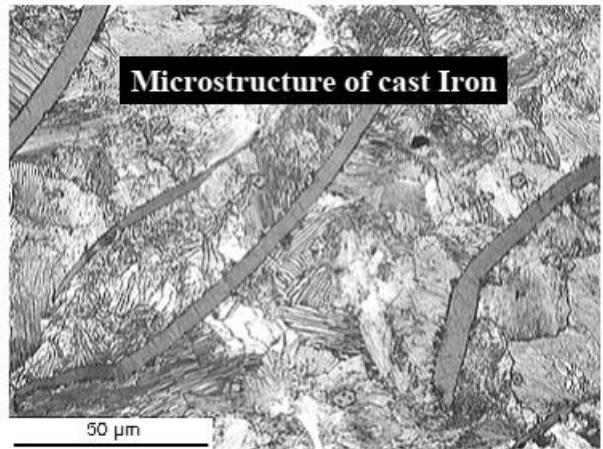


# Diagramas de Fase y Transformaciones en Sistemas Multicomponentes

Este material presenta los conceptos fundamentales de los diagramas de fase y las transformaciones microestructurales en sistemas multicomponentes, con énfasis en sistemas binarios. Exploraremos desde definiciones básicas hasta sistemas complejos como el hierro-carbono, analizando cómo la microestructura determina las propiedades de las aleaciones.

Los diagramas de fase son herramientas fundamentales en la ciencia e ingeniería de materiales que permiten predecir y controlar la microestructura de aleaciones y otros sistemas multicomponentes. Su comprensión es esencial para el diseño de materiales con propiedades específicas para aplicaciones en industrias como la automotriz, aeroespacial, electrónica y construcción. El estudio de los diagramas de fase binarios nos proporciona la base para entender sistemas más complejos como el hierro-carbono, fundamental para la producción de aceros y fundiciones.

# Definiciones y Conceptos Básicos: Componentes y Fases



## Componente

Especie químicamente reconocible (Fe y C en acero al carbono, H<sub>2</sub>O y Sacarosa en solución de azúcar en agua). Una aleación binaria contiene dos componentes, una aleación ternaria – tres, etc.

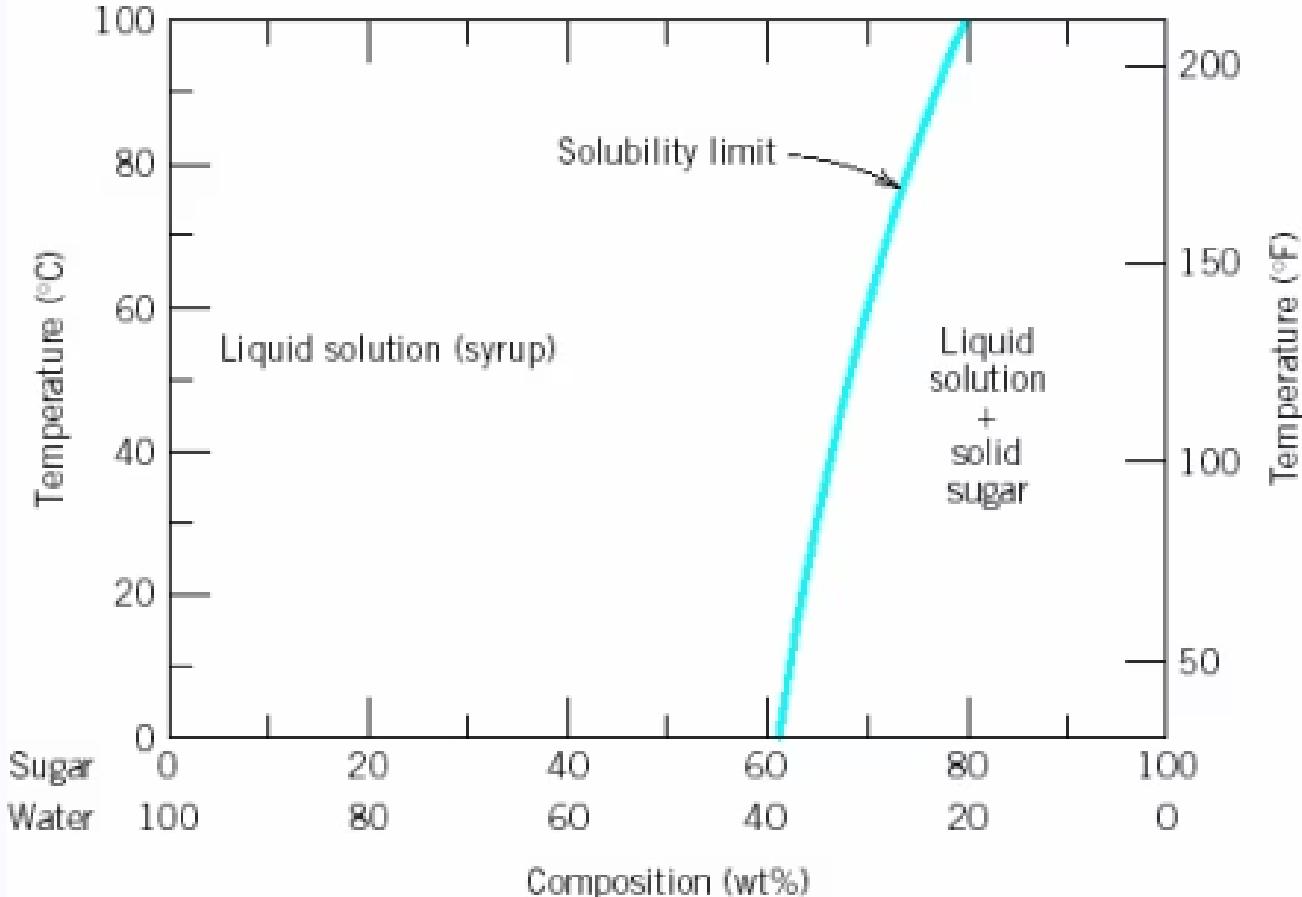
## Fase

Porción de un sistema que tiene características físicas y químicas uniformes. Dos fases distintas en un sistema tienen características físicas y/o químicas distintas (por ejemplo, agua y hielo, agua y aceite) y están separadas entre sí por límites de fase definidos. Una fase puede contener uno o más componentes.

## Sistema

Un sistema monofásico se llama homogéneo, los sistemas con dos o más fases son mezclas o sistemas heterogéneos.

# Límite de Solubilidad



## Definiciones Básicas

Solvente: componente principal o principal en solución;  
sólido: componente minoritario.

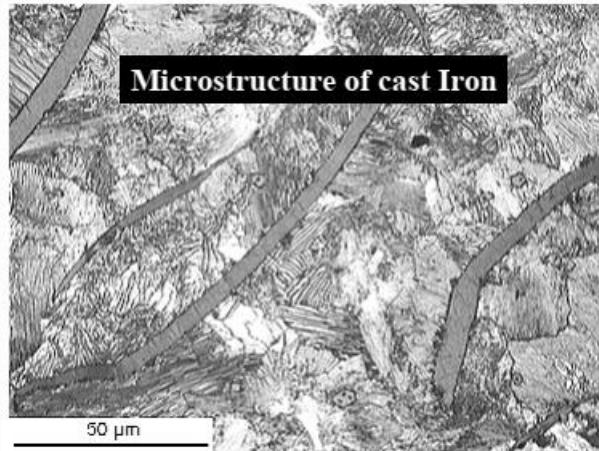
## Concepto de Solubilidad

El límite de solubilidad de un componente en una fase es la cantidad máxima del componente que puede disolverse en ella (p. ej., el alcohol tiene una solubilidad ilimitada en agua, el azúcar tiene una solubilidad limitada y el aceite es insoluble).

## Aplicación a Fases Sólidas

Los mismos conceptos se aplican a las fases sólidas: el Cu y el Ni son mutuamente solubles en cualquier cantidad (solubilidad sólida ilimitada), mientras que el C tiene una solubilidad limitada en Fe.

# Microestructura



## Definición de Microestructura

Las propiedades de una aleación dependen no solo de las proporciones de las fases sino también de cómo están dispuestas estructuralmente a nivel microscópico.

## Fases de la Microestructura

La microestructura se especifica por el número de fases, sus proporciones y su disposición en el espacio.

## Análisis con Diagramas de Fase

Los diagramas de fase nos ayudarán a entender y predecir microestructuras como la mostrada en la figura.

En la imagen se observan regiones grises largas que son escamas de grafito. La matriz es una mezcla fina de Fe BCC y compuesto Fe<sub>3</sub>C.

# Estados de Equilibrio y Metaestables

## Sistema en Equilibrio

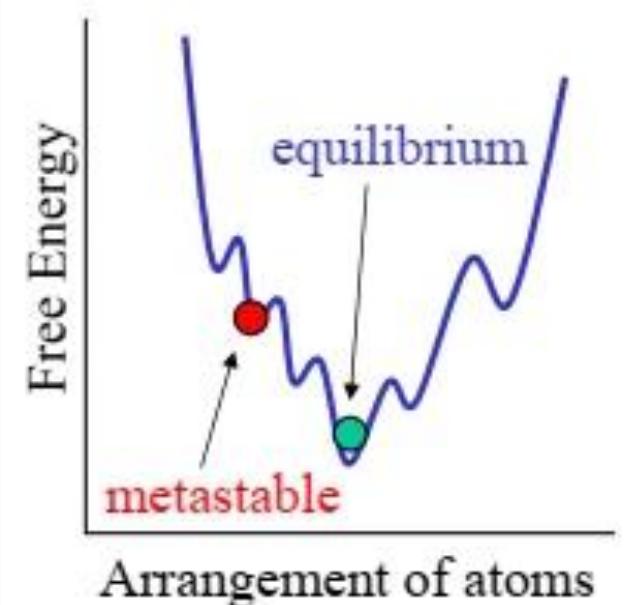
Un sistema está en equilibrio si a temperatura, presión y composición constantes, el sistema es estable, no cambia con el tiempo.

El equilibrio es el estado que se alcanza dado el tiempo suficiente. Pero el tiempo para alcanzar el equilibrio puede ser muy largo (la cinética puede ser lenta) que un estado en el camino hacia el equilibrio puede parecer estable. Esto se llama un estado metaestable.

## Equilibrio termodinámico

En termodinámica, el equilibrio se describe como un estado de un sistema que corresponde al mínimo de la función termodinámica llamada energía libre. La termodinámica nos dice que:

- Bajo condiciones de temperatura, presión y composición constantes, la dirección de cualquier cambio espontáneo es hacia una energía libre más baja.
- El estado de equilibrio termodinámico estable es el que tiene la mínima energía libre.
- Un sistema en un estado metaestable está atrapado en un mínimo local de energía libre.



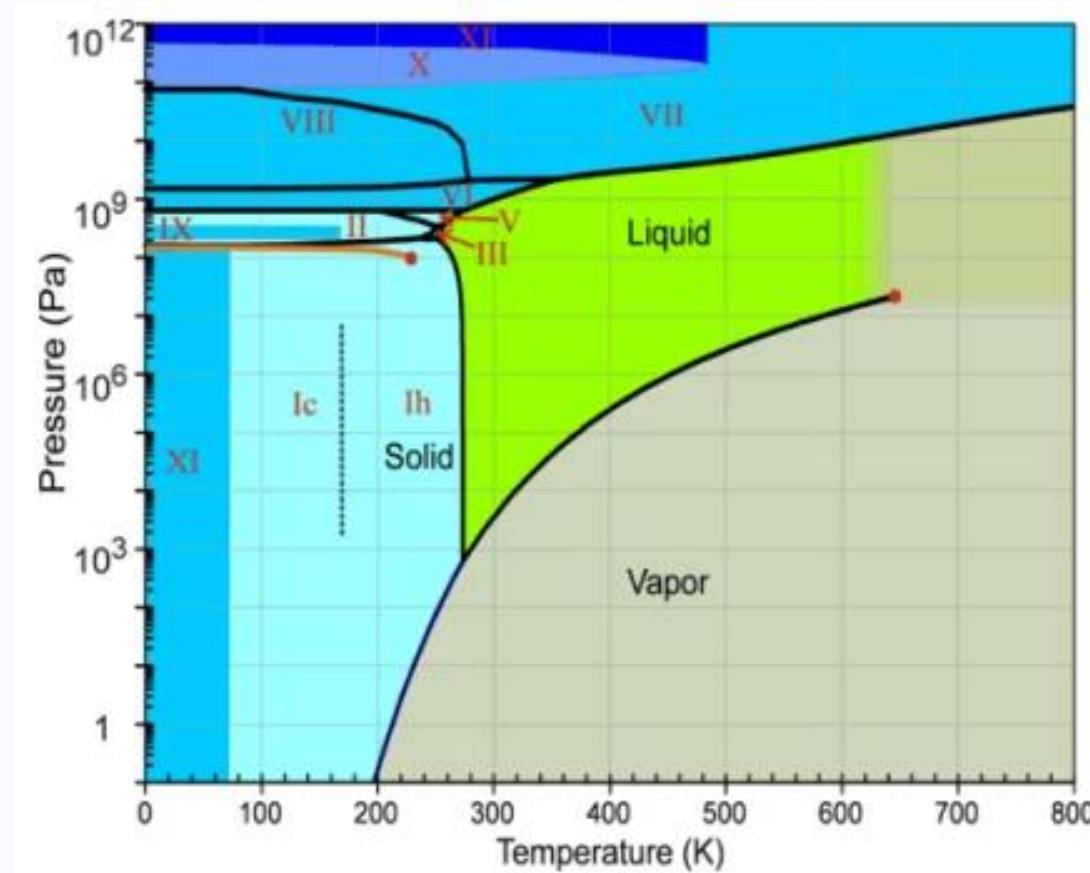
# Diagramas de Fase

## Definición

El diagrama de fases es una representación gráfica de todas las fases de equilibrio en función de la temperatura, la presión y la composición.

