en frio y recocido.



La aleación 1’ es muy similar pero segrega metal puro B EN ESTE CASO, siempre segrega en los bordes de grano primarios lo que tengo en el lado opuesto, tal que posee un poco más de dureza pero al mismo tiempo incrementa levemente su fragilidad y disminuye su tenacidad. Eso se debe a que posee 2 fases.

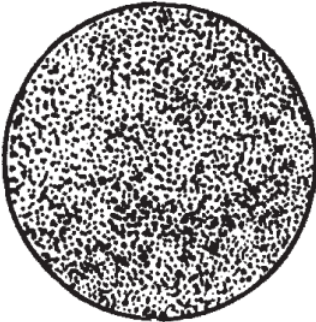


La aleación 2 posee cristales de solución solida α como grano primario y grano de intermetalico y α como eutético en los bordes de grano.

Esto también produce un aumento de dureza y resistencia mecánica, con disminución de plasticidad y tenacidad, lo que provoca un aumento de fragilidad.

Se puede disminuir la fragilidad al adquirir interfaces menos extensas, es decir, al disminuir el borde de grano mediante tratamientos térmicos.

Ademas, si nos acercamos al punto eutético podemos obtener una estructura más resistente y con mayor tenacidad que la aleación número 2 ya que posee una estructura de grano fino eutético con poca interfaz por el tamaño de grano primario de solución solida α



La aleación 3 tiene concentración eutética α - $AmBn$ puro, es decir que todo el líquido remanente se convertirá en eutético. Esta aleación posee **Es la estructura más fina y homogénea**

En este caso, poseemos mayor cantidad de borde de grano (muy poco grano) con muy poca interfaz, lo cual nos brinda mucha dureza y resistencia mecánica a cambio de perder plasticidad. Obtenemos fragilidad debido a la poca cohesión que nos brinda el intermetalico y tenemos una muy baja conductividad.

Debido a la poca interfaz entre grano tenemos mayor tenacidad, mayor resistencia a la fatiga, bajo punto de fusión y muy buena colabilidad.



La aleación 4 se compone por compuesto intermetalico como grano primario (En forma de aguja, por lo general toman esta forma) y compuesto eutético como grano secundario.

La interfaz entre granos es relativamente chica, aunque es mayor que la de la aleación 3. Esto nos brinda una buena tenacidad sin que los efectos de dureza, resistencia a la abrasión y fragilidad del compuesto intermetalico sean excesivo.

Esto permite que este tipo de aleaciones sean buenas para **herramientas** debido a su dureza y tenacidad; y para materiales antifricción ya que su resistencia a la abrasión y la estructura permite retener el lubricante y absorber las vibraciones debido a la tenacidad.

Esto solo se cumple en concentraciones cercanas a la concentración eutética.

Si la aleación se desplaza hacia la concentración $AnBm$ se produce un aumento de grano primario y aumento de interfaz entre granos lo que implica una pérdida de tenacidad y el material deja de ser apto para este tipo de usos.



La aleación numero 5 está compuesta por material intermetalico puro (Teóricamente). Su estructura se asemeja a la de un metal puro, es decir, de granos equiaxiales lo cual le otorga una poca interfaz de grano y teóricamente debería tener una gran dureza, con buena resistencia a la abrasión y a su vez con gran tenacidad debido a la poca interfaz de grano.

Esto en la práctica no es posible ya que **obtener un material intermetalico puro de una sola fase es imposible**. Siempre existe material eutético entre los bordes de grano, ya sea E o E’. Recordamos que el material intermetalico tiene poca cohesión en dos fases y provoca que sea muy frágil.

La aleación 6’ es equivalente a la aleación 4 y la 6 es equivalente a la 4’

La aleación numero 7 es un eutético E’. Como ya vimos es muy difícil obtenerlo puro ya que siempre puede existir un mínimo de grano primario proeutectico ya sea de B o de compuesto intermetalico. Por lo tanto, al igual que en la aleación 3, tenemos buena tenacidad, resistencia a la fatiga y buena colabilidad. Su estructura se asemeja a la de la aleación número 3.

En la aleación 8 pasa algo similar a la aleación número 2, pero esta vez tenemos al metal puro B como grano primario rodeado de eutético E’. Sus propiedades se van a ir pareciendo a la de un metal puro a medida que nos vamos acercando a B. Es decir, presentara mucha perdida de dureza pero sin obtener plasticidad debido que la presencia de dos fases impide la deformación plástica. Además, la poca cohesión provoca que sea una aleación frágil.

Obtener un tipo de grano más pequeño mediante tratamientos térmicos en este tipi de aleaciones puede beneficiar a la resistencia mecánica y a la tenacidad del material.

La aleación pura B corresponde al metal puro B, la cual es la más blanca, plástica y mejor conductora de la electricidad. Además la dureza disminuye considerablemente

Diagrama Hierro-Carbono

Análisis micrográficos de acero al carbono:

El principal componente de aleación en las fundiciones y aceros es el **Carbono** debido a su influencia en las propiedades del material.

Si tenemos una solución de carbono y la enfriamos en hierro obtendremos una disminución de la solubilidad de la solución dando como resultado una separación del carbono. Se puede separar de dos formas:

- Carbono libre o grafito
- Compuesto Hierro-Carbono. Denominado comúnmente como **CEMENTITA** o Carburo de hierro, CFe3

El **enfriamiento lento** favorece la formación de **grafito**.

El **enfriamiento rápido** favorece la formación de **cementita**.

Por lo tanto, según la velocidad de enfriamiento, podemos obtener dos diagramas:

- Diagrama Hierro-Cementita.
- Diagrama Hierro-Grafito.

En la figura 1 se muestran los diagramas superpuestos.

Las líneas punteadas representan el diagrama hierro-grafito, estas líneas representan el equilibrio estable y se obtiene con un enfriamiento lento donde el silicio actúa como Catalizador. También es posible llegar a este tipo de estructura a través de un recocido de la estructura hierro-cementita.

Las líneas llenas representan el diagrama hierro-cementita.

Este diagrama es más importante en la industria y suele ser denominado como diagrama de carburo hierro o **diagrama de equilibrio METAESTABLE**.

Se favorece con un enfriamiento rápido y utiliza al **manganeso como catalizador**.

Para obtener un 100% de cementita es necesario un 6,67% de carbono.

El hierro puro sufre transformaciones **alotrópicas** a diversas temperaturas en los puntos denominados: M, G, N, y A de la figura N° 1

***Alotropía es la propiedad de algunas sustancias simples de poseer estructuras atómicas o moleculares diferentes. Las moléculas formadas por un solo elemento y que poseen distinta estructura molecular se llaman alótropos. Por ejemplo: Carbono. Variedades alotrópicas: grafito, diamante, grafeno, nano tubos de carbono, fullereno y carbón.**

Las temperaturas de los puntos A,N,G y M se van desplazando a medida que aumentamos el % de Carbono. Este desplazamiento es el que origina el diagrama

A **temperatura ambiente** la forma estable del hierro es el denominado **Fe α** cuya estructura cristalográfica es **BCC**.

A **768° C** sufre ciertas transformaciones físicas que afectan principalmente a sus **propiedades**, como pérdida de sus propiedades magnética, y la nueva forma estable del hierro es **Fe β** cuya estructura cristalográfica es **BCC**.

A **900°C** obtenemos un nuevo estado alotrópico y su forma estable se denomina **Fe γ** cuya estructura cristalográfica es **FCC**. Se destaca principalmente por su capacidad para disolver carbono en estado sólido. La solución solida de carbono en **Fe γ** **hierro gamma** se **denomina como AUSTENITA**.

A **1401°C** el hierro vuelve a obtener una estructura **BCC** y se denomina **Fe δ**.

Finalmente, a **1528° C** obtenemos el punto de fusión del hierro.

Estas temperaturas ideales de transformación se denominan A1, A2, A3 y A4.

Durante el calentamiento los puntos de transformación se encuentran algo por encima de los hallados durante el enfriamiento.

Los registrados durante el calentamiento se denominan Ac1, Ac2, Ac3 y Ac4 y los registrados durante el enfriamiento Ar1, Ar2, Ar3 y Ar4.

La pequeña diferencia de temperatura entre Acx y Arx se define como **HISTERESIS TERMICA**.

La histéresis térmica se puede reducir mediante calentamientos y enfriamientos lentos.

La línea **ABCD** [Violeta] es la línea que separa la zona liquida y el comienzo de solidificación.

La línea **AHNJECI** [Celeste] es la línea que separa el estado sólido total, es decir, por debajo de esta línea el compuesto está totalmente solidificado.

SISTEMA HIERRO- CEMENTITA (METAESTABLE)

En el sistema hierro-cementita, también denominado metaestable, se prioriza un enfriamiento rápido y se utilizan catalizadores como el manganeso.

Es especialmente útil para **ACEROS (menores a 1,7% de carbono)**. Si supera el 1,7% se denomina **FUNDICION**

Primero nos enfocaremos en el análisis del acero, es decir, para valores inferiores a 1,7%, a la izquierda del punto E hasta llegar al punto B.

