



## Estudio y Ensayo de Materiales Industriales

# Diagramas de fase



# Contenido

- **Diagramas de fase de sustancias puras**
- **Diagramas de fase de aleaciones**
- **Regla de la palanca**
- **Solidificación de aleaciones fuera del equilibrio**
- **Transformación eutéctica y eutectoide**
- **Fases y microconstituyentes**
- **Diagrama Fe-C**

Bibliografía:

**Ciencia e Ingeniería de los Materiales**, Cuarta edición, International Thomson. **Donald R. Askeland, Pradeep P. Phulé.**

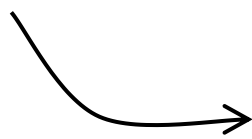
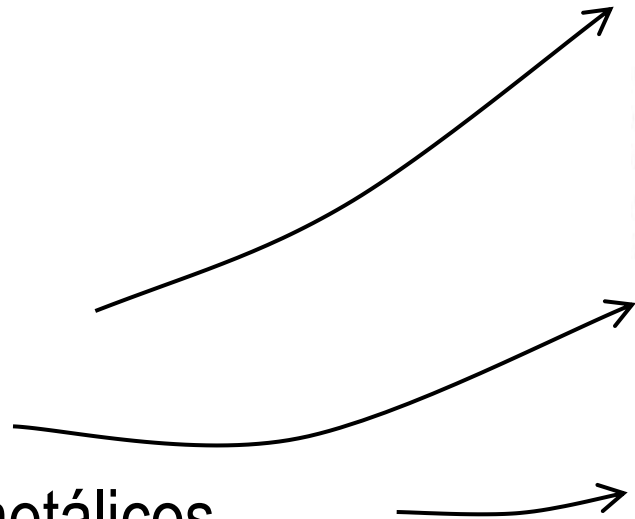
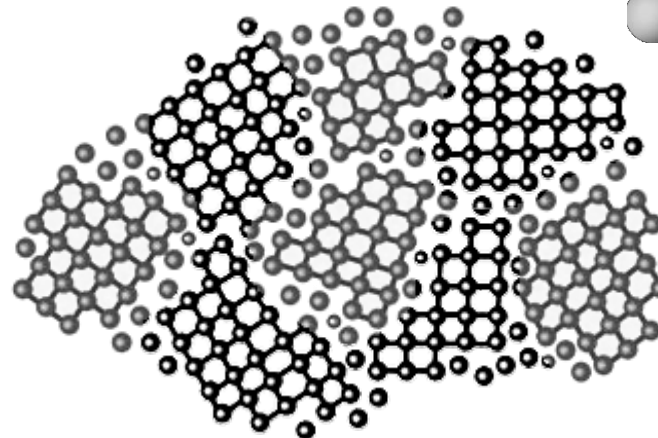
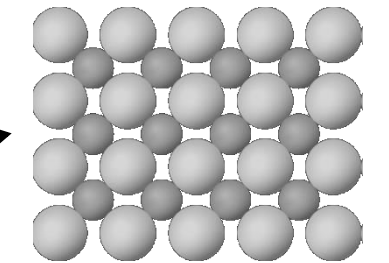
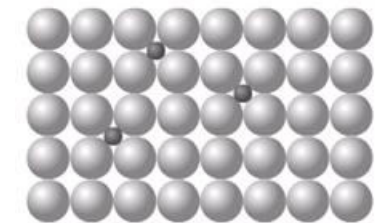
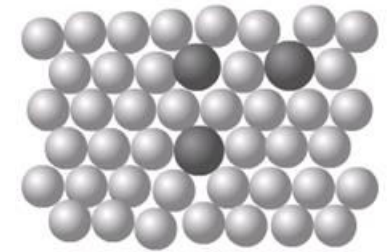
**Ciencia e Ingeniería de los Materiales**. Tercera edición, Mc Graw Hill. **William Smith.**

# Aleaciones

## Metales puros

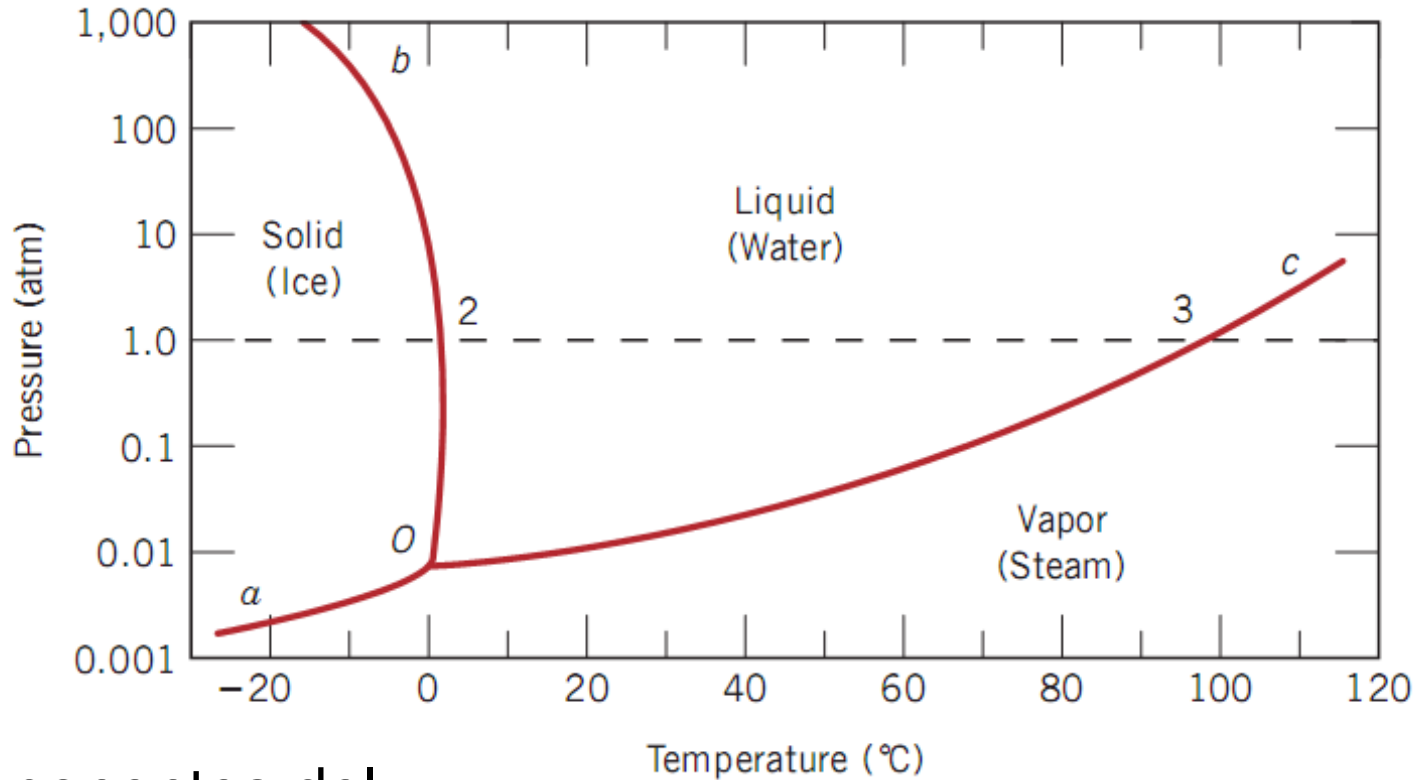
## Aleaciones:

- Solución sólida:
  - Sustitucionales
  - Intersticiales
- Compuestos intermetálicos
- Sistemas bifásicos





# Sustancia pura - Regla de Gibbs



Componentes del sistema

Fases

$$F = C + N - P$$

Grados de libertad

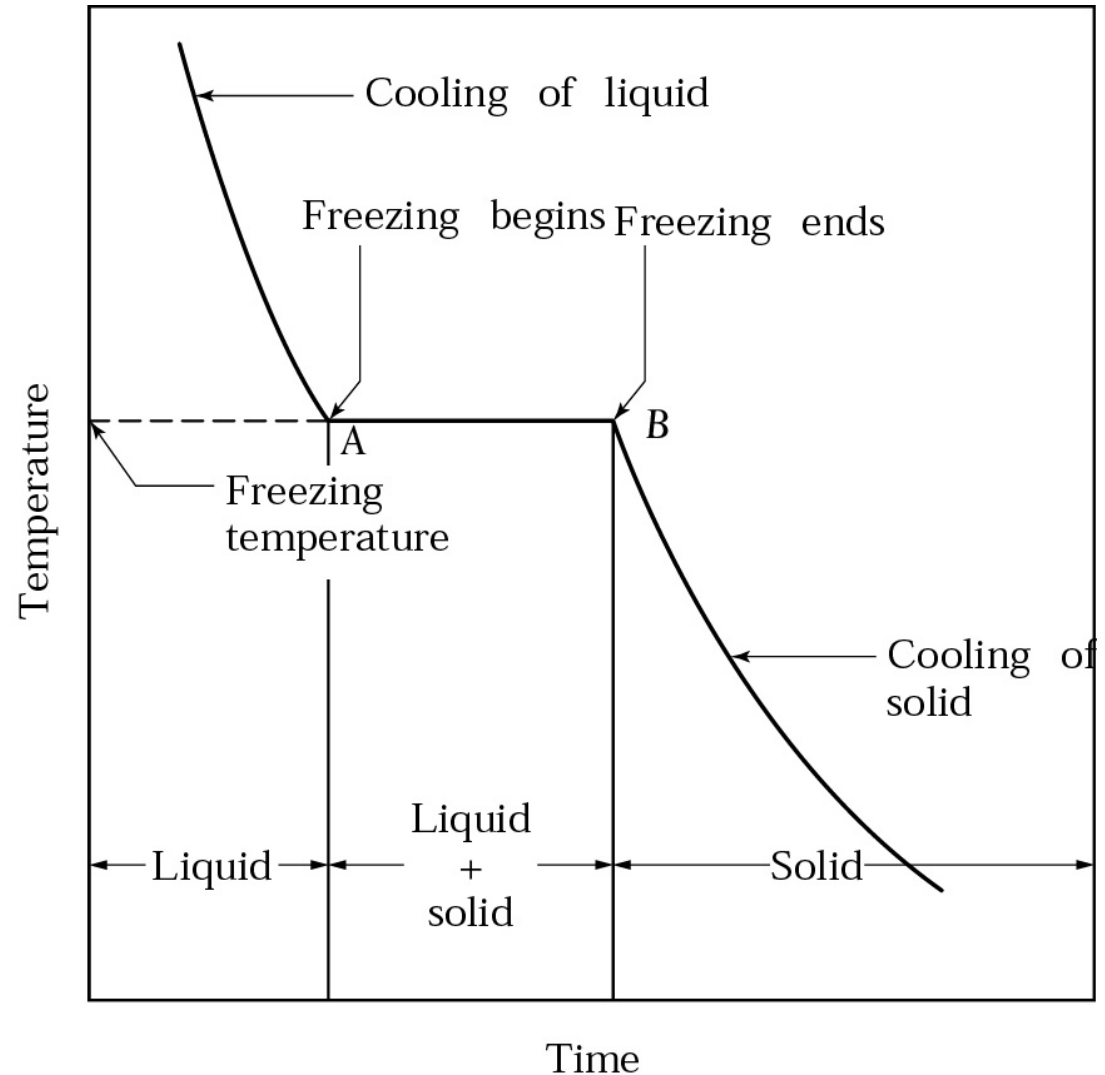
Variables no composicionales



# Curvas de enfriamiento

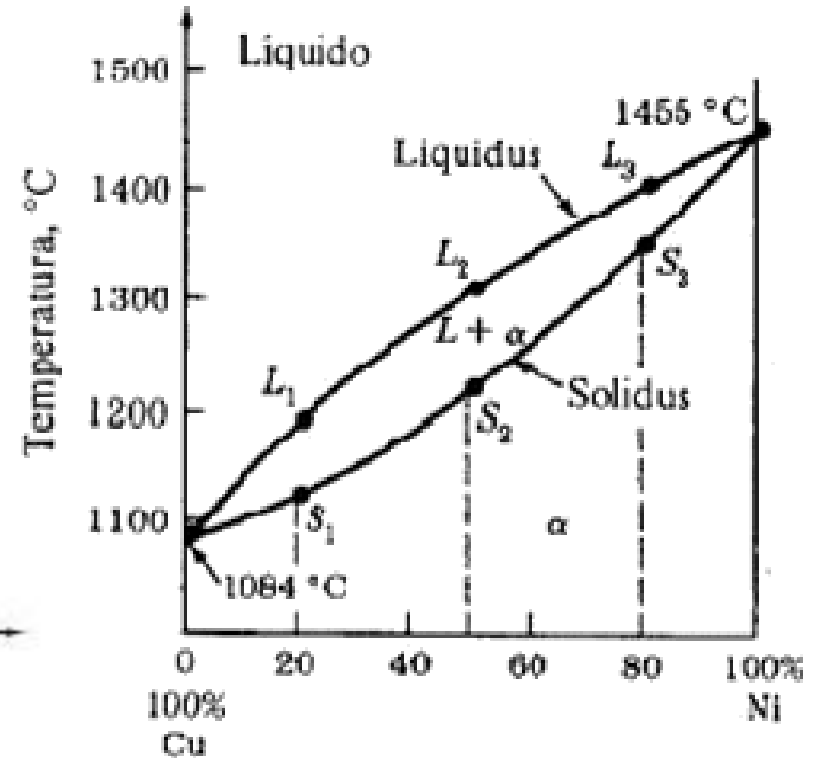
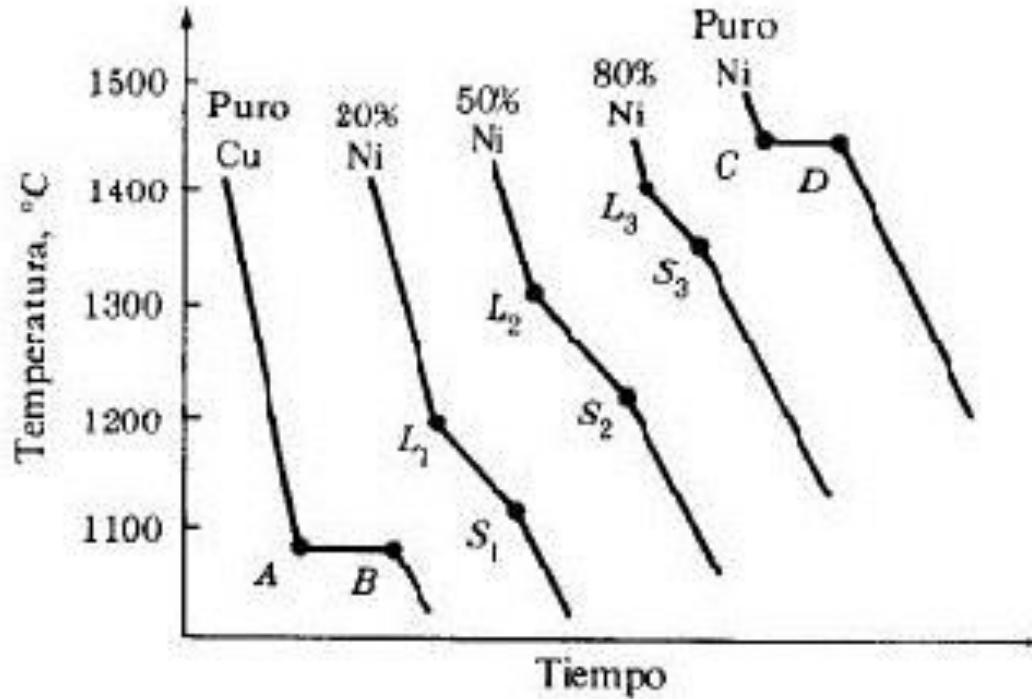
Curva de enfriamiento en la solidificación de un **metal puro**

La solidificación se produce a temperatura constante





# Curvas de enfriamiento

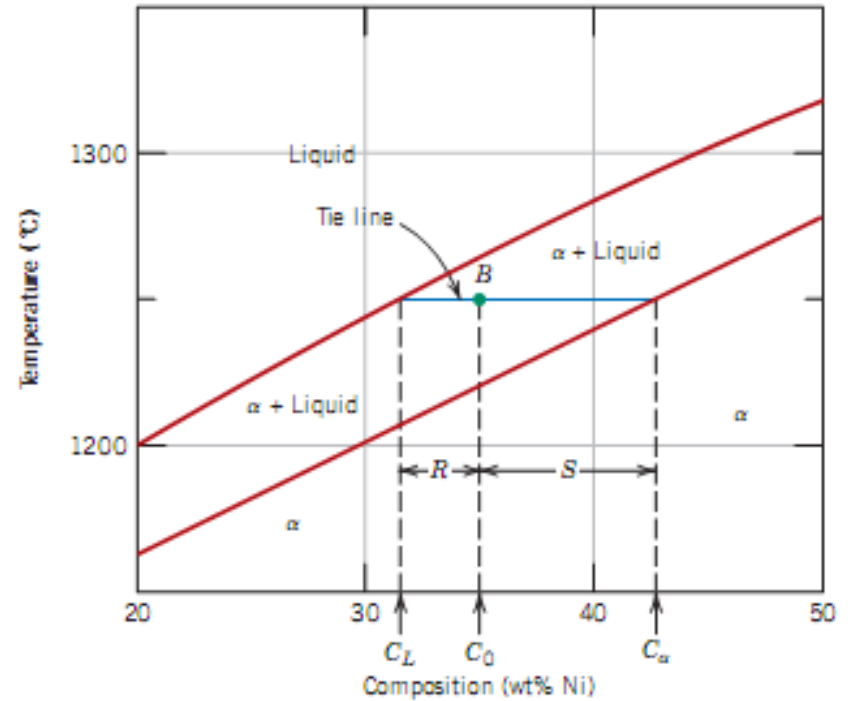
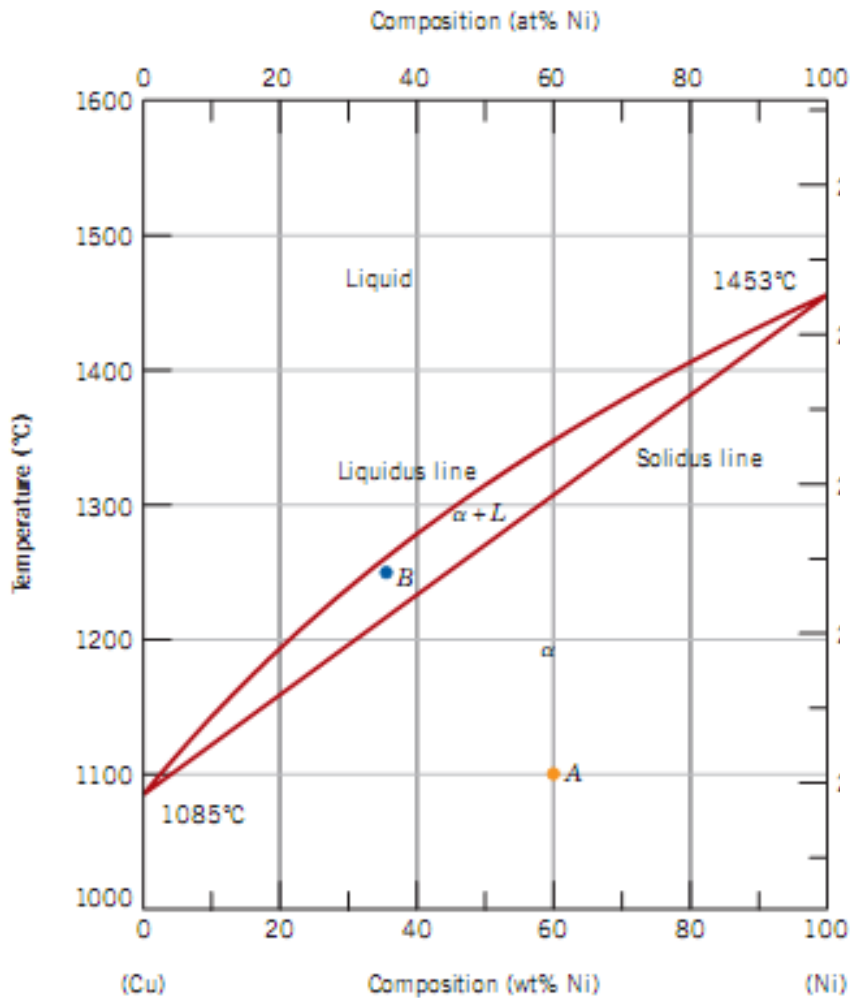


Graficas T/t (curvas de enfriamiento)  
Para obtener el diagrama de equilibrio Cu-Ni