## Sistemas de un componente

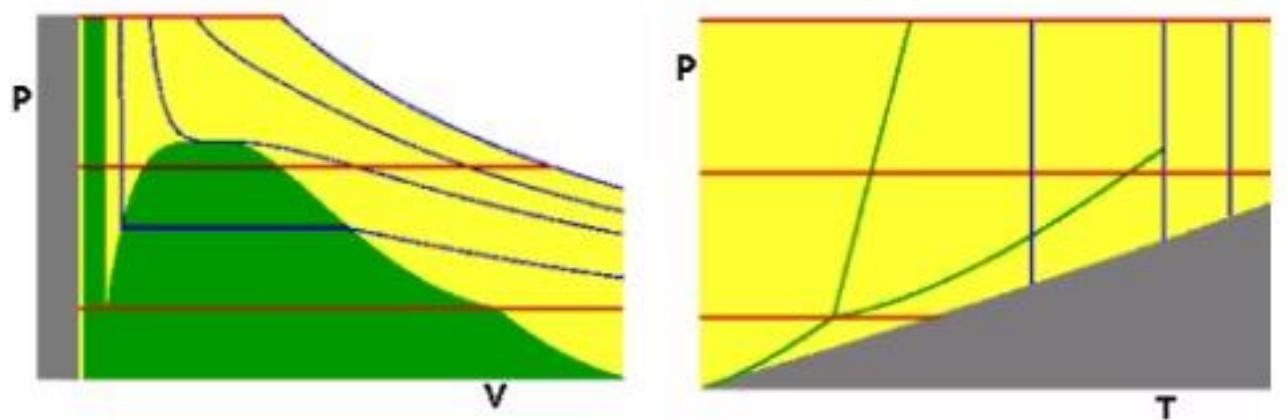
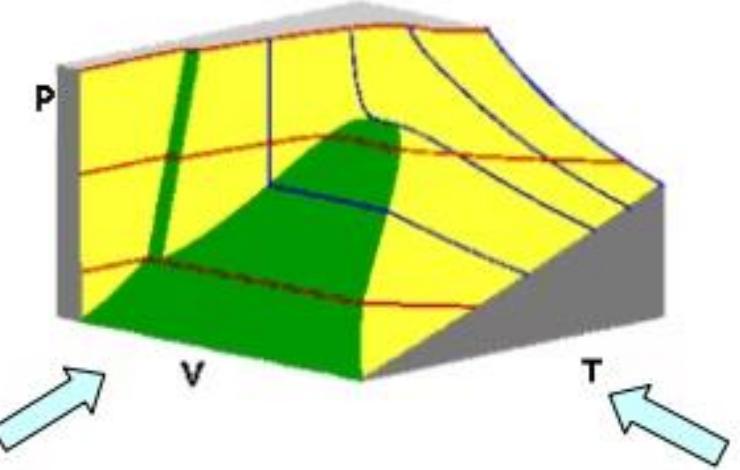
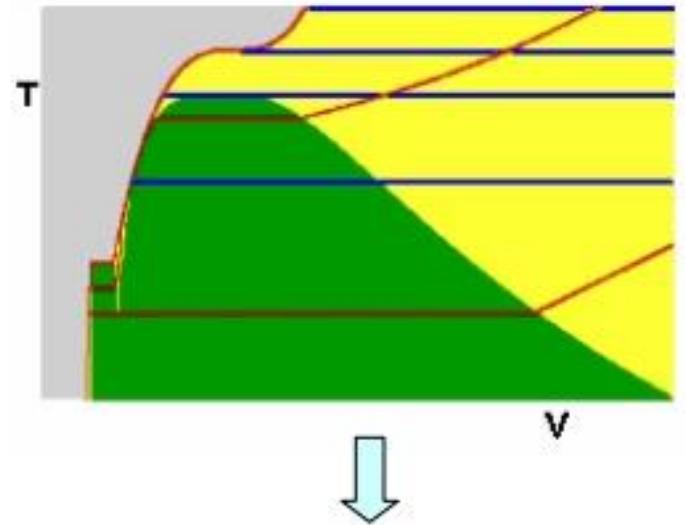
Para sistemas de un componente, el estado de equilibrio del sistema está definido por dos parámetros independientes ( $P$  y  $T$ ), ( $T$  y  $V$ ), o ( $P$  y  $V$ ).



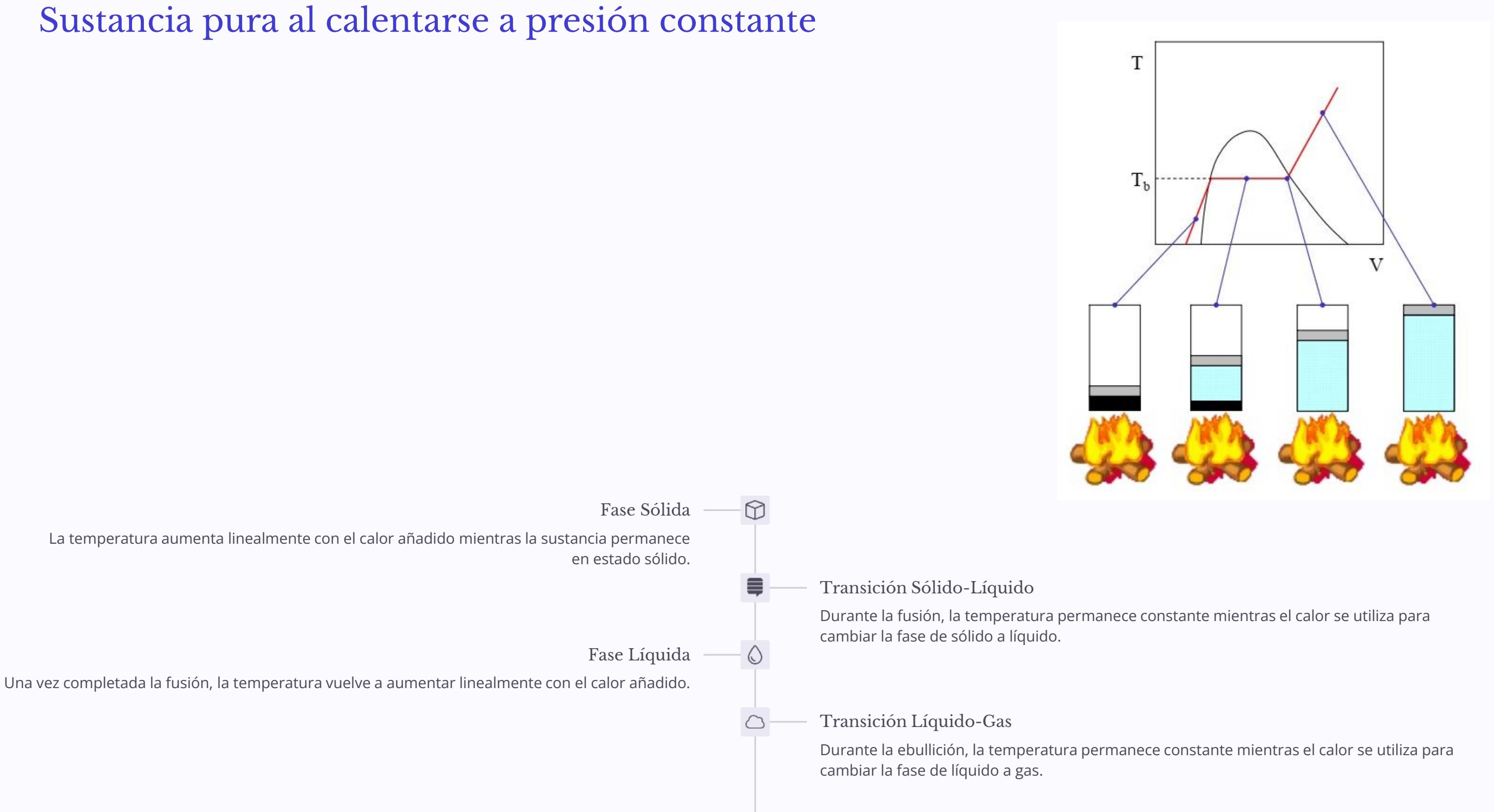
## Ejemplo: Agua

Diagrama de fases de presión-temperatura para  $\text{H}_2\text{O}$ , como se muestra en la imagen.

## Superficie PVT de una sustancia pura



# Sustancia pura al calentarse a presión constante

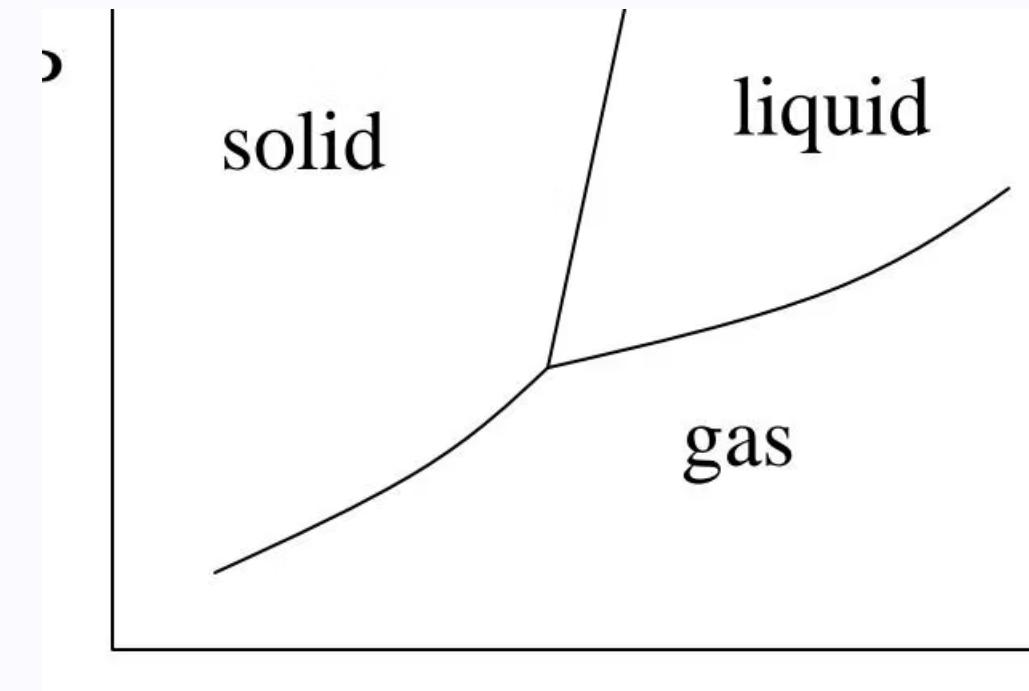


# La Regla de Fases de Gibbs

Consideremos un sistema simple de un componente. En las áreas donde solo una fase P es estable, tanto la presión como la temperatura pueden variarse **independientemente** sin alterar el equilibrio de fase → hay 2 grados de libertad.

A lo largo de las líneas donde coexisten dos fases en equilibrio, solo una variable puede variarse **independientemente** sin alterar el equilibrio de dos fases (P y T están relacionadas por la ecuación de Clapeyron) → hay solo un grado de libertad.

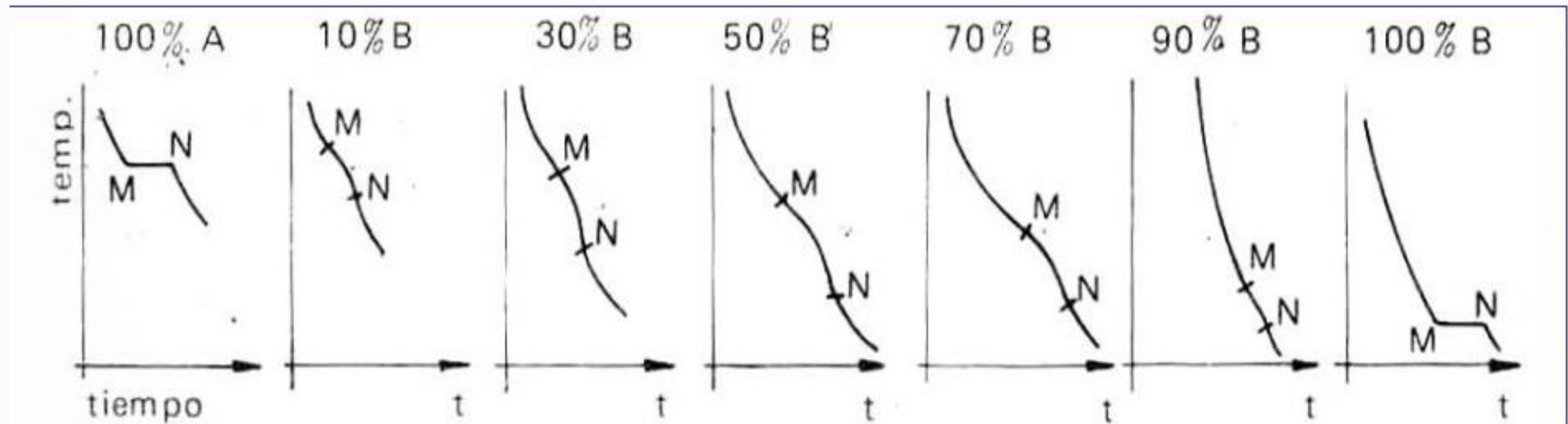
En el punto triple, donde coexisten sólido, líquido y vapor, cualquier cambio en P o T alteraría el equilibrio de tres fases → no hay grados de libertad.