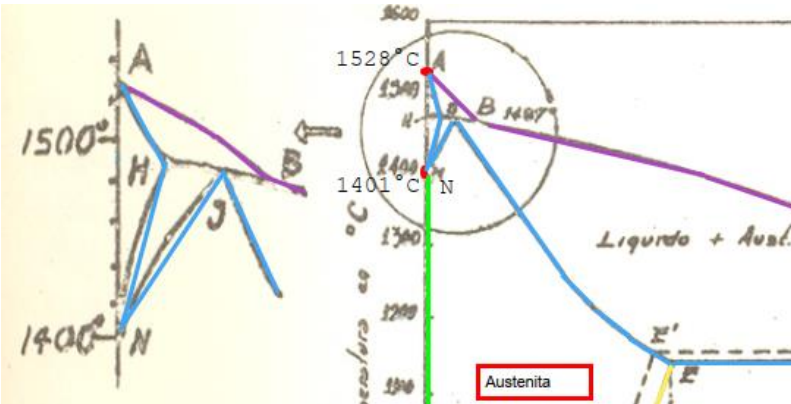
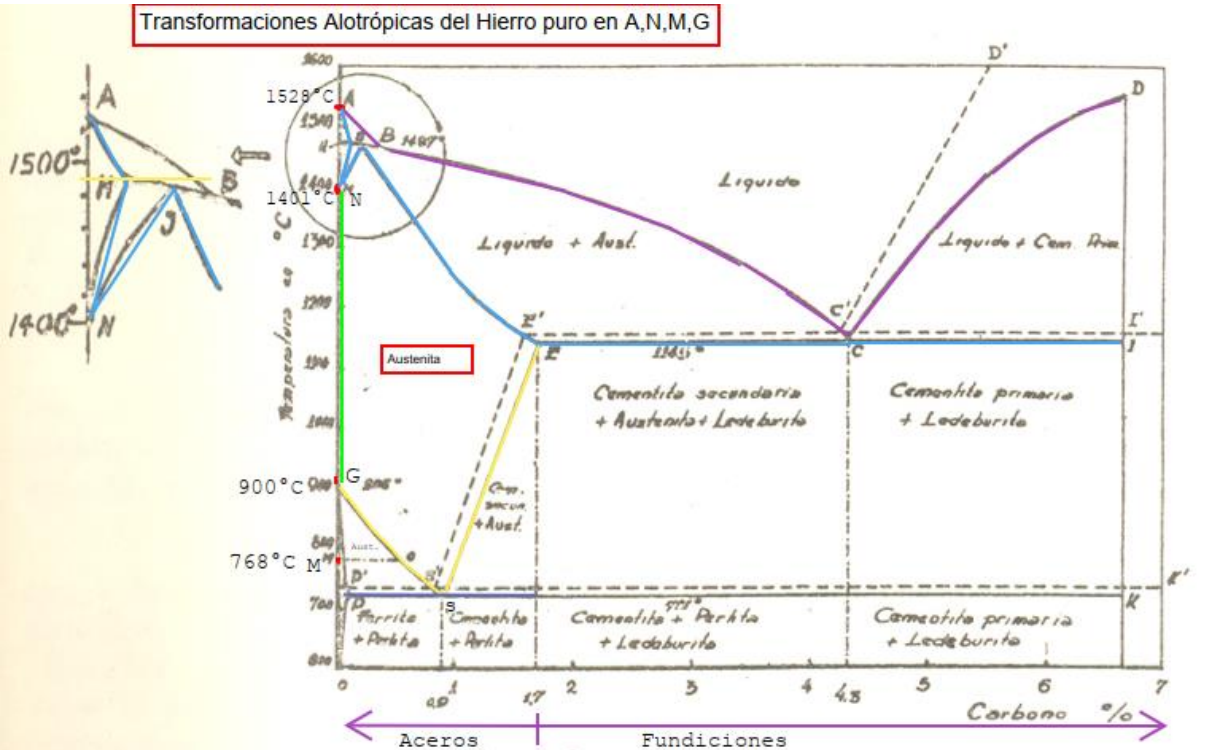
Si tenemos una aleación por encima de la curva **B-C** y luego la enfriamos, una vez que cruza la curva de liquidus se forma el primer cristal de solución sólida.

A la solución solida de carbono en hierro y se la denomina **AUSTENITA**. Se la considera muy tenaz. Soporta un alargamientoα de hasta el 30%

La solidificación se completa una vez que entra en contacto con la línea J-E (Muy cercana a B-E).

La estructura obtenida es estable solo a temperaturas muy elevadas donde el **Fe γ** posee una estructura cristalográfica es **FCC**. Si disminuimos aún más la temperatura entonces el hierro se transformara en su forma estable a temperatura ambiente **Fe α**.

Ahora suponemos que tenemos una aleación por encima de la curva A-B. Ahora enfriamos la solución y observamos que vamos a obtener una solución con parte solida AH y parte liquida AB. La parte solida se



compone por una **solución sólida de carbono en hierro Fe δ** cuya composición de carbono varía a lo largo de A-H.

Al llegar a la temperatura de **1487°C**, se produce una transformación **PERITECTICA [Línea HB]**.

La solución sólida de composición H reacciona con el líquido remanente de concentración B, para dar otra solución sólida llamada AUSTENITA de concentración J.

Si la concentración original del líquido ha correspondido exactamente a la del punto J, no quedará después de la transformación peritética ni solución δ , ni líquido B, todo se habrá transformado en **solución sólida γ** .

Si la concentración original del líquido estuvo comprendida entre A y J, **además de solución sólida γ quedará en el sistema algo de solución sólida de hierro δ remanente.**

Si la concentración original estaba comprendida entre J y B, luego de la transformación tendremos solución sólida austenita y más líquido de concentración B.

La transformación del líquido remanente B en solución sólida se realiza a lo largo de la línea JE y la transformación de la solución sólida δ remanente en γ según la línea JN.

Una vez por debajo de la línea NJE nos encontramos con una **solución de carbono en hierro γ denominada austenita.**

El aspecto metalográfico de la **austenita es de cristales blancos poligonales, característicos de las soluciones sólidas y metales puros.**

Se llega a la austenita por **solidificación directa** cuando la concentración original del baño está comprendida entre los puntos B y C

Se llega a la austenita por **transformación indirecta** pasando primeramente por la solución sólida δ cuando la concentración original de carbono es menor al correspondiente al punto B

La capacidad del hierro γ para disolver carbono varía con la temperatura. Alcanza su valor máximo de 1,7 % a 1145°C.

Si tenemos una solución sólida en estas condiciones y bajamos su temperatura, la solubilidad del carbono disminuye y se

separa **CEMENTITA** a lo largo de la línea ES. La cementita es un compuesto de fórmula **Fe₃C**.

La solución sólida remanente se va empobreciendo en carbono.

Al llegar a la temperatura de 721°C la concentración de la austenita remanente será de 0,89 % de carbono.

En ese momento cesa la segregación de cementita, y la solución sólida homogénea de austenita se convierte en un **material heterogéneo**, semejante a los eutécticos. Por provenir de un sólido se llama **eutectoide**.

Si la concentración original de la austenita está entre G y S, es decir cuando el contenido de carbono es menor de 0,89 %, llegaremos durante el enfriamiento a la línea GS, donde se separa ferrita. **La ferrita es una solución sólida de carbono en hierro α .**

La composición de ferrita varía de acuerdo a la curva GP.

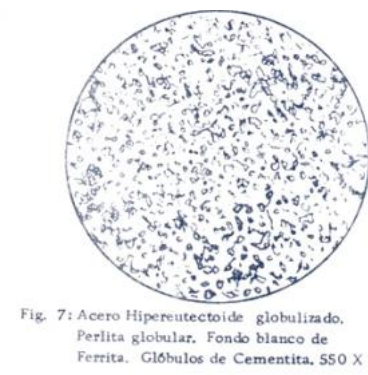
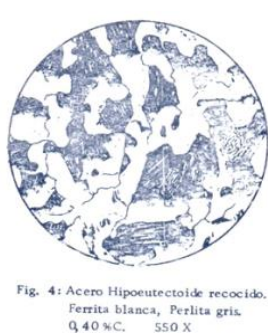
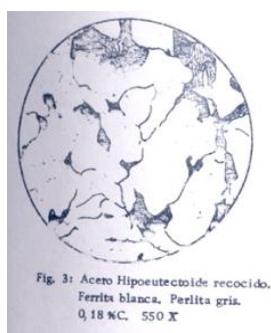
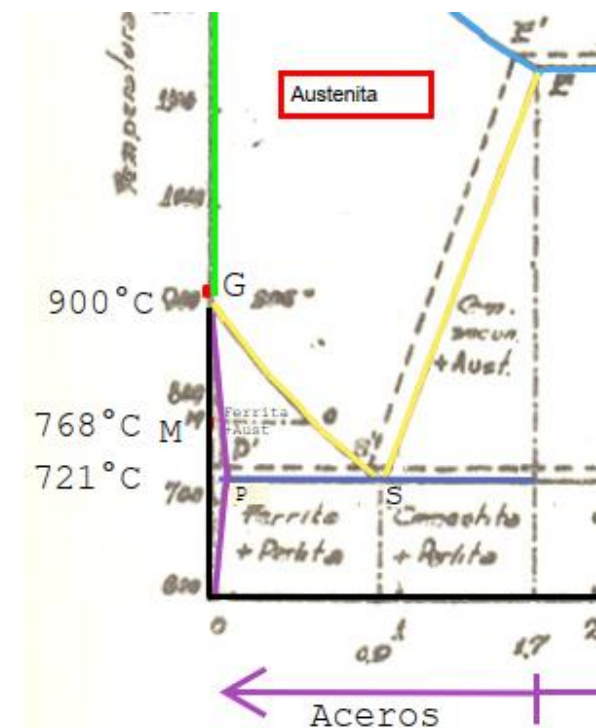
Una vez que se alcanza la temperatura de 721°C alcanzamos el punto S, y la austenita remanente se convierte en **perlita**

La perlita es una yuxtaposición de láminas de ferrita y cementita.

Los aceros hipoeutectoides (Concentración menor al 0,89%) presentan cristales poligonales de perlita gris rodeados de una matriz de ferrita blanca.

Los aceros hipereutectoides (Concentración mayor al 0,89%) presentan cristales de cementita blancos con una matriz de perlita gris.

Se puede apreciar en ambos casos que tanto la ferrita como la cementita forman polígonos que encierran a la perlita. Esto se debe a que la ferrita y la cementita segregaron en los bordes de grano de la austenita, que luego se convierte en perlita, porque esa zona es la de mayor energía interna y son zonas muy reactivas aptas para crear una nueva fase. Por esta razón queda **“Encerrada” por la ferrita en forma poligonal y por la cementita en forma de red fina.**



CASOS PRACTICOS:

Analizaremos 3 casos que solidifican según el sistema hierro-cementita.

Caso 1:

Suponemos una **aleación de 0,4% de C**. El resultado será un **acero hipoeutectoide**.

Al inicio iremos enfriando la aleación líquida. Primero obtendremos una mezcla de líquido con los primeros granos solución sólida delta δ . Una vez que llegamos a la línea H-C comenzará a producir el crecimiento dendrítico de solución sólida gamma γ , denominada austenita, al principio tendrá en su centro a los elementos de mayor punto de fusión, y los de menor puntos de fusión se encontraran al borde de los granos.

Luego, al seguir disminuyendo la temperatura llegamos a la línea GS, donde comienza a segregar solución sólida de carbono en hierro α [ferrita] en los bordes de grano de la austenita.

Una vez alcanzada la línea PS, se forman la austenita remanente tiene una composición de 0,89% de C y se comienzan a formar laminas de ferrita de composición P y laminas de cementita de composición K (6,67% de C). La yuxtaposición de ambos forma el eutectoide denominado perlita y da una forma de laminas claras y oscuras. La perlita estará rodeada por los cristales primarios de ferrita.

Caso 2:

Suponemos una **aleación 0,89% de C**. El resultado será un **acero eutectoide**. Al igual que antes, al enfriar la aleación y llegar a la línea HJC comenzará el crecimiento dendrítico que dará lugar al primer cristal de solución sólida homogénea γ o austenita, luego al seguir enfriando la aleación llegamos al punto S y ocurre una transformación de austenita a perlita a temperatura constante, la cual ya detallamos previamente. A diferencia del caso anterior esta vez tendremos granos eutectoides puros sin granos primarios. Las láminas de los granos toman la dirección de los planos de deslizamiento, los cuales son de mayor energía.