Diagrama de equilibrio Cu-Ni



# Regla de la palanca



$$W_L = \frac{S}{R + S} = \frac{C_\alpha - C_0}{C_\alpha - C_L}$$

$$W_\alpha = \frac{R}{R + S} = \frac{C_0 - C_L}{C_\alpha - C_L}$$

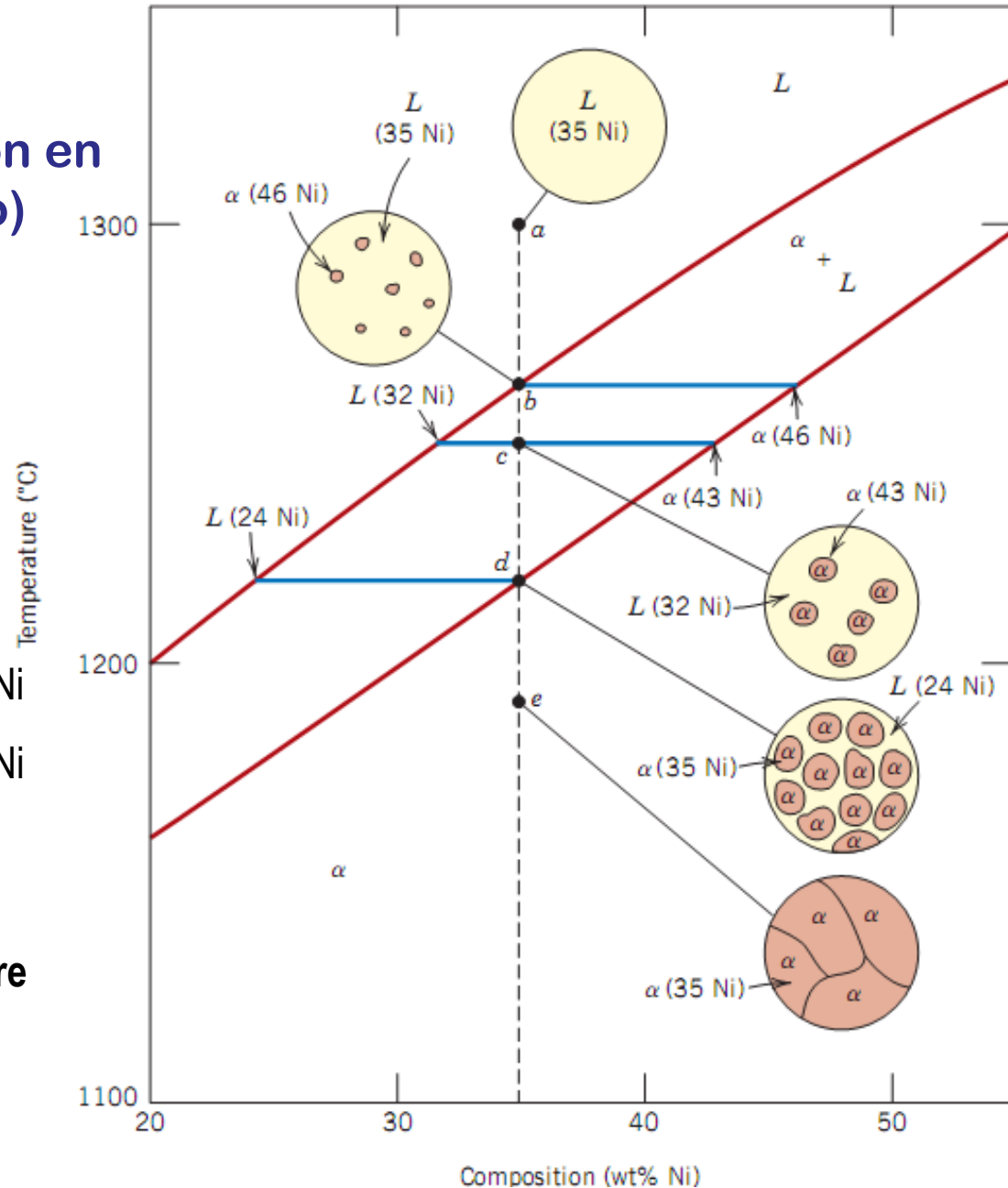
## Solidificación de una aleación en solución sólida (equilibrio)

Ejemplo: 35% Ni, 65% Cu

### Líneas *liquidus* y *solidus* en equilibrio

- $T > T_f$  Líquido con 35% Ni
- Primeros granos con 46% Ni y líquido con 35% Ni
- Granos con 43% Ni y líquido con 32% Ni
- Granos con 35% Ni y líquido con 24% Ni
- Sólo granos con 35% Ni

**Velocidad de enfriamiento muy lenta para permitir la difusión del Cu y Ni entre el líquido y el sólido. Situación ideal**



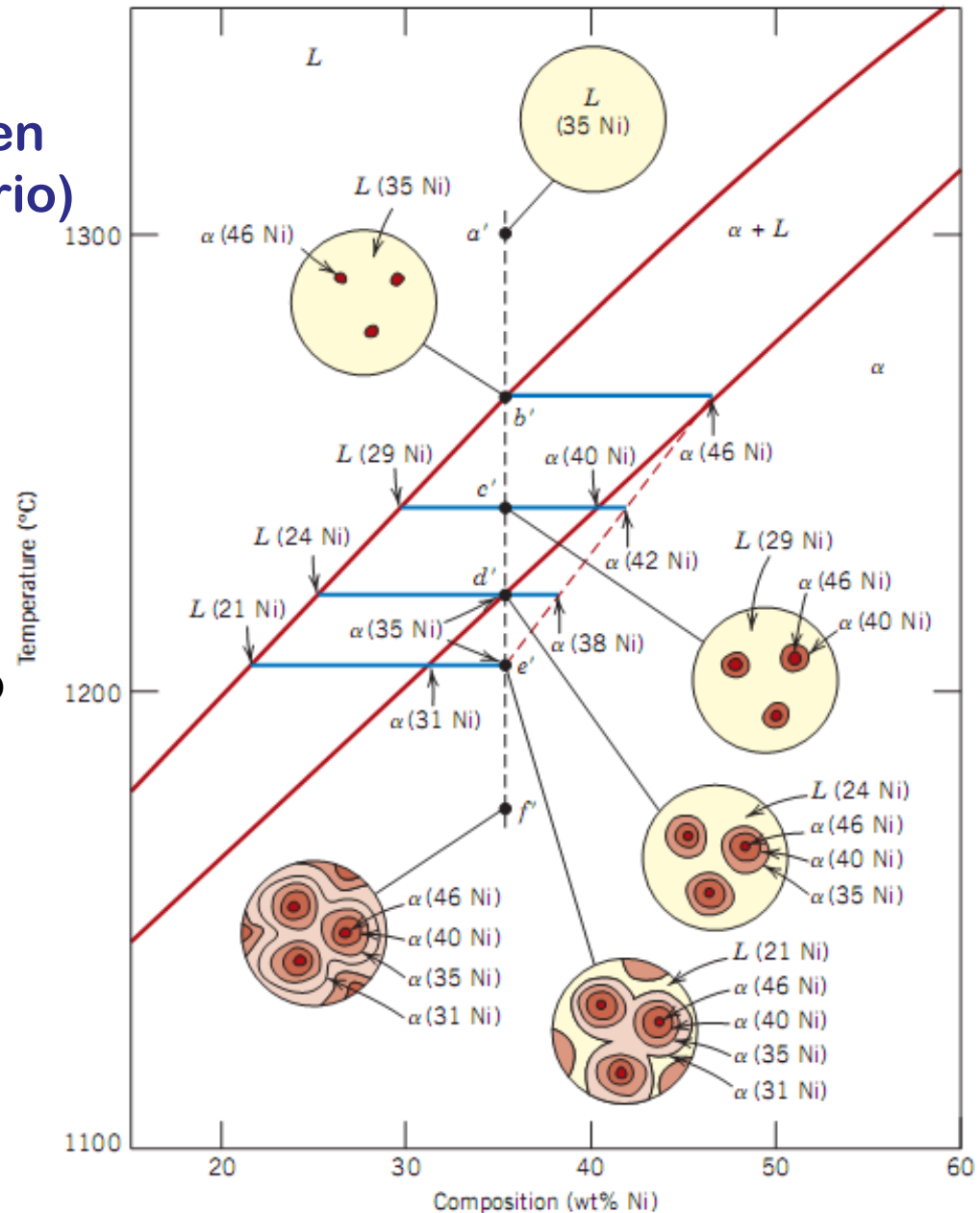
## Solidificación de una aleación en solución sólida (fuera de equilibrio)

Velocidad de enfriamiento rápida

### Situación real

Diagrama de fases

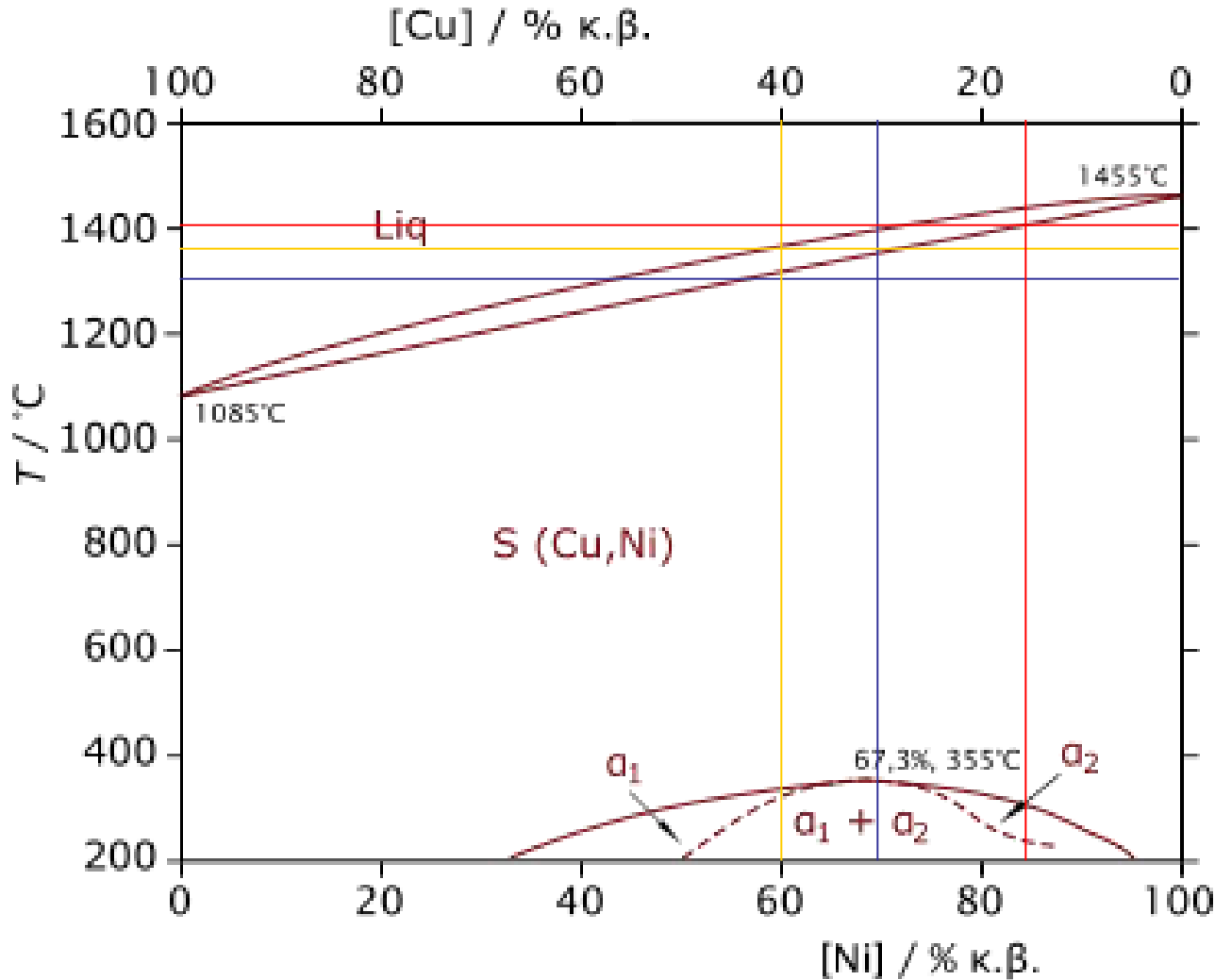
- La difusión en el líquido siempre es alta (composición calculada con gran precisión). **La línea *liquidus* en equilibrio**
- La difusión en el sólido es muy lenta (composición del sólido solo aproximada). **Línea *solidus* fuera del equilibrio**
- **Segregación: composición no homogénea de los granos (solidificación fuera del equilibrio)**





Una aleación 70 wt% Ni – 30 wt% Cu es calentada lentamente desde una temperatura de 1300°C:

- a – A qué temperatura se forma la primer fase líquida?
- b –Cuál es la composición de esta fase líquida?
- c – A qué temperatura la aleación se funde completamente?
- d –Cuál es la composición de la fase sólida remanente previa a la fundición total de la aleación





# Reglas Hume-Rothery

## Condiciones para solubilidad sustitucional en metales:

- 1. Tamaño atómico:** Diferencia de tamaño atómico de menos de  $\pm 15\%$ .
- 2. Estructura cristalina:** Las estructuras cristalinas deben ser las mismas.
- 3. Electronegatividad:** Electronegatividad similar. Cuanto más electronegativo sea uno de los elementos y más electropositivos el otro mayor posibilidad de formar compuestos intermetálicos.
- 4. Valencia:** Misma valencia. Adicionalmente los metales tienen tendencia a disolverse mejor en otro metal de valencia mayor que uno de valencia menor

**Cu:** 0,128 nm; FCC; 1,9; +1/+2

**Ni:** 0,125 nm; FCC; 1,8; +2

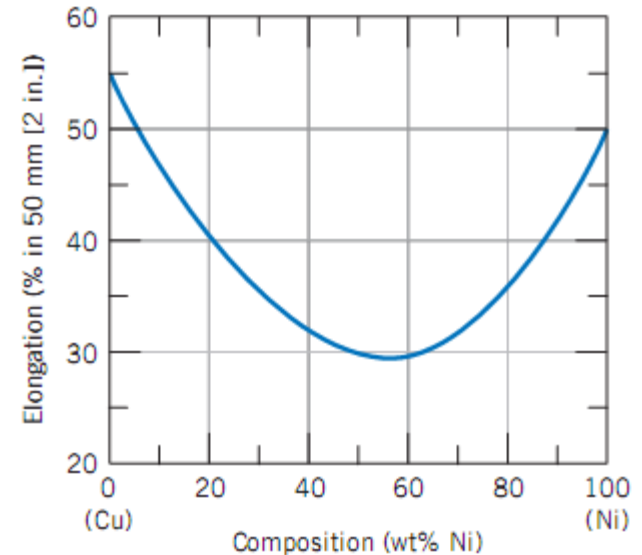
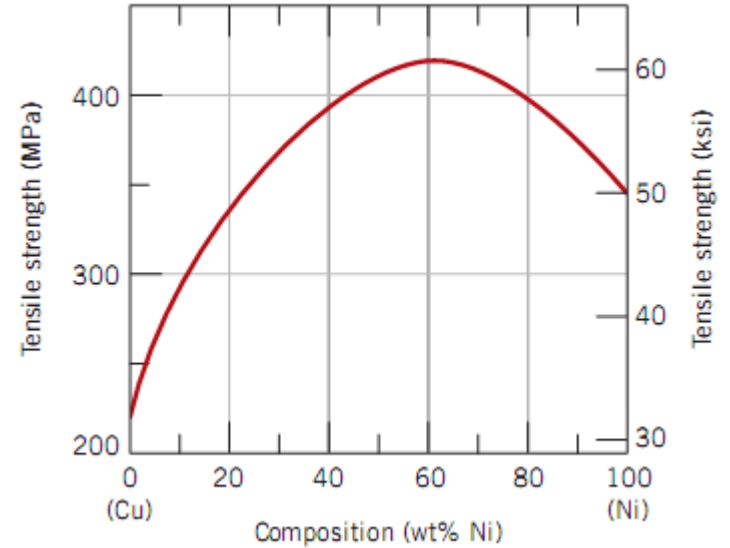
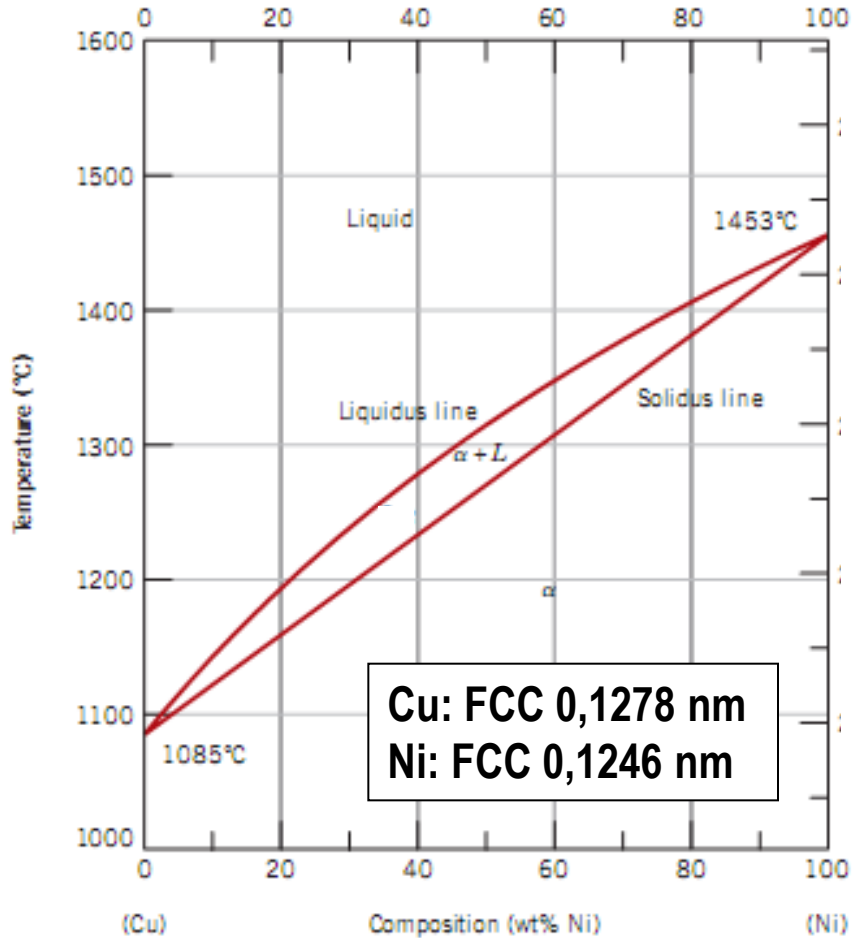
## Condiciones para solubilidad intersticial en metales:

- 1. Tamaño atómico:** El átomo de soluto debe ser lo suficientemente pequeño para entrar en los intersticios de la red.
- 2. Electronegatividad:** Electronegatividad similar.