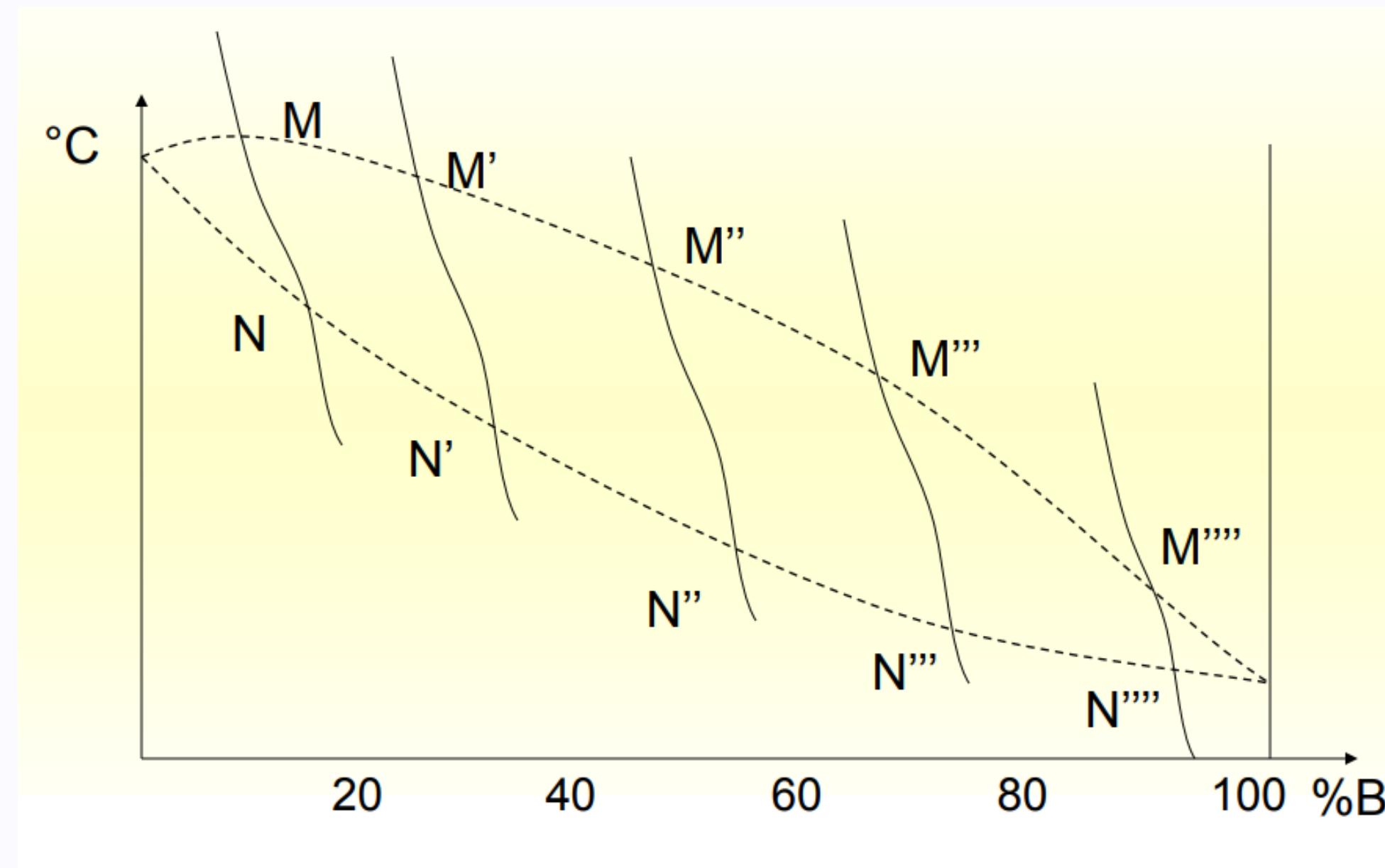
En general, el número de grados de libertad, F, en un sistema que contiene C componentes y puede tener Ph fases está dado por la **regla de fases de Gibbs**:

$$F = C - Ph + 2$$

## Curvas de enfriamiento para distintas composiciones de aleación



# Curvas de enfriamiento para distintas composiciones de aleación



# Diagramas de Fase para Sistemas Binarios



## Utilidad de los Diagramas de Fase

Los diagramas de fase muestran qué fases existen en equilibrio y qué transformaciones de fase podemos esperar cuando cambiamos uno de los parámetros del sistema.



## Materiales Reales

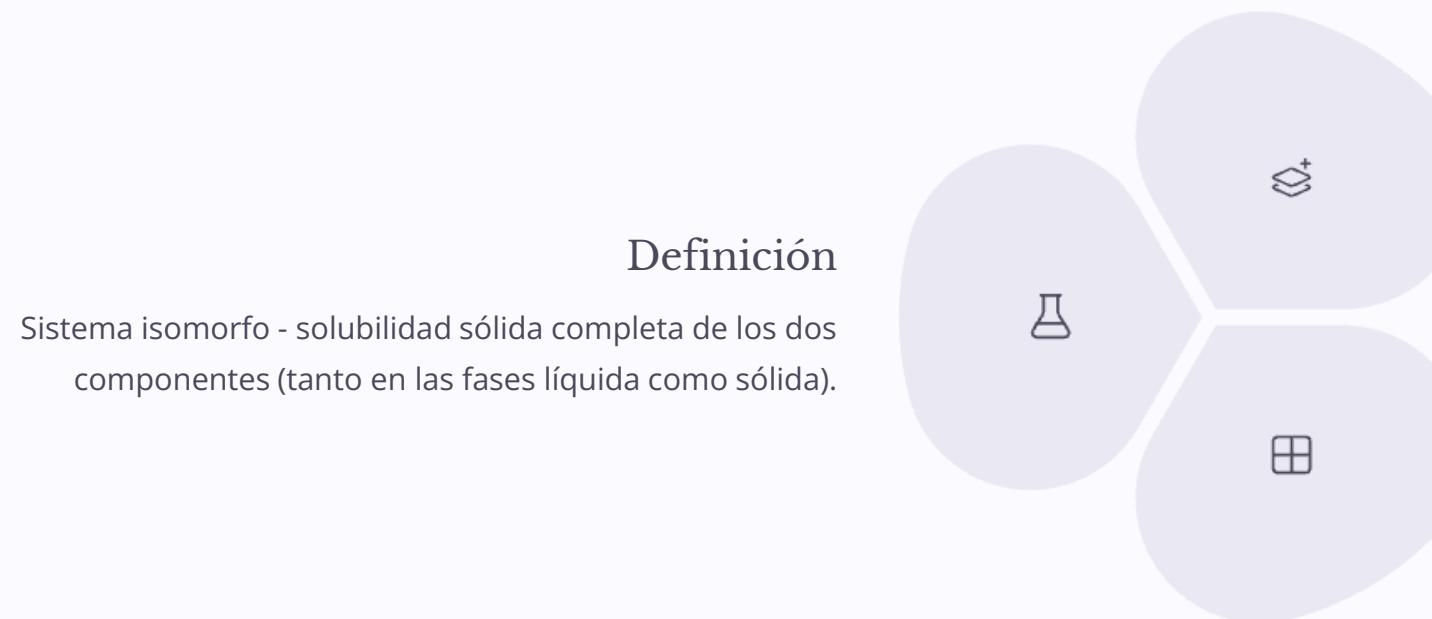
Los materiales reales son casi siempre mezclas de diferentes elementos en lugar de sustancias puras: además de T y P, la composición también es una variable.



## Limitaciones del Estudio

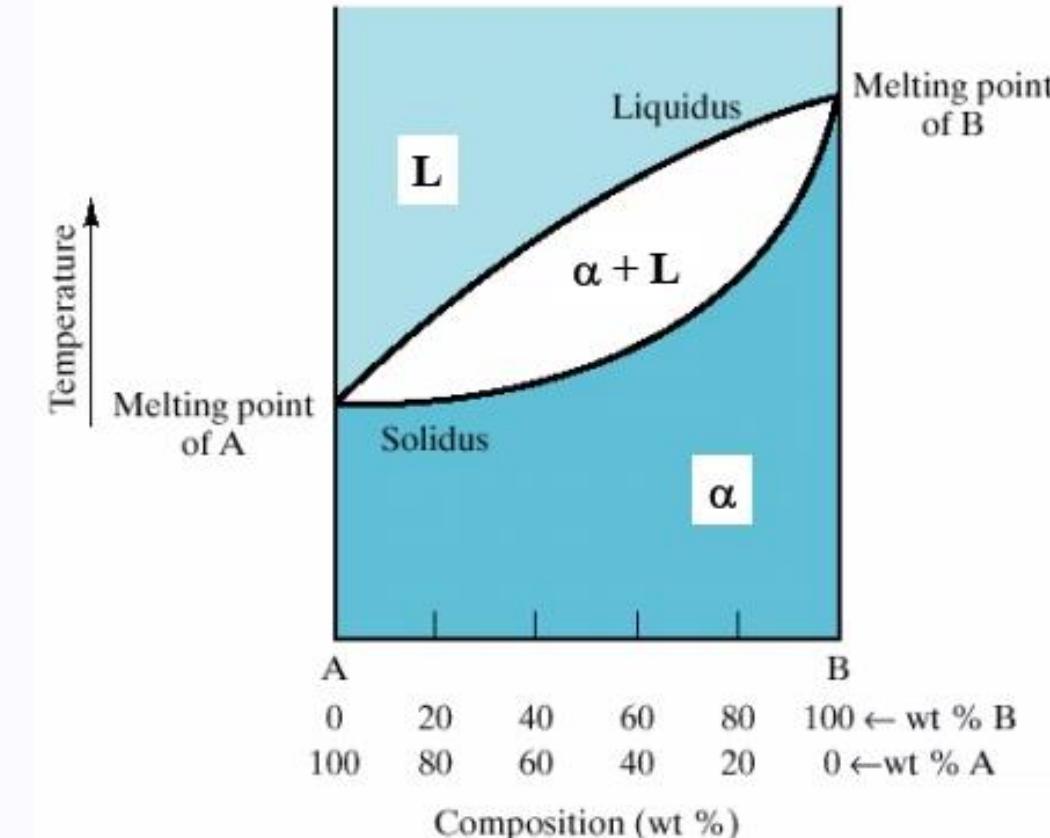
Limitaremos nuestra discusión de diagramas de fase de sistemas multicomponentes a aleaciones binarias y asumiremos que la presión es constante a una atmósfera.

# Sistemas Binarios Isomorfos (I)



## Definición

Sistema isomorfo - solubilidad sólida completa de los dos componentes (tanto en las fases líquida como sólida).



## Regiones de Fase

Se pueden identificar tres regiones de fase en el diagrama de fase: Líquido (L), sólido + líquido ( $\alpha + L$ ), sólido ( $\alpha$ )

## Líneas Importantes

La línea de liquidus separa el líquido del líquido + sólido

La línea de solidus separa el sólido del líquido + sólido

# Sistemas Binarios Isomorfos (II)



Ejemplo de Sistema isomorfos  
Sistema Cu-Ni



## Razones de solubilidad completa

La solubilidad completa ocurre porque tanto Cu como Ni tienen la misma estructura cristalina, FCC, radios similares y electronegatividad.

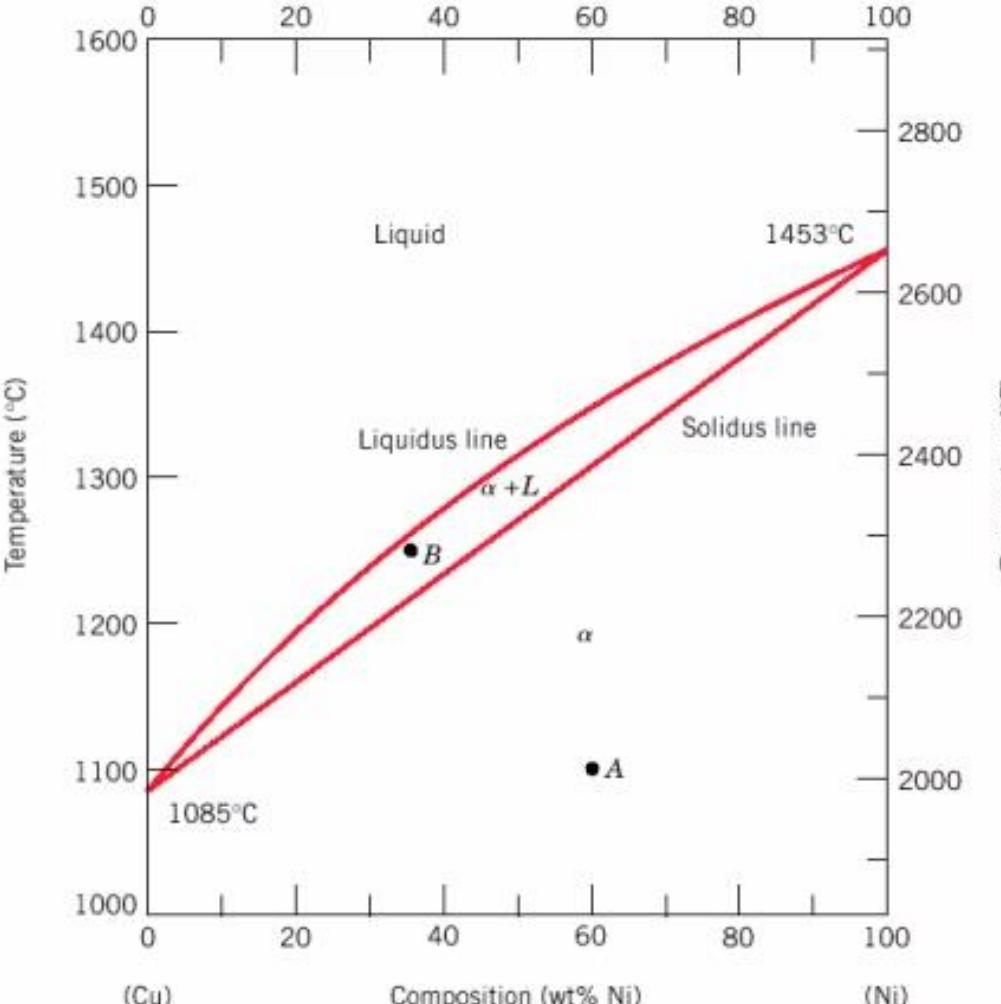


%

## Líneas de Fase

El diagrama muestra claramente las líneas de liquidus y solidus que delimitan las regiones de fase única y bifásica.