Los cambios bruscos de la orientación de las láminas ocurren en los bordes de grano de la austenita remanente.

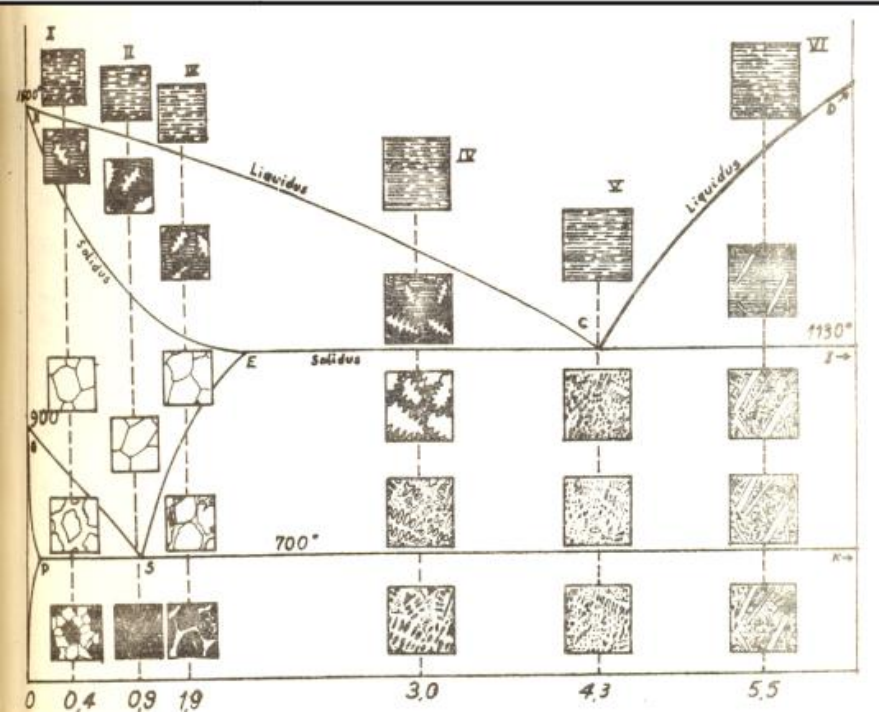
Caso 3:

Suponemos una **aleación 1,3% de C**. El resultado será un **acero hipereutectoide**. El proceso inicial es igual que el proceso del caso anterior pero solo hasta antes de llegar a la línea SE.

Por lo tanto comenzaremos el análisis a partir de la zona de solución solida de carbono en hierro gamma y o austenita, donde posee una estructura homogenea. Al enfriar la aleacion llegamos a la línea SE en donde comienza a disminuir la solubilidad del carbono en hierro gamma y lo que provoca que comience a segregar cementita o carburo de hierro (CFe3) en los bordes de grano de la austenita en form de red fina, lo cual produce interfaces muy extensas causando mucha fragilidad, debido a que la red que forma la cementita es muy rigida

Por lo tanto tenemos cristales de austenita rodeados de cementita.

Una vez que lleguemos a la línea PSK, la austenita se transformara en perlita al igual que los casos anteriores, solo que esta vez la perlita estará rodeada de granos de cementita.



Constituyentes estructurales de los aceros al carbono recocidos:

Ferrita: La ferrita es una solución solida de **carbono (O cementita)** en hierro α. Puede tener en solución solida α pequeñas cantidades de Si, Mn, P y S.

A temperatura ambiente el hierro es solo capaz de diluir un máximo de 0,008% de Carbono.

Cristaliza manteniendo la estructura del hierro α, es decir, **BCC**. Su afecto al microscopio es de granos blancos con contornos negros, cuando se ataca con nital o picral.

Su dureza es de aproximadamente 80 brinell, es decir, muy blando. Además, tiene buenas propiedades magnéticas.

Cementita: Es carburo de CFe3. Su composición es 6,67% de Carbono. Es el constituyente más duro, su dureza es aproximadamente de 68 Rockwell C con equivalencia a 745 Brinell. Sus propiedades magnéticas no son buenas, por debajo de 218°C es débilmente magnetico

Aparece libre en los aceros hipereutectoides.

Pelita: Como vimos previamente, es un eutectoide formado por láminas de ferrita y cementita. Tiene una composición de 0,89% de carbono C

La separación de sus láminas depende principalmente de la velocidad de enfriamiento, e influyen directamente en la dureza de la perlita.

A mayor velocidad de enfriamiento obtendremos laminas más juntas con una dureza aproximada de 300 Brinell (Equivale a 33 Rockwell C)

A menor velocidad de enfriamiento obtendremos láminas más separadas con una dureza aproximada de 250 Brinell.

Caracteristias mecánicas de los aceros al carbono recocidos

Los aceros se pueden clasificar de acuerdo a su contenido de carbono como:

Proeutectoides: Son aquellos que poseen más de 0,008% y menos de 0,89% de Carbono. Suelen tener ferrita como grano principal con perlita eutéctica. La propiedades dependen principalmente de que tanto %C tengan. A menor cantidad de %C se comportara como si fuera un metal puro.

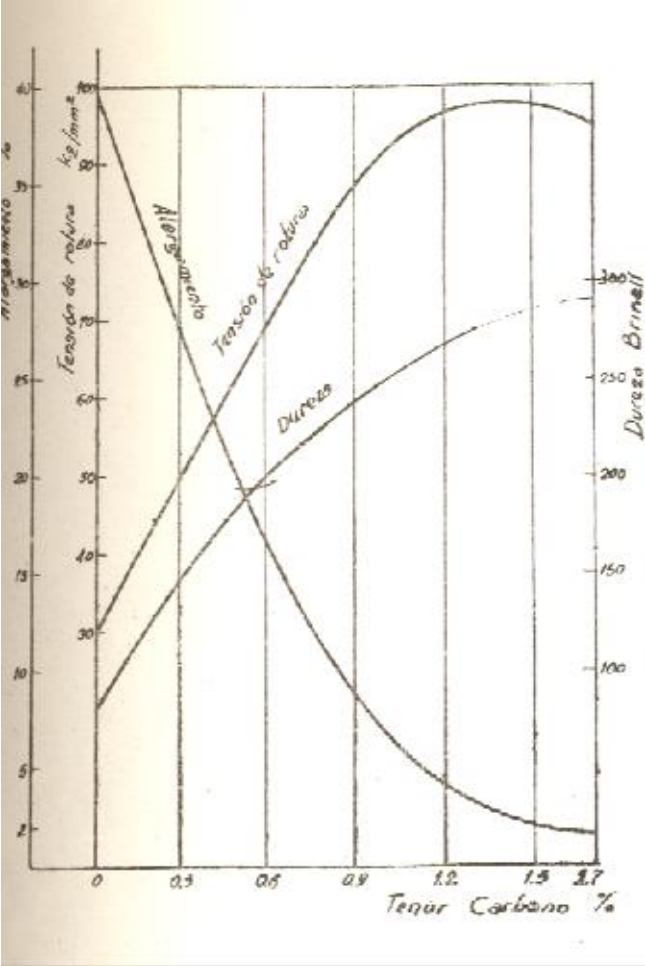
- **Eutectoides:** Son aquellos que poseen 0,89% de carbono. Su composición ideal es de perlita pura. Como vimos anteriormente sus propiedades dependen principalmente de la separación de sus láminas y por ende de la velocidad de enfriamiento.
- **Hipereutectoides:** Son aquellos que poseen más de 0,89 % y menos de 1,7 % de Carbono. Su estructura está compuesta por perlita rodeada por una matriz de cementita.

La proporción de ferrita-perlita y cementita-perlita, en los aceros Proeutectoides e Hipereutectoides respectivamente, depende de %C de la aleación.

En la siguiente imagen la variación de las propiedades de acuerdo a la variación de contenido de Carbono:

Observamos que

- **La tensión de rotura alcanza un máximo en aproximadamente 1,3%C**
- **La dureza aumenta con el incremento de carbono.**
- **El alargamiento soportado disminuye con el incremento de carbono**
-



DETERMINACION MICROSCOPICA DEL TENOR DE CARBONO EN LOS ACEROS

Como vimos previamente: La ferrita puede contener un máximo de 0,008% C, mientras que el eutéctico posee 0,89% y la cementita 6,67%C.

Suponemos una pieza de material a la que se le efectuó un tratamiento de recocido y que previamente se le realizó un pulido y se la atacó como un reactivo [Picral o nital]

Luego, se determinan las áreas de la ferrita, la perlita, y la cementita, además del área total de la muestra observada. Con estos datos podemos calcular las proporciones de carbono de la siguiente forma:

$$\text{Carbono de la perlita} = \frac{\text{Sup. Perlita} \times 0,89\%}{\text{Sup. Total}} = \%C \text{ Perlita}$$
$$\text{Carbono de la ferrita} = \frac{\text{Sup. Ferrita} \times 0,008\%}{\text{Sup. Total}} = \%C \text{ Ferrita}$$
$$\text{Carbono de la cementita} = \frac{\text{Sup. Cementita} \times 6,67}{\text{Sup. Total}} = \%C \text{ Cementita}$$

El carbono total del acero será :

$\%C_{\text{Total}} = \%C_{\text{Perlita}} + \%C_{\text{Ferrita}}$ si el acero es hipoeutectoide

$\%C_{\text{Total}} = \%C_{\text{Perlita}} + \%C_{\text{Cementita}}$ si el acero es hipereutectoide

CLASIFICACION SAE

SISTEMA NUMERAL DE ESPECIFICACIONES SAE

Se emplea este sistema de índices numerales para determinar la composición química de los aceros bajo especificación.

El primer número indica la clase de acero a que pertenece, de esta forma:

- ❑ “1” indica aceros al carbono simple
- ❑ “2” aceros al níquel
- ❑ “3” aceros al cromo níquel
- ❑ “4” aceros al molibdeno
- ❑ “5” aceros al cromo
- ❑ “6” aceros al cromo vanadio
- ❑ “7” aceros al tungsteno

En el caso de los aceros de aleación, el segundo número indica el porcentaje del elemento de aleación predominante.

Normalmente las dos o tres últimas cifras indican el promedio de contenido de carbono en centésimo de 1%. Así por ejemplo:

- ✓ “2340” indica un acero al níquel con aproximadamente 3%Ni (3,25-3,75) y 0,40 (0,35-0,45) de C
- ✓ “71360” indica un acero al tungsteno con 13% de Tungsteno (12-15%) y 0,60% de C(0,50-0,70%)
- ✓

Los aceros primarios son los que se emplean en grandes cantidades.

