

---

Curso OpenCourseWare

**QUÍMICA DE LOS MATERIALES**

Javier Pozuelo de Diego

---

**Tema 6. Materiales metálicos, cerámicos y polímeros (I)**



## Conceptos previos

### Sistema de Aleaciones binarias isomorfas

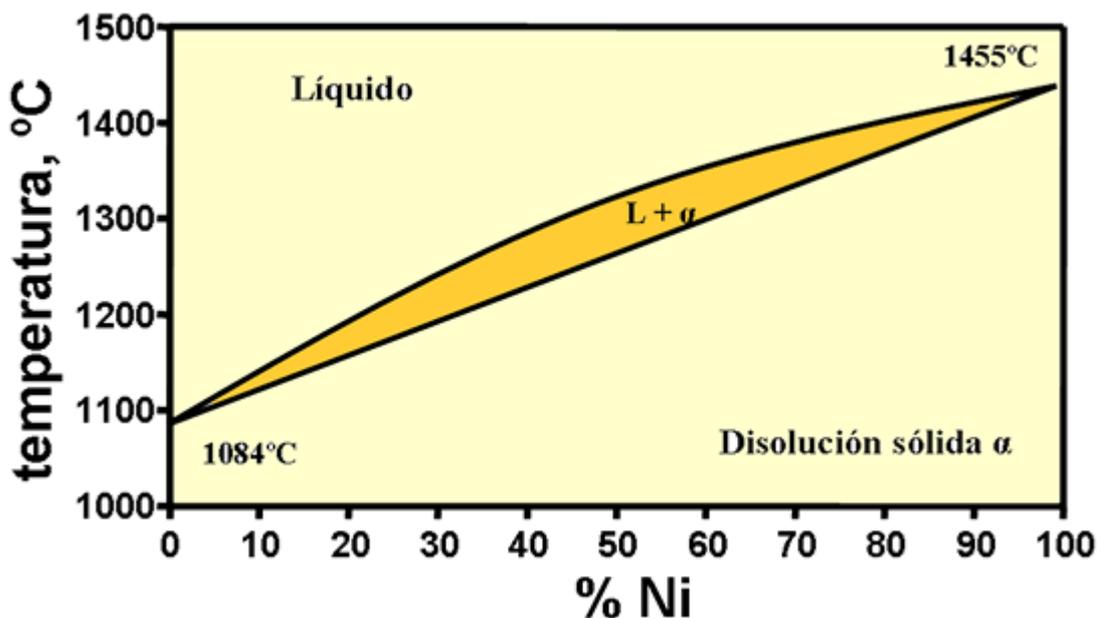
En estos sistemas solamente existen una única estructura cristalina para cualquier composición, debe cumplir alguna de las condiciones siguientes: **Regla de solubilidad de Hume-Rothery.**

**El tamaño de los átomos de cada uno de los dos elementos no debe diferir en más del 15%**

**Los elementos no deben formar compuestos entre sí, es decir, deben tener electronegatividades similares.**

**Los elementos deben tener la misma valencia**

**La estructura cristalina de cada elemento de la disolución sólida debe ser la misma.**



Información que se puede obtener de los diagramas de fases.

### Composición de cada fase

Donde corte la isoterma con cada línea

Ej: Aleación Cu-Ni a 1300°C

$w_o$  = composición inicial = 53%Ni

$w_L$  = composición líquido = 45%Ni

$w_S$  = composición sólido = 58%Ni

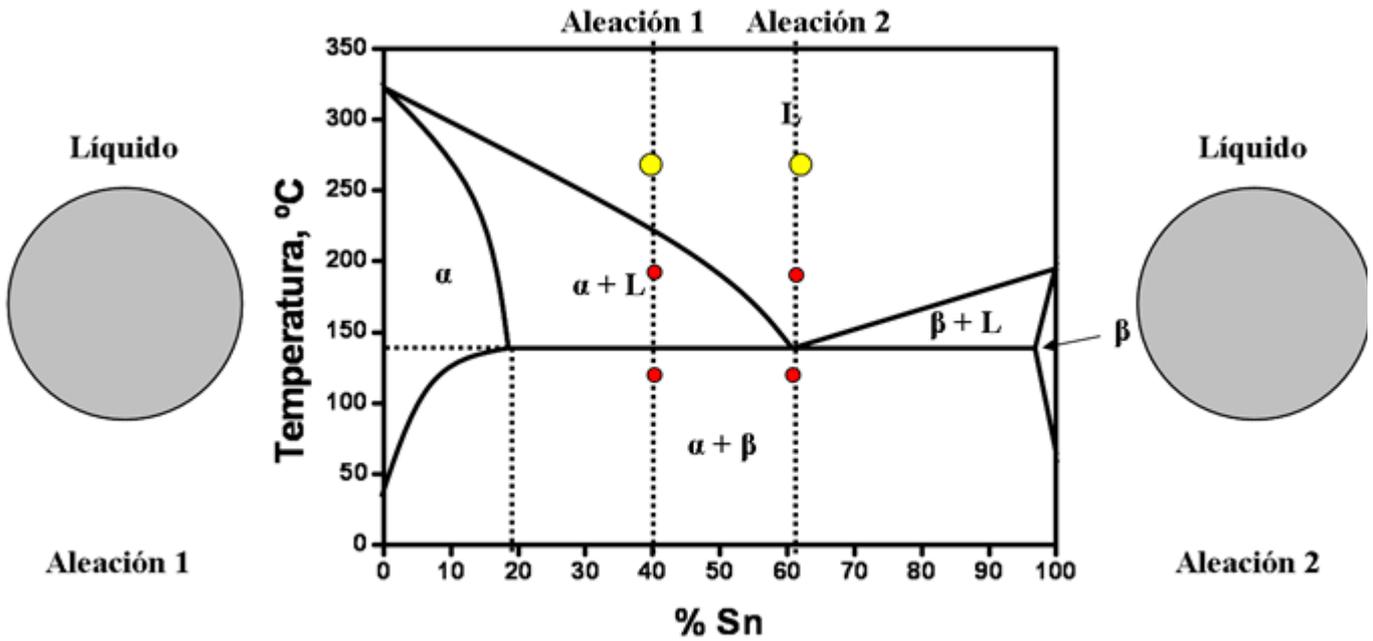
### Porcentaje de cada fase. Regla de la Palanca