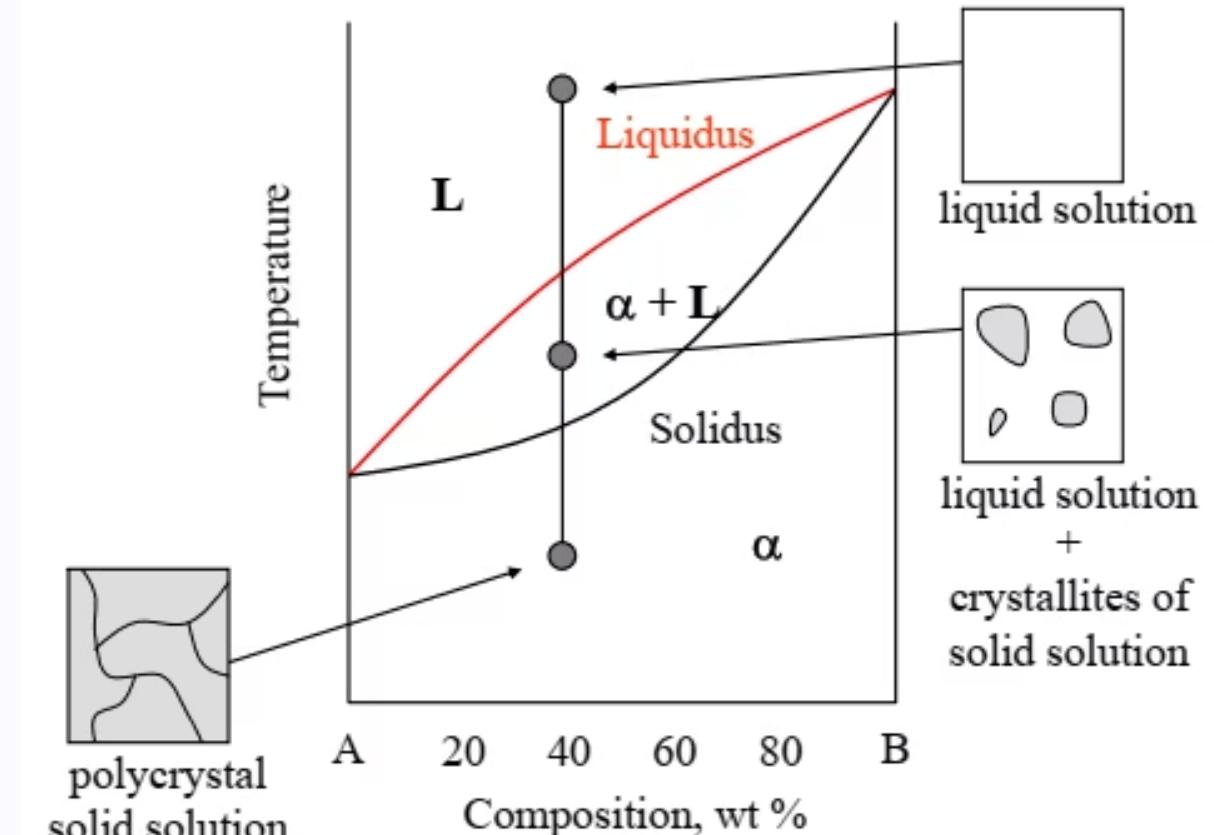
Composition (at% Ni)



## Efecto de la Composición

La temperatura de fusión/solidificación varía continuamente con la composición entre los puntos de fusión de los metales puros.

# Sistemas Binarios Isomorfos (III)



## Fusión en Sistemas de Un Componente

En un sistema de un componente, la fusión ocurre a una temperatura de fusión bien definida.

La transición de fase es “abrupta” y ocurre a una temperatura específica, característica del material puro.

## Fusión en Sistemas Multicomponentes

En sistemas multicomponentes, la fusión ocurre en un rango de temperaturas, entre las líneas de solidus y liquidus. Las fases sólida y líquida están en equilibrio entre sí en este rango de temperatura.

Este comportamiento es característico de las aleaciones y permite manipular las propiedades del material mediante el control de la composición.

# Interpretación de Diagramas de Fase Binarios

## Determinación de Fases Presentes

Para una temperatura y composición dadas, podemos usar el diagrama de fase para determinar:

- Las fases que están presentes.
- Composición de las fases
- Fracciones relativas de las fases.

## Procedimiento

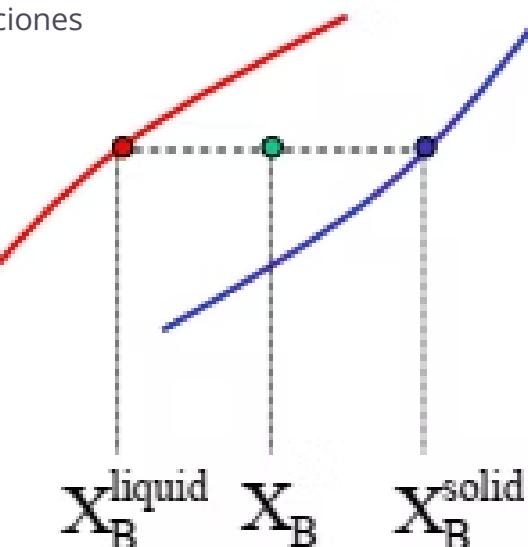
Para encontrar la composición en una región de dos fases:

1. Localizar la composición y temperatura en el diagrama
2. En la región de dos fases, dibujar la línea de enlace o isotermia
3. Observar la intersección con los límites de fase. Leer las composiciones en las intersecciones.

## Composiciones de las Fases

El diagrama permite identificar las composiciones específicas de cada fase presente.

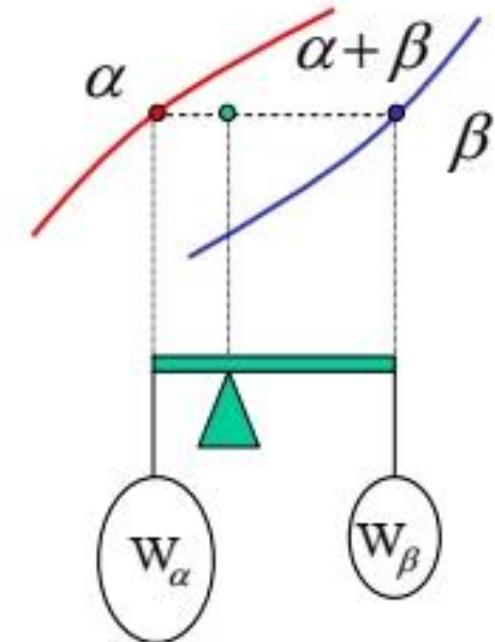
Las fases líquida y sólida tienen estas composiciones



## Fracciones Relativas de las Fases

También podemos calcular las proporciones relativas de cada fase en la mezcla.

# La Regla de la Palanca

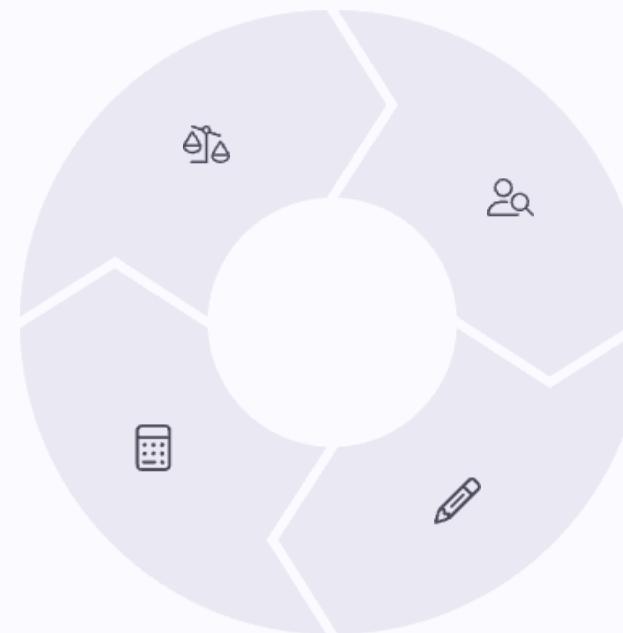


## 1. Concepto

La regla de la palanca es una analogía mecánica al cálculo del balance de masa. La línea de enlace en la región de dos fases es análoga a una palanca equilibrada sobre un punto de apoyo.

## 4. Calcular Fracciones

La fracción de una fase se determina tomando la longitud de la línea de enlace hasta el límite de fase para la otra fase, y dividiendo por la longitud total de la línea de enlace



## 2. Localizar en el Diagrama

Encontrar la composición y temperatura en el diagrama

## 3. Dibujar la Línea de Enlace

En la región de dos fases, dibujar la línea de enlace o isoterma

# Derivación de la Regla de la Palanca

1

El material debe estar en una fase u otra

$$W_{\alpha} + W_L = 1$$

2

La masa de un componente que está presente en ambas fases igual a la masa del componente en una fase + masa del componente en la segunda fase

$$W_{\alpha}C_{\alpha} + W_L C_L = C_o$$

3

La solución de estas ecuaciones nos da la regla de la palanca

$$\begin{aligned} W_L &= (C_{\alpha} - C_o) / (C_{\alpha} - C_L) \\ W_{\alpha} &= (C_o - C_L) / (C_{\alpha} - C_L) \end{aligned}$$

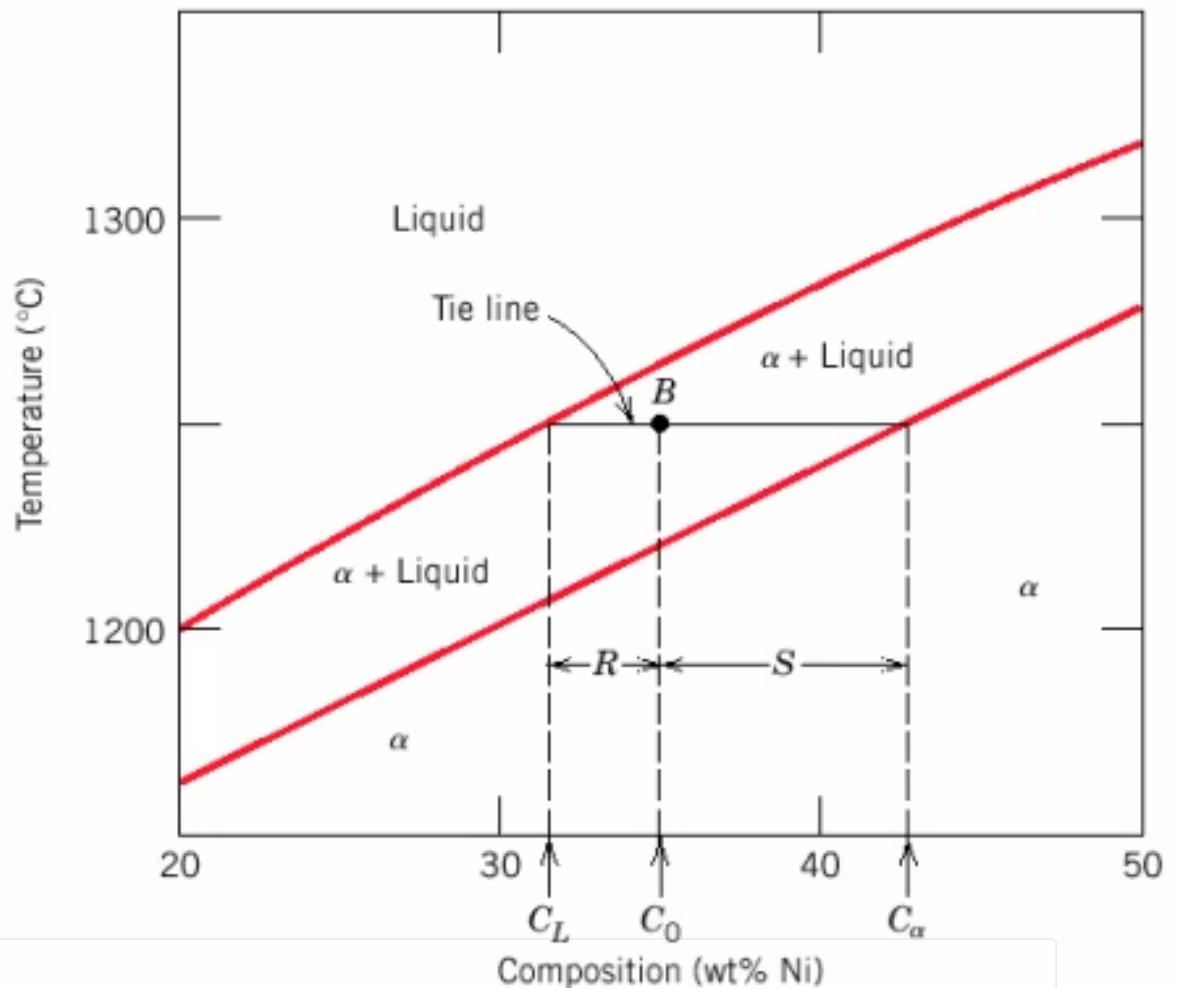
# Composiciones de Fase y Cantidades: Un Ejemplo

Composición Ca (Porcentaje en peso de Ni en la fase $\alpha$ )	42.5%
Composición Co (Porcentaje en peso de Ni en la aleación total)	35%
Composición CL (Porcentaje en peso de Ni en la fase líquida)	31.5%
Fracción másica de líquido (WL)	0.68
Fracción másica de sólido (Wa)	0.32