# Diagrama de fase: Ni-Cu

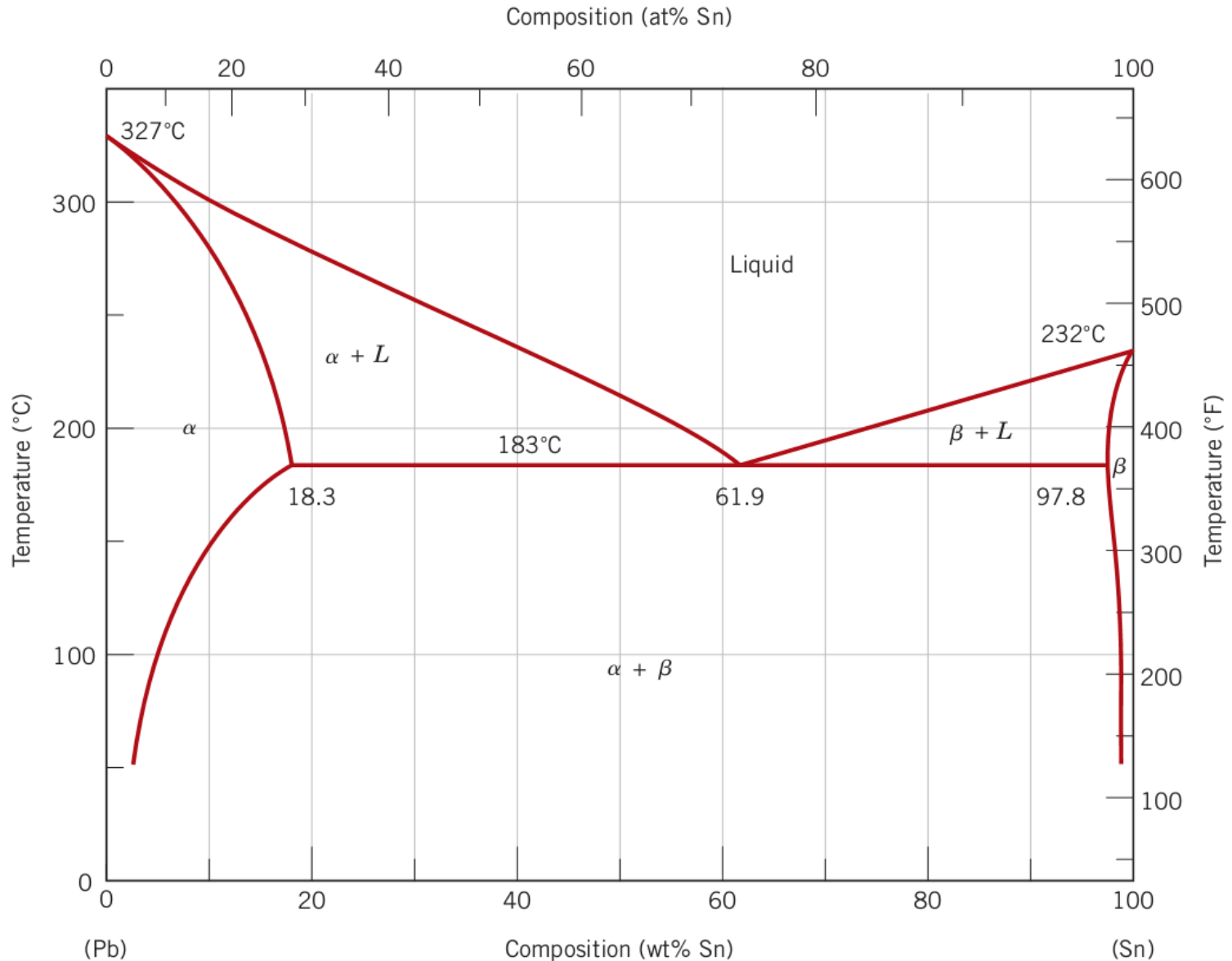
Composition (at% Ni)



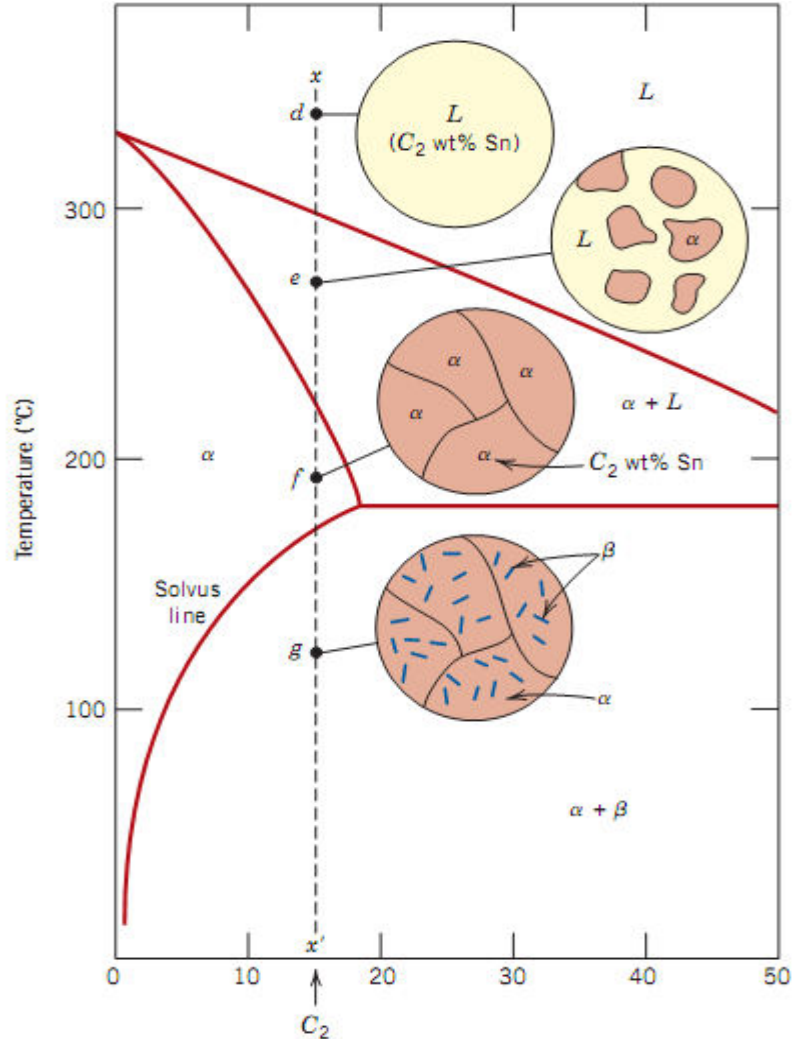
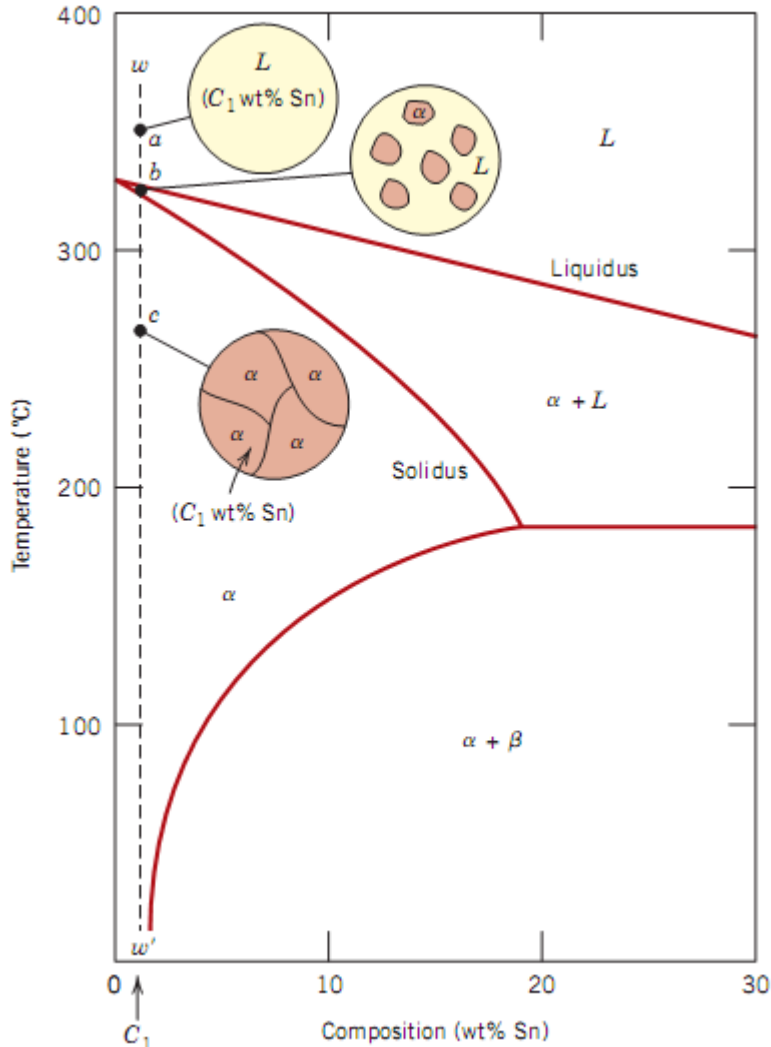
**Endurecimiento por solución sólida**



# Diagrama de equilibrio de aleación eutéctica

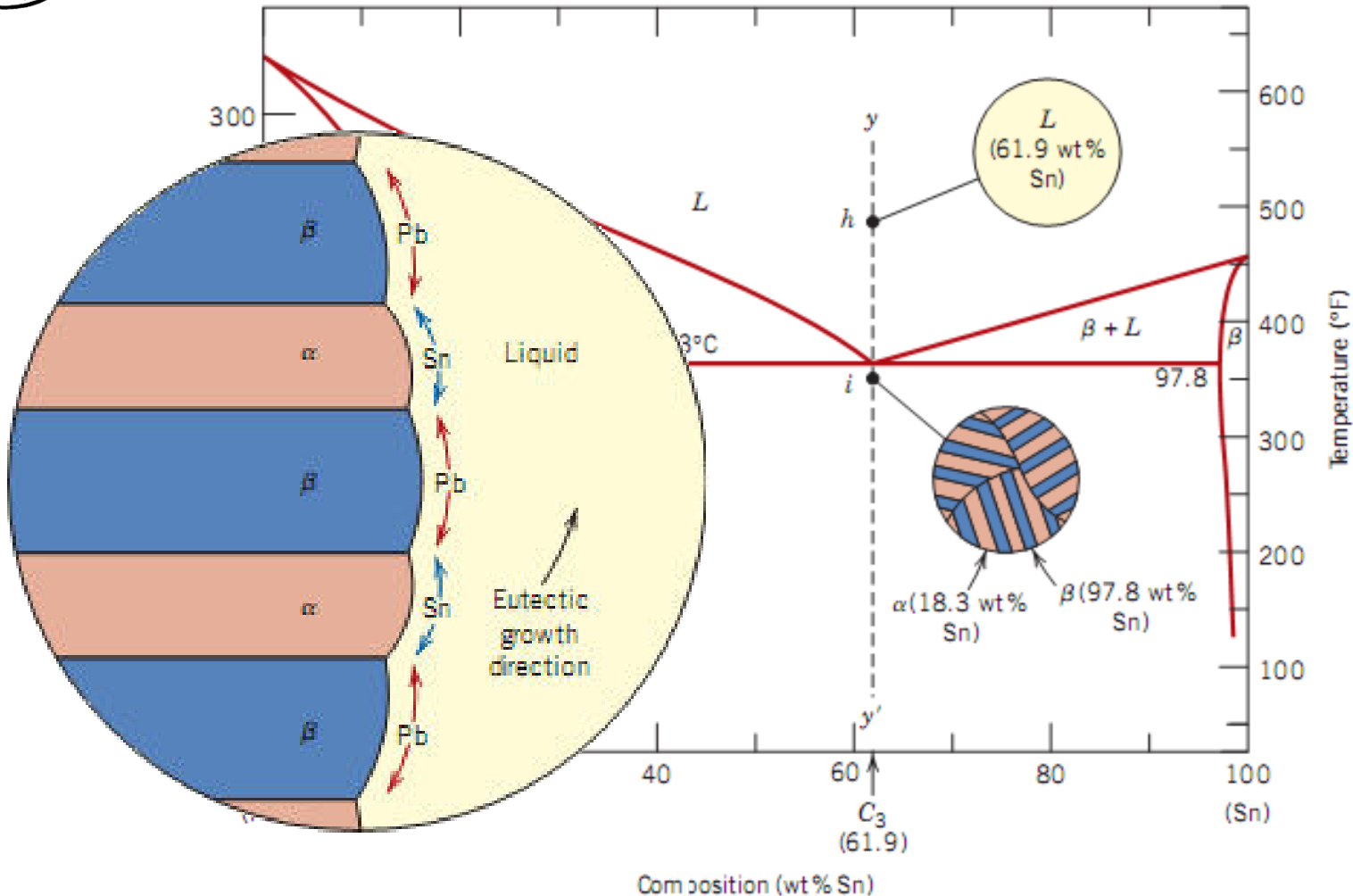


# Diagrama de equilibrio de aleación eutéctica

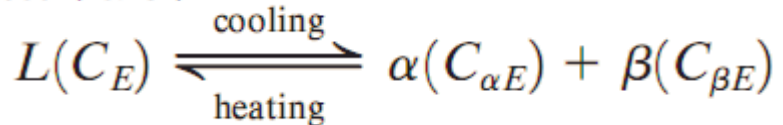


**Endurecimiento por precipitación de segundas fases**

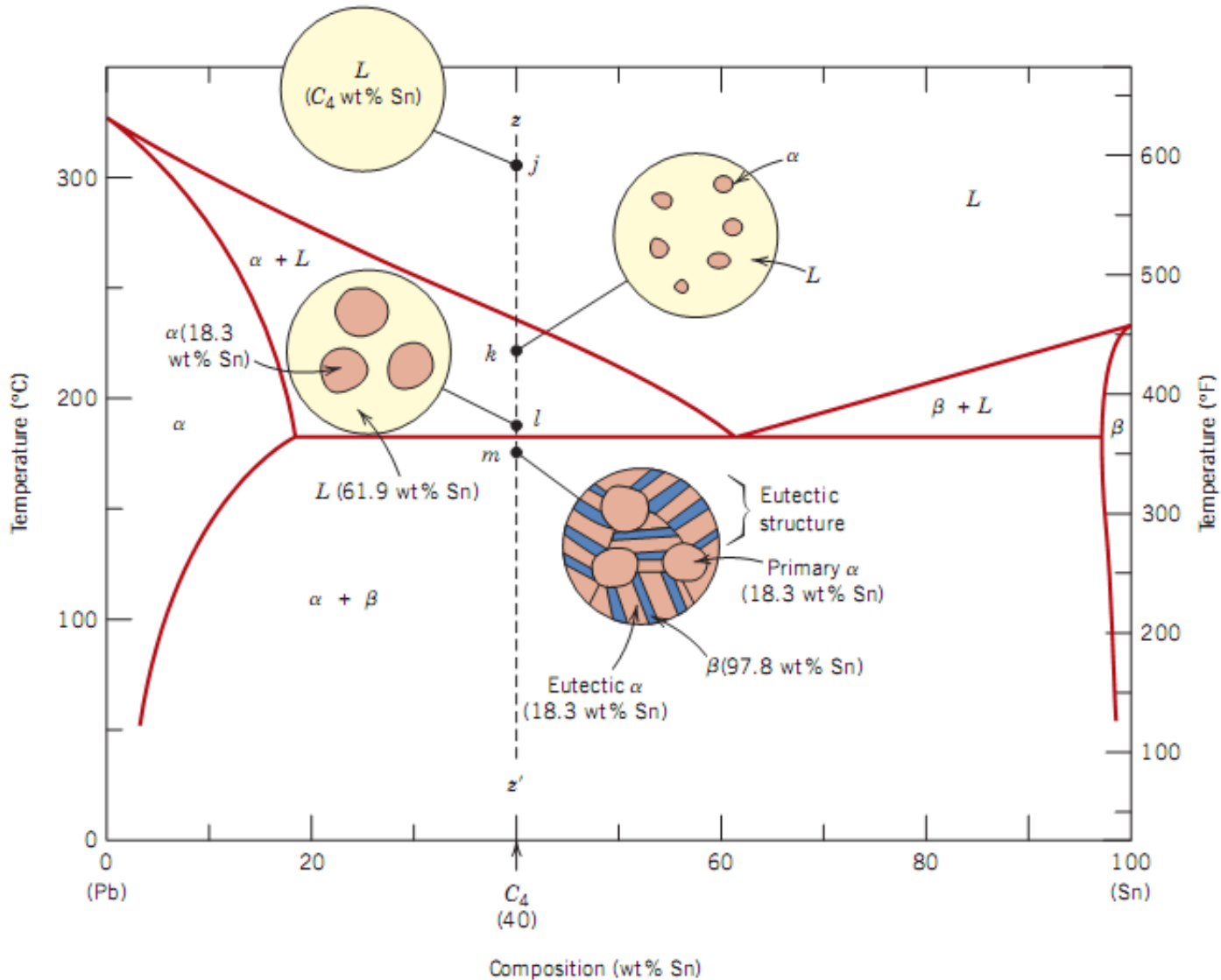
# Diagrama de equilibrio de aleación eutéctica



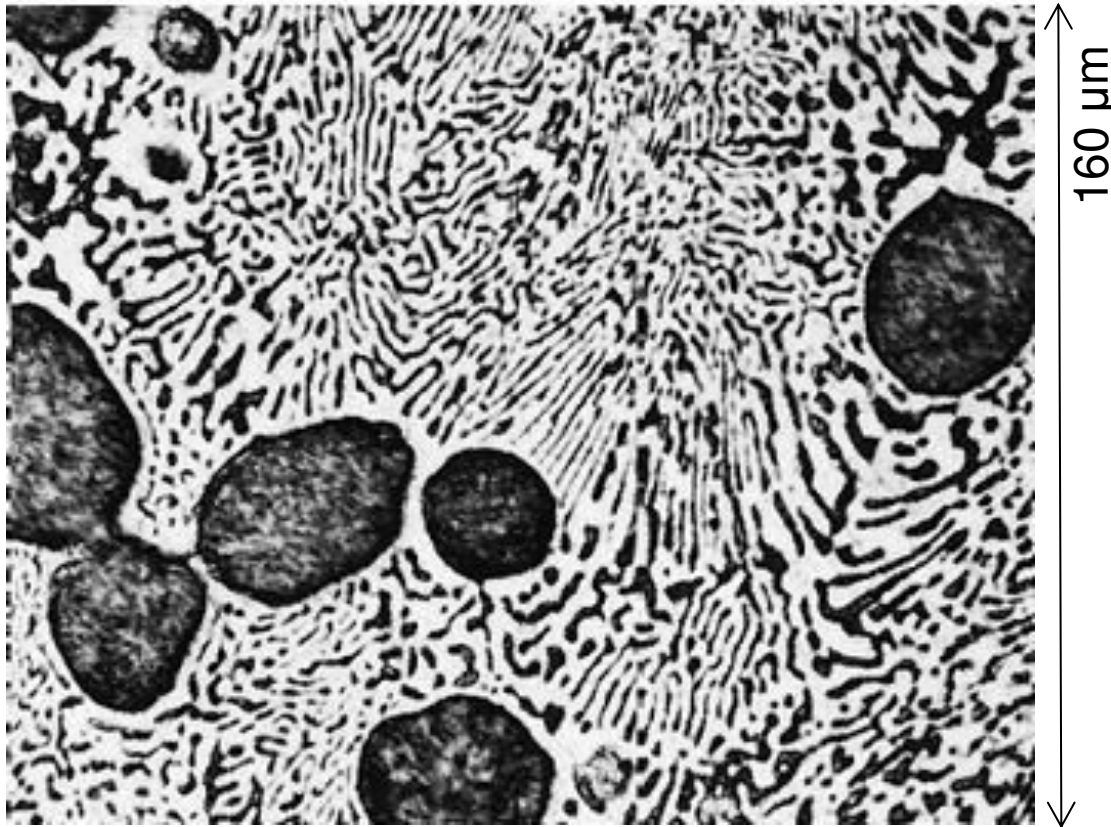
**Reacción eutéctica:**  
Un líquido > dos sólidos



# Diagrama de equilibrio de aleación eutéctica



## Aleación hipoeutéctica

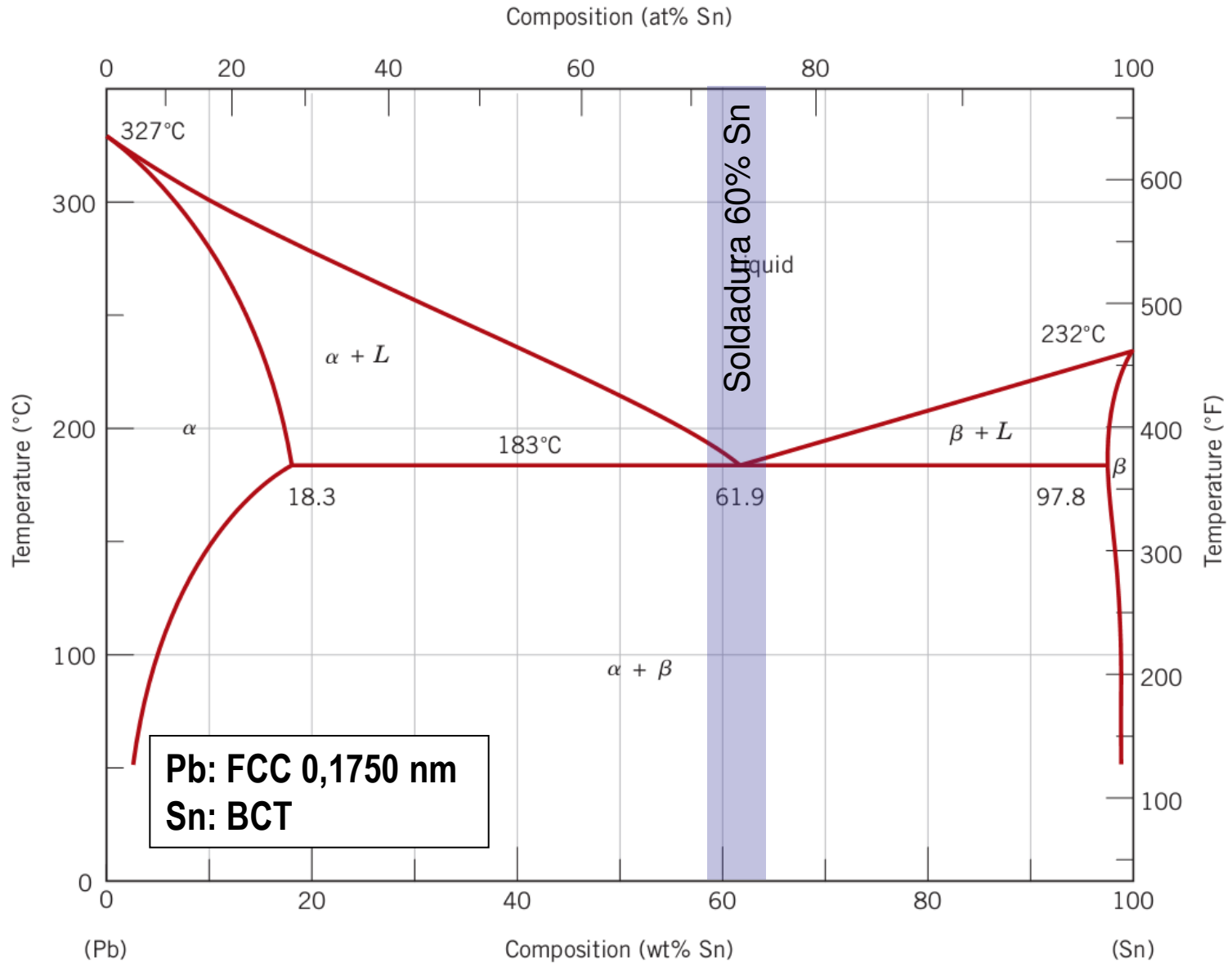


Microestructura de una aleación 50 wt% Sn–50 wt% Pb.