Los aceros secundarios son los que se consideran esenciales para ciertos usos industriales.

ANALISIS MICROGRAFICO DE FUNDICIONES

Nociones generales:

Las fundiciones son aleaciones de Fe-C con contenido de carbono mayor a 1,7% C. Además, suelen contener Si [Catalizador F.Gris], Mn [Catalizador F.Blanca], **S y P [Impurezas]**. Se clasifican en dos tipos de fundiciones principales:

- **FUNDICION BLANCA:** El carbono en este tipo de funciones se encuentra combinado en forma de compuesto intermetálico **CEMENTITA [Fe3C]**. Se obtiene con un **enfriamiento rápido** [Catalizador: Mn] y se puede obtener mediante el diagrama **Metaestable o Hierro-Cementita**.
- **FUNCION GRIS:** El carbono en este tipo de funciones se encuentra en forma de **GRAFITO**, es decir, que el **carbono** se encuentra **en forma libre**. Se obtiene mediante el diagrama **Hierro-Grafito**, también denominado **Diagrama estable** (Diagrama de líneas punteadas). **Es la más usada industrialmente.**

ANALISIS FUNDICION BLANCA – Diagrama Metaestable [Hierro-Cementita]

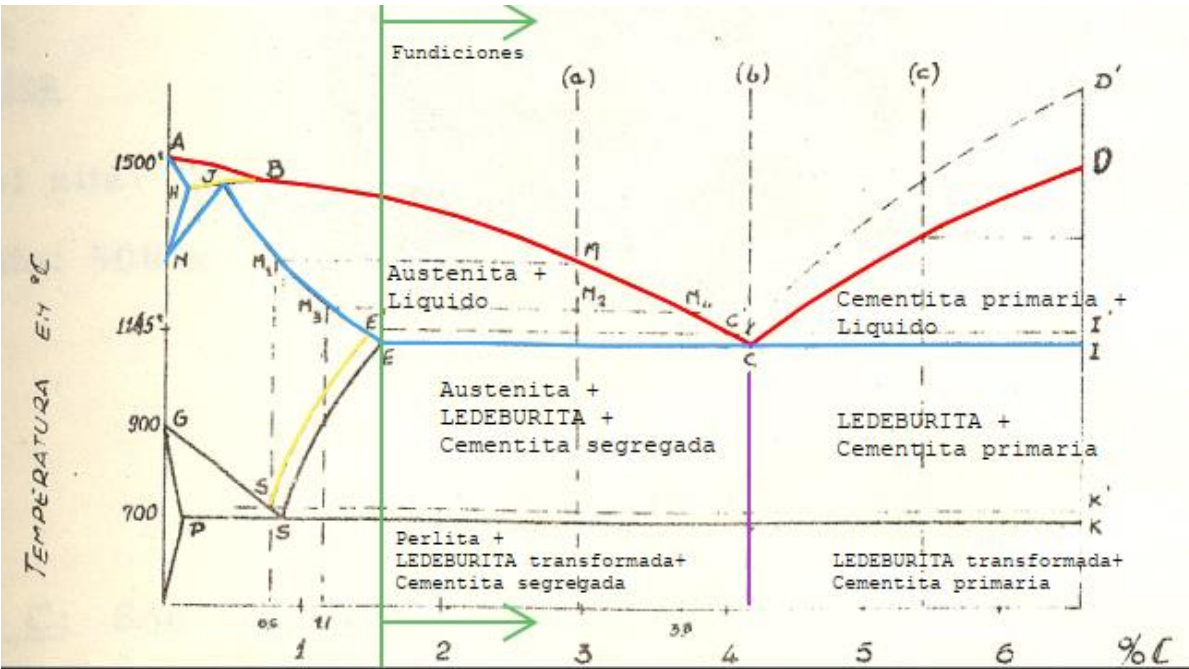
Analizaremos 3 casos.

Caso 1: Aleación con 3% C. [a]. Fundicion Hipoeutectica Al enfriar esta aleación llegaremos al punto M ubicado en la curva Liquidus. En este punto comenzará el crecimiento dendrítico de solución sólida de carbono en hierro y [Austenita]. Su composición, en este caso, será M1=0,6%C.

Luego, si mediante un **enfriamiento rápido** llegamos al punto M2, obtendremos dendritos de austenita con composición M3 y líquido remanente con composición M4.

Si el enfriamiento fuera lo suficientemente lento los porcentajes de carbono de los dendritos precipitados se equilibrarían debido a que el carbono ***DIFUNDE** a estas temperaturas.

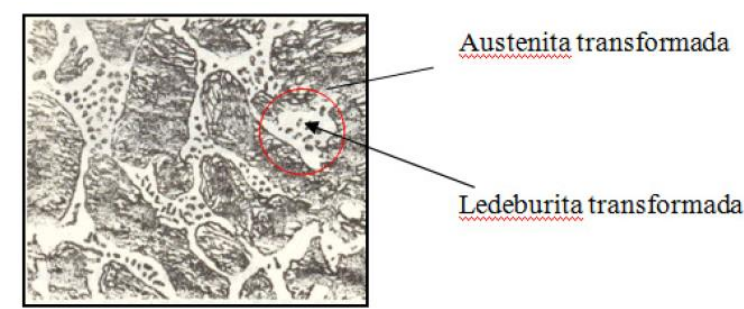
***La difusión molecular**, a menudo llamada simplemente difusión, es el movimiento térmico de todas las partículas (líquido o gas) a temperaturas por encima del cero absoluto. **La difusión explica el flujo neto de moléculas de**



una región de mayor concentración a una de menor concentración.
La velocidad de difusión aumenta con el aumento de la temperatura y con el aumento del gradiente de concentración

Al llegar a la **temperatura eutéctica: 1145°C**, el líquido remanente con composición **4,3% C** comienza su solidificación en forma eutéctica (Yuxtaposición de laminas de **austenita 1,7%C** y **cementita Fe₃C 6,67%C**)

Por lo tanto tenemos cristales primarios de austenita [Se presenta en forma dendrítica] en una matriz de eutéctico, el eutéctico se llama **LEDEBURITA**.



Luego, al seguir enfriando la aleación tanto la austenita como la LEDEBURITA (Eutectico) van perdiendo carbono debido a la disminución de solubilidad del carbono en hierro (Línea SE). **El carbono segrega en los bordes de grano de la austenita favoreciendo el crecimiento de cementita.**

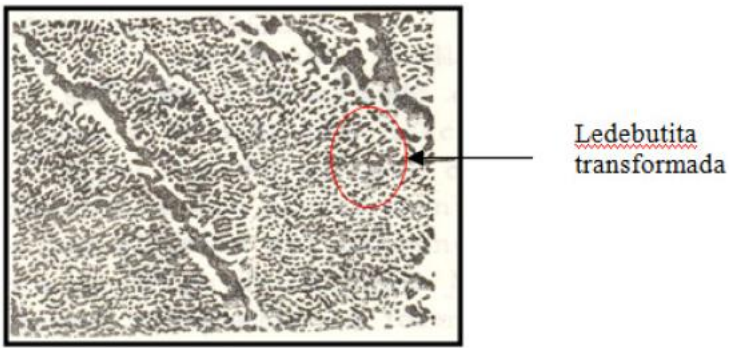
Finalmente, al pasar la línea SK, tendremos cementita segregada en los bordes de grano de la austenita, y la austenita se transformará en perlita (Ferrita y cementita de forma laminar) y la Ledeburita estará compuesta por cementita y lagunas de perlita, a esta nueva ledeburita se la denomina **LEDEBURITA TRANSFORMADA**. Por esta razón se observa que la perlita está totalmente rodeada por cementita.

Se dice que forma brazos dendríticos de perlita en una matriz de ledeburita transformada.

Caso 2: Aleación con 4,3%C. Fundición EUTECTICA

Si enfriamos la aleación hasta llegar al punto C (1145°C) Solidifica todo el líquido en forma de **Ledeburita [Laminas de Cementita y Austenita]**. Luego al seguir disminuyendo la temperatura, la solubilidad del carbono en el hierro disminuye y la austenita va perdiendo carbono favoreciendo el segregado de cementita en los bordes de grano de la austenita.

Luego, al cruzar la línea SK, la austenita se convierte en perlita y tendremos Ledeburita transformada pura.



Caso 3: Aleación con 5,5%C. Fundición Hipereutectica

Este caso es particular ya que no es igual a los casos anteriores. Esta vez al cruzar la línea de solidus se comenzarán a formar **cristales largos** de cementita denominada **CEMENTITA PRIMARIA [6,67C]**.

Luego, al llegar a 1145°C, el líquido remanente se convierte en Ledeburita [Laminas de austenita y cementita] La ledeburita en este caso difiere un poco de la ledeburita pura debido a que las láminas de cementita destacan mucho más. Luego, esta ledeburita se convertirá en ledeburita transformada.

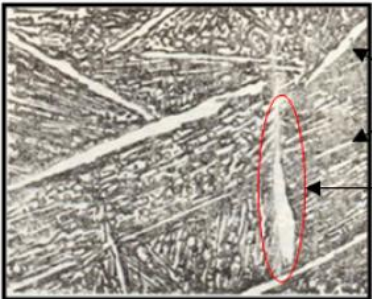
En esta aleación tendremos cristales grandes y duros de cementita rodeados de una matriz de ledeburita transformada.

Este tipo de aleaciones presenta una gran dureza debido a la cementita pero son muy frágiles debido a la gran área de borde de grano con una interfaz con baja cohesión.

Como bien sabemos, los intermetálicos presentan una excelente resistencia a la abrasión, por lo tanto las fundiciones blancas con alto contenido en cementita suelen ser valoradas por su resistencia a la abrasión y se utilizan en estado “Bruto directo de colada” Debido a la dificultad que presenta el mecanizado de este material.

También se utilizan técnicas de enfriado rápido superficial para obtener una superficie de fundición blanca y un interior de fundición gris.