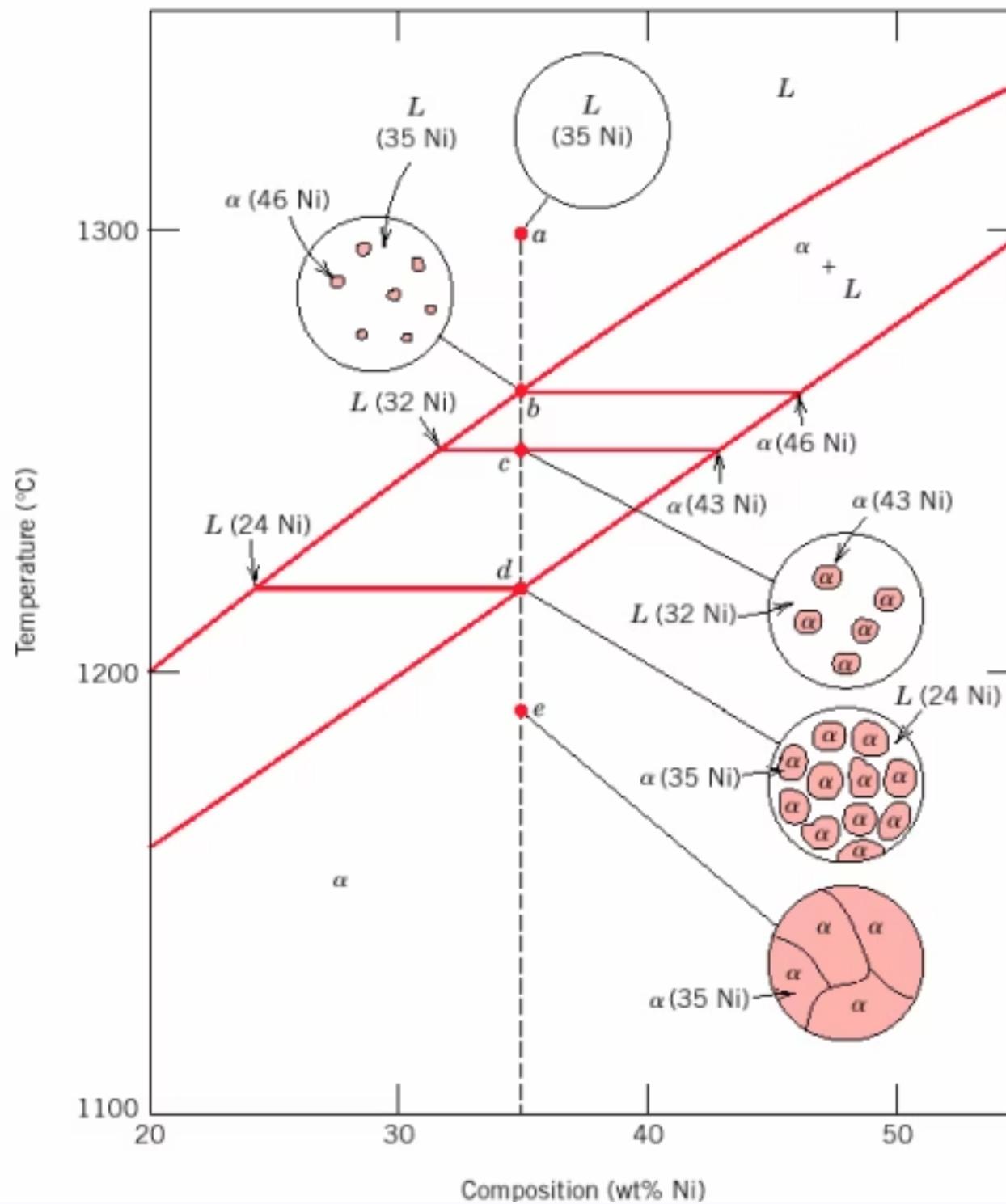
Fracciones másicas:

$$WL = S / (R + S) = (Ca - Co) / (Ca - CL) = 0.68$$

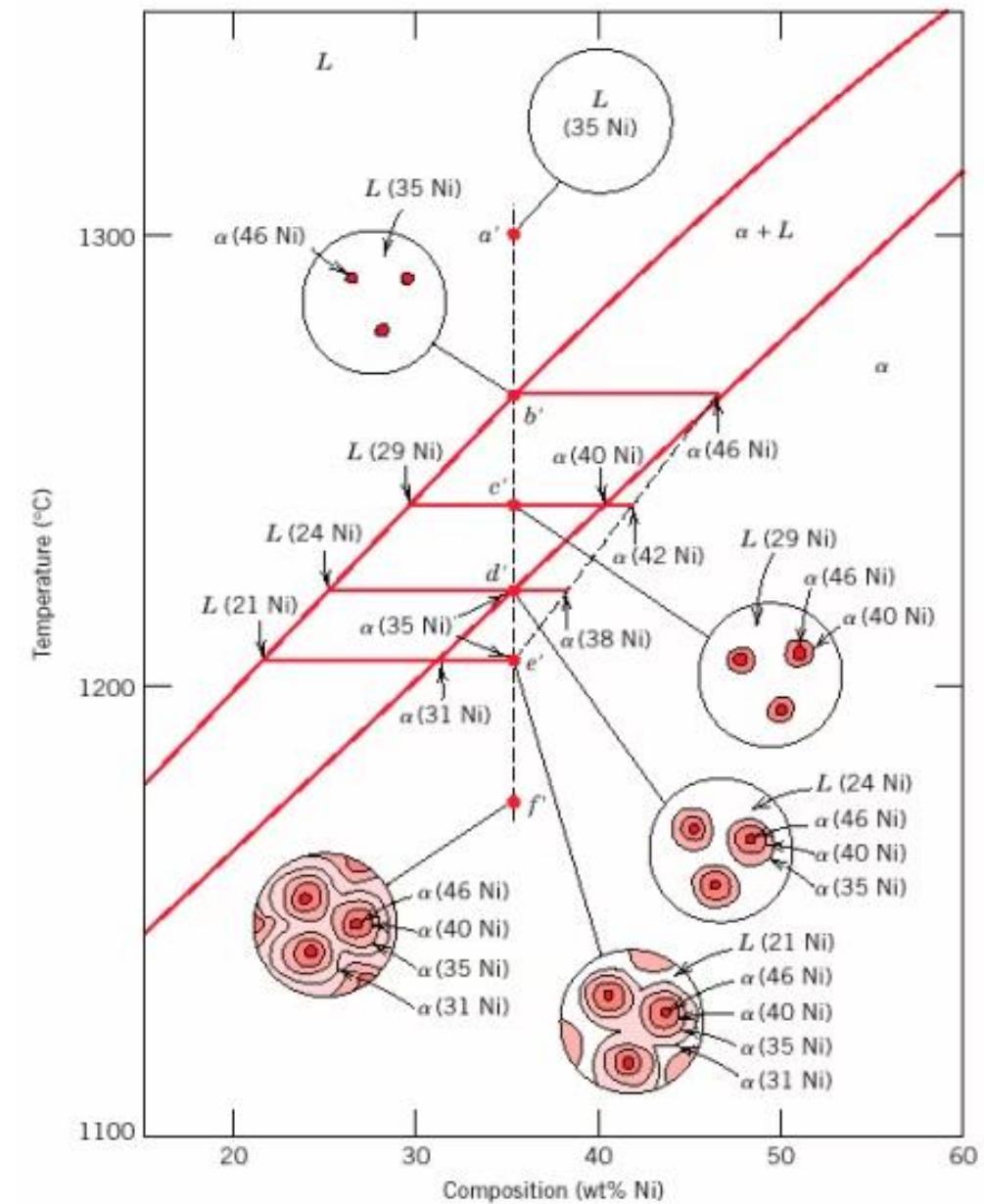
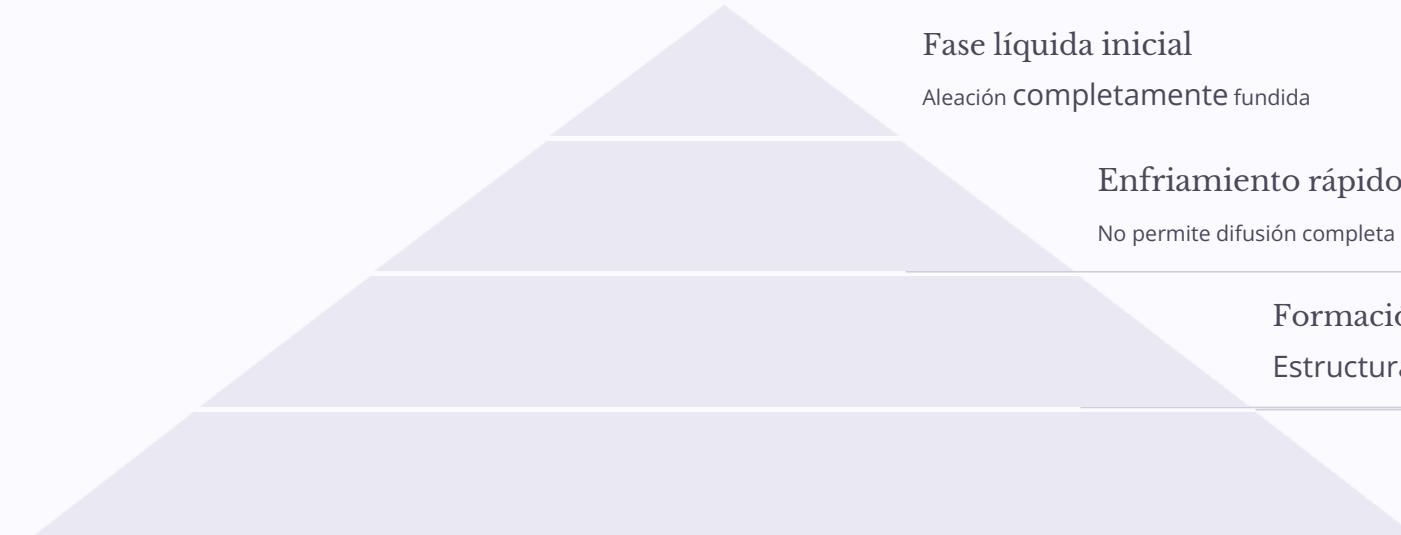
$$Wa = R / (R + S) = (Co - CL) / (Ca - CL) = 0.32$$



## Desarrollo de Microestructura en Aleaciones Isomorfas: Enfriamiento en Equilibrio (muy lento)

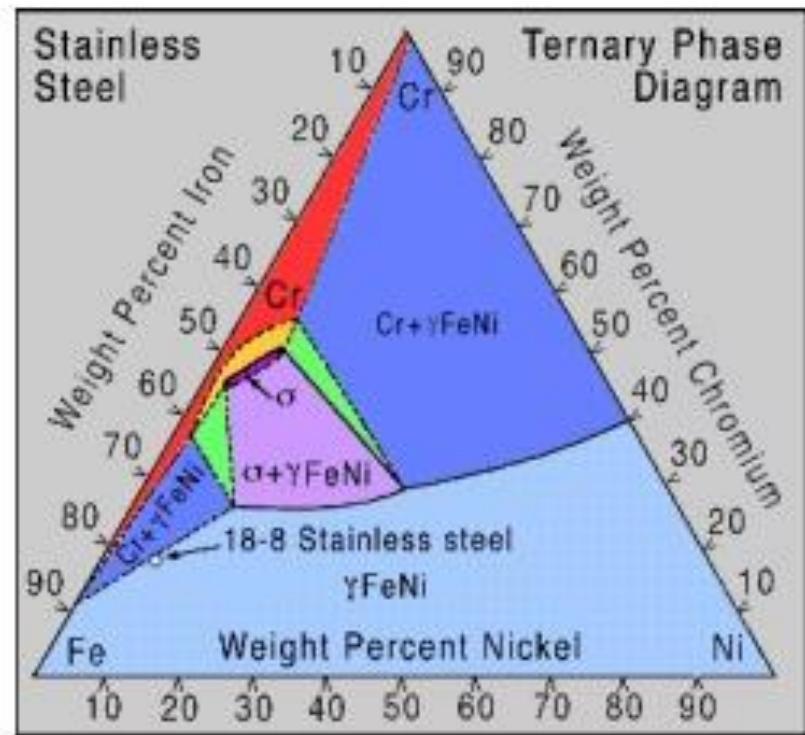


# Desarrollo de Microestructura en Aleaciones Isomorfas: Enfriamiento Rápido



El enfriamiento rápido no permite que los átomos se difundan completamente, resultando en una microestructura con variaciones de composición desde el centro hasta el borde de los granos cristalinos.

# Diagramas de Fase para Sistemas Ternarios



## Representación Triangular

Los diagramas de fase para materiales con más de dos componentes son complejos y difíciles de representar. Un ejemplo de un diagrama de fase para una aleación ternaria se muestra para una T y P fijas en la imagen (diagrama ternario de Ni-Cr-Fe).

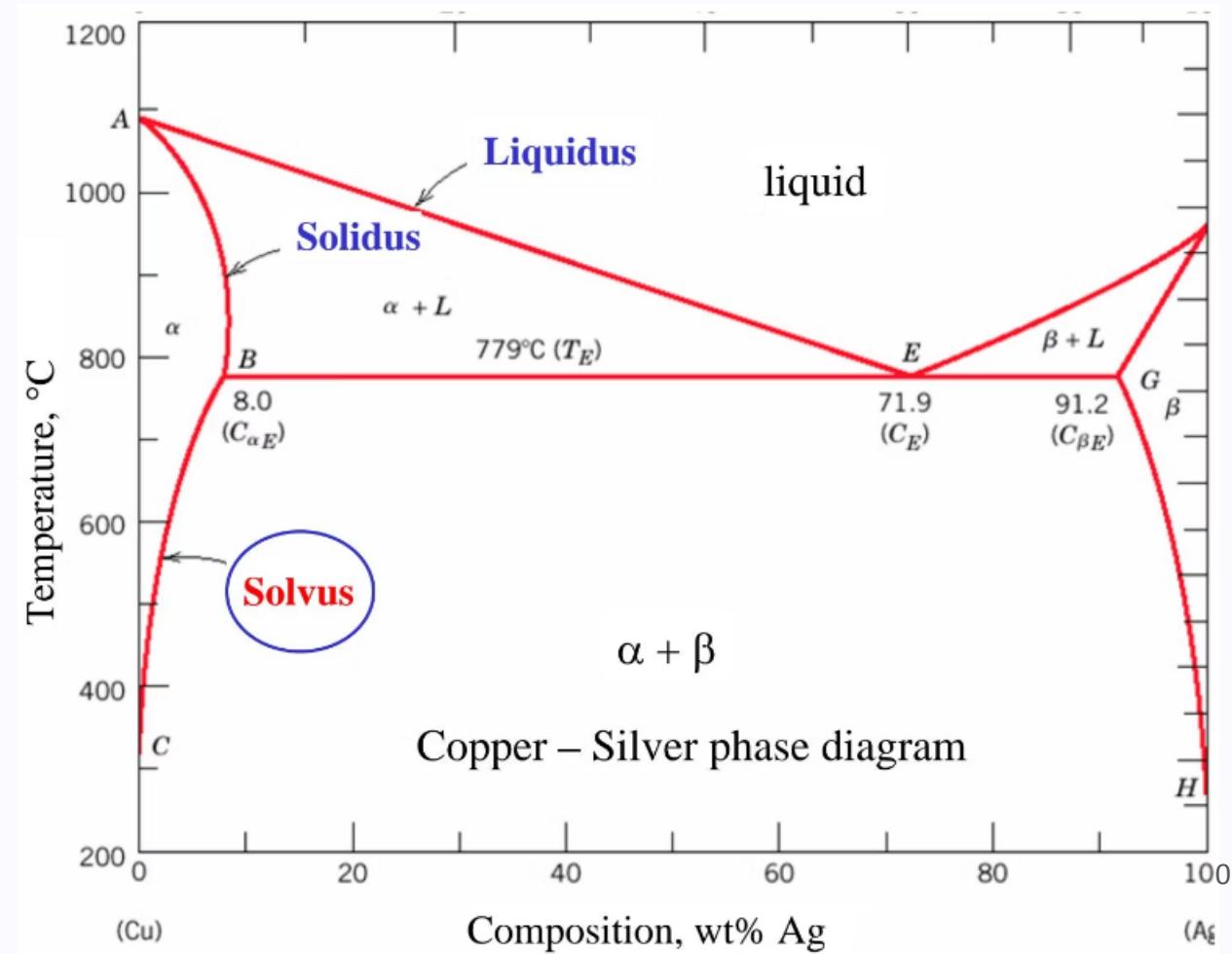
## Interpretación Tridimensional

La representación completa de un sistema ternario requiere un espacio tridimensional, donde cada vértice del triángulo representa un componente puro, y cualquier punto dentro del triángulo representa una composición específica de los tres componentes.