Compuesta por fase primaria rica en Pb (manchas oscuras) dentro de una **microestructura eutéctica** lamelar consistente en una fase rica en Sn (capas claras) y otra rica en Pb (capas oscuras).

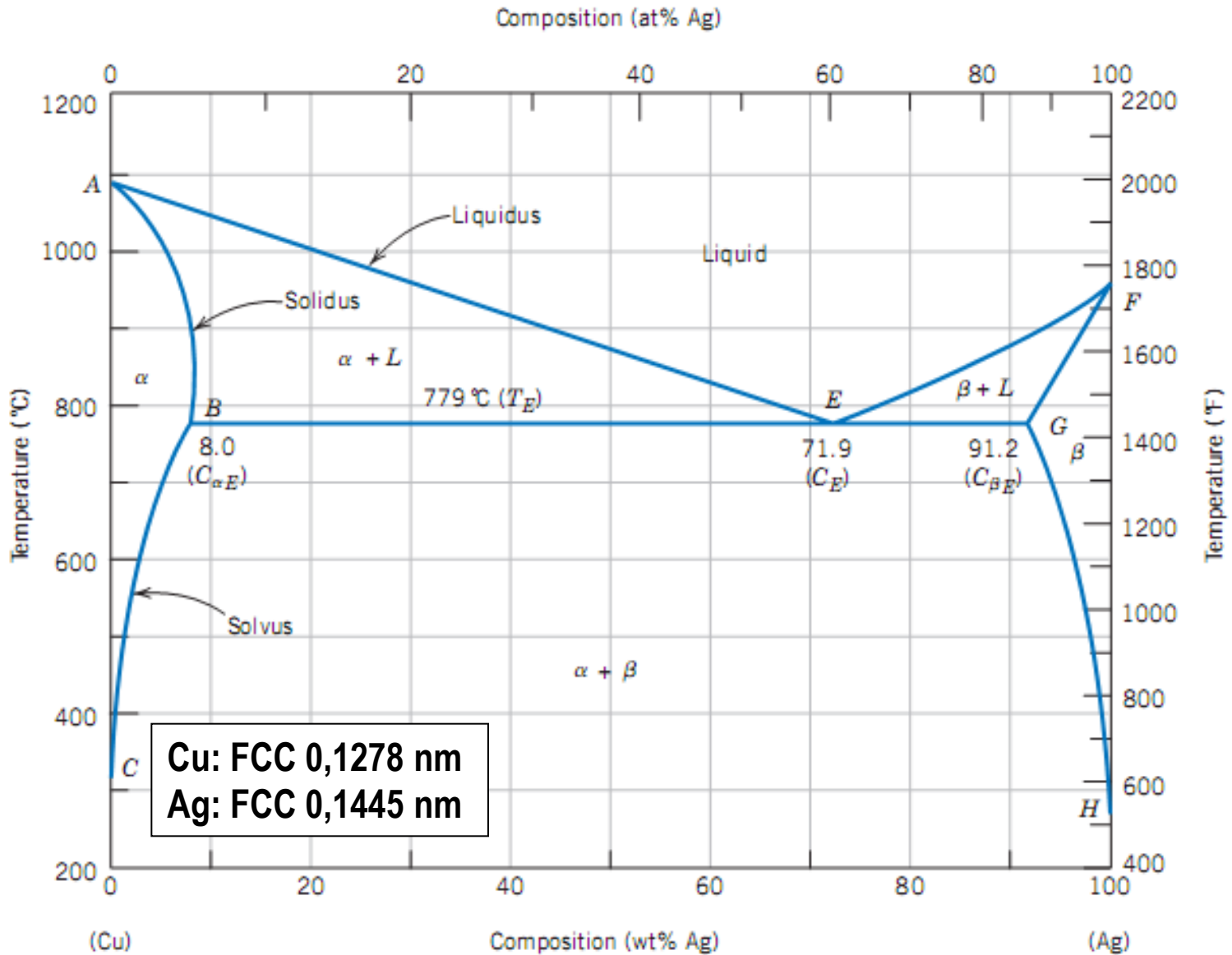


# Diagrama de fase: Pb-Sn



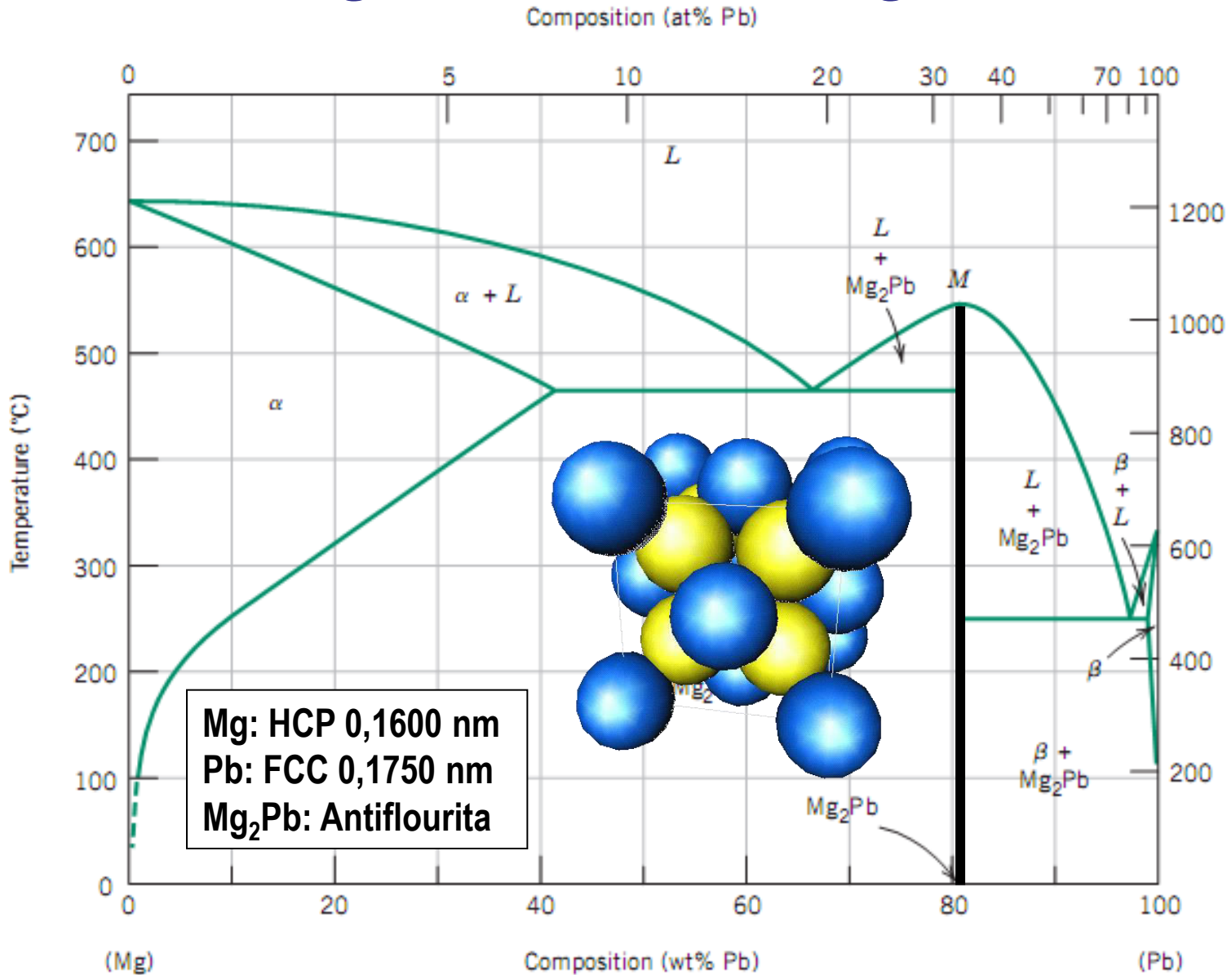


# Diagrama de fase: Cu-Ag





# Diagramas de fase: Mg-Pb





Considere una aleación de 70 wt% Pb – 30 wt% Sn. Determinar:

- a – Si la aleación es hipo o hipereutéctica
- b – La composición del primer sólido que se forma
- c – Las cantidades y composiciones de cada fase a 184°C
- d – Las cantidades y composiciones de cada fase a 182°C
- e – Las cantidades de cada microconstituyente a 182°C
- f – Las cantidades de cada fase a 0°C

c:

$$W_L = (30 - 18) / (61 - 18) = 0,28$$

$$W_\alpha = (61 - 30) / (61 - 18) = 0,72$$

d:

$$W_\alpha = (98 - 30) / (98 - 18) = 0,85$$

$$W_\beta = (30 - 18) / (98 - 18) = 0,15$$

e:

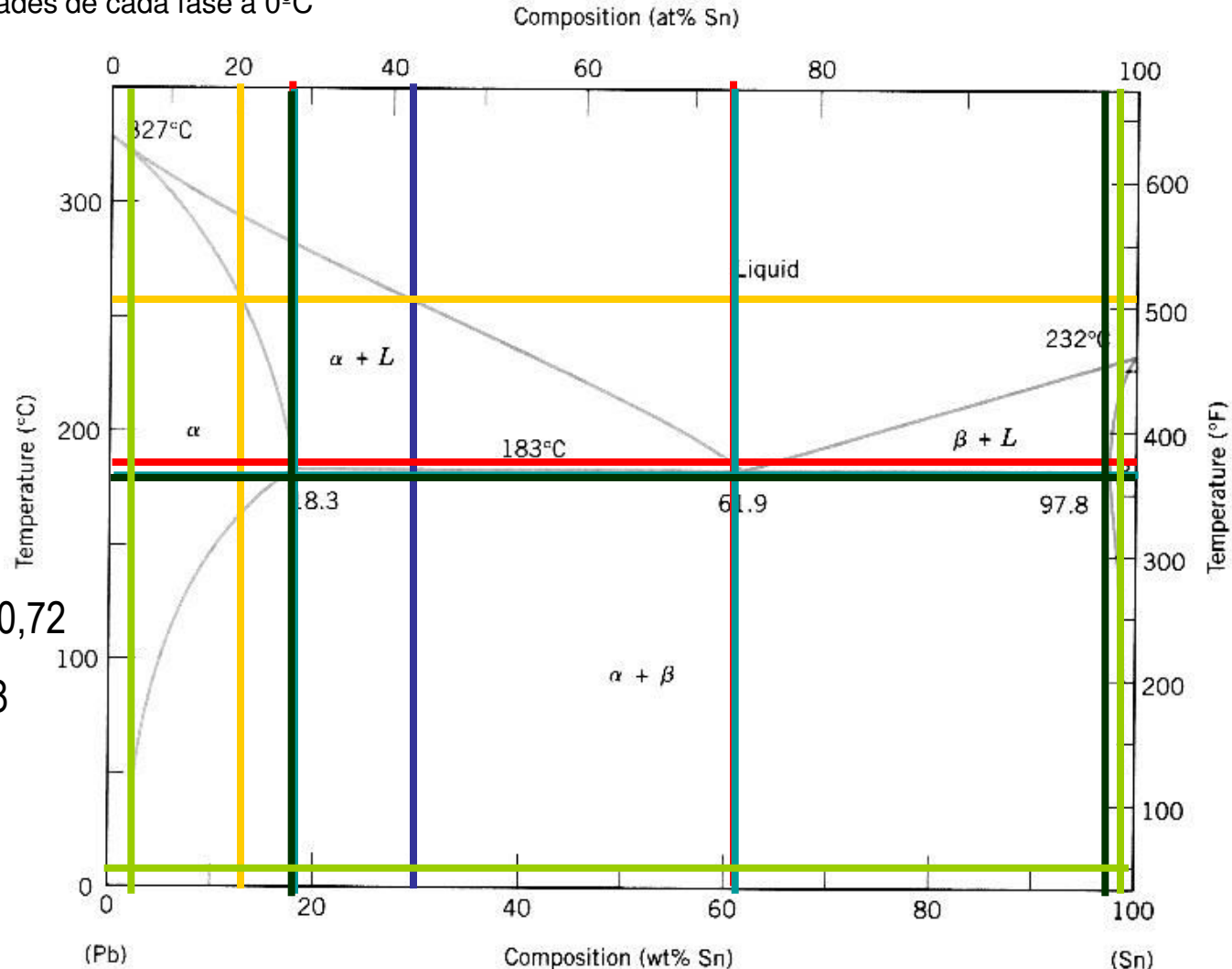
$$W_{\alpha\text{-preeutectico}} = (62 - 30) / (62 - 18) = 0,72$$

$$W_{\text{eutectico}} = (30 - 18) / (62 - 18) = 0,28$$

f:

$$W_\alpha = (99 - 30) / (99 - 2) = 0,71$$

$$W_\beta = (30 - 2) / (99 - 2) = 0,29$$

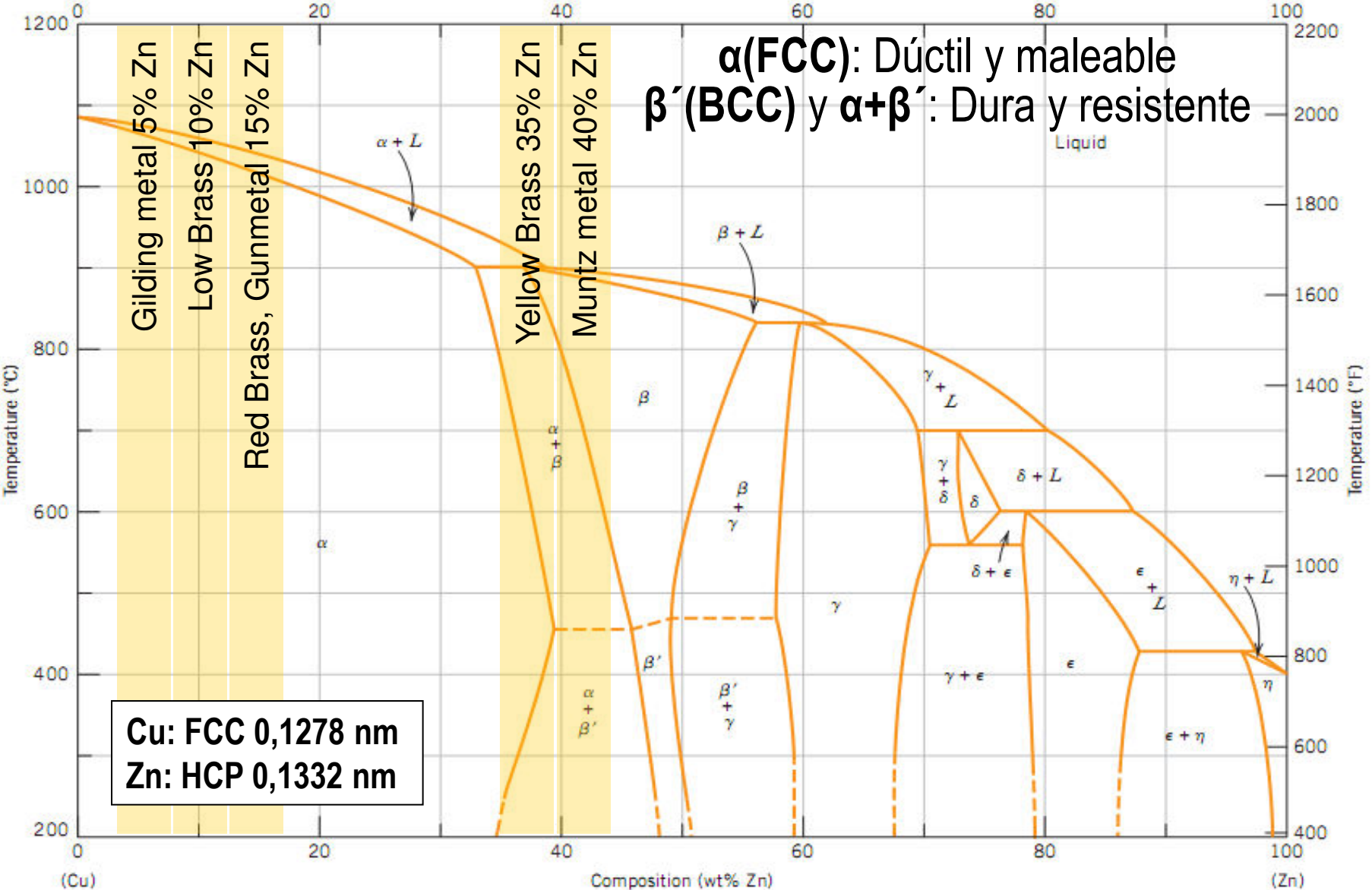




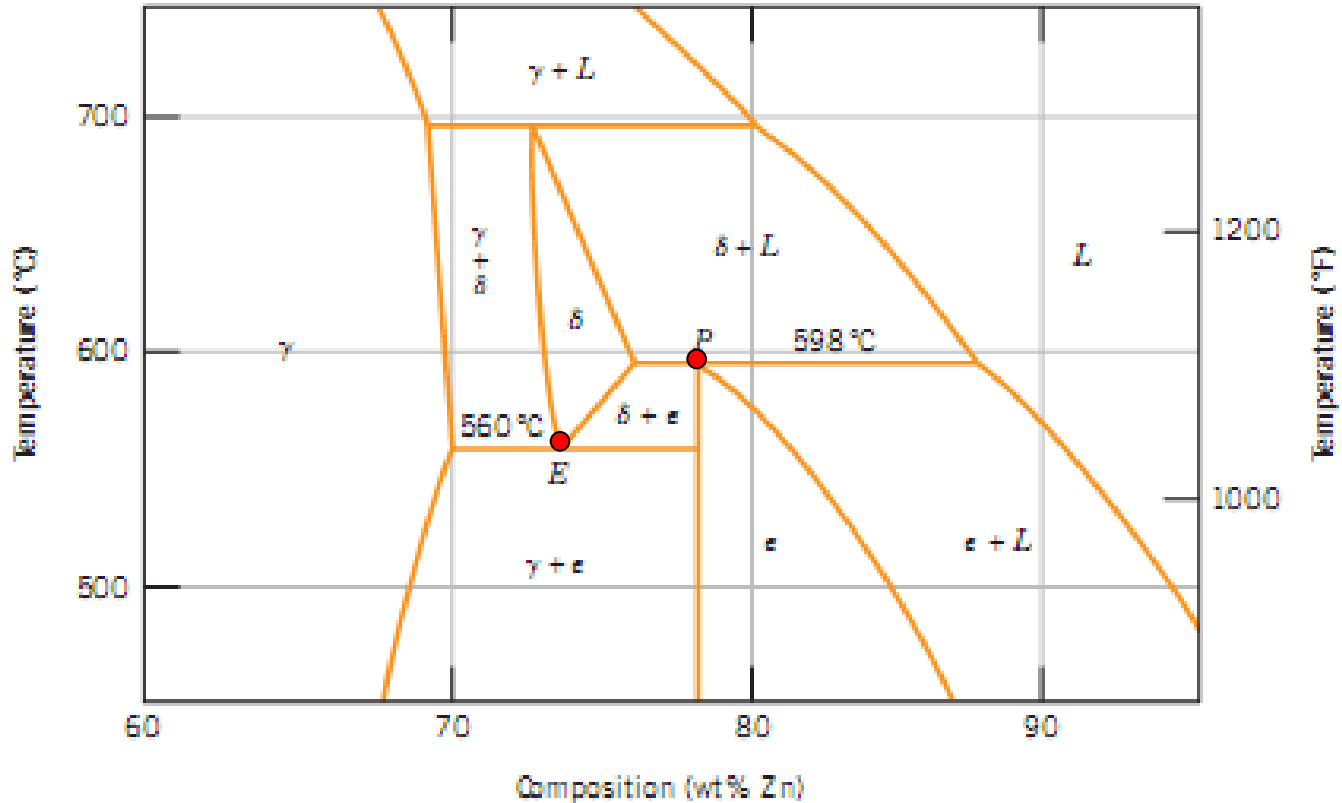
# Diagramas de fase: Cu-Zn (Latón)