$$X(\%)_{\text{líquido}} = \frac{S}{S+R} 100 = \frac{w_S - w_o}{w_S - w_L} 100 = 38.5\% \quad X(\%)_{\text{sólido}} = \frac{R}{S+R} 100 = \frac{w_o - w_L}{w_S - w_L} 100 = 61.5\%$$

### Conceptos básicos de los diagramas de fases en metales

#### Reacciones invariantes

Reacción	Ecuación	Diagrama de fases
Eutética	$L \xrightarrow{\text{Enfriamiento}} \alpha + \beta$	
Eutectoide	$\alpha \xrightarrow{\text{Enfriamiento}} \beta + \gamma$	
Peritética	$\alpha + L \xrightarrow{\text{Enfriamiento}} \beta$	
Peritectoide	$\alpha + \beta \xrightarrow{\text{Enfriamiento}} \gamma$	
Monotética	$L_1 \xrightarrow{\text{Enfriamiento}} \alpha + L_2$	



**Fases presentes:**

$\alpha, \beta$  = disoluciones sólidas terminales       $L$  = fase líquida

Solidus = sólido  $\leftrightarrow$  sólido + líquido      ( $\alpha \leftrightarrow \alpha + L$ ), ( $\beta \leftrightarrow \beta + L$ )

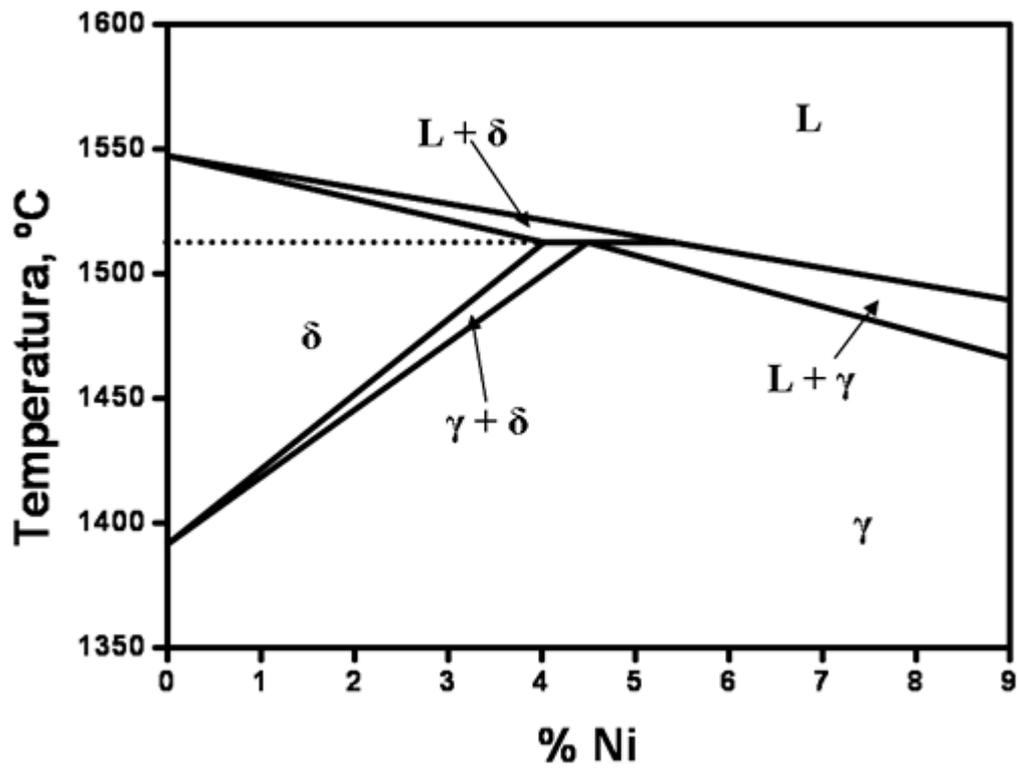
**Líneas:**

Liquidus = líquido  $\leftrightarrow$  sólido + líquido      ( $L \leftrightarrow \alpha + L$ ), ( $L \leftrightarrow \beta + L$ )

Solvus = sólido  $\leftrightarrow$  sólido + sólido      ( $\alpha \leftrightarrow \alpha + \beta$ ), ( $\beta \leftrightarrow \alpha + \beta$ )