Diagrama Metaestable con estructuras:



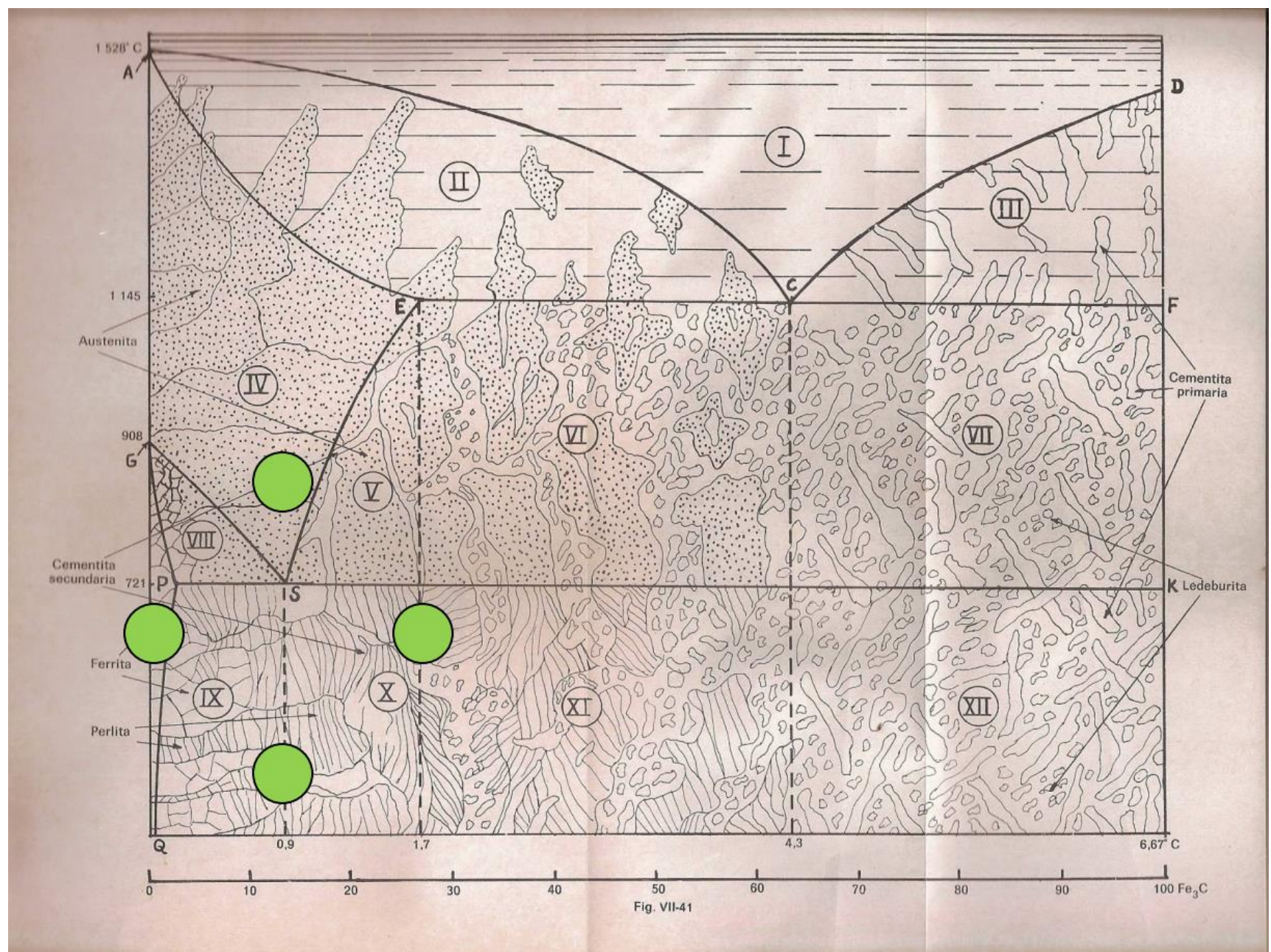


DIAGRAMA DE EQUILIBRIO ESTABLE [Hierro – Grafito] FUNDICION GRIS

La fundición gris que se consigue mediante este diagrama corresponde a la aleación más usada en la industria por su **bajo costo** y por sus **propiedades mecánicas**. Esto se debe a que, a diferencia de una fundición blanca, posee una buena maquinabilidad y una **dureza brinell entre 150 y 250**, además, debido a su tenacidad tiene una buena absorción de vibraciones.

Analizaremos 3 casos para entender mejor la solidificación:

Caso 1: Fundición gris hipoeutectica [3%C]:

Suponemos que tenemos una aleación líquida de concentración 3%C sobre la línea liquidus, en el punto M. En este punto comenzará la solidificación formando dendritas de austenita. Al ir enfriando la aleación los dendritas de austenita tendrán distintas composiciones de Carbono, al igual que en las fundiciones blancas.

Pero a diferencia de las fundiciones blancas, las fundiciones grises se enfrían a una velocidad muy lenta.

Como dijimos previamente el enfriamiento lento provoca que los porcentajes de carbono de los dendritas precipitados se equilibre debido a que el carbono ***DIFUNDE** a estas temperaturas.

***La difusión molecular**, a menudo llamada simplemente difusión, es el movimiento térmico de todas las partículas (líquido o gas) a temperaturas por encima del cero absoluto. **La difusión explica el flujo neto de moléculas de una región de mayor concentración a una de menor concentración.**

Por lo tanto el líquido remanente variará su composición a lo largo de la línea MC'.

Al llegar a la línea del punto C' precipitará todo el líquido remanente en forma de eutéctico ledeburita.

Por lo tanto tendremos Ledeburita y austenita. La austenita homogeniza por difusión pero al igual que con las fundiciones blancas irá perdiendo carbono por disminución de solubilidad, pero esta vez el carbono formará **laminas de grafito**.

Además el Si actúa como agente grafitizante y provoca la **descomposición** de la cementita Fe₃C en ferrita y grafito que va destinado hacia las laminas de grafito existentes. Las laminas de ferrita suelen aparecer al costado de las laminas de grafito.

Luego, al cruzar la línea SK, la austenita remanente se convierte en perlita [Laminas de ferrita y cementita] y la ledeburita se convierte en ledeburita transformada [Perlita y cementita].

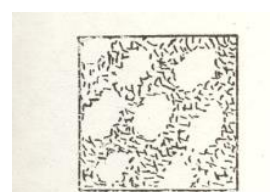
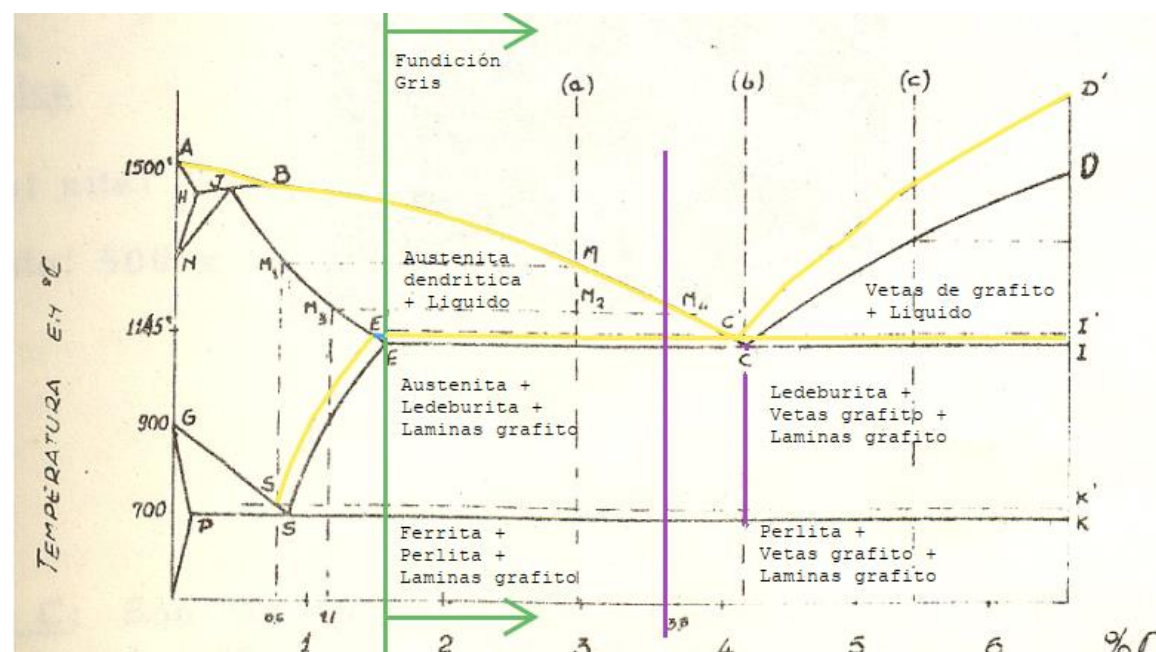


Fig. 21.- Tipo D
Vetas cortas distribuidas en los espacios interdendríticos. Orientación random.

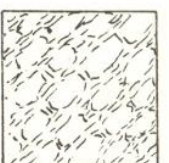


Fig. 22.- Tipo E
Alojadas en espacios interdendríticos. Orientación preferida.

Finalmente esta fundición que contiene **perlita, algo de ferrita y grafito** se la denomina **fundición gris de fondo hipoeutectoide**. Esto se debe a su parecido con el acero hipoeutectoide pero con grafito.

En algunos casos la segregación de carbono produce cementita en vez de laminas de grafito, esto depende de la velocidad de enfriamiento.

Debido a las impurezas puede contener **steadita**. La steadita es eutectico fosforoso [Fosfuro de hierro] combinado con ferrita.

Se diferencia de la ferrita pura debido a que esta forma granos totalmente blancos sin “puntos” o globulos

Caso 2: Fundición gris eutectica [4,3%C]:

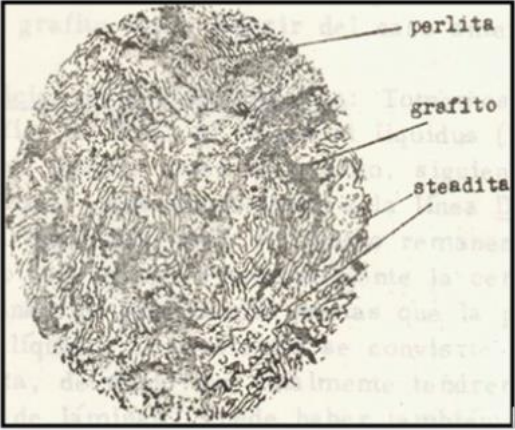


Fig. 14: Fundición Gris con matriz perlítico- ferrítica. Ataque: nital. Aumento: 800x

Si bien teóricamente decimos que la composición es de 4,3%C esto no ocurre en la práctica ya que **La presencia de Si hace disminuir el contenido en 0,3% de C del eutectico por cada 1% de Si.**

Por lo tanto podemos construir un diagrama de la variación de carbono en el eutectico en función del contenido de Si en fundiciones grises [Solo en grises porque el Si es un agente grafitizante]

Por lo tanto, teniendo en cuenta esto suponemos una aleación con composición eutéctica (De C y de Si).

Al enfriarla llegaremos al punto C donde todo el líquido precipitara en forma de ledeburita eutectico (Austenita y cementita). La cementita de esta ledeburita se ira descomponiendo en forma de grafito, mientras que la austenita difunde su carbono segregando láminas de vetas finas de grafito.