Composition (at% Zn)

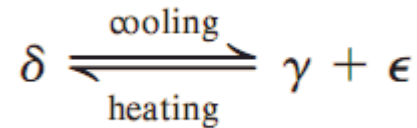
$\alpha$ (FCC): Dúctil y maleable  
 $\beta'$ (BCC) y  $\alpha+\beta'$ : Dura y resistente



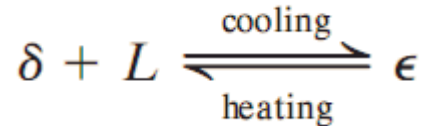
# Reacciones eutectoide y peritética



**Reacción eutectoide:**  
Un sólido > dos sólidos

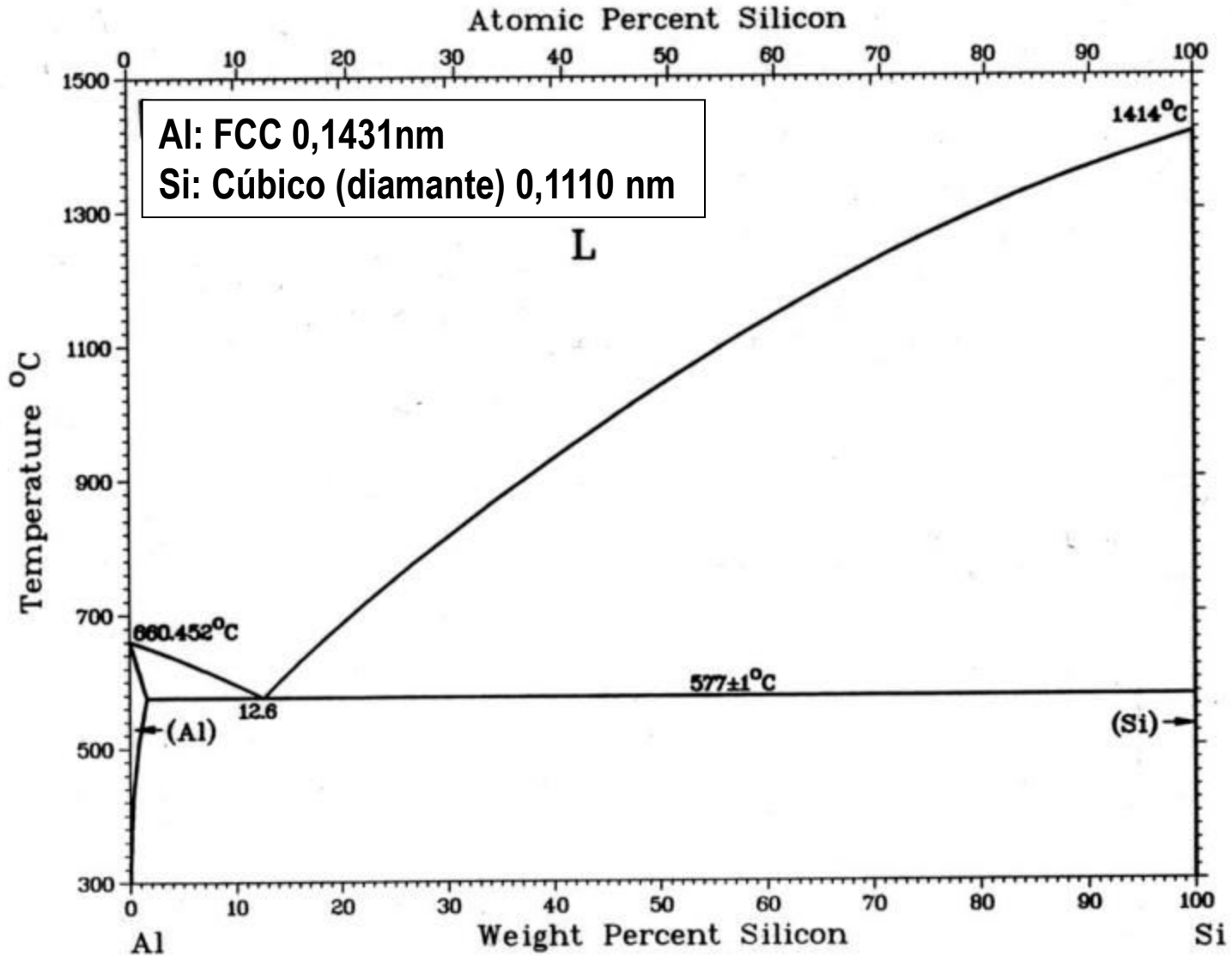


**Reacción peritética:**  
Un sólido y un líquido > un sólido

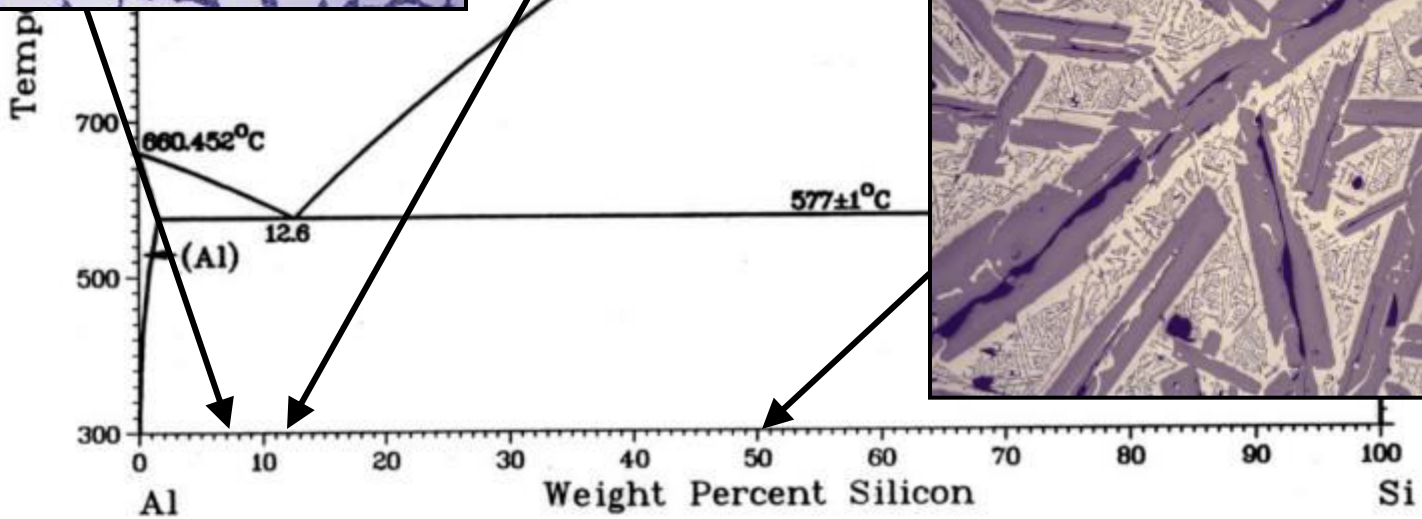
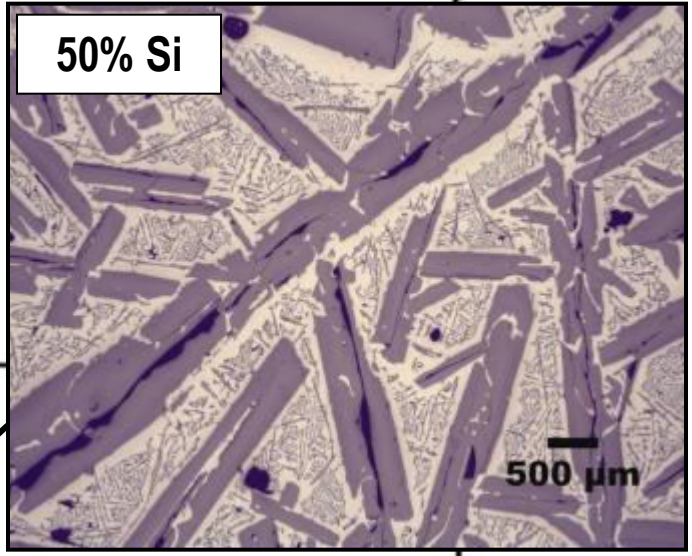
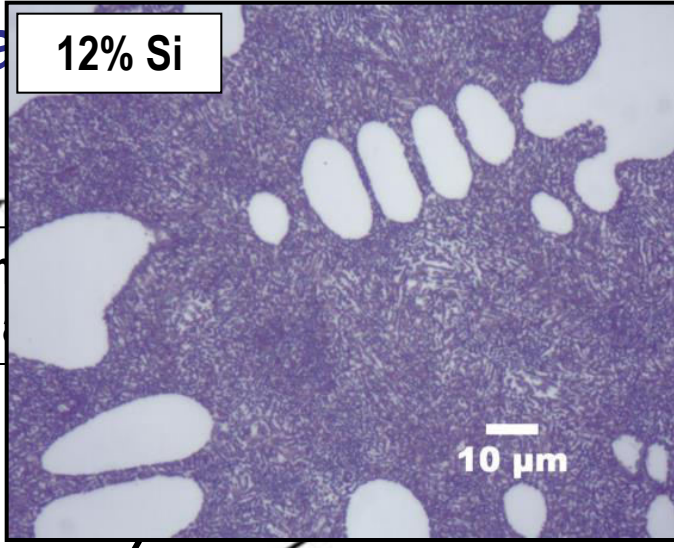
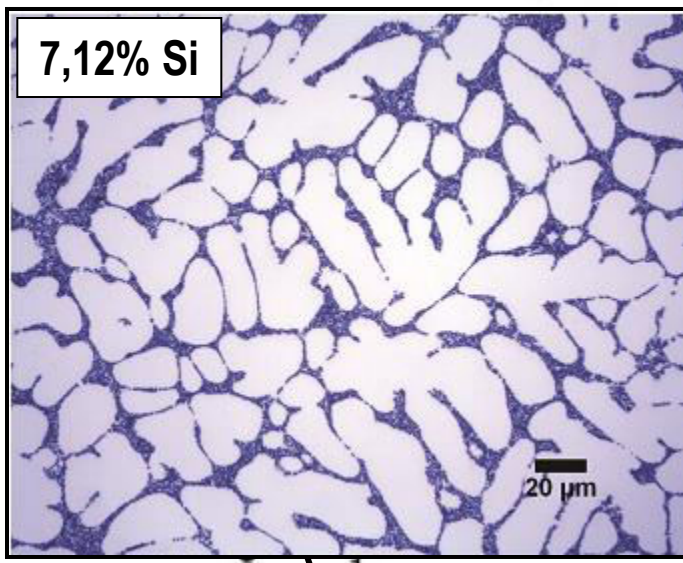