**Reacciones:**

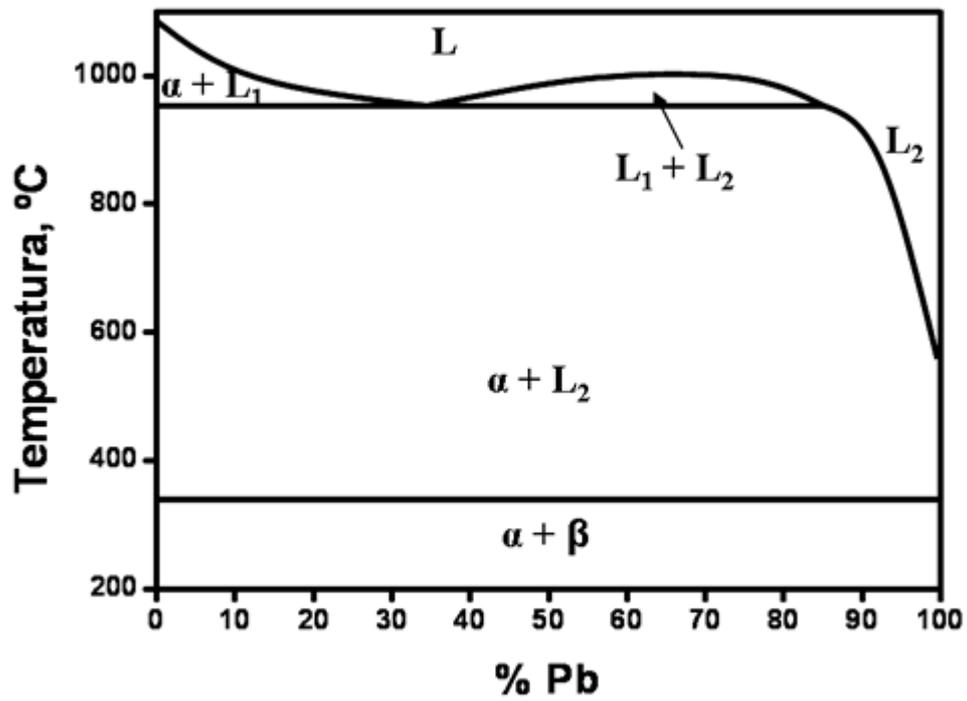
Eutéctica :       $L(61\%Sn) \xrightarrow{183^\circ C} \alpha(19.2\%Sn) + \beta(97.5\%Sn)$



*Fases presentes:*       $\delta, \gamma$  = disoluciones sólidas       $L$  = fase líquida

*Reacciones:*      Peritética:       $L(5.4\%Ni) + \delta(4.0\%Ni) \xrightarrow{1517^{\circ}C} \gamma(4.3\%Ni)$

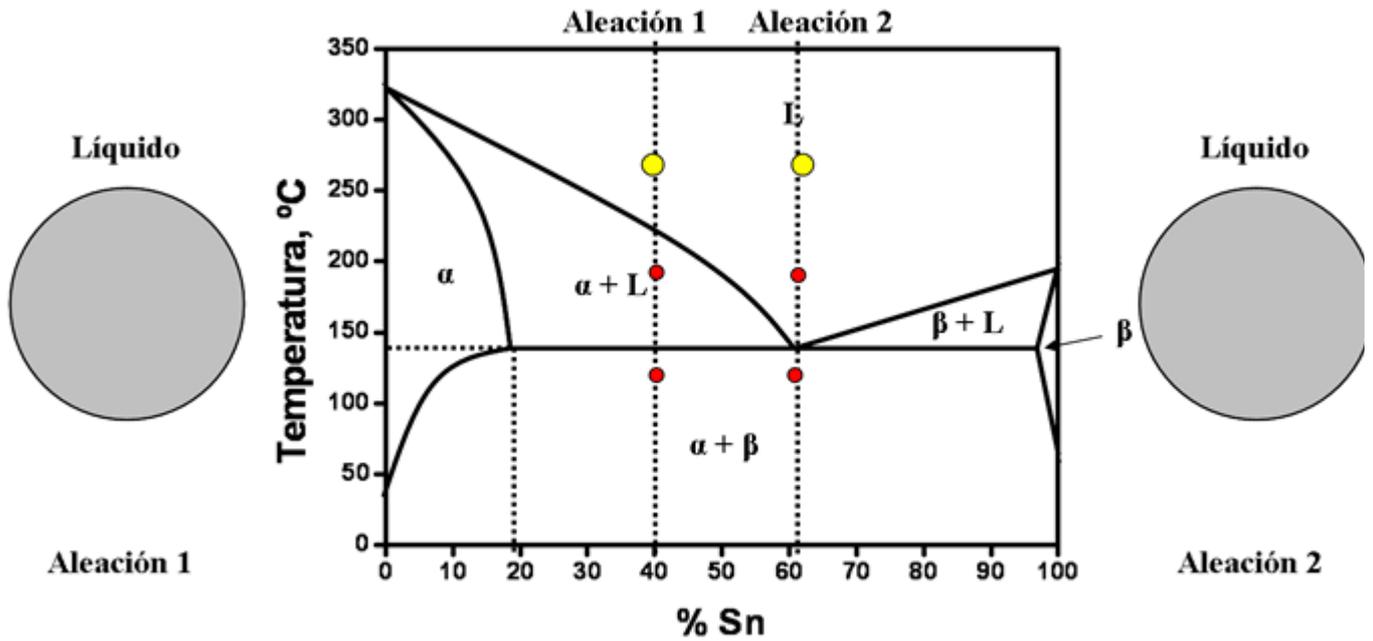
Sistemas binarios monotéticos. Ej: Cu-Pb



*Fases presentes:*       $\alpha$  = disolución sólidas       $L_1, L_2$  = fases líquidas

*Reacciones*      Monotética :     $L_1(36\%Pb) \xrightarrow{955^\circ C} \alpha(0\%Pb) + L_2(87\%Pb)$

Formación de microestructuras por enfriamiento lento: Ej: Sistema eutéctico, Pb-Sn



**Aleación 1:**  $C_0=61.9\% \text{Sn}$  (Punto  $E_2$  se transforma el líquido en una mezcla de dos fases sólidas en forma de láminas paralelas, esta microestructura se denomina **Perlita**)