## Aplicaciones Industriales

Los sistemas ternarios son fundamentales para el desarrollo de aleaciones especiales con propiedades específicas para aplicaciones en industrias como la aeroespacial, biomédica y electrónica, etc.

# Sistemas Eutécticos Binarios (I)



## Regiones de fase única

- $\alpha$  - solución sólida de Ag en matriz de Cu
- $\beta$  - solución sólida de Cu en matriz de Ag
- L - líquido

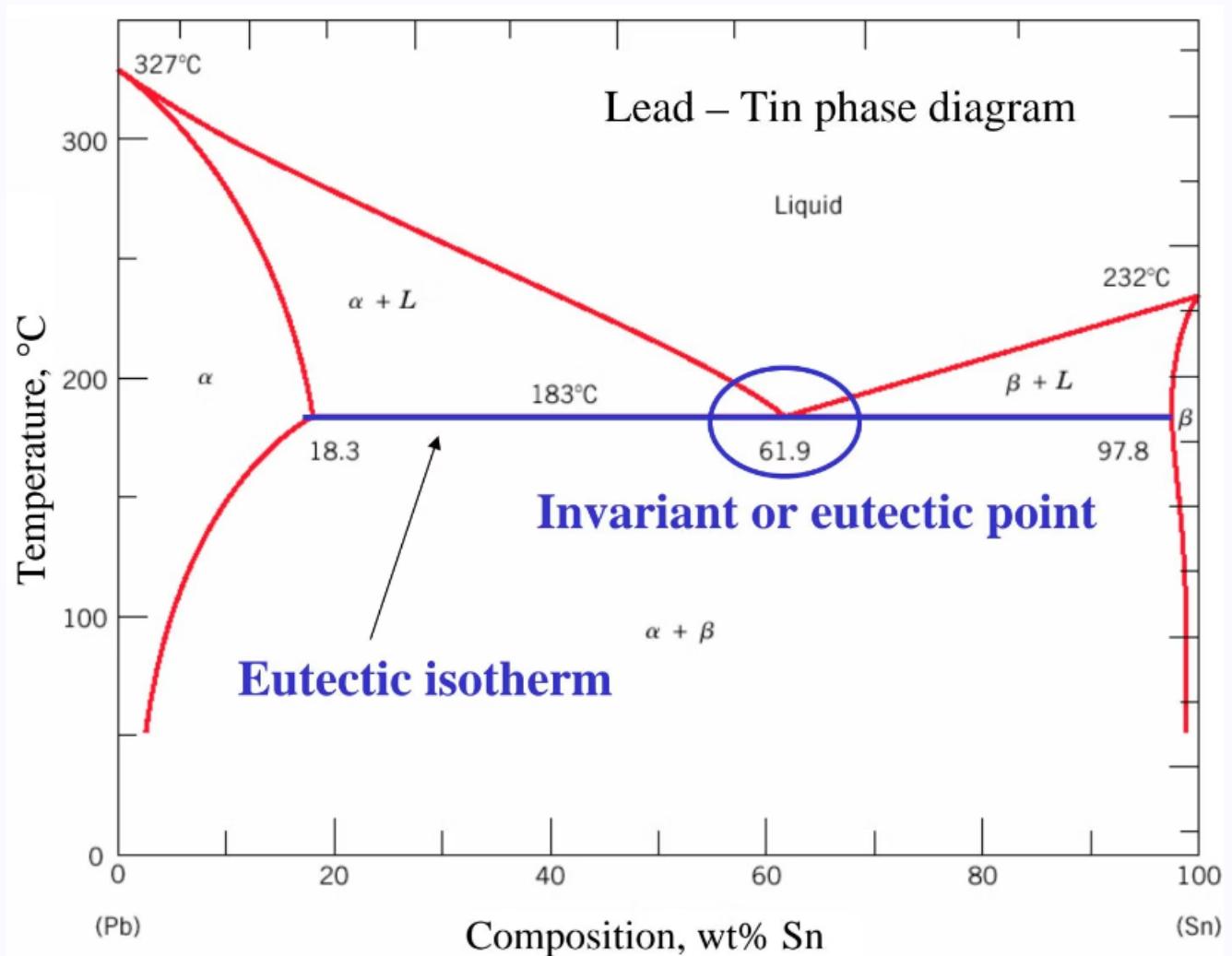
## Regiones de dos fases

- $\alpha + L$
- $\beta + L$
- $\alpha + \beta$

## Línea de solvus

Separa una solución sólida de una mezcla de soluciones sólidas. La línea de solvus muestra el límite de solubilidad.

# Sistemas Eutécticos Binarios (II)



## Punto eutéctico o invariante

El líquido y dos fases sólidas coexisten en equilibrio en la composición eutéctica CE y la temperatura eutéctica TE.

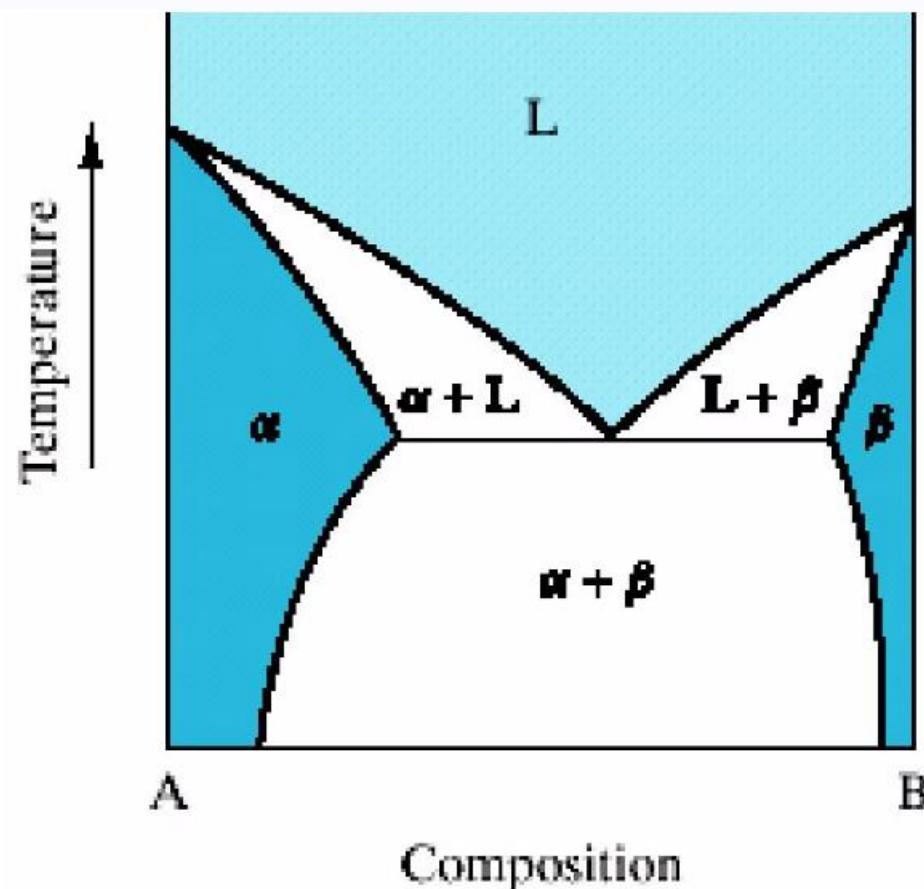
## Isoterma eutéctica

La línea horizontal de solidus a la temperatura TE.

## Características clave

En este punto específico, tres fases ( $L$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ) pueden estar en equilibrio, lo que lo convierte en un punto crítico en el diagrama de fases.

# Sistemas Eutécticos Binarios (III)



## Reacción eutéctica

Transición entre líquido y mezcla de dos fases sólidas,  $\alpha + \beta$  en la concentración eutéctica CE.



## Punto de fusión más bajo

El punto de fusión de la aleación eutéctica es más bajo que el de los componentes (*eutéctico = fácil de fundir en griego*).



## Equilibrio de fases

Como máximo dos fases pueden estar en equilibrio dentro de una región de fase. Tres fases ( $L$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ) pueden estar en equilibrio solo en unos pocos puntos a lo largo de la isotérmica eutéctica.

# La Regla de Fases de Gibbs - Ejemplo de Sistema Binario

## 1 Regiones de una fase

En regiones de una fase del diagrama de fase, T y XB pueden cambiarse independientemente.

$$F = C - Ph + 2$$

$$P = \text{const}$$



$$F = C - Ph + 1$$

$$C = 2$$



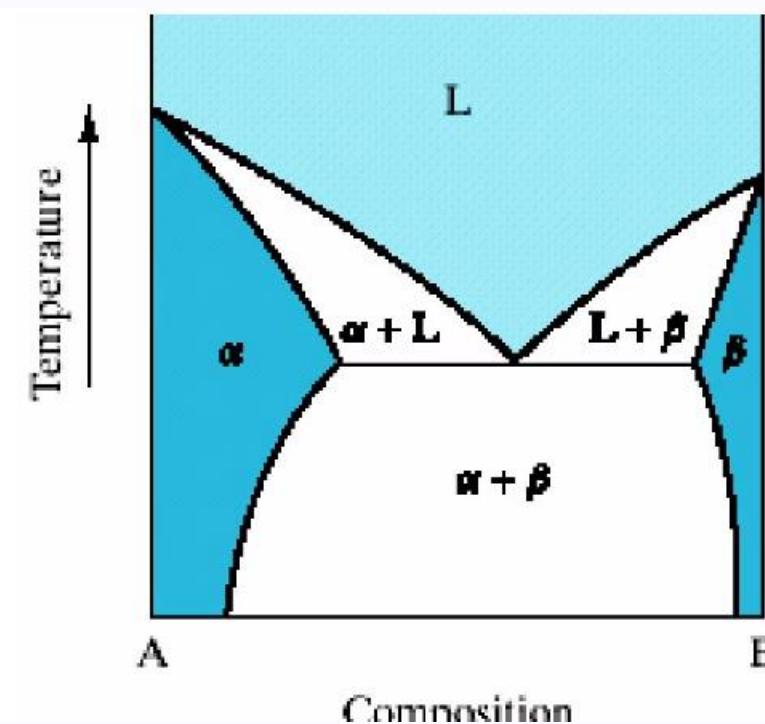
$$F = 3 - Ph$$

## 2 Regiones de dos fases

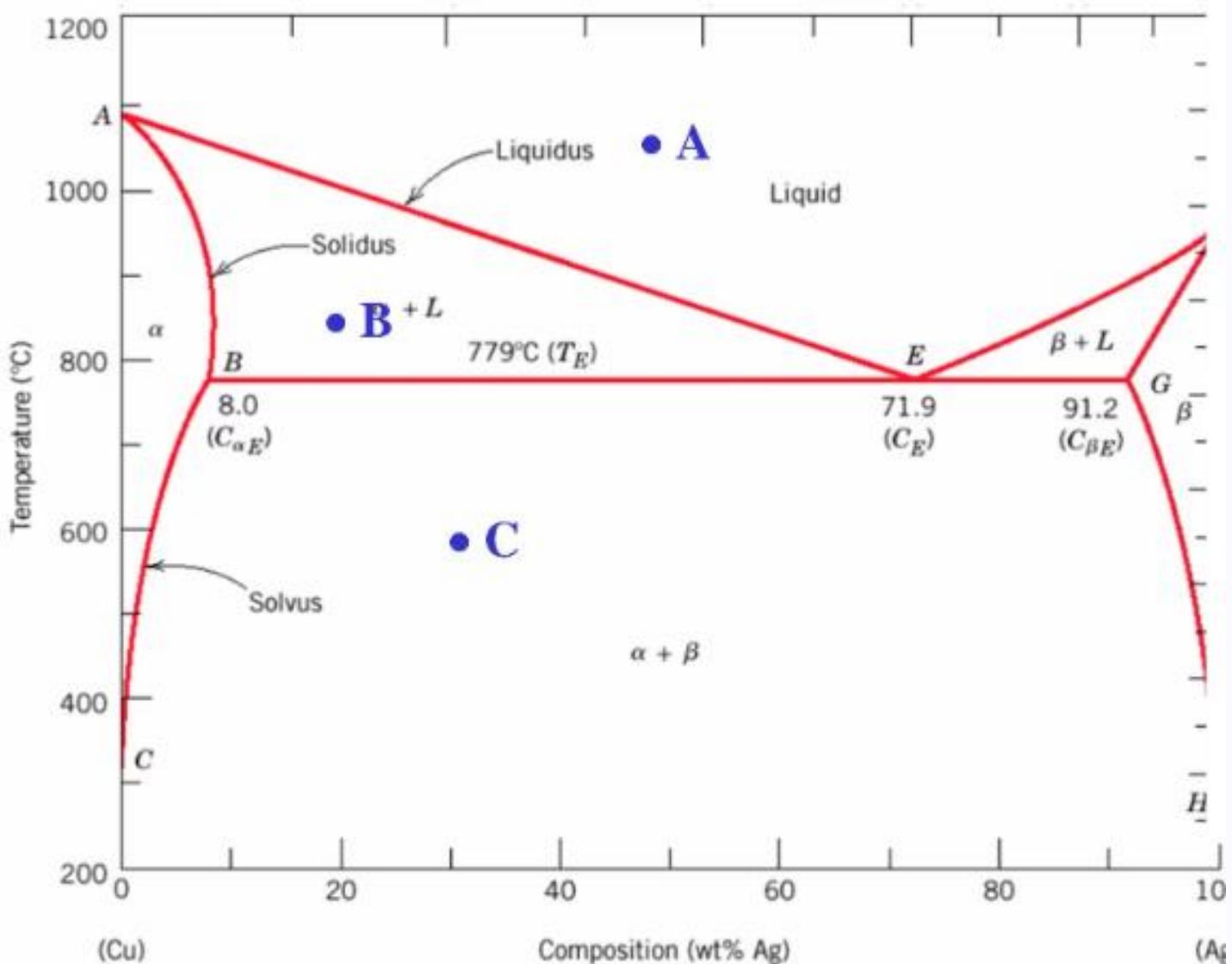
En regiones de dos fases,  $F = 1$ . Si la temperatura se elige independientemente, las composiciones de ambas fases son fijas.