# Diagramas de fase: Al-Si

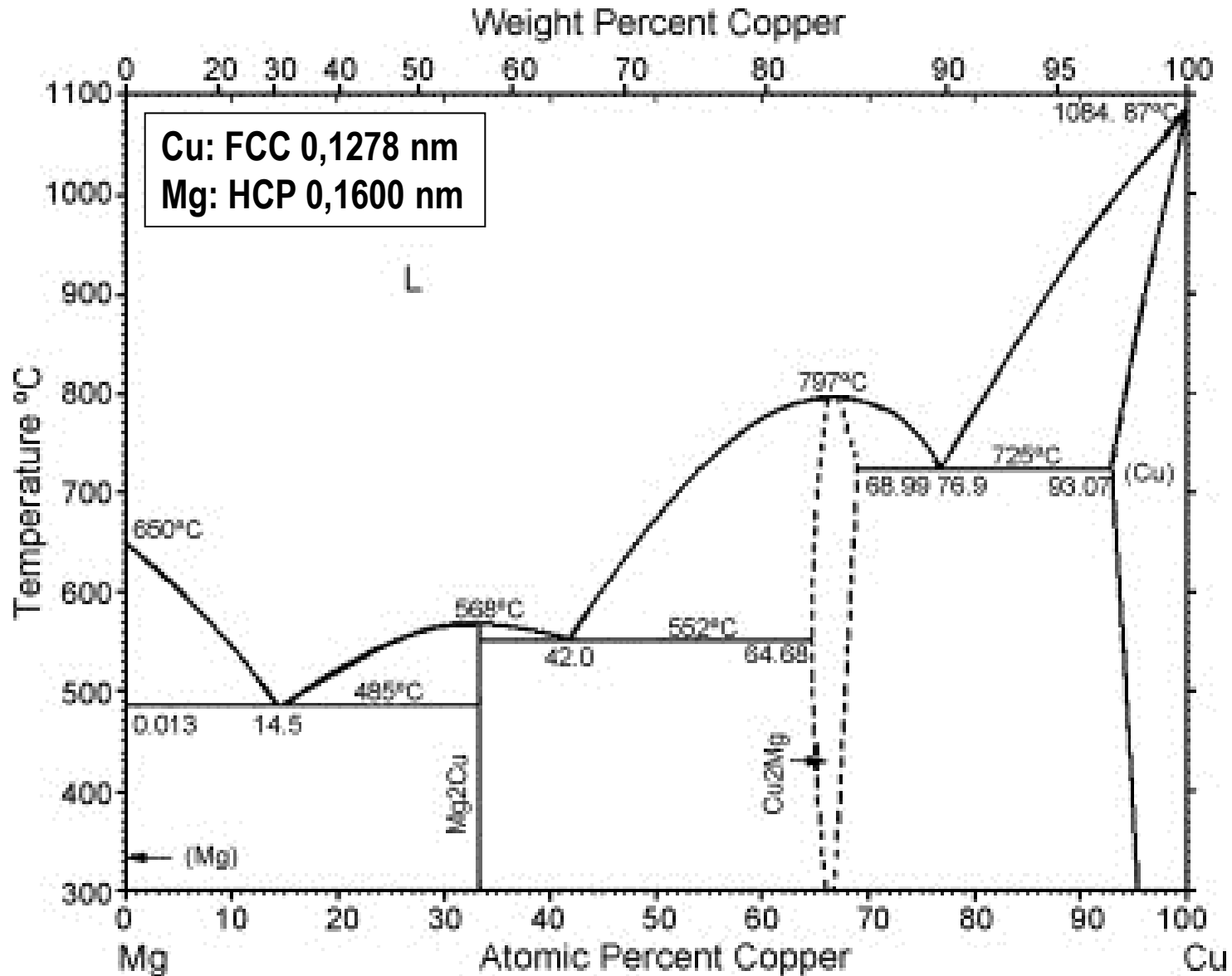


# Diagrama



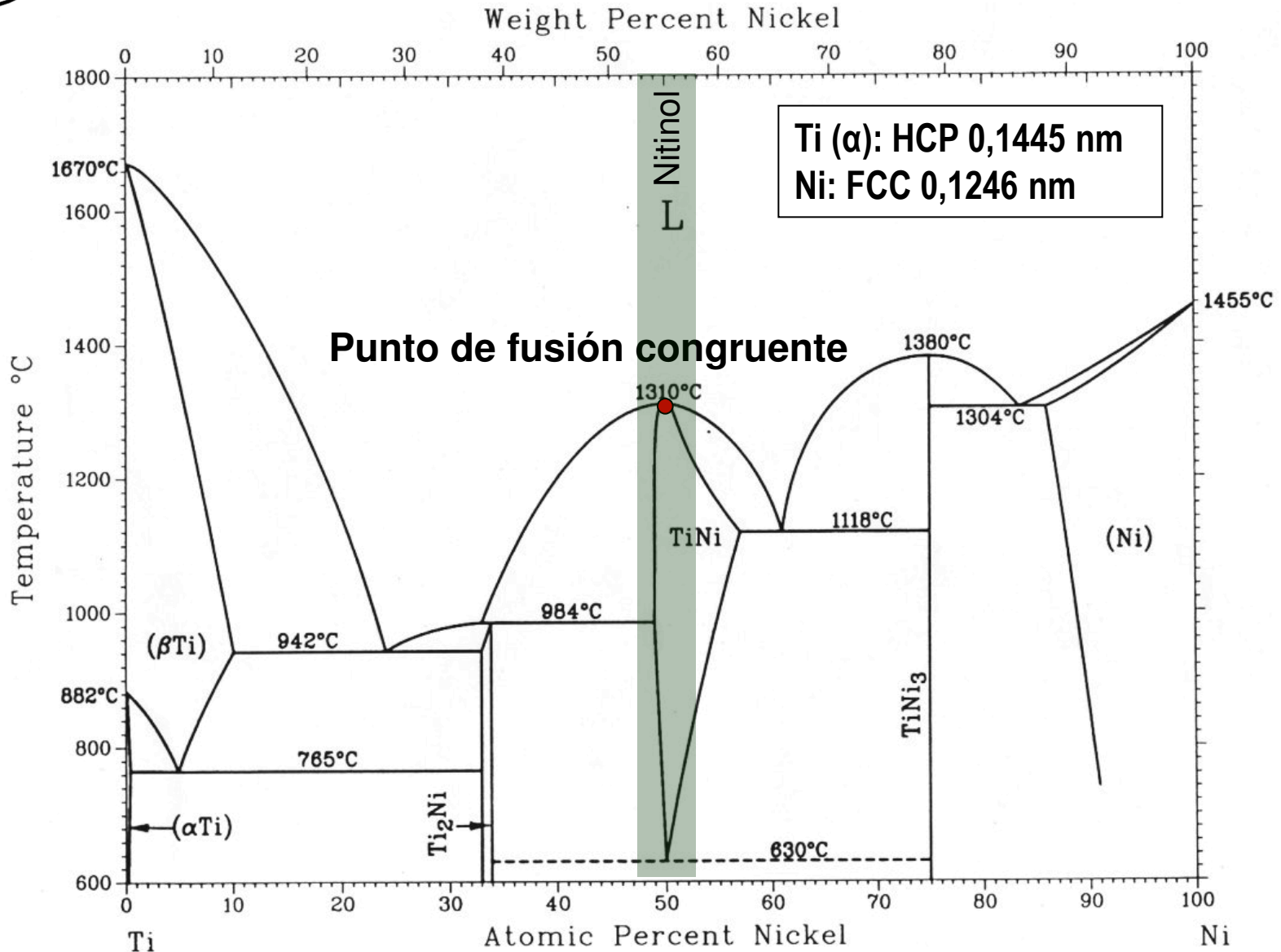


# Diagramas de fase: Cu-Mg



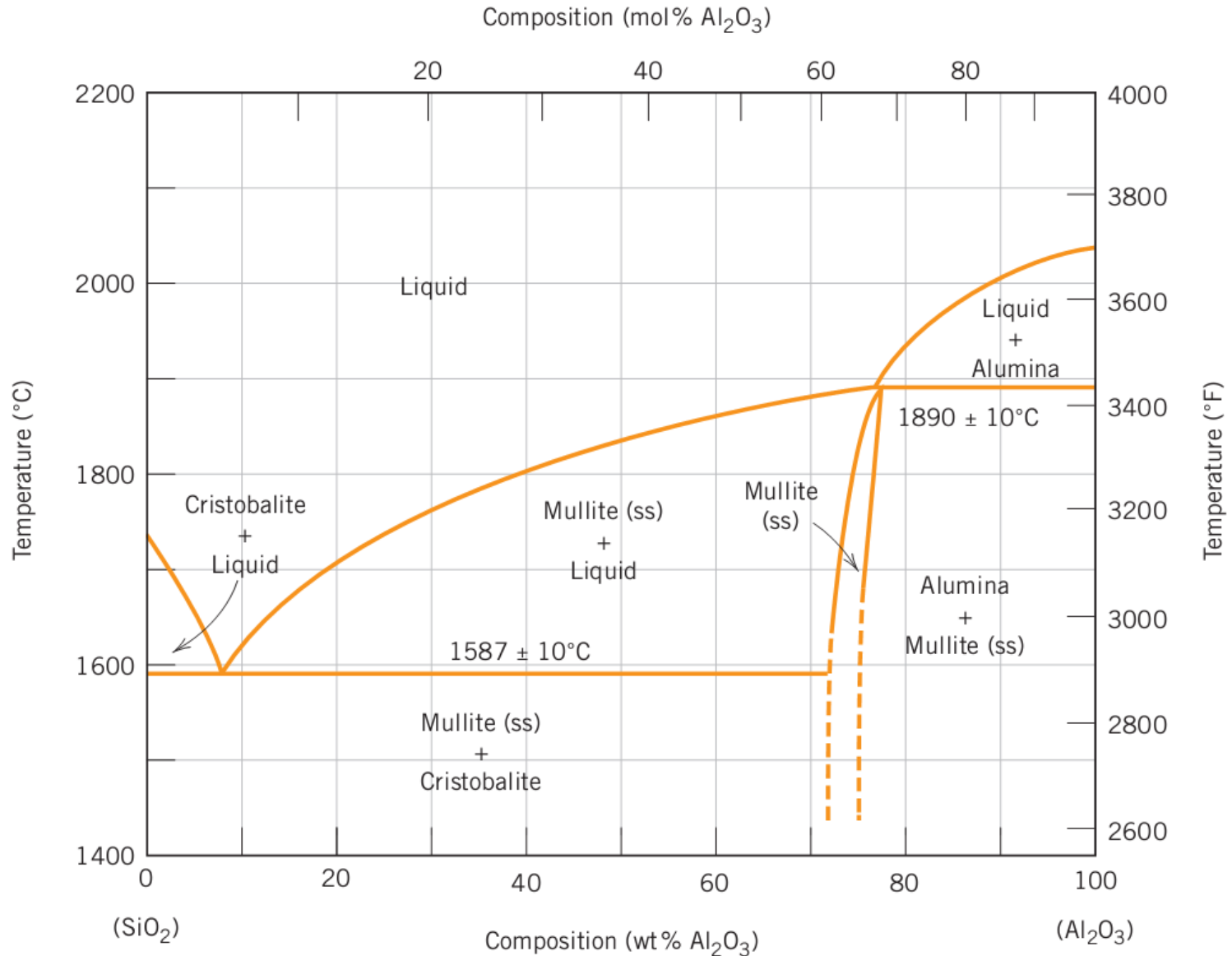


# Diagramas de fase: Ti-Ni

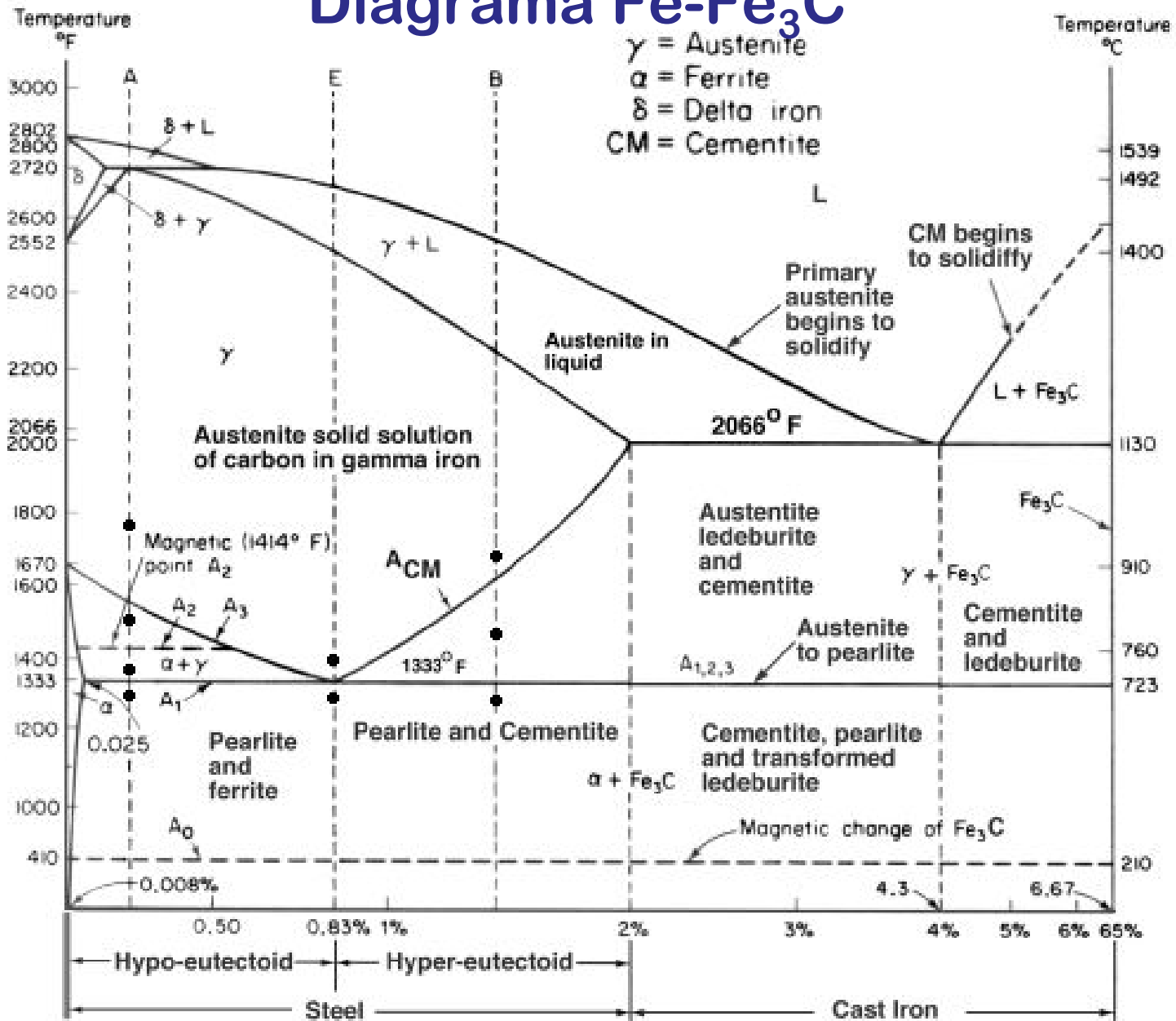




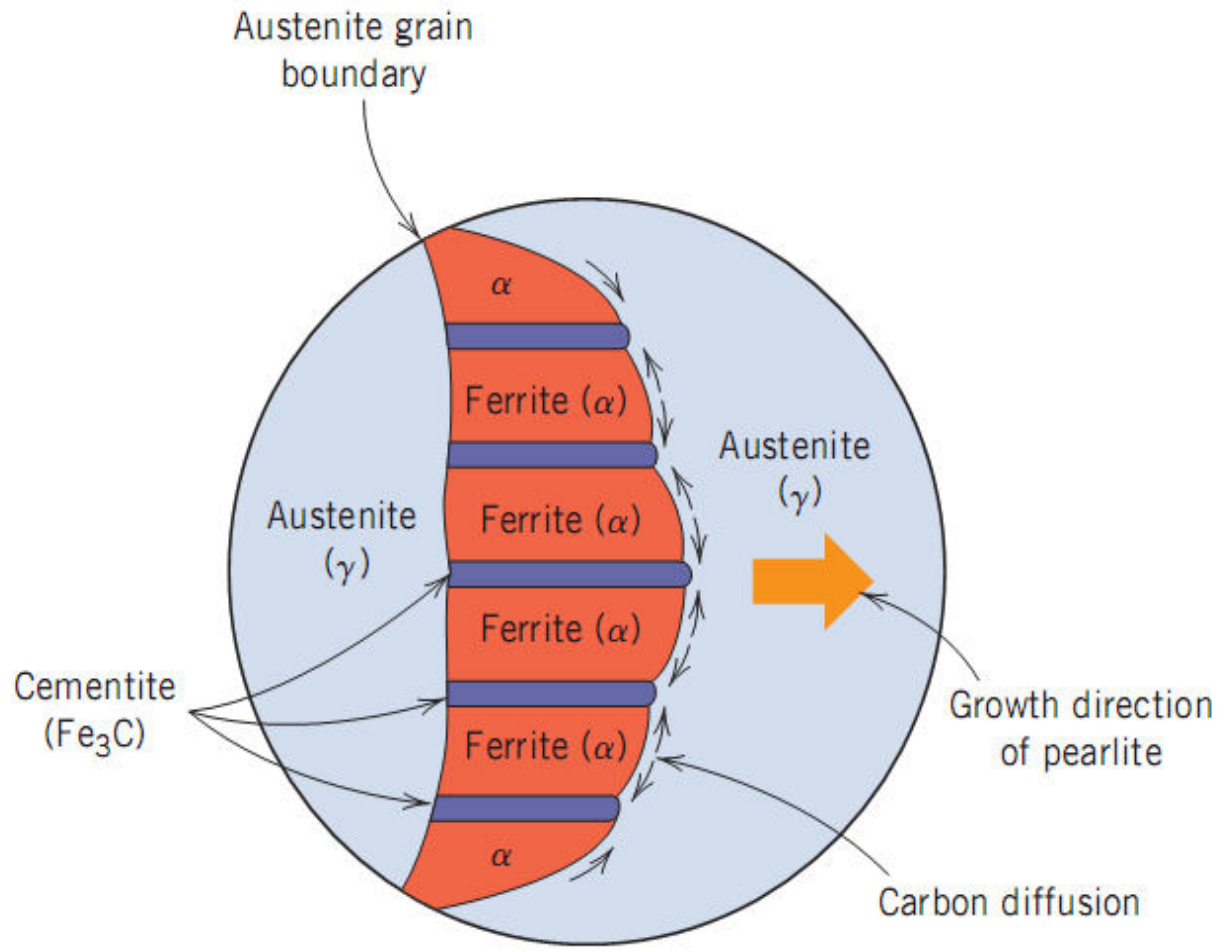
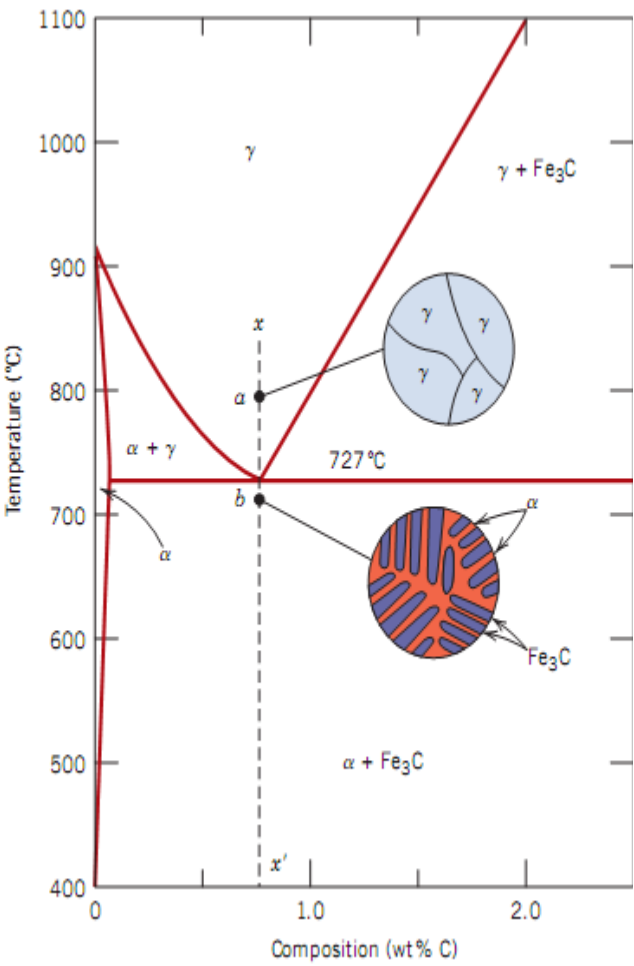
# Diagramas de fase: $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$



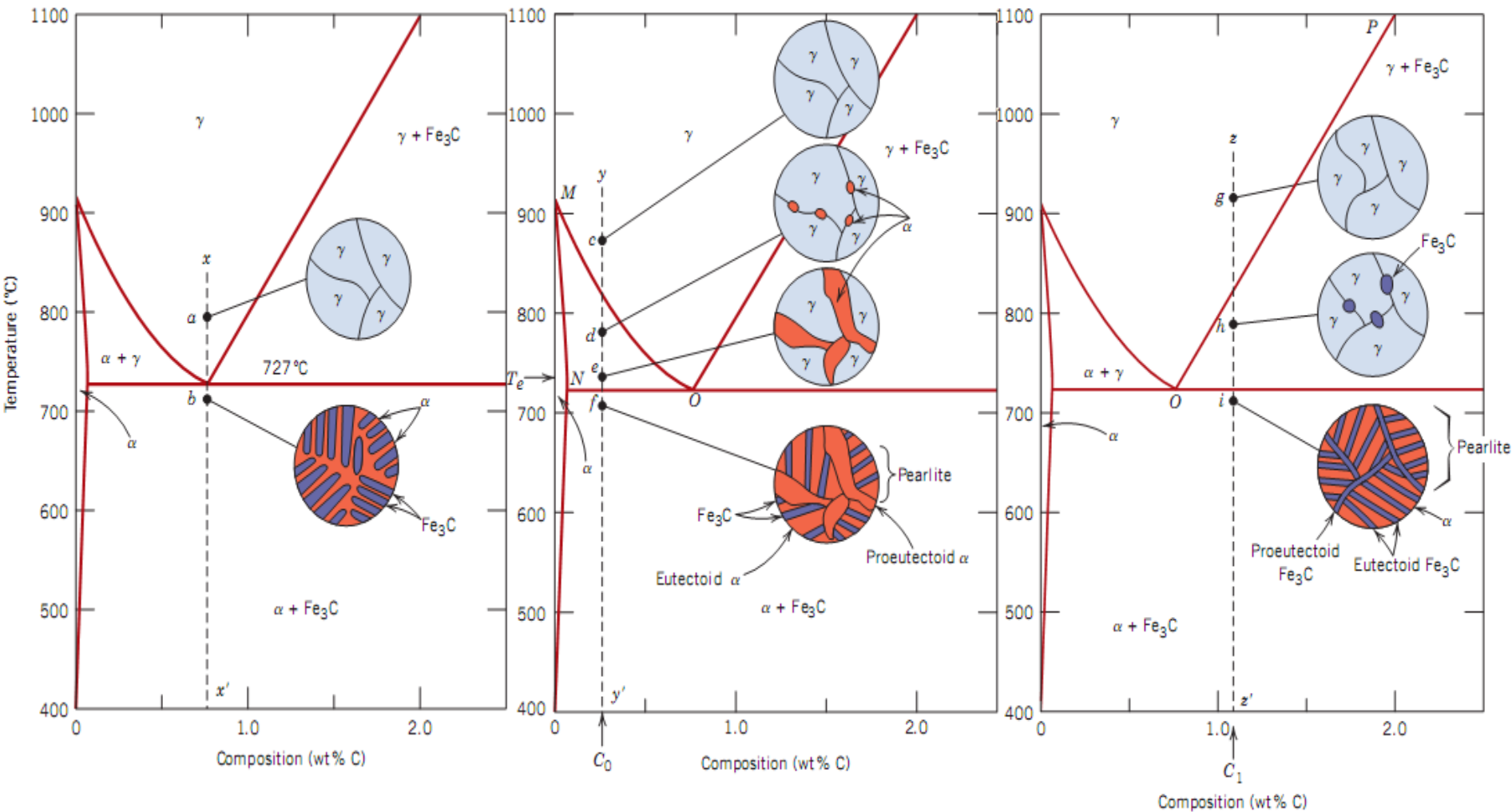
# Diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C