**Aleación 4:**  $C_0=40\% \text{Sn}$  (<Punto eutéctico)

a) Fase líquida

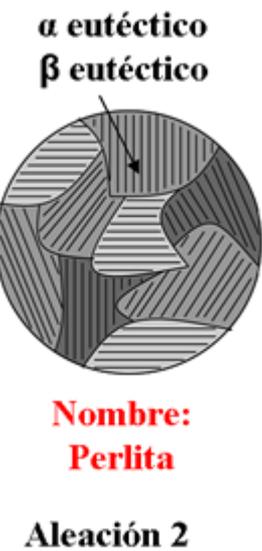
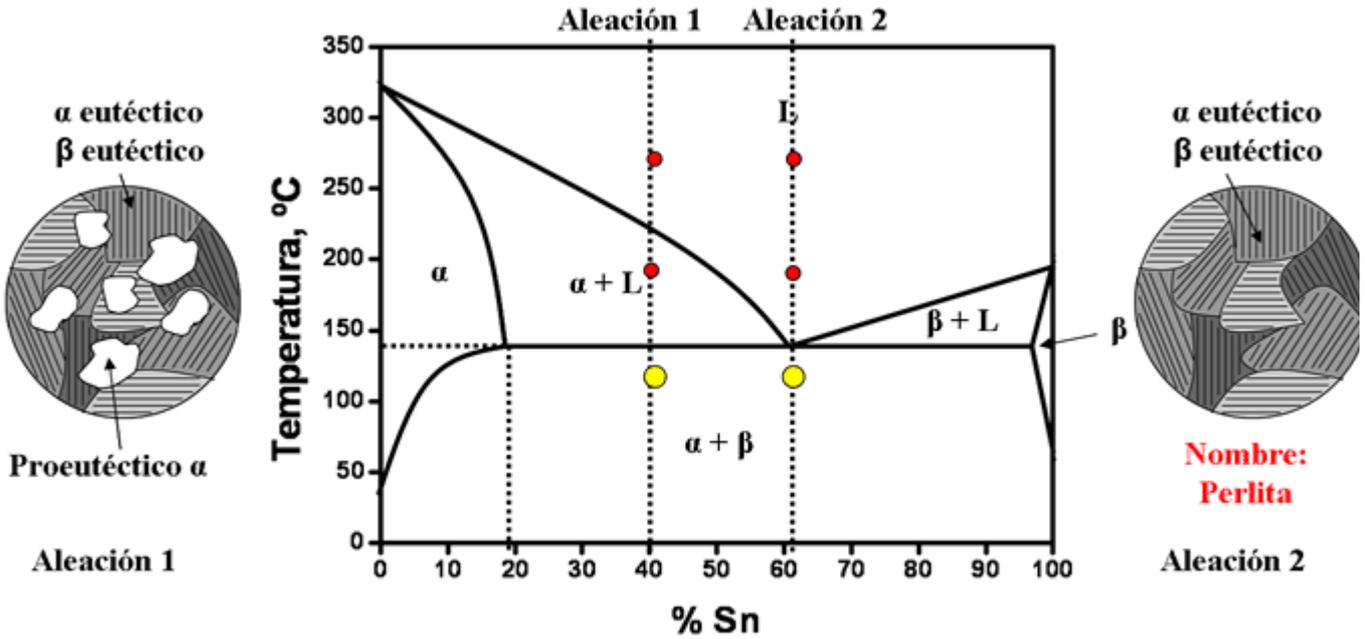
b) Comienza a aparecer fase alfa

c) Crecen los gránulos de fase alfa

d) Crecen los gránulos de fase alfa (fase alfa proeutéctica)

e) Reacción eutéctica, lo que quedaba de líquido se transforma en una mezcla de fases sólidas con forma de láminas paralelas (**Perlita=alfa eutéctica+beta eutéctica**)

Porcentaje de cada fase para una composición inicial de 40%Sn que se ha enfriado lentamente hasta una temperatura de 150°C de una aleación Pb-Sn



Se calcula el porcentaje total de fase alfa

$$\% \alpha_{(total)} = \frac{99.0 - 40.0}{99.0 - 12.2} 100 = 68\%$$

Se calcula el porcentaje de fase beta eutética

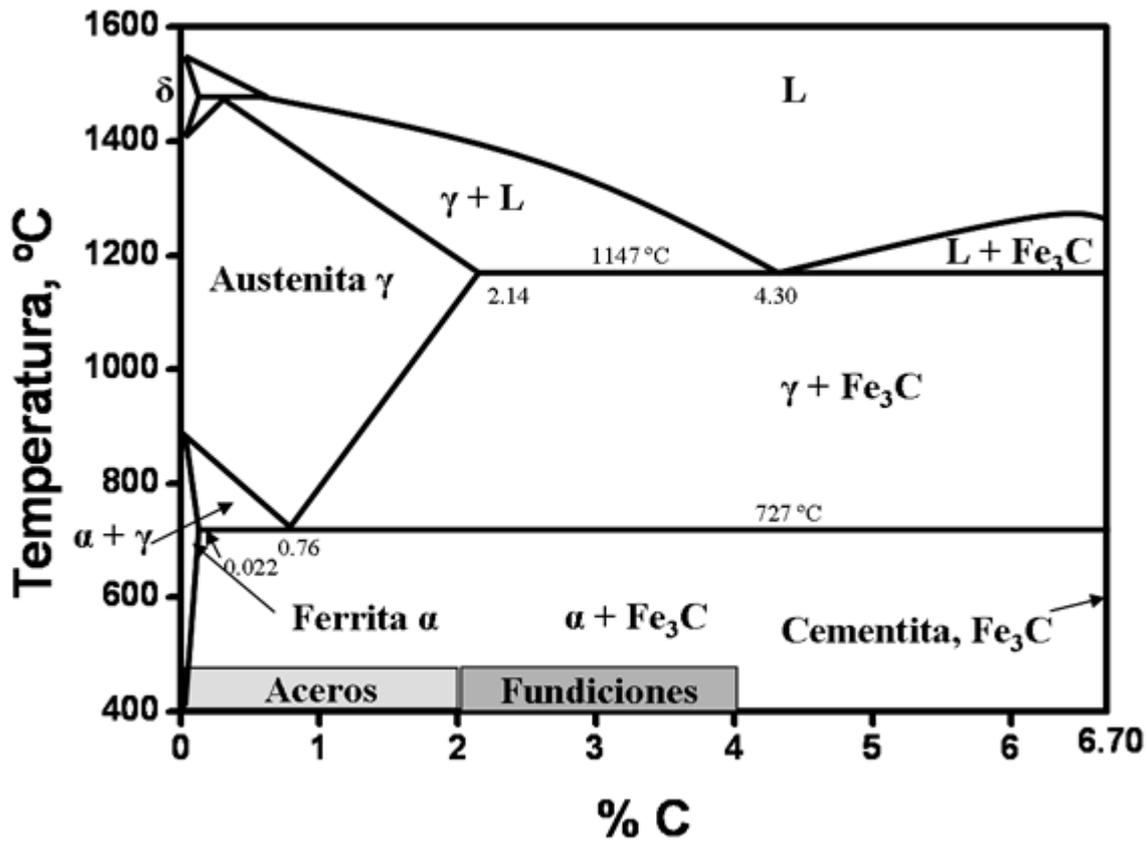
$$\% \beta_{eutética} = \frac{40.0 - 12.2}{99.0 - 12.2} 100 = 32\%$$