## 3 Punto eutéctico

Tres fases ( $L, \alpha, \beta$ ) están en equilibrio solo en el punto eutéctico en este sistema de dos componentes ( $F = 0$ ).



# Sistemas Eutécticos Binarios (IV)



## Determinación de composiciones

Las composiciones de las fases se determinan utilizando las líneas de enlace, igual que para aleaciones isomórficas.

## Cálculo de cantidades relativas

Las cantidades relativas de fases se calculan mediante la regla de la palanca, igual que para aleaciones isomórficas.

## Aplicación práctica

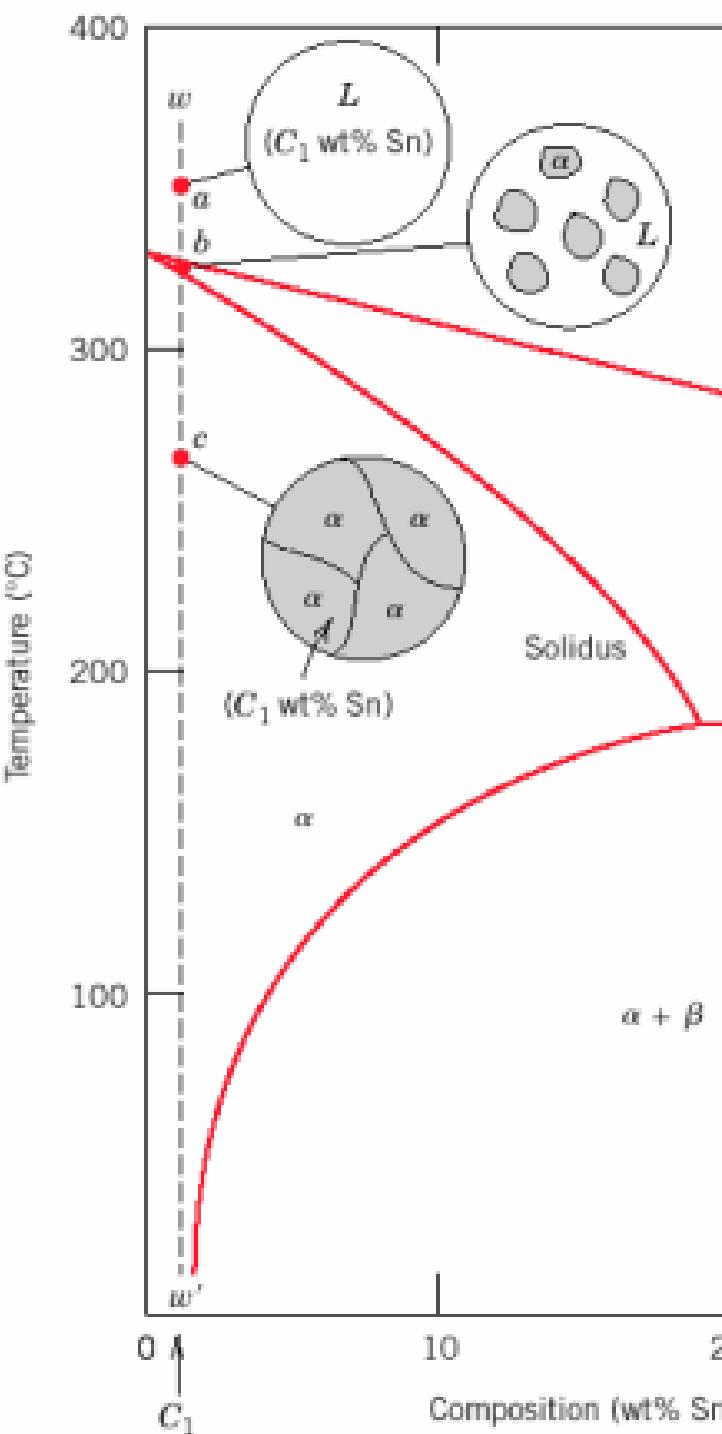
Para los puntos A, B y C se pueden calcular las composiciones (% en peso) y cantidades relativas (fracciones máscicas) de las fases presentes.

1

2

3

# Desarrollo de microestructura en aleaciones eutécticas (I)



## Diferentes tipos de microestructura

Se pueden formar varios tipos diferentes de microestructura en el enfriamiento lento a diferentes composiciones.

## Sistema plomo-estaño

Consideremos el enfriamiento del sistema líquido plomo-estaño a diferentes composiciones.

## Aleación rica en plomo

En el caso de aleación rica en plomo (0-2% en peso de estaño), la solidificación procede de la misma manera que para aleaciones isomórficas (por ejemplo, Cu-Ni) que discutimos anteriormente.

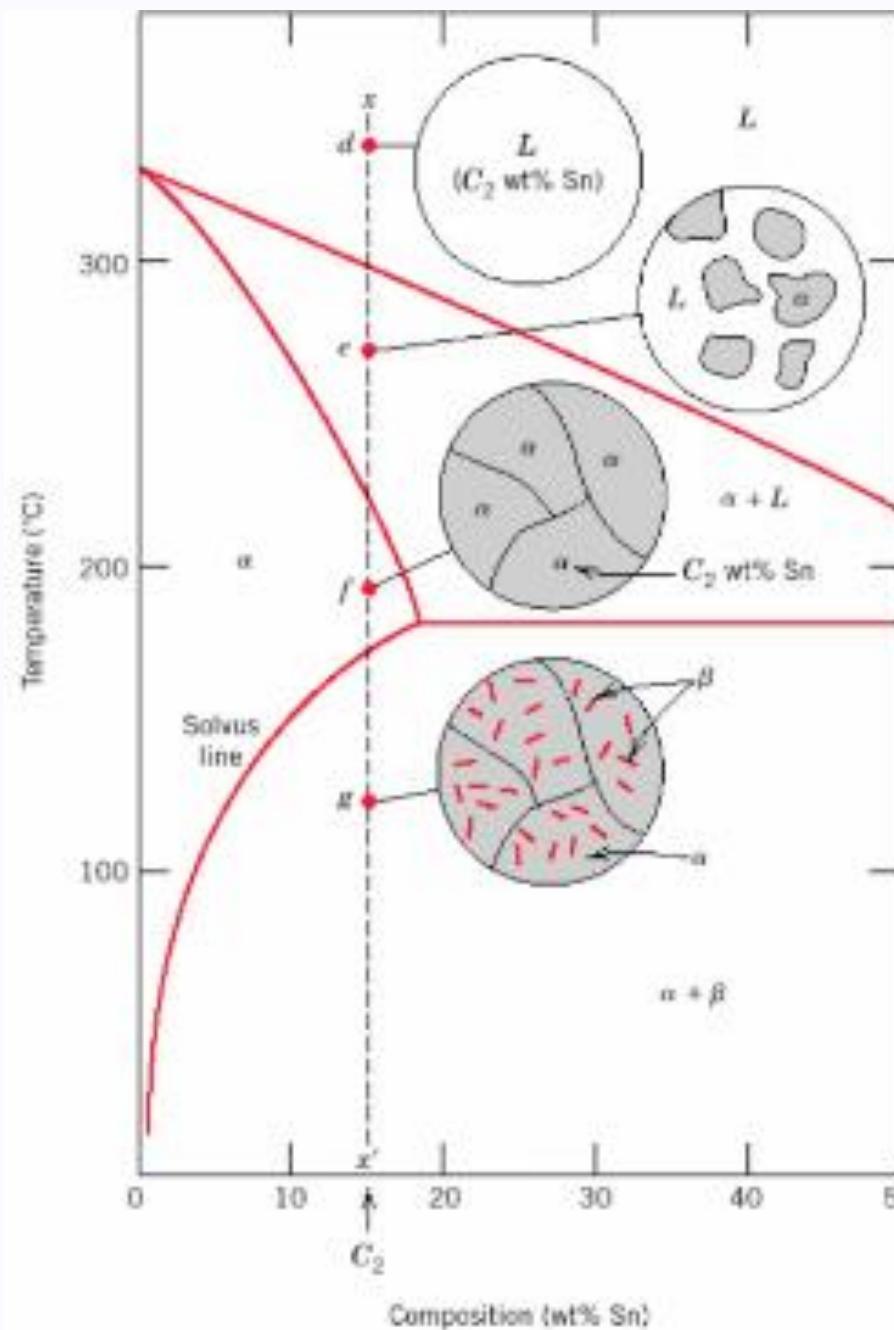
## Secuencia de transformación

$$L \rightarrow \alpha + L \rightarrow \alpha$$

$$\textcolor{blue}{L \rightarrow \alpha + L \rightarrow \alpha}$$

- 1
- 2
- 3
- 4

# Desarrollo de microestructura en aleaciones eutécticas (II)



## Composiciones intermedias

En composiciones entre el límite de solubilidad a temperatura ambiente y la solubilidad sólida máxima a la temperatura eutéctica.

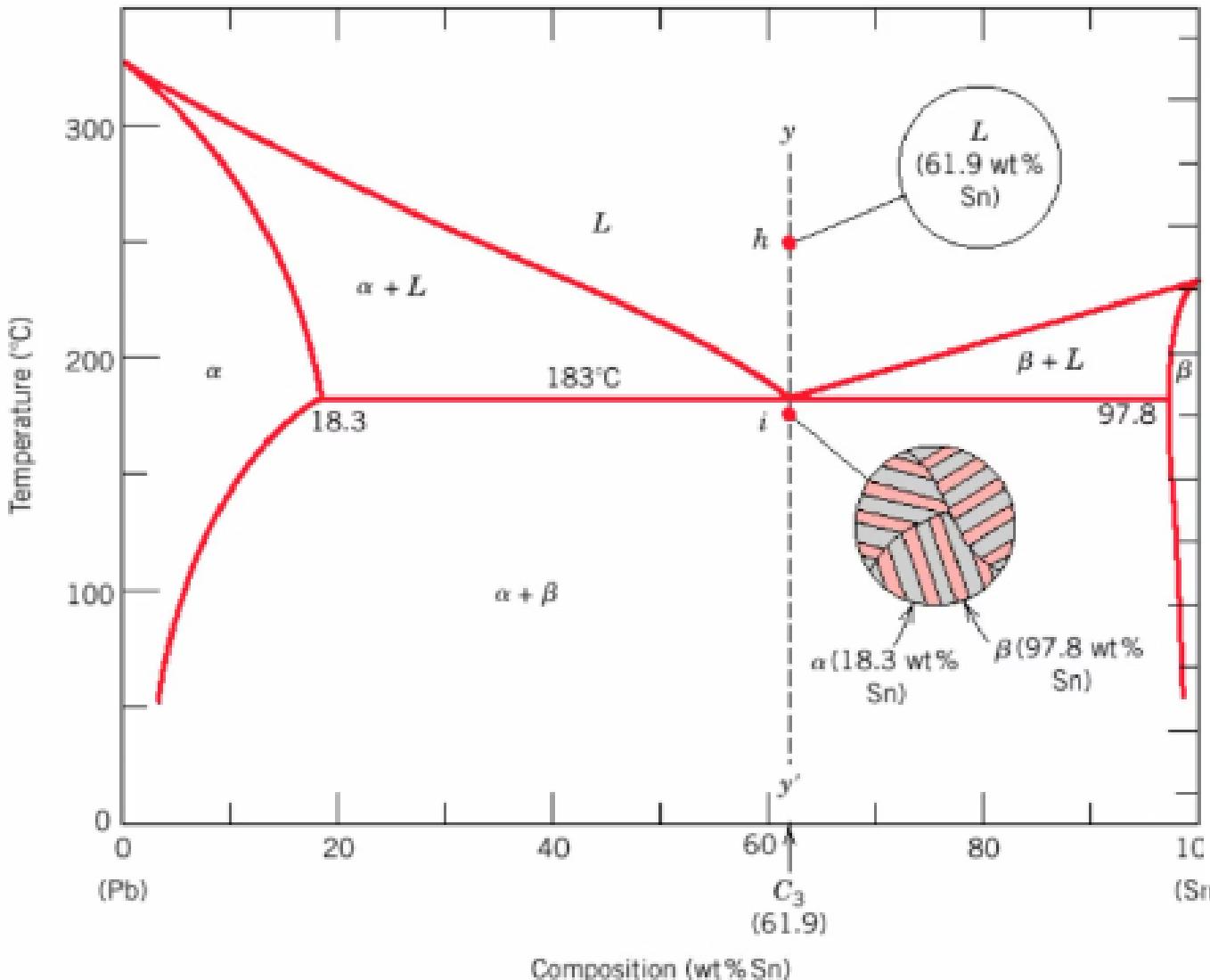
## Nucleación de fase $\beta$

La fase  $\beta$  nuclea cuando se excede la solubilidad sólida  $\alpha$  al cruzar la línea de solvus.