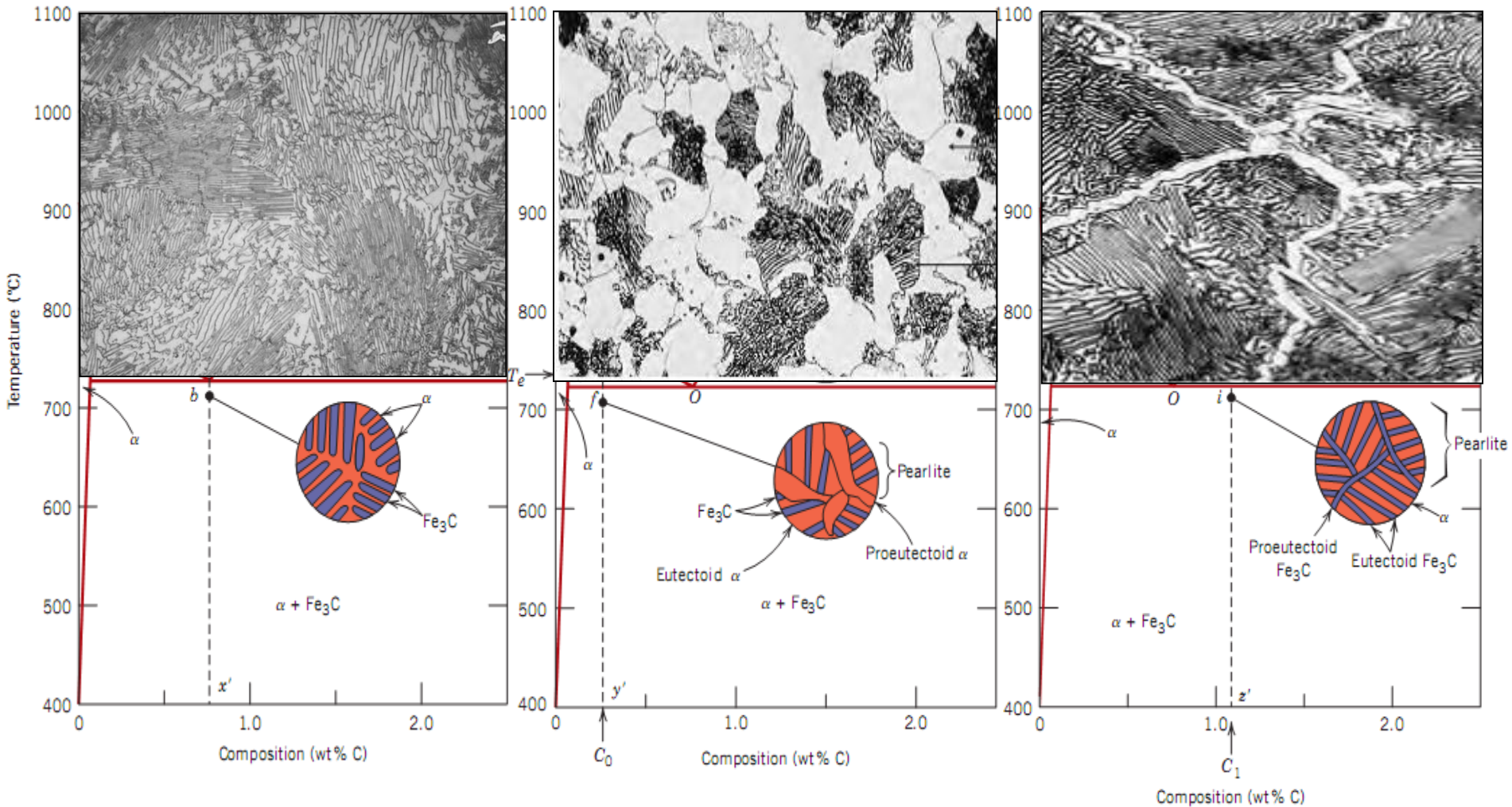
# Transformaciones del acero



# Transformaciones del acero

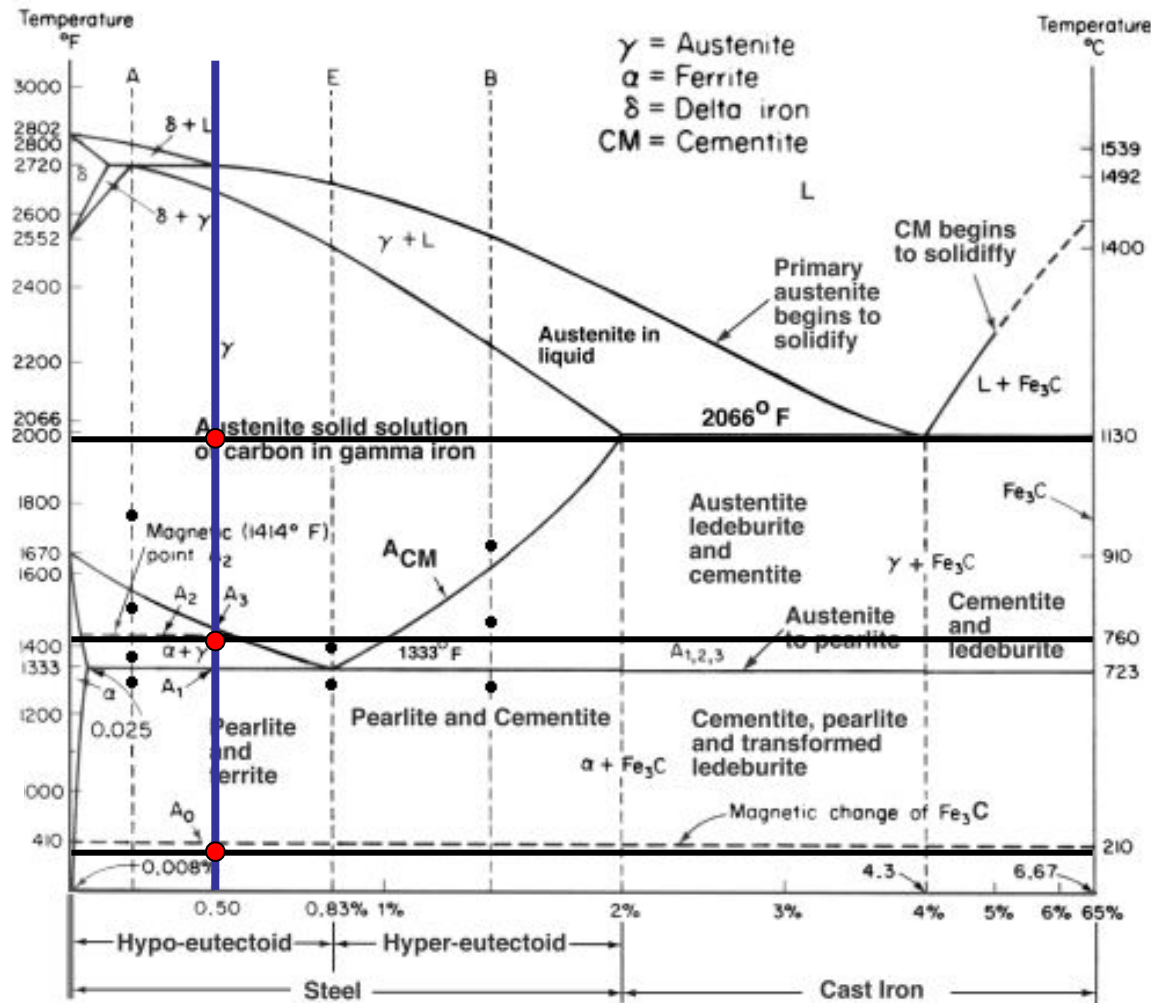
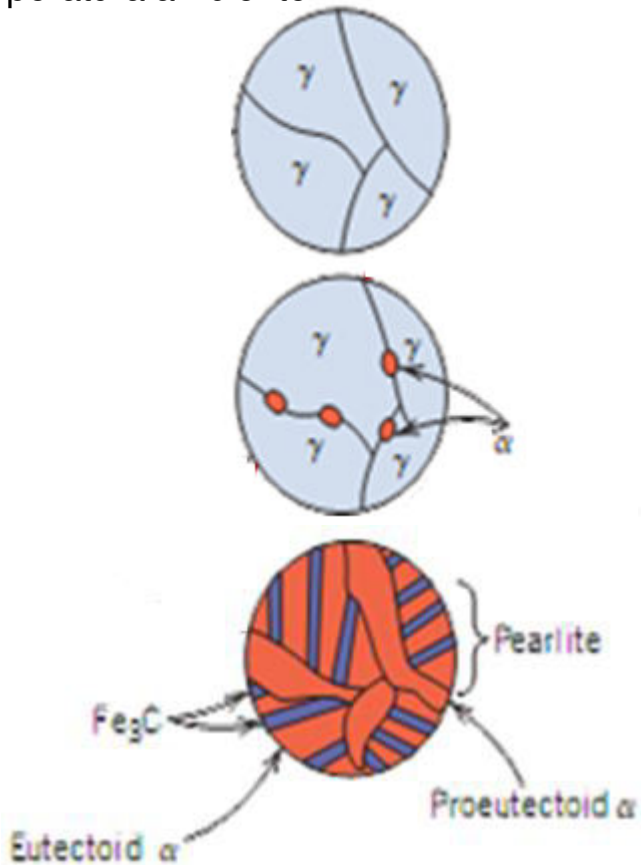


# Transformaciones del acero





c – Haga un esquema de lo que observaría en un microscopio (metalografía) si un acero de 0.5 % estuviera a 1130°C, a 760°C y a temperatura ambiente.





# Diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C

## **α-ferrita - solución solidad de C en Fe BCC**

- Forma estable de hierro a temperatura ambiente
- La máxima solubilidad del C es 0.022 wt%
- Se transforma en FCC γ-austenita a 912° C

## **γ-austenita - solución sólida de C en Fe FCC**

- La máxima solubilidad del C es 2.14 wt%
- Se transforma en BCC δ-ferrita a 1395° C
- No es estable debajo de la temperatura eutectica (727° C) al menos que se enfríe rápidamente

## **δ-ferrita - solución sólida de C en BCC Fe**

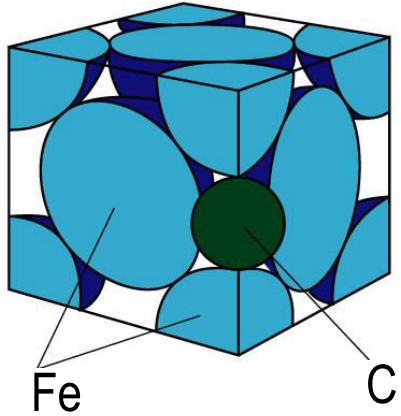
- La misma estructura que α -ferrita
- Estable solo a altas temperaturas (arriba de 1394° C)
- Se funde a 1538° C

## **Fe<sub>3</sub>C (Carburo de hierro o cementita)**

Es un compuesto intermetálico metaestable, se mantiene a temperatura ambiente indefinidamente, pero se descompone (muy lentamente, en el orden de años) en a-Fe y C (grafito) a 650-700° C

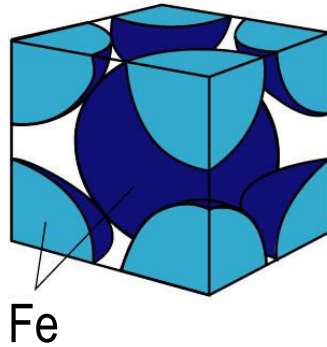
# Estructura cristalina de aleación Fe-C

**Austenita (FCC)**

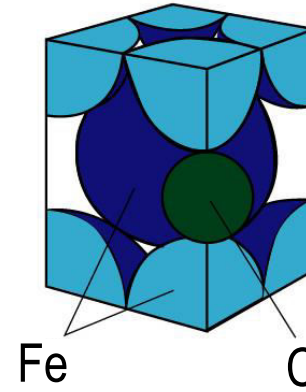


C en solución sólida intersticial

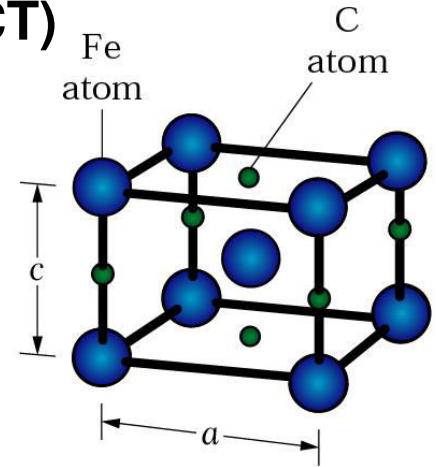
**Ferrita (BCC)**



**Martensita (BCT)**



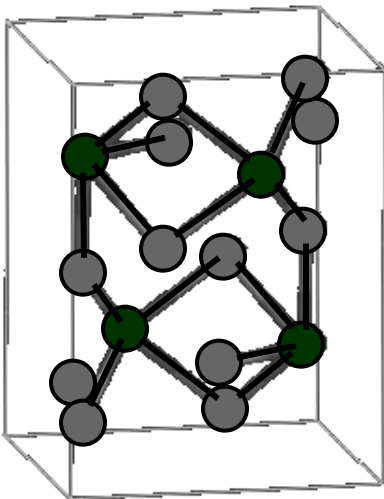
Transformación sin difusión



carbon (%)	c (nm)	a (nm)
0	0.286	0.286
0.20	0.288	0.2858
0.40	0.291	0.2856

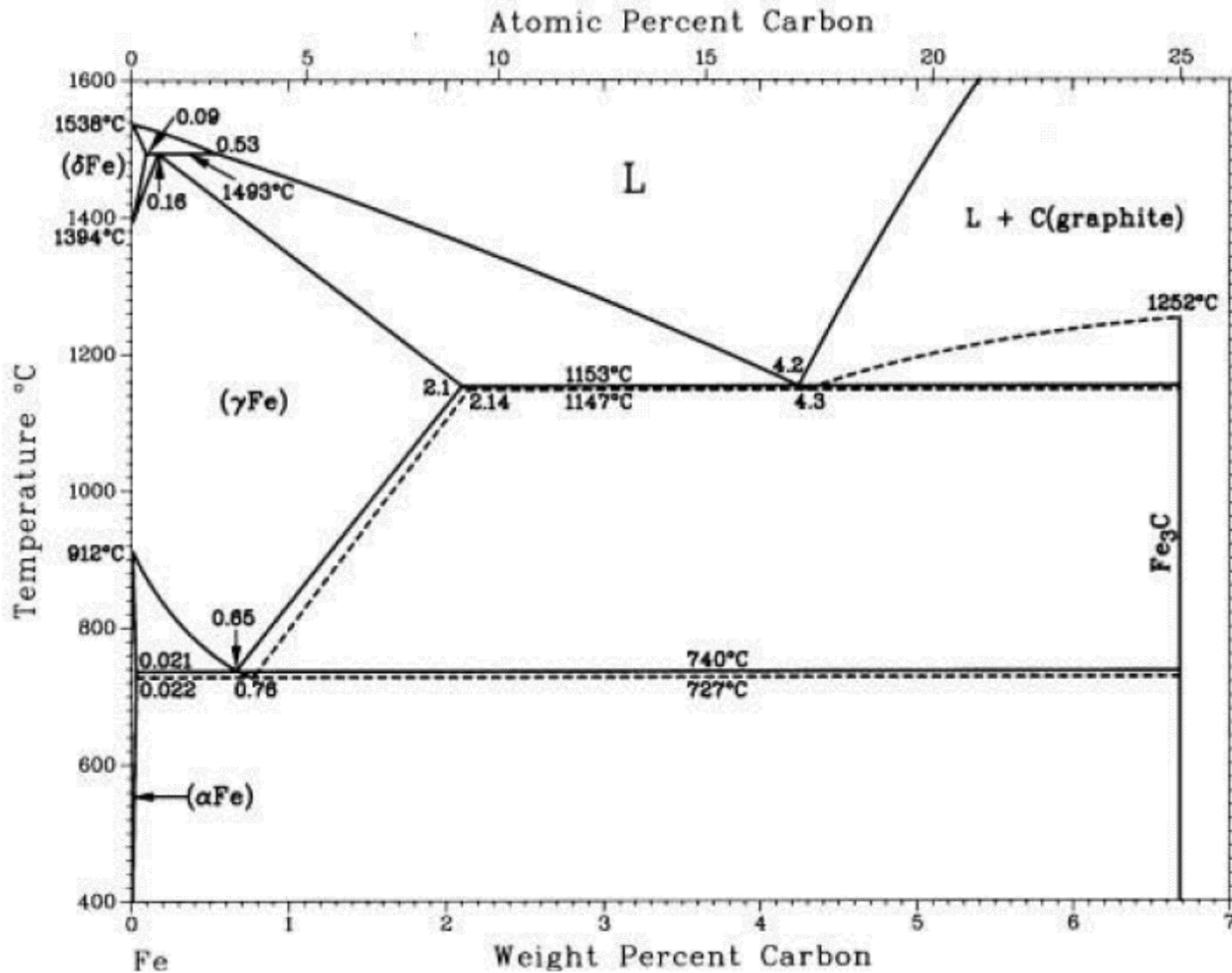
## Cementita Fe<sub>3</sub>C

Estructura ortorrómbica con parámetros de red:  
 $a = 0,45165 \text{ nm}$   $b = 0,50837 \text{ nm}$   $c = 0,67297 \text{ nm}$   
 12 átomos de Fe y 4 de C por celda

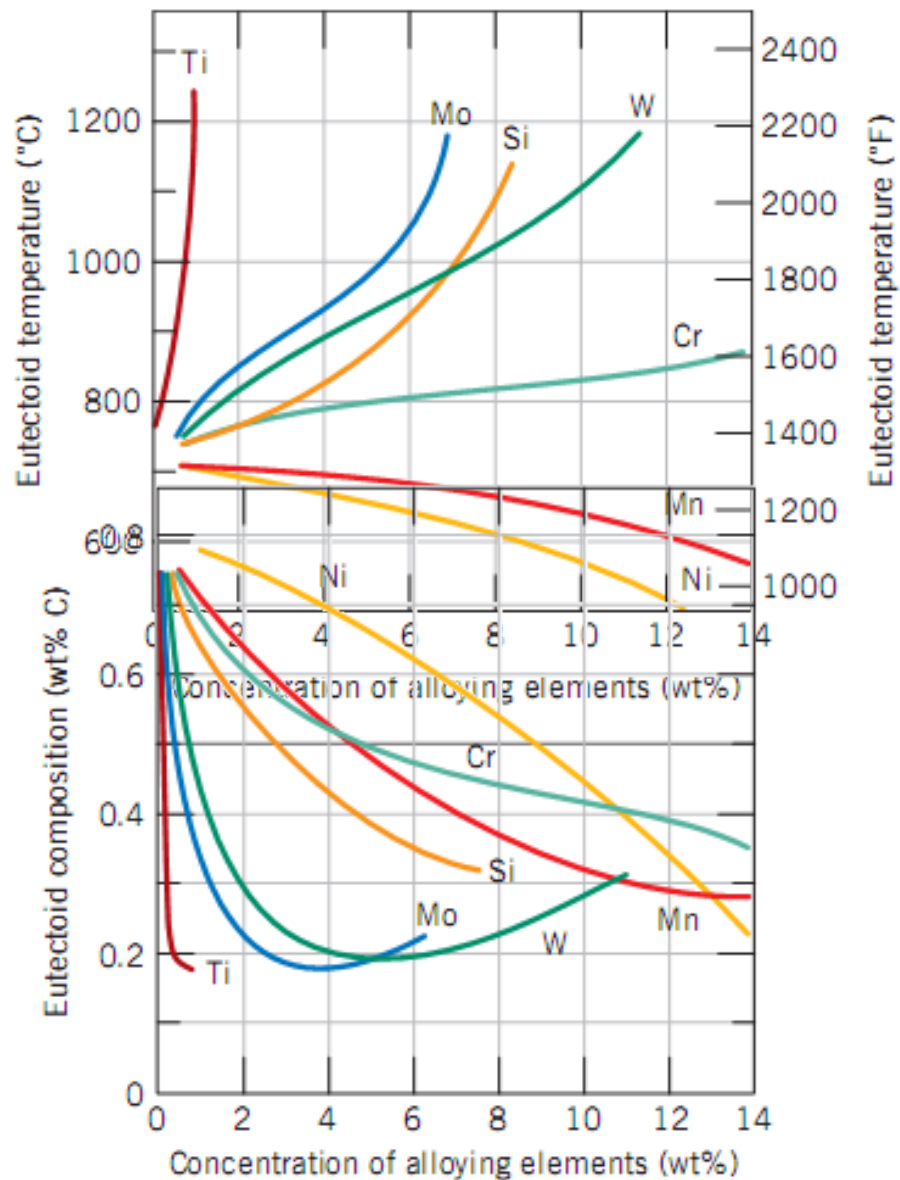
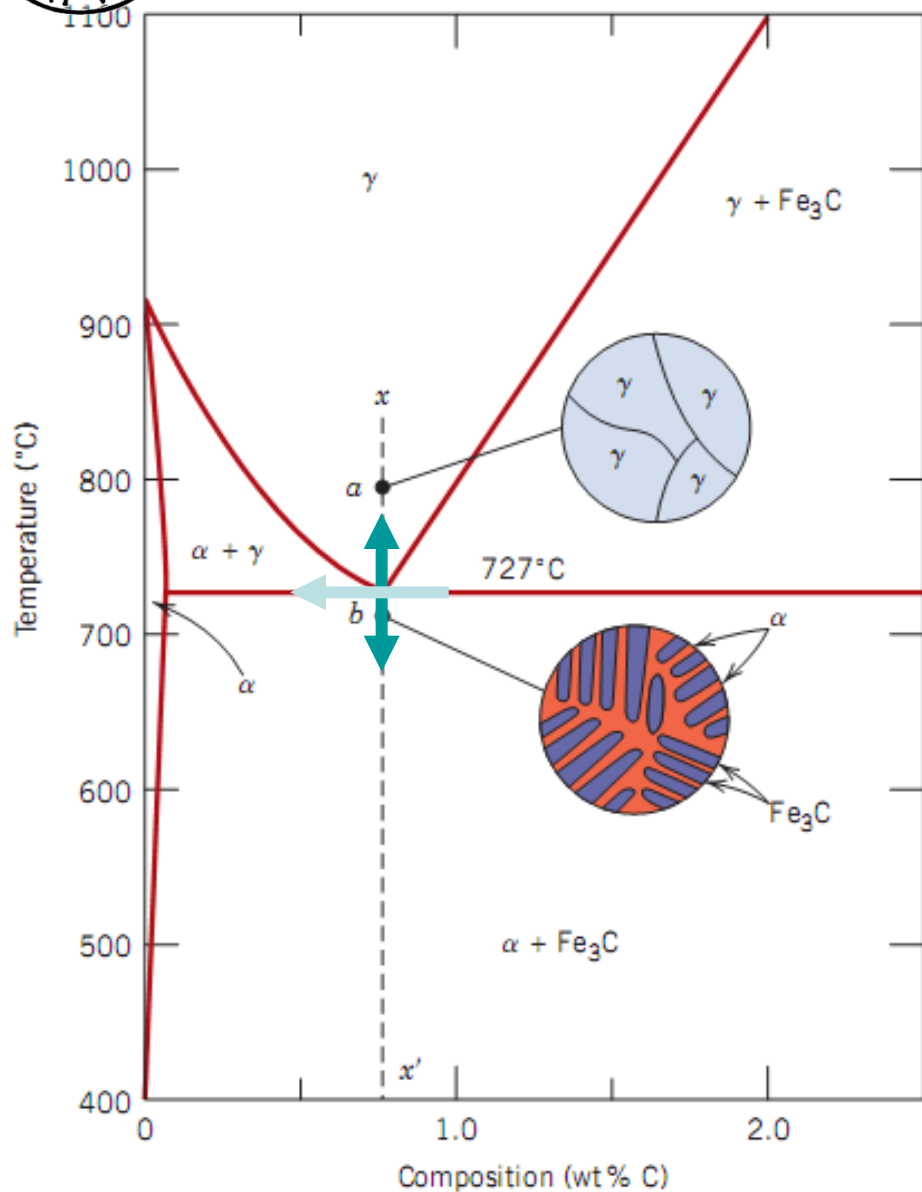