Se calcula el porcentaje fase alfa formada antes de la R.Eutética

$$\% \alpha_{proeutética} = \frac{61.9 - 40.0}{61.9 - 19.2} 100 = 51.3\%$$

Se calcula el porcentaje de fase alfa eutética

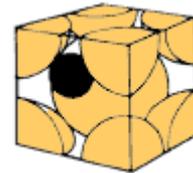
$$\% \alpha_{eutética} = 68\% - 51.3\% = 16.7\%$$



Fases sólidas:

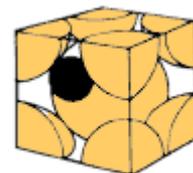
**Ferrita  $\alpha$**

Es una solución sólida intersticial en una red BCC



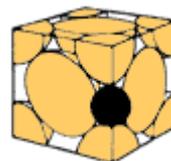
**Ferrita  $\delta$**

Es una solución sólida intersticial en una red BCC



**Austenita  $\gamma$**

Es una solución sólida intersticial en una red FCC



**Cementita  $\text{Fe}_3\text{C}$**

Es un compuesto intermetálico

## Reacciones Invariantes

**Reacción Peritética** Líquido(0.53%C) + Ferrita  $\delta$ (0.09%C)  $\xrightarrow{1493^{\circ}\text{C}}$  Austenita  $\gamma$ (0.17%C)

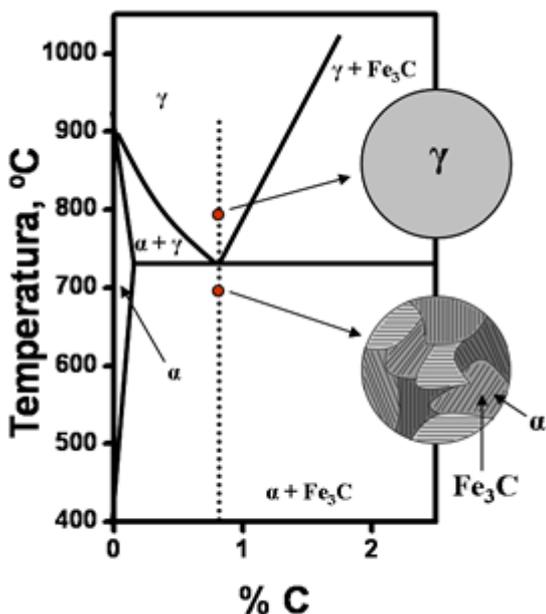
**Reacción Eutéctica** Líquido(4.30%C)  $\xrightarrow{1147^{\circ}\text{C}}$  Austenita  $\gamma$ (2.14%C) + Cementita  $\text{Fe}_3\text{C}$ (6.70%C)

**Reacción Eutectoide** Austenita  $\gamma$ (0.76%C)  $\xrightarrow{727^{\circ}\text{C}}$  Ferrita  $\alpha$ (0.022%C) + Cementita  $\text{Fe}_3\text{C}$ (6.70%C)

## Enfriamiento lento de Aceros al Carbono

### Aceros Eutectoides (0.76%C)

Cuando un **acero de composición eutectoide (0.76%C)** se calienta hasta la **austenización ( $T > 727^{\circ}\text{C}$ )** y se deja **enfriar lentamente** hasta una temperatura **inferior a la temperatura eutécticoide ( $T < 727^{\circ}\text{C}$ )** se produce una microestructura denominada **perlita** que está formada por ferrita-alfa y cementita dispuestas en láminas paralelas



a.- Austenita

b.- Perlita (ferrita alfa eutectoide + cementita eutectoide)