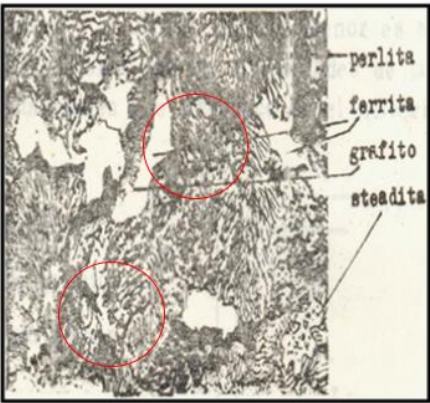


Fig. 13: Fundición Gris con matriz perlita. Ataque: nital. Aumento: 500x

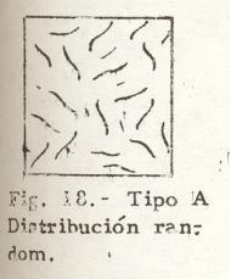
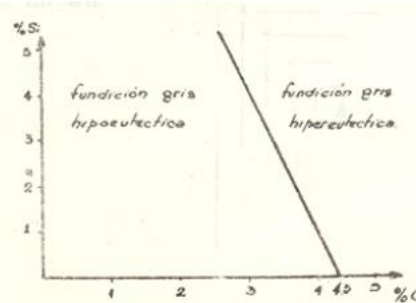


Fig. 18.- Tipo A Distribución random.

Luego, a la temperatura eutectoide (721°C), la austenita se convierte en perlita (Ferrita y cementita) Por lo tanto, finalmente tendremos **Perlita y Grafito**.

Se los denomina **fundición gris de fondo eutectoide**. Además, Pueden aparecer vetas de ferrita y steadita pero serán muy pequeñas en comparación del caso anterior.

Caso 3: Fundición hipereutectica [5,5%]:

Esta vez al enfriar y llegar a la línea liquidus comenzara comenzaran a precipitar grandes vetas de grafito.

Luego, al llegar a la temperatura eutéctica, el líquido remanente solidificara en forma de ledeburita [Austenita + Cementita]. Posteriormente, al igual que en los casos anteriores, la cementita comienza su descomposición y aparece láminas de grafito cortas, puede aparecer ferrita debido cierta decomposicion de perlita.

Finalmente, a 721°C, la austenita se difunde y se convierte en perlita al igual que en los casos anteriores.

Puede haber ferrita y steadita pero en menor composición.

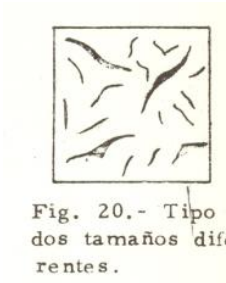
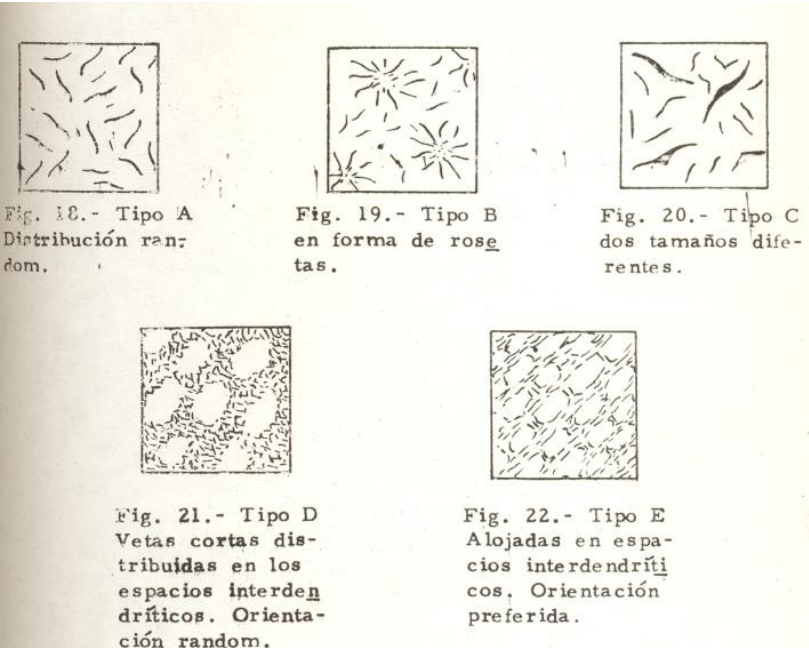


Fig. 20.- Tipo C dos tamaños diferentes.

Grafito: Formas y tamaño.

Según la norma ASTM, **cuanto menor es el tamaño y más uniforme es la distribución de las vetas de grafito mejores serán las propiedades de la fundición**. Esto se debe a que gracias a esto las discontinuidades en el material son menores.

Tipos de grafito según su forma y distribución:



Las fundiciones grises hipereutéticas corresponden al tipo C.

En las fundiciones grises hipoeutéticas la concentración de carbono es baja y se forman grandes dendritos. Cuando el líquido alojado en estos espacios dendriticos debe solidificar en forma de eutéctico puede dar origen a los tipos de grafito D y E.

Cuando la aleación tiene concentraciones mas cercanas al eutéctico el tamaño de dendritos disminuye su tamaño y el liquido que precipitara será mucho mayor. En estas concentraciones se forma la distribución tipo A. Es muy apreciada por sus propiedades

Otros tipos de fundiciones:

Fundición atruchada: Cuando en una misma pieza se presentan partes de fundición gris y partes de fundición blanca, ésta se llama atruchada.

Fundición maleable: Esta aleación ha sido creada para superar **la fragilidad de las fundiciones comunes debido a la presencia de cementita** en las fundiciones blancas y a la presencia de las vetas de grafito en las fundiciones grises.

La fundición maleable se obtiene por un tratamiento térmico o térmico químico prolongado de una fundición blanca de composición química adecuada. Es un proceso costoso, pero las propiedades del material en cuanto a la resistencia a la tracción y a la corrosión, maquinabilidad, colabilidad, poca dilatación (crecimiento), etc. lo hacen

apto para sustituir a muchas piezas de acero.

Existen dos procesos de maleabilización:

• **Fundición maleable de corazón NEGRO.**

Esta fundición se trata mediante **grafitización** en el que toda la **cementita inclusive la de la perlita se convierte en ferrita y grafito** en forma de nódulos. Se obtiene un producto maleable, puesto que lo es la ferrita, y el grafito en forma de nódulos no compromete la cohesión de la pieza como lo hace en forma de vetas.

Se lo conoce con el nombre de **fundición maleable de corazón negro.**

Es muy importante la composición química del material base puesto que **debe solidificar blanco en todo su espesor y luego poder grafitizar durante el tratamiento térmico.**

La fundición **blanca base** debe tener:

Carbono combinado	2,2 – 2,8%
Silicio	0,70- 1,00%
Manganeso	0,25 – 0,35%
Azufre	0,03- 0,08%
Fósforo	Menos del 0,20%

Las piezas se rodean de un material inerte como sílice, cenizas, etc. y se colocan en cajas de fundición dentro de un horno.

Se sube lentamente la temperatura. La estructura del material está formada por **cementita y perlita**.

Al llegar a 721°C, la **perlita se transforma en austenita**.

Luego, al seguir aumentando la temperatura **esta austenita comienza a disolver cementita** hasta la saturación indicada por la curva S. E.

Llegado a 900°C se mantiene la temperatura constante durante muchas horas, incluso días, durante este periodo **la cementita se descompone poco a poco en grafito y austenita**. Durante el calentamiento la austenita ha ido disolviendo cementita de acuerdo a su curva de solubilidad S.E, pero el grafito es algo menos soluble en la austenita y por lo tanto solubilida según la curva S'E'. [Amarilla]

Asi, la austenita disuelve cementita pero también precipita algo de grafito. La austenita no se satura respecto a la cementita, por lo tanto se sigue disolviendo cementita y precipita grafito.

Luego, al disminuir la temperatura la solubilidad disminuye de acuerdo a la curva S'E' y por lo tanto, la austenita va segregando carbono de su seno en forma de nódulos de grafito.

Al llegar a 721° la austenita se transforma en perlita. En este punto la temperatura se mantiene prácticamente constante. Esto provoca que la perlita se descomponga en grafito (nódulos) y ferrita.

Diagrama de representación de temperatura en funcion del tiempo

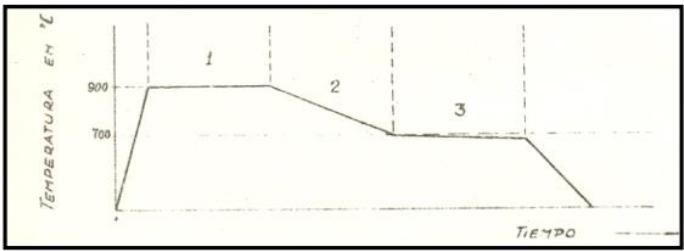


Fig 24

- 1) Grafitización de la cementita libre
- 2) Grafitización de la cementita que se segrega de la austenita
- 3) Grafitización de la cementita perteneciente a la perlita

En este material se alcanza una resistencia a la tracción de 35-40 kg/mm2 y una dureza Brinell de 100-150.

El proceso de maleabilización descrito dura mucho. Actualmente existen métodos más cortos

Por ejemplo: Agregando a los componentes químicos algún estabilizador de la cementita como el Cr. Calentando las piezas ya terminadas para disolver algo del grafito y luego templar y revenir.

• **Fundición maleable de corazón BLANCO**

Por **descarburación**, acá el carbono de la cementita y de la perlita se ha eliminado en la superficie de la pieza por oxidación. En este caso el carbono de la cementita y de la perlita se ha eliminado en la superficie de la pieza por oxidación. El carbono del interior difunde hacia el borde y en las piezas de poco espesor llega a descarburarse todo el material quedando solamente ferritita.

Se lo conoce con el nombre de **fundición maleable de corazón blanco.**

La composición química de la fundición base debe ser:

Carbono combinado	3,00 a 3,50 %
Silicio	0,50 a 0,80 %
Manganeso	0,10 a 0,40 %
Azufre	0,20 a 0,45 %
Fósforo	me nos de 1 O, 15 %

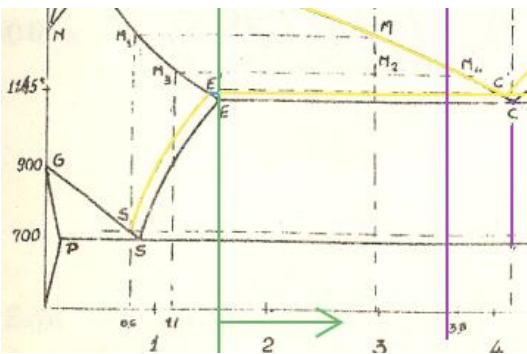
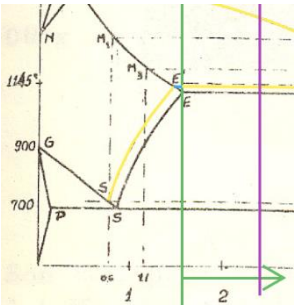
Las piezas de fundición blanca se colocan en cajas. Dentro de las cajas las piezas se rodean de un material capaz de ceder oxígeno como hematita (Fe2O3)

Las cajas se colocan en un horno y se sube la temperatura lentamente. Se mantiene la temperatura a 900-1000°C.