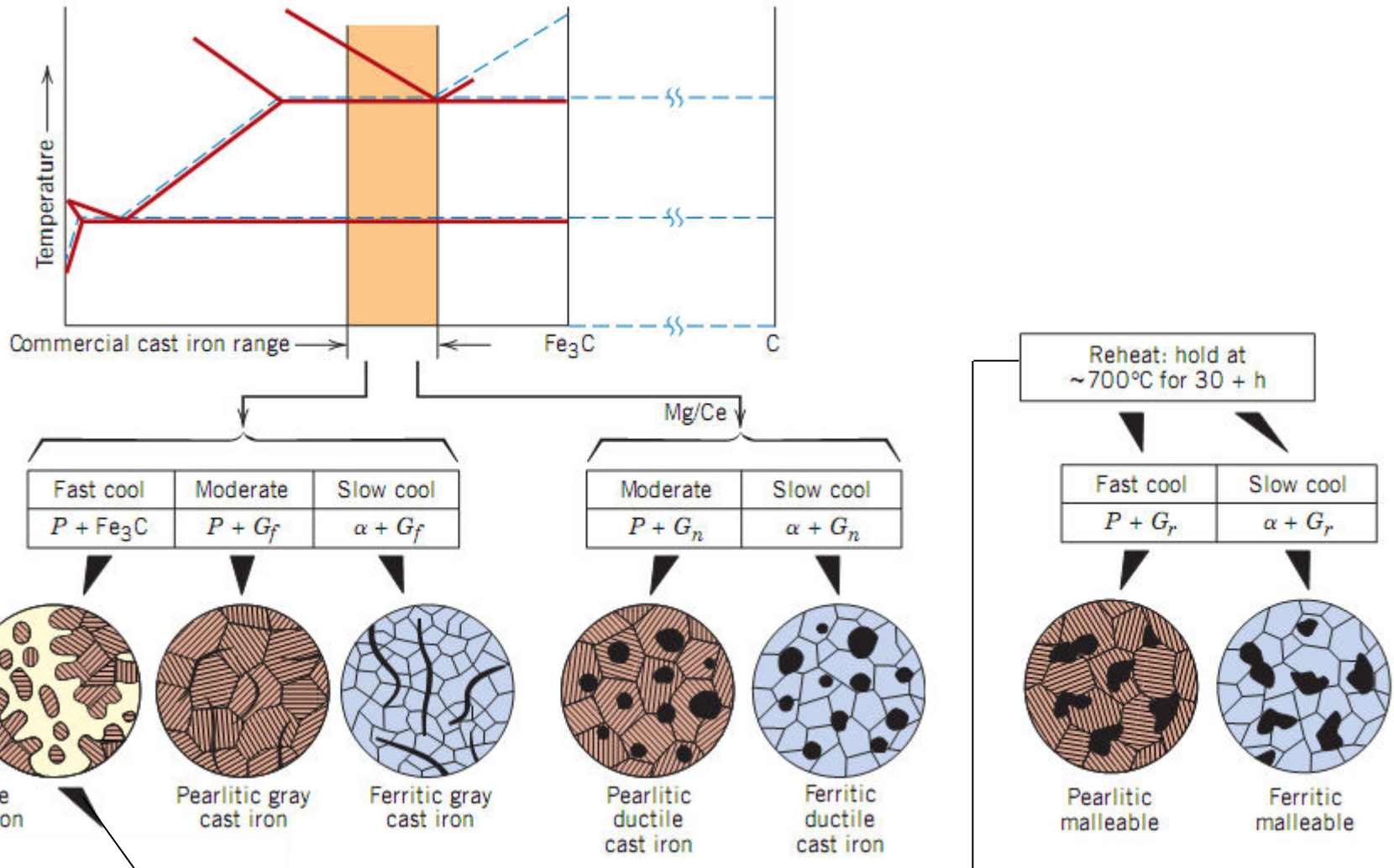
# Diagrama Fe-C



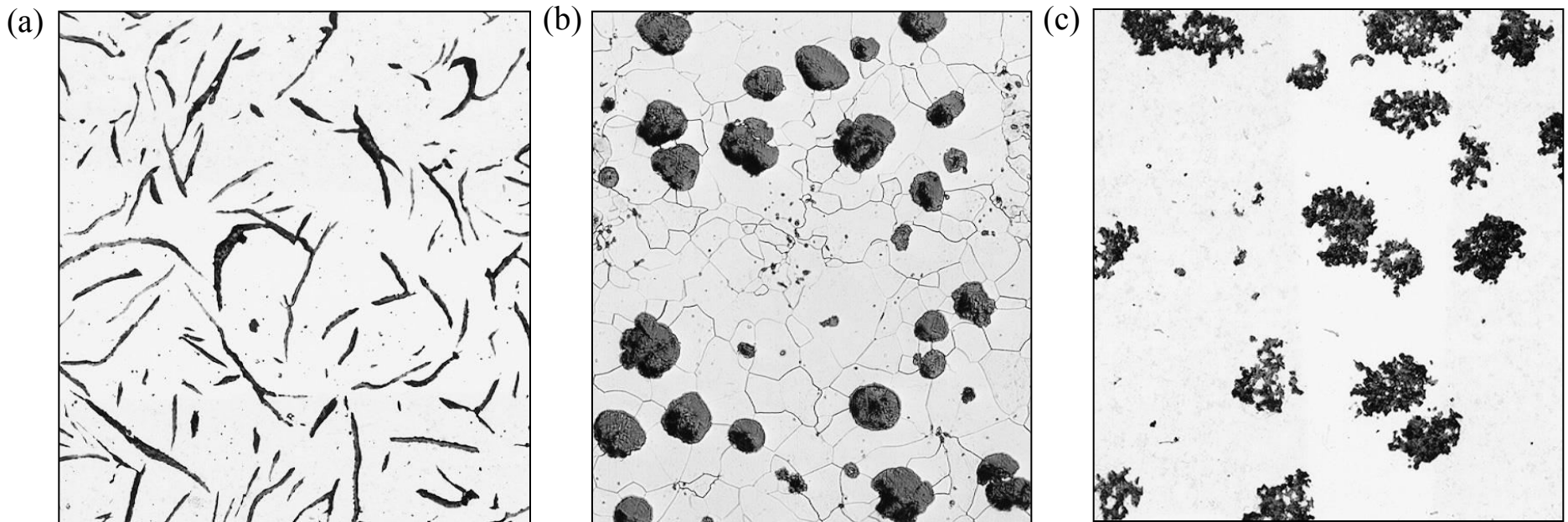
# Diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C



# Microestructura de la fundición de hierro



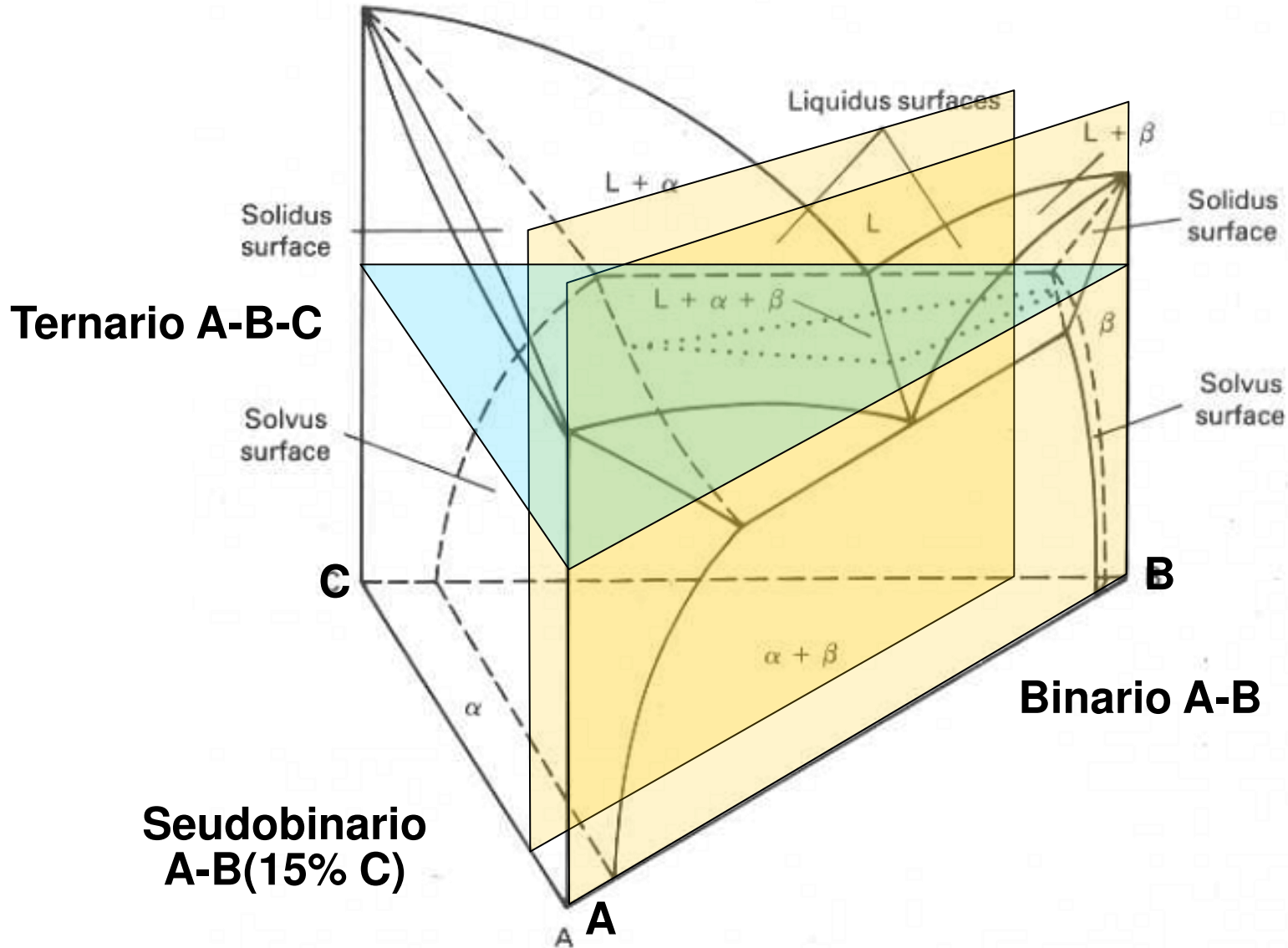
# Microestructura de la fundición de hierro



Microestructuras de Hierro fundido. Magnificación 100X.

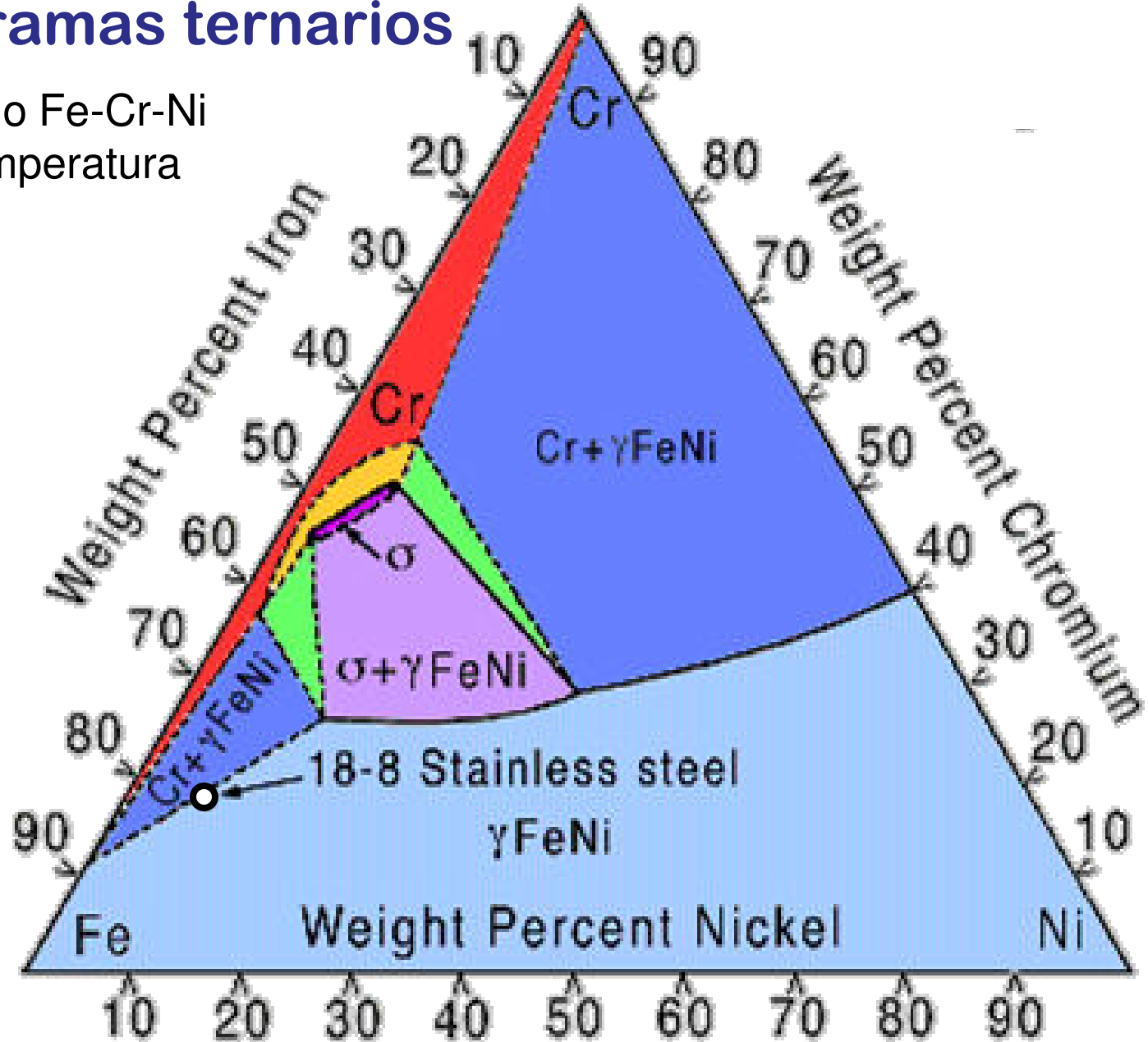
- (a) Hierro gris ferrítico con escamas de Grafito.
- (b) Hierro dúctil ferrítico (Hierro nodular) con Grafito en forma nodular
- (c) Hierro maleable ferrítico; este hierro fundido se solidificó como hierro blanco, con carbono presente como cementita, y fue tratado térmicamente para grafitizar el carbono.

# Diagramas ternarios



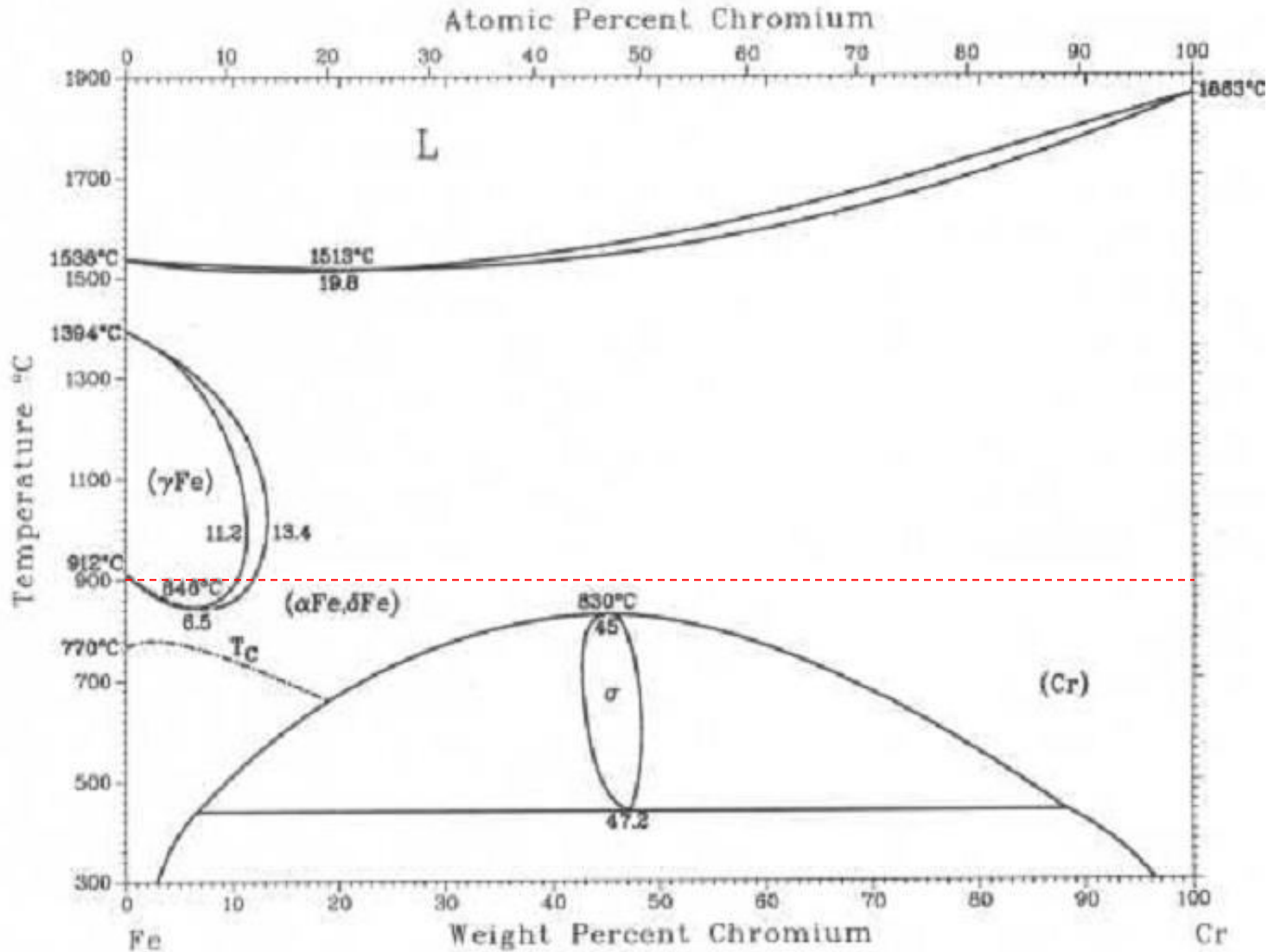
# Diagramas ternarios

Diagrama ternario Fe-Cr-Ni  
a 900° C de temperatura



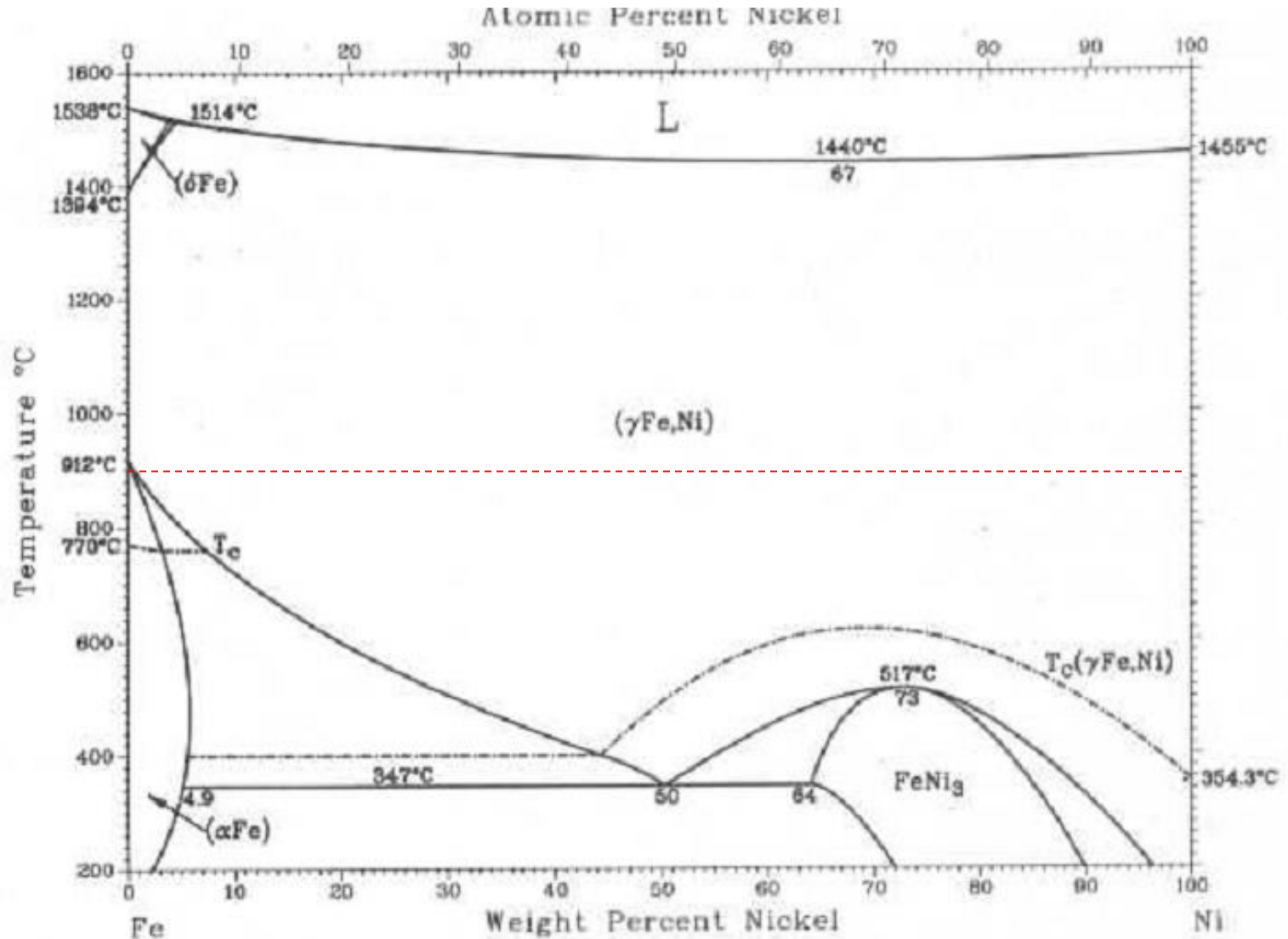


# Diagramas de fase: Fe-Cr





# Diagramas de fase: Fe-Ni





# Diagramas de fase: Ni-Cr