Porcentaje de cada fase en el punto b

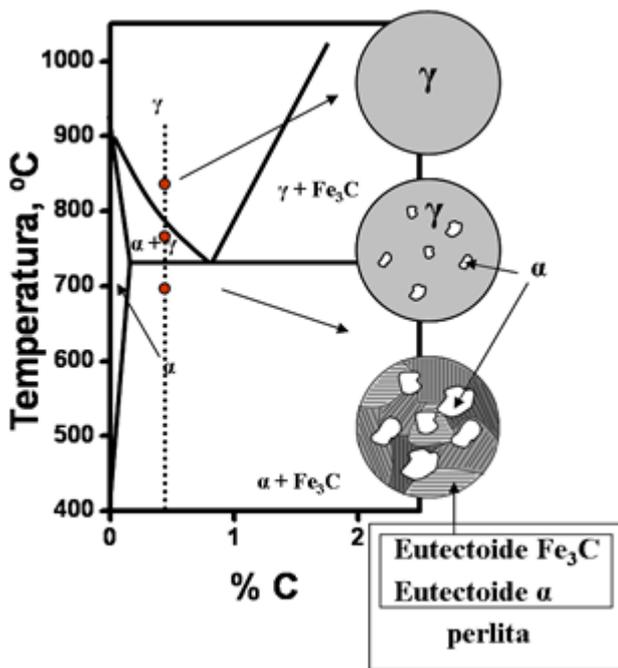
$$\% \text{Ferrita } \alpha_{\text{eutectoide}} = \frac{6.70 - 0.76}{6.70 - 0.02} 100 = 88.9\%$$

$$\% \text{Cementita}_{\text{eutectoide}} = \frac{0.76 - 0.02}{6.70 - 0.02} 100 = 11.1\%$$

$$\% \text{Perlita} = \% \text{Ferrita } \alpha_{\text{eutectoide}} + \% \text{Cementita}_{\text{eutectoide}} = 100\%$$

Aceros Hipoeutectoides (<0.76%C)

Cuando un **acero de composición menor que la composición eutectoide (<0.76%C)** se calienta hasta la **austenización** y se deja **enfriar lentamente** hasta una temperatura **inferior a la temperatura eutécticoide (T<727°C)** se produce una microestructura compuesta por **ferrita alfa proeutectoide** (la que se formo antes de la reacción autectoide y por **perlita** que está formada por ferrita-alfa y cementita dispuestas en láminas paralelas



c) Austenita

d) Aparecen nódulos de ferrita alfa

e) La cantidad de ferrita alfa aumenta

f) Lo que quedaba de austenita se ha transformado en perlita

Porcentaje de cada fase en el punto f

$$\% \text{Ferrita } \alpha(\text{total}) = \frac{6.70 - 0.30}{6.70 - 0.02} 100 = 95.8\%$$

$$\% \text{cementita}_{\text{eutectoide}} = \frac{0.30 - 0.02}{6.70 - 0.02} 100 = 4.2\%$$

$$\% \text{Ferrita } \alpha_{\text{proeutectoide}} = \frac{0.76 - 0.30}{0.76 - 0.022} 100 = 62.3\%$$

$$\% \text{Ferrita } \alpha_{\text{eutectoide}} = 95.8 - 62.3 = 33.5\%$$

$$\% \text{Perlita} = \% \text{Ferrita } \alpha_{\text{eutectoide}} + \% \text{cementita}_{\text{eutectoide}} = 37.7\%$$

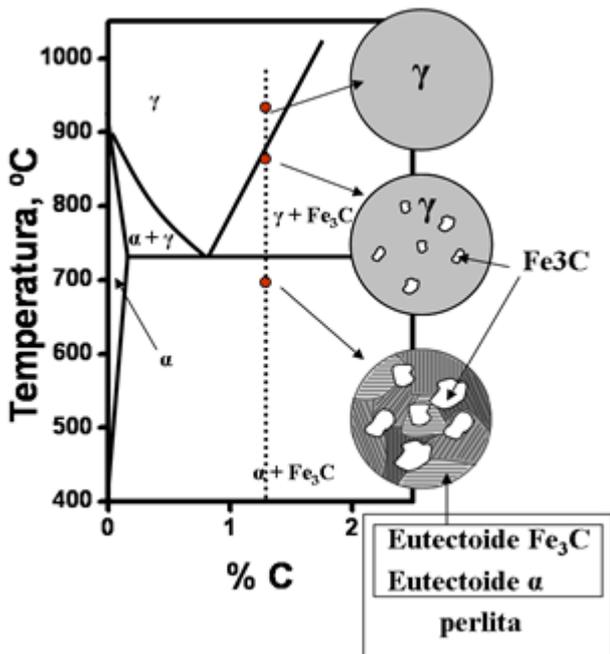
Aceros Hipereutectoides (>0.76%C)

Cuando un **acero de composición mayor que la composición eutectoide (>0.76%C)** se calienta hasta la **austenización** y se deja **enfriar lentamente** hasta una temperatura **inferior a la temperatura eutécticoide** se produce una microestructura compuesta por **cementita proeutectoide** y **perlita** que está formada por ferrita-alfa y cementita dispuestas en láminas paralelas.

g) Austenita

h) Aparecen nódulos de cementita

i) Lo que quedaba de austenita se ha transformado en perlita



Porcentaje de cada fase en el punto i

$$\% \text{Cementita}(\text{total}) = \frac{1.15 - 0.02}{6.70 - 0.02} 100 = 16.9\%$$

$$\% \text{Ferrita } \alpha_{\text{eutectoide}} = \frac{6.70 - 1.15}{6.70 - 0.02} 100 = 83.1\%$$

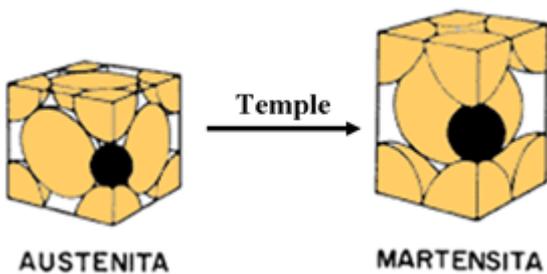
$$\% \text{Cementita}_{\text{preeutectoide}} = \frac{1.15 - 0.76}{6.70 - 0.76} 100 = 6.6\%$$

$$\% \text{Cementita}_{\text{eutectoide}} = 16.9 - 6.6 = 10.3\%$$

$$\% \text{Perlita} = \% \text{Ferrita } \alpha_{\text{eutectoide}} + \% \text{cementita}_{\text{eutectoide}} = 93.4\%$$