Se produce la descarburación de las piezas comenzando por el borde. El carbono del centro migra hacia la periferia.

En espesores mayores a 4mm queda cementita libre en el centro y que se grafitiza durante esta etapa.

Luego sigue un enfriamiento lento de 10°C/hora hasta llegar a 600°C y luego se enfria lentamente.



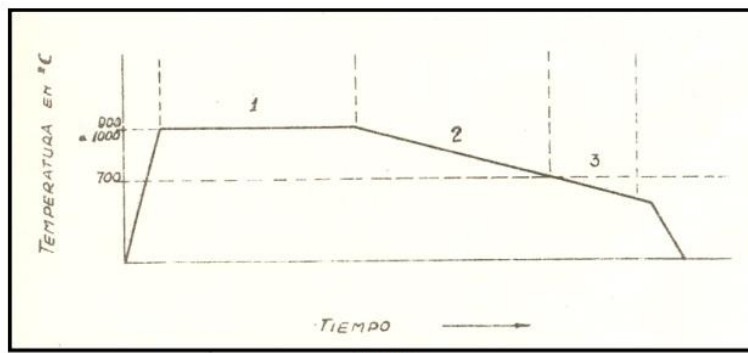


Fig 26

1. Descarburización intensa y grafitización de la cementita libre
2. Descarburización y grafitización de la cementita segregada por la austenita.
3. Formación de perlita en caso de haber quedado algo de carbono en solución.

La temperatura no debe exceder 1000°C para evitar un gran crecimiento de grano.

La forma de los nódulos de grafito es más compacta que la fundición de corazón blanco.

En espesores finos aparece ferrita en los bordes del grafito, mientras que en los materiales con espesores gruesos puede existir perlita junto a los nódulos de grafito.

Suele ser más dúctil que la fundición de corazón blanco.

La fundición maleable de corazón blanco no se temple pues carece del %C mínimo para producir un temple.

Fundición nodular:

Es posible obtener en estado de colada una fundición con el grafito en forma de esfera. Para ello se agrega al baño líquido de un aditivo llamado nodulizante (**Magnesio o cecio**) con el fin de alterar la tensión superficial una vez salido del cubilote. Esto sirve para retardar la grafitización y no producir una fundición blanca.

Luego, se agrega una grafitizante como por ejemplo el ferrosilicio, el cual hace precipitar al grafito.

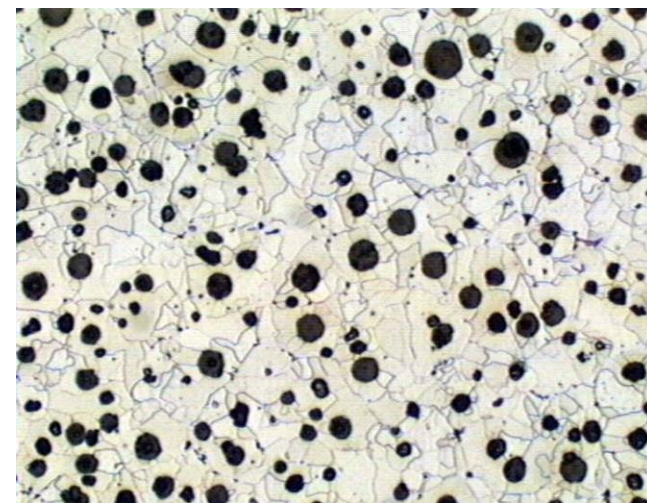
El grafito así obtenido presenta el aspecto de los nódulos que se encuentran en los espesores gruesos de la fundición maleable de corazón blanco.

Las propiedades mecánicas de una fundición nodular son superiores a la de una fundición gris convencional debido a que disminuye las discontinuidades en el material.

Se dice que es un tipo de fundición maleable de corazón negro.

Además, puede recocerse y templarse.

AGREGAR LOS PASOS PARA REALIZAR UNA METALOGRAFIA.



Clasificación de aceros:

El objetivo de esta unidad es conocer los conceptos básicos para la clasificación y el reconocimiento de los aceros que son de uso común en la industria. Por ejemplo: La serie 300 de la norma AISI/SAE indica que se trata de un acero inoxidable de tipo austenítico resistente a la corrosión.

En Sudamérica estamos **habituados a utilizar la nomenclatura del sistema americano** y para referirnos a dicho sistema es necesario conocer varias instituciones que han clasificado y normalizado los aceros para la fabricación de diferentes productos en formas distintas. Entre dichas instituciones podemos encontrar:

- ASTM (American Society for Testing and Materials),
- AISI (American Iron and Steel Institute),
- ASME (American Society of Mechanical Engineers),
- SAE (Society of Automotive Engineers),
- ANSI (American National Standards Institute),
- ACI (Alloy Casting Institute),
- AWS (American Welding Society).

La confusión más frecuente es la de no distinguir entre “Norma de Fabricación” y el “Grado” de un acero.

Cuando hablamos de **grado** hace referencia a la **norma ASTM**.

Dentro de dicha norma este acero puede ser de grado **A, B o C según su contenido en carbono**.

Además, también se puede dividir en clases en función de su tensión de rotura y el tamaño de la probeta utilizada y no en grados.

La designación de un mismo acero también cambia según se trate de un producto laminado, forjado o un producto fundido.

Laboratorio Grupo 1 – **Lunes Mecatronica 8:20hs** – Buscar puerta que dice “Itrend”, entrada por rodriguez y sobremonte

Buscar aplicaciones de acero y fundiciones. Una aplicación. Hay que saber cómo seleccionar un material

Bibliografía: Tratamientos térmicos “metallurgy?”

La profe ayuda con datos de algunos aceros conocidos.

Aceros inoxidables:

Los aceros inoxidables son aleaciones de bases de hierro, que contienen cromo, carbono y otros elementos, principalmente níquel, molibdeno, manganeso, silicio y titanio. El cromo, que se encuentra en un porcentaje no inferior al 10 %, le confiere la propiedad de ser mucho más resistente a la corrosión

Diagrama cromo-hierro

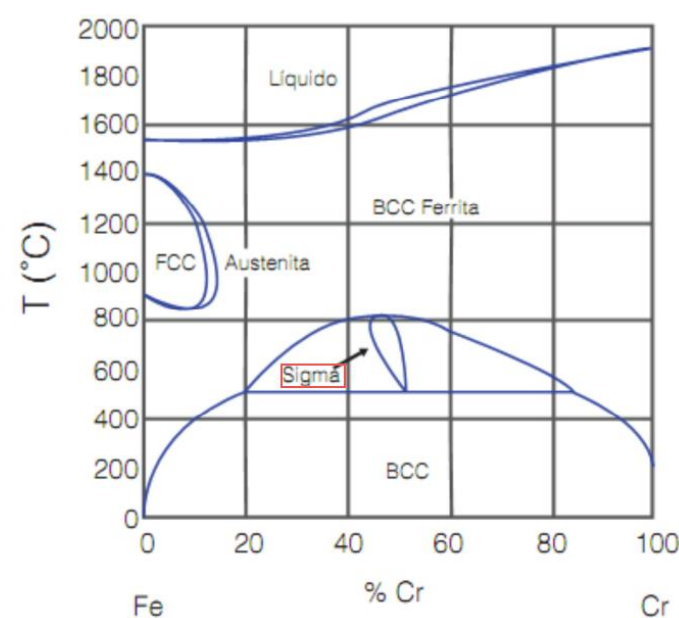
Las aleaciones hierro-cromo, con menos de 12% de cromo, transforman su estructura ferrítica a austenítica (fase gamma, γ) durante el calentamiento.

Por enfriamiento rápido hasta la temperatura ambiente, conseguiremos transformar la Austenita en Martensita (aceros inoxidables martensíticos).

Se habla de transformación martensítica cuando la transformación ocurre sin difusión y con una distorsión en la red cristalina, y de manera instantánea.

Las aleaciones de hierro con contenidos de cromo entre 12 y 13% forman a elevadas temperaturas estructuras bifásicas (α y γ) que enfriadas rápidamente a temperatura ambiente, presentarán una estructura formada por Ferrita y Martensita (aceros ferríticos-martensíticos).

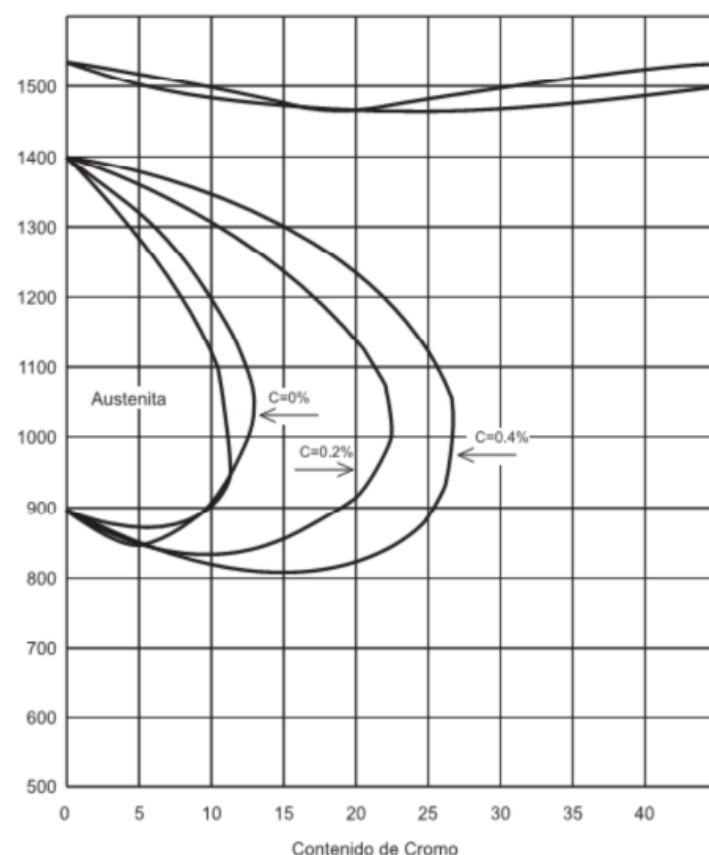
Las aleaciones hierro-cromo con más de 13% de Cr, mantienen su estructura ferrítica, desde temperatura ambiente hasta el punto de fusión. Durante el calentamiento, dicha estructura no atraviesa el campo austenítico (fase gamma), luego no puede austenizarse y tampoco puede templarse para formar Martensita