### Tratamientos térmicos de Aceros al carbono

Martensita



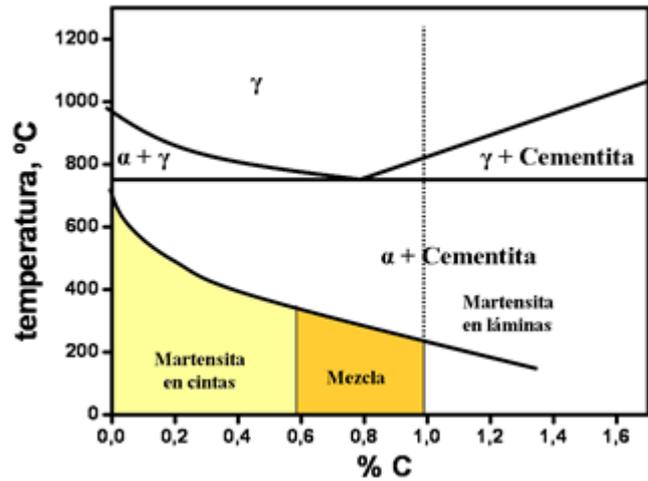
Se produce por un **enfriamiento rápido (temple) de austenita**, esta rapidez hace que no de tiempo a los átomos a reorganizarse en ferrita y cementita.

**La Martensita** en aceros al carbono es una **fase metaestable** formada por una disolución sólida intersticial sobresaturada en carbono en **hierro tetragonal centrado en el cuerpo**

### Microestructuras de la martensita.

Para **baja concentración** de carbono la martensita presenta dominios **de cintas** de diferentes orientaciones pero limitadas a todo el dominio

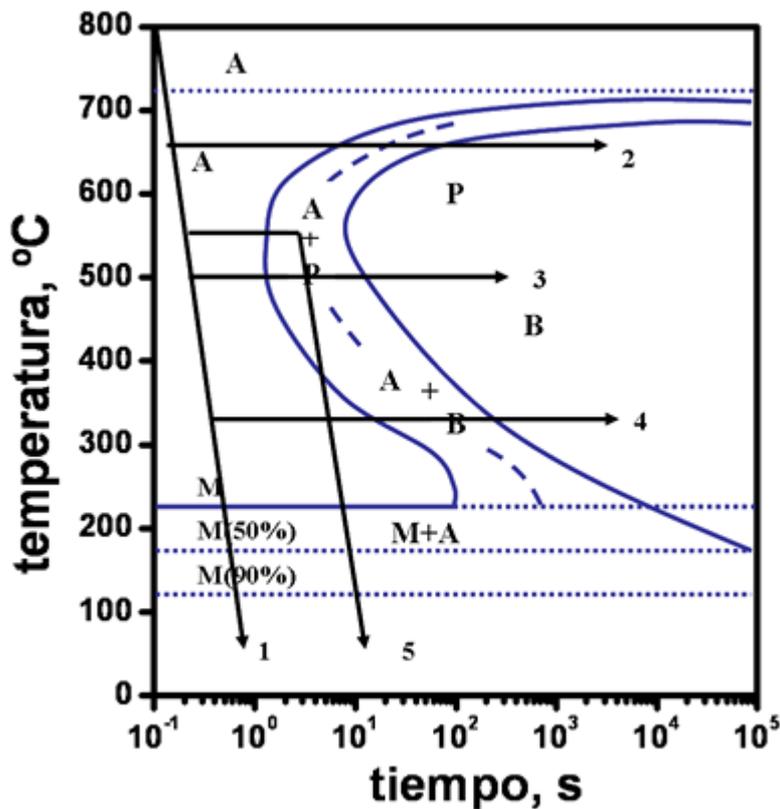
Si el **contenido en carbono es alto** la microestructura es en **placas**, a veces rodeadas de austenita retenida



### Descomposición isoterma de la austenita

Consiste en disminuir rápidamente la temperatura hasta un punto de interés, termostatar el sistema a esa temperatura y mirar las microestructuras cada cierto tiempo

- 1.- La microestructura que se obtiene es **Martensita**
- 2.- La microestructura que se obtiene es **perlita gruesa**
- 3.- La microestructura que se obtiene es **perlita fina**
- 4.- La microestructura que se obtiene es **un 50% perlita y 50% Martensita**



5.- La microestructura que se obtiene es **bainita**, está compuesta de ferrita alfa y cementita como la perlita pero no se colocan formando placas paralelas.

## Recocido y Normalizado de Aceros al carbono

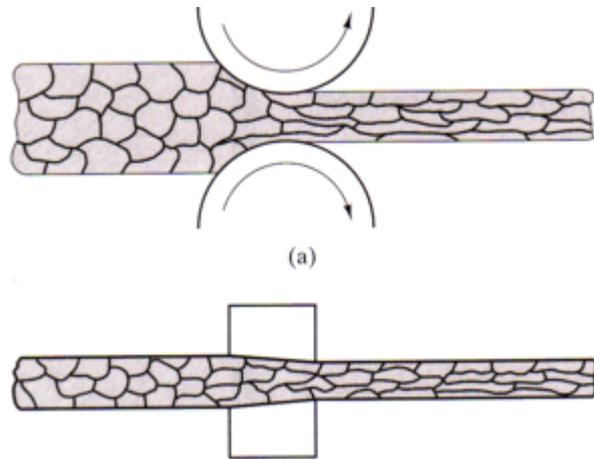
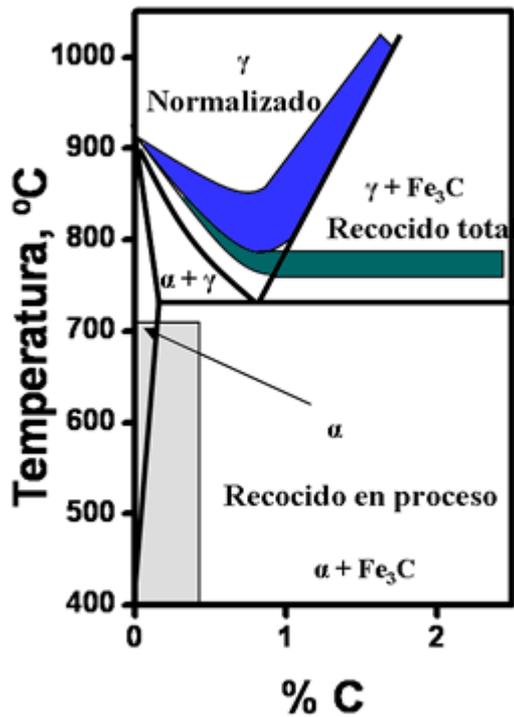
**Recocido Total:** Se calientan en la región austenítica los aceros hipoeutectoides y eutectoides, unos 40°C por encima del límite austenita-ferrita y se enfrían lentamente

Los hipereutectoides se calientan unos 40°C por encima de la reacción eutectoide

**Recocido en proceso:** consiste en eliminar tensiones a temperaturas comprendidas entre 550 y 650°C

Se reduce la dureza de una microestructura con acritud a temperatura elevada

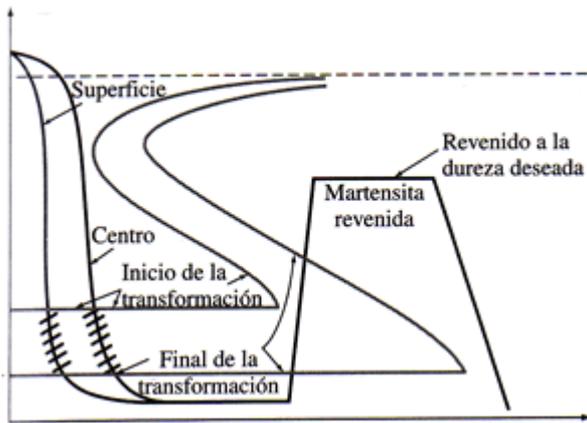
a) **Acritud:** Deformación de un material a temperaturas relativamente bajas. Se produce un endurecimiento por acritud.



- b) **Restauración:** Se pueden mover los granos para disminuir la concentración de defectos puntuales en el interior de los granos.
- c) **Recristalización:** Se nuclean nuevos granos equiaxiales y libres de tensiones
- d) **Crecimiento de grano:** El tamaño de los granos aumenta y produce una disminución de la dureza.

## Revenido de Aceros al Carbono

Es un proceso de calentamiento de un acero martensítico a temperaturas inferiores a la temperatura eutéctica para hacerlo más blando y dúctil



El acero primero se austeniza, después se enfría rápidamente para obtener martensita y por último se calienta hasta obtener la dureza deseada.

**Entre 20-200°C.** La Martensita presenta gran número de dislocaciones, estas posiciones son de menor energía y los átomos a esa temperatura se segregan a hacia esas zonas.

**Entre 200-300°C.** El precipitado adopta formas de barilla

**Entre 400-700°C.** Las varillas de Fe<sub>3</sub>C coalescen para formar partículas esferoidales (**Esferoidita**)

### Aceros de baja Aleación

Efecto de los Elementos de aleación en la temperatura eutectoide

Los elementos de aleación puede hacer que la temperatura eutectoide aumente o disminuya

**Estabilizantes de la Austenita o Austenizantes.**(Mn,Ni)

Aumentan la región austenítica. **Disminuye la temperatura** de la reacción **eutectoide**

**Estabilizantes de la Ferrita o ferritizantes.**(V, Mo, Ti)

Forman carburos. **Aumentan la temperatura** de la reacción **eutectoide**

### Templabilidad

La templabilidad de un acero se define como la propiedad que determina la profundidad y la distribución de la dureza provocada por el temple desde la condición austenítica

Los elementos de aleación hacen que la disminución de la dureza respecto al extremo donde se realiza el temple no sea tan pronunciada

## Fundiciones de Hierro

### Propiedades generales

Tienen una composición en carbono entre el 2 y el 4%. Funden con facilidad. Presentan un amplio intervalo de resisten y dureza y suelen ser fáciles de mecanizar pero son poco resistentes al impacto y poco dúctiles.

### Tipos de fundiciones

Fundición blanca

Fundición gris

Fundición dúctil

Fundición maleable

### Tipos de fundiciones

**Fundición Blanca.** Se produce por enfriamiento rápido. Su microestructura consiste en grandes cantidades de  $Fe_3C$  en una matriz perlítica

**Fundición gris.** Se produce por enfriamiento moderado o lento. Si el enfriamiento es moderado su microestructura consiste en **láminas de grafito** en una matriz perlítica. Si su enfriamiento es lento su microestructura consiste en **láminas de grafito** en una ferrítica

**Fundición Dúctil.** Se produce por enfriamiento moderado o lento. Si el enfriamiento es moderado su microestructura consiste en **nódulos de grafito** en una matriz perlítica. Si su enfriamiento es lento su microestructura consiste en **nódulos de grafito** en una matriz ferrítica

**Fundición Maleable.** Se produce a partir de la fundición blanca, se calienta hasta unos  $700^{\circ}C$  y posteriormente se enfría. Si el enfriamiento es rápido su microestructura consiste en **nódulos de grafito** en una matriz perlítica. Si su enfriamiento es lento su microestructura consiste en **nódulos de grafito** en una matriz ferrítica