Influencia del carbono ampliando el bucle Gamma

Del diagrama de Influencia del carbono, se deduce lo siguiente:

- En el diagrama hierro-cromo, el bucle gamma se expande a la derecha al aumentar el contenido de carbono de la aleación. El carbono favorece la formación de fase gamma, es decir que estabiliza a la austenita.
- Si el carbono alcanza 0.6%, el límite del bucle gamma queda limitado para un cromo aproximado del 18%.** Por lo tanto, con carbono superior al 0.4% ya no se amplía el bucle y el exceso de carbono queda en el acero formando distintos tipos de carburos de hierro y cromo que dependen de la temperatura, del contenido de carbono y de cromo.
- Las aleaciones hierro-cromo-carbono, con contenidos de cromo superior a 27%Cr son ferríticas sin importar el contenido de carbono (Ya que supusimos un máximo de 0,4%C)
- Con porcentajes muy bajo de carbono (0,1% C) se pueden conseguir aceros ferríticos con al menos 17%Cr



Clasificación de los aceros inoxidables:

Los tres tipos principales de aceros inoxidables utilizados en la industria son las clases **Martensítica, Ferrítica y Austenítica**, nombres derivados de la fase predominante que se encuentra a temperatura ambiente.

Una cuarta clase, los tipos **PH (Precipitation Hardening)** o de Endurecimiento por Precipitación, ha alcanzado importancia en las últimas décadas.

En los últimos años, la clase **Dúplex** ha despertado gran interés.

Aceros Inoxidables Austeníticos

La clase austenítica contiene níquel como segundo elemento principal de aleación.

El Ni níquel se utiliza para suprimir la transformación de la Austenita y hacerla estable incluso a temperatura ambiente y más bajas.

Los metales de aporte serie 300 de acero inoxidable Austenítico (contenido de carbono de 0,08 a 0,12%, Cromo de 18 a 26 %, y Níquel de 3 a 20% y además puede contener Molibdeno) se utilizan en la mayor parte de las aplicaciones de soldadura ya que ellos son mucho más soldables que los aceros inoxidables ferríticos, martensíticos o de endurecimiento por precipitación.

Esta familia se divide en dos categorías:

Serie 300 AISI.- Aleaciones cromo-níquel

Serie 200 AISI.- Aleaciones cromo-manganeso-nitrógeno

Características básicas

- Elevada resistencia a la corrosión en una amplia gama de ambientes corrosivos, generalmente mejor que la de los aceros Martensíticos o Ferríticos, pero son vulnerables al **agrietamiento por corrosión bajo tensiones (SCC)** en ambientes de cloruro.
- Buenas soldabilidad
- Tiene una buena dureza, más duro que los ferríticos, conservando una ductilidad y maleabilidad superior a los ferríticos y martensíticos.
- Buena resistencia al impactom incluso a bajas temperaturas lo cual le da una zona de temperaturas de trabajo muy amplia
- Endurecibles por trabajado en frío
- Problemas a altas temperaturas debido a corrosión intergranular, además el punto de fusión es bajo si lo comparamos con un acero al carbono.
- Levemente margneticos

Útiles para partes de turbinas, usos a muy bajas temperaturas -200°C, usos arquitectónicos por su acabo y su resistencia.

Se utilizan mucho en intercambiadores de calor y en elementos de cocina.

El 304L está reducido en carbono para poder tener una mejor soldabilidad.

El 304 es el mas conocido en esta área debido a su gran uso en cocina, hospitales y equipos que resistan procesos de carga y soporten una atmosfera no tan inerte.

Aceros Inoxidables Ferríticos

Se obtienen con bajos contenidos de carbono, lo que el carbono favorece la formación de martensita y de carburos de cromo.

El contenido de cromo favorece la formación de ferríticos, pero no debe superar el 30% de cromo ya que sino favorece la fase sigma.

Observando los diagramas observamos que se ve favorecido por el bajo contenido de carbono, el bajo contenido de níquel y el gran contenido de cromo, aunque el mismo no debe superar el 30%.

Características básicas

- Elevada resistencia a la corrosión, superior a los martensíticos y a los ferríticos. Especialmente resistente a la Corrosion bajo tensión.
- Soldabilidad Media
- Menor tenacidad que los austeníticos. Mejoran la tenacidad mediante recocido.
- Buena resistencia al impacto, pero disminuye con la temperatura
- Moderadamente endurecibles por trabajado en frío
- Problemas a altas temperaturas debido a corrosión intergranular, además el punto de fusión es bajo si lo comparamos con un acero al carbono.
- Bastante magnéticos
- DESTACA POR EXCELENTE RESISTENCIA A LA CORROSION Y BAJO COSTO

Útiles para tubos, estampados o embutidos (Ollas, botellas o tanques), adornos (Debido que por ser relativamente blandos no producen mucho desgaste de herramientas)

Uno de los más populares es el 430 debido a su gran maquinabilidad

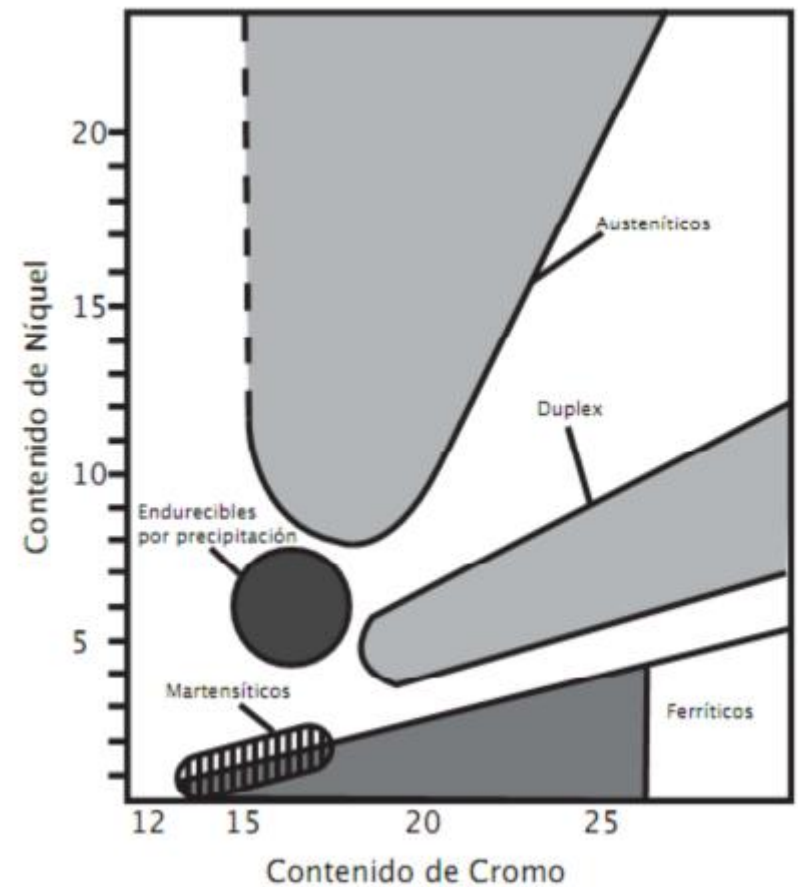
Aceros Inoxidables Martensíticos

Nos situamos en la zona austenítica del diagrama T-Cr, si aplicamos un recocido obtenemos ferrita, pero si aplicamos un enfriamiento rápido producimos una distorsión en la red fcc y obtenemos martensita.

No suelen contener más de 14% de Cr, pero como vimos previamente el contenido de carbono expande la “pancita” de la zona austenítica por lo que pueden tener gran contenido de carbono (1,2%C) para obtener la dureza que buscada. No suelen tener elementos de aleación como níquel.

Características básicas

- Moderada resistencia a la corrosión.
 - Baja soldabilidad, El gran contenido de carbono facilita la formación de carburos de cromo a elevadas temperaturas.
 - Excelente resistencia mecánica.
 - **Puede ser endurecido por el tratamiento térmico** y así alcanzar altos niveles de resistencia y dureza.
- Son endurecidos por aire cuando se enfrían rápidamente desde el rango de temperatura de austenizado (871°C-1010°C) en donde la fase austenítica es predominante. Ligeramente endurecibles por trabajo en frío.
- Son bastante magnéticos al igual que los aceros inoxidables ferríticos, por lo tanto **están sujetos al desvío del arco en la soldadura.**



Util especialmente para elementos que precisan de resistencia mecánica con resistencia a la corrosión, como carcasas y cuchillería.

Uno de los más populares es el 420, muy utilizado en cuchillería, cubiertos y moldes.

Aceros Inoxidables Endurecibles por Precipitación

Son aleaciones base hierro, con Cr entre 12% y 18% y Ni entre 4% y 9%, además de elementos aleantes que producen el endurecimiento por precipitación tales como Molibdeno (Mo), Titanio (Ti), Cobre (Cr), Aluminio (Al).

Se suelen suministrar a altas temperaturas en forma de solución sólida para poder maquinaarlos. Luego se endurecen a 500°C. Reune muy buenas características de cada uno de los aceros inoxidables.

- Moderada resistencia a la corrosión y soldables. (Similar a los austeníticos)
- Gran resistencia mecánica (Superior a los martensíticos)
- Magnéticos (similar a los ferríticos)

Útiles para ejes, intercambiadores de calor y tubos de sobrecalentamiento de calderas a vapor, Componentes aeroespaciales y marinos, Tanques de combustibles.

Aceros DUPLEX

Son aleaciones base hierro con Cr, Mo y una cantidad de estabilizadores de la Austenita como Ni y N para lograr el balance deseado entre las fases ferríticas y austeníticas de donde deriva su denominación dúplex. El N nitrógeno retarda la formación de carburos que otorgan fragilidad y el Mo otorga una excelente resistencia a la corrosión por picadura.

Destacan por tener una excelente ductilidad y tener una excelente resistencia a la corrosión bajo tensiones.

Suelen tener un gran contenido de cromo, desde 15% hasta 29%

Mientras que poseen entre 4 y 9%Ni

La aleación dúplex más utilizada es la 2205. Destaca por mejorar la resistencia a la tracción de un similar (304) y por aumentar la resistencia a la corrosión por tensiones y por fatiga. Además, cuenta con una excelente resistencia a la abrasión.

Ampliamente utilizado en ambiente petroquímico y marino.