## Transformación gradual

Este proceso ocurre gradualmente a medida que la temperatura disminuye, creando una microestructura característica.

# Desarrollo de microestructura en aleaciones eutécticas (III)



Solidificación a la composición eutéctica

No hay cambios por encima de la temperatura eutéctica TE.

Transformación eutéctica

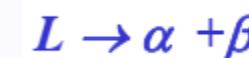
A la temperatura TE, el líquido se transforma en fases  $\alpha$  y  $\beta$  (reacción eutéctica).

Reacción química

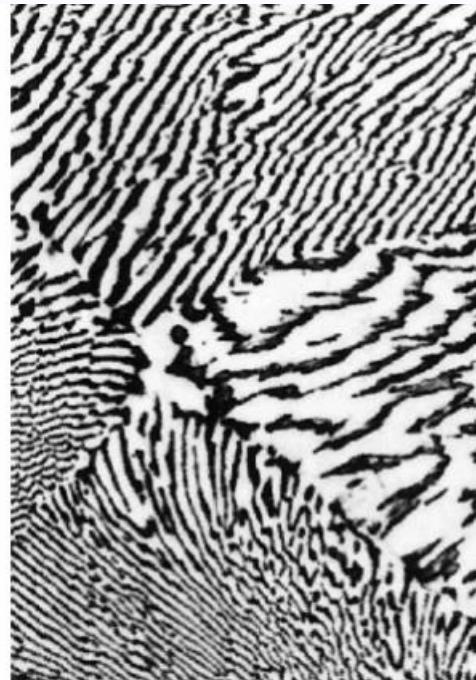
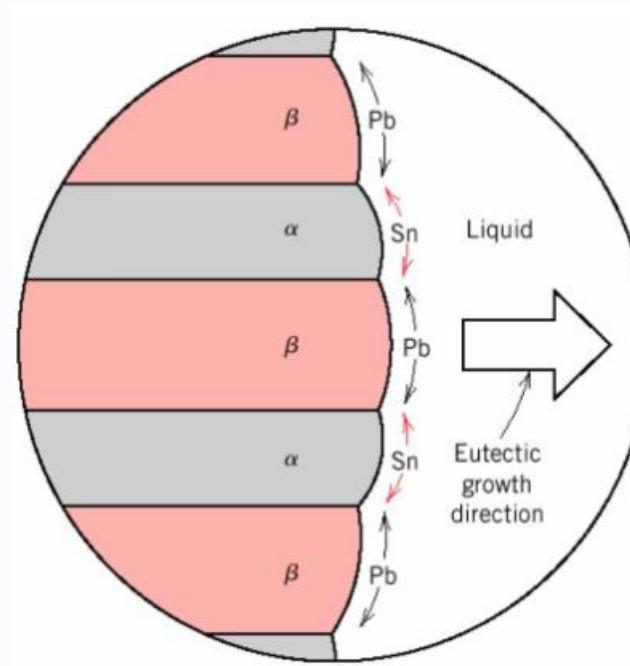


Microestructura resultante

Se forma una estructura característica con propiedades características.



# Desarrollo de microestructura en aleaciones eutécticas (IV)



## Redistribución atómica

Las composiciones de las fases  $\alpha$  y  $\beta$  son muy diferentes → la reacción eutéctica implica la redistribución de átomos de Pb y Sn mediante difusión atómica.

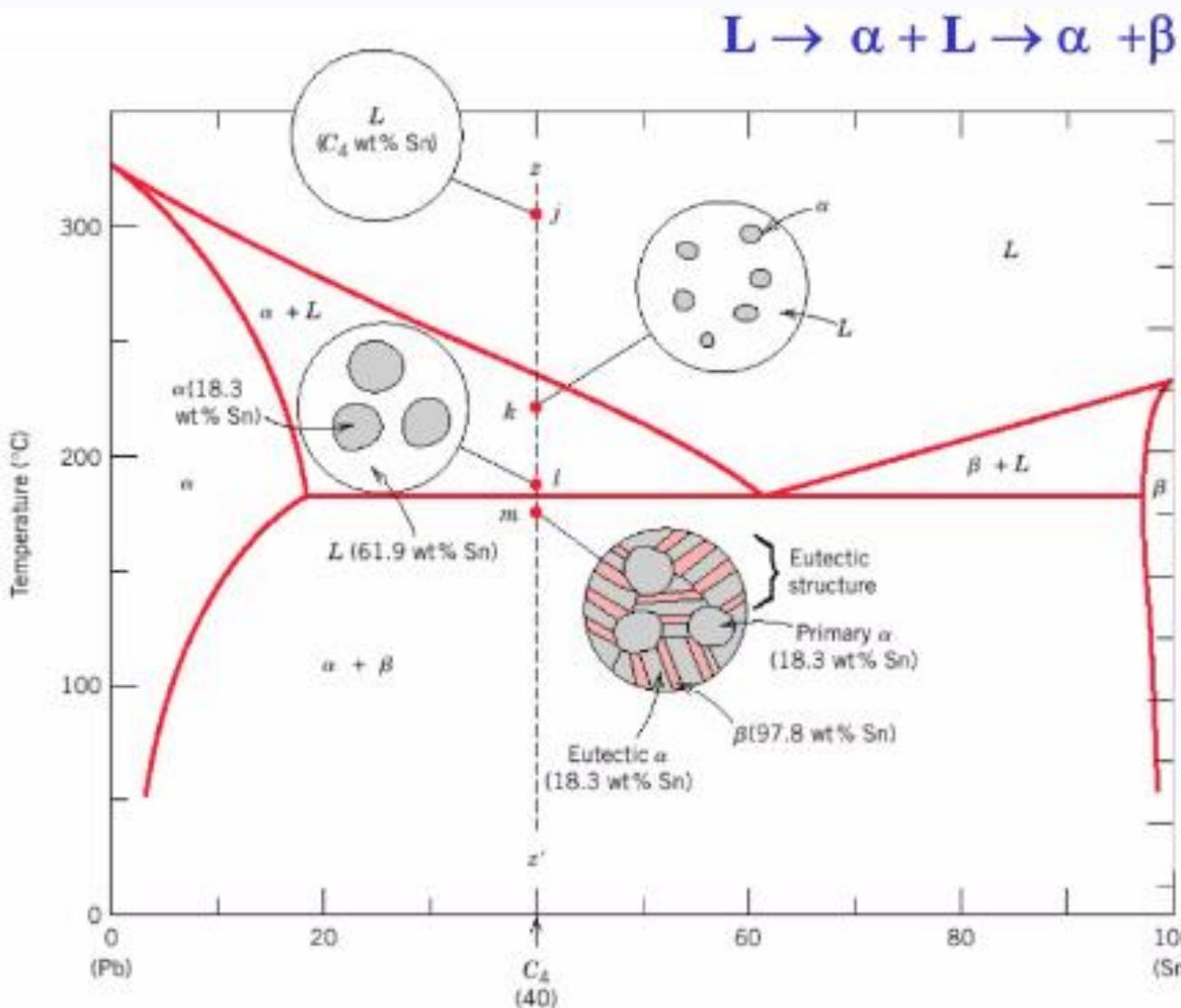
## Estructura laminar

Esta formación simultánea de fases  $\alpha$  y  $\beta$  resulta en una microestructura en capas (o láminas) alternadas de  $\alpha$  y  $\beta$ , que se denomina **estructura eutéctica**.

## Visualización

En la micrografía, las capas oscuras son la fase  $\alpha$  rica en plomo, las capas claras son la fase  $\beta$  rica en estaño.

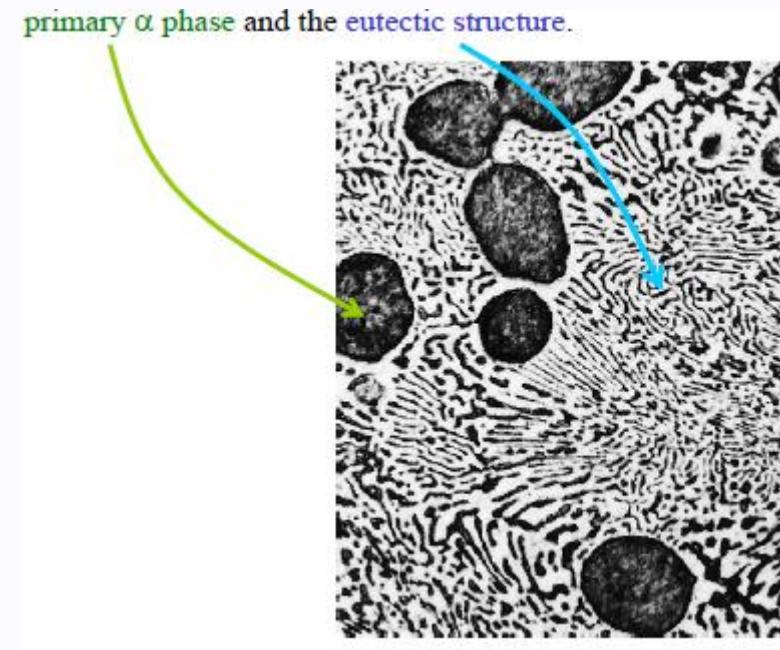
# Desarrollo de microestructura en aleaciones eutécticas (V)



$L \rightarrow \alpha + L \rightarrow \alpha + \beta$

La fase  $\alpha$  primaria se forma en la región  $\alpha + L$ , y la estructura eutéctica que incluye capas de fases  $\alpha$  y  $\beta$  (llamadas fases  $\alpha$  eutéctica y  $\beta$  eutéctica) se forma al cruzar la isoterma eutéctica.

# Desarrollo de microestructura en aleaciones eutécticas (VI)



## Microconstituyente

Elemento de la microestructura que tiene una estructura identificable y característica.



## Estructura compuesta

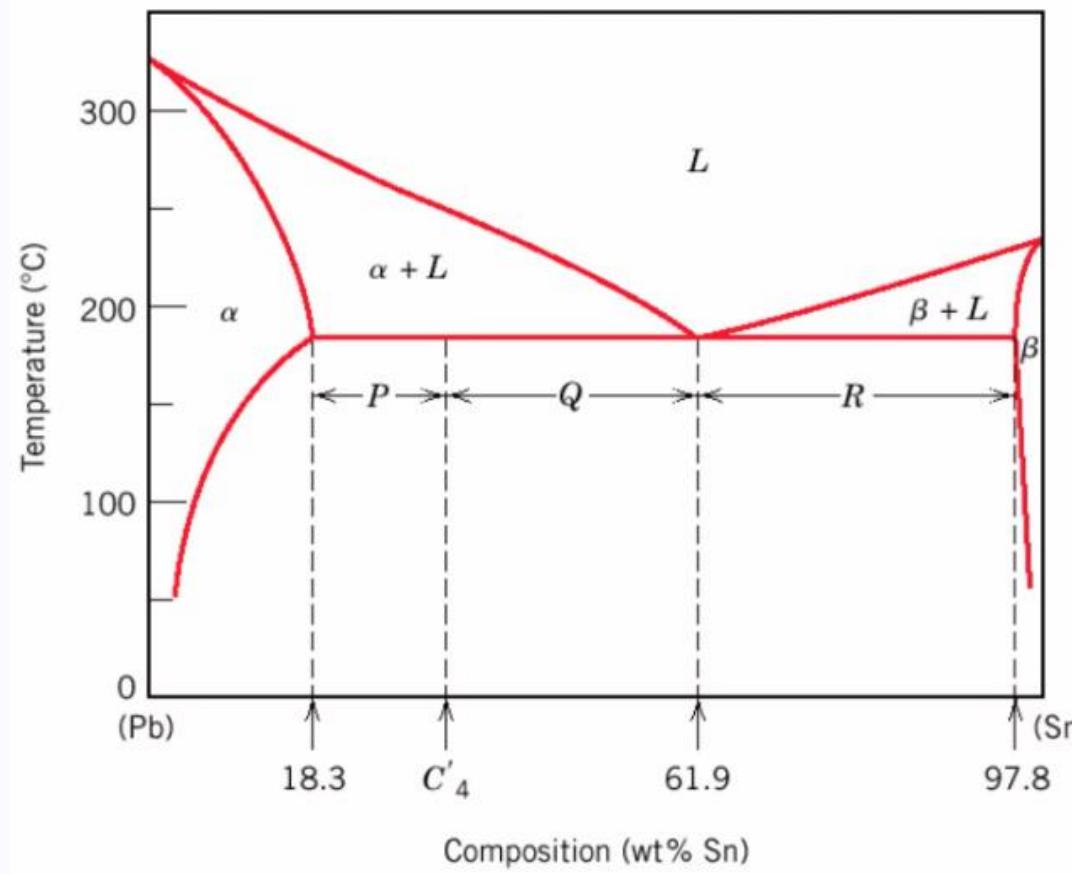
En el caso descrito en la página anterior, la microestructura consta de dos microconstituyentes: fase  $\alpha$  primaria y estructura eutéctica.



## Estructura laminar distintiva

Aunque la estructura eutéctica consta de dos fases, es un microconstituyente con estructura laminar distintiva y proporción fija de las dos fases.

# Cálculo de cantidades relativas de microconstituyentes



Identificación del microconstituyente eutéctico

El microconstituyente eutéctico se forma a partir del líquido que tiene composición eutéctica (61,9% en peso de Sn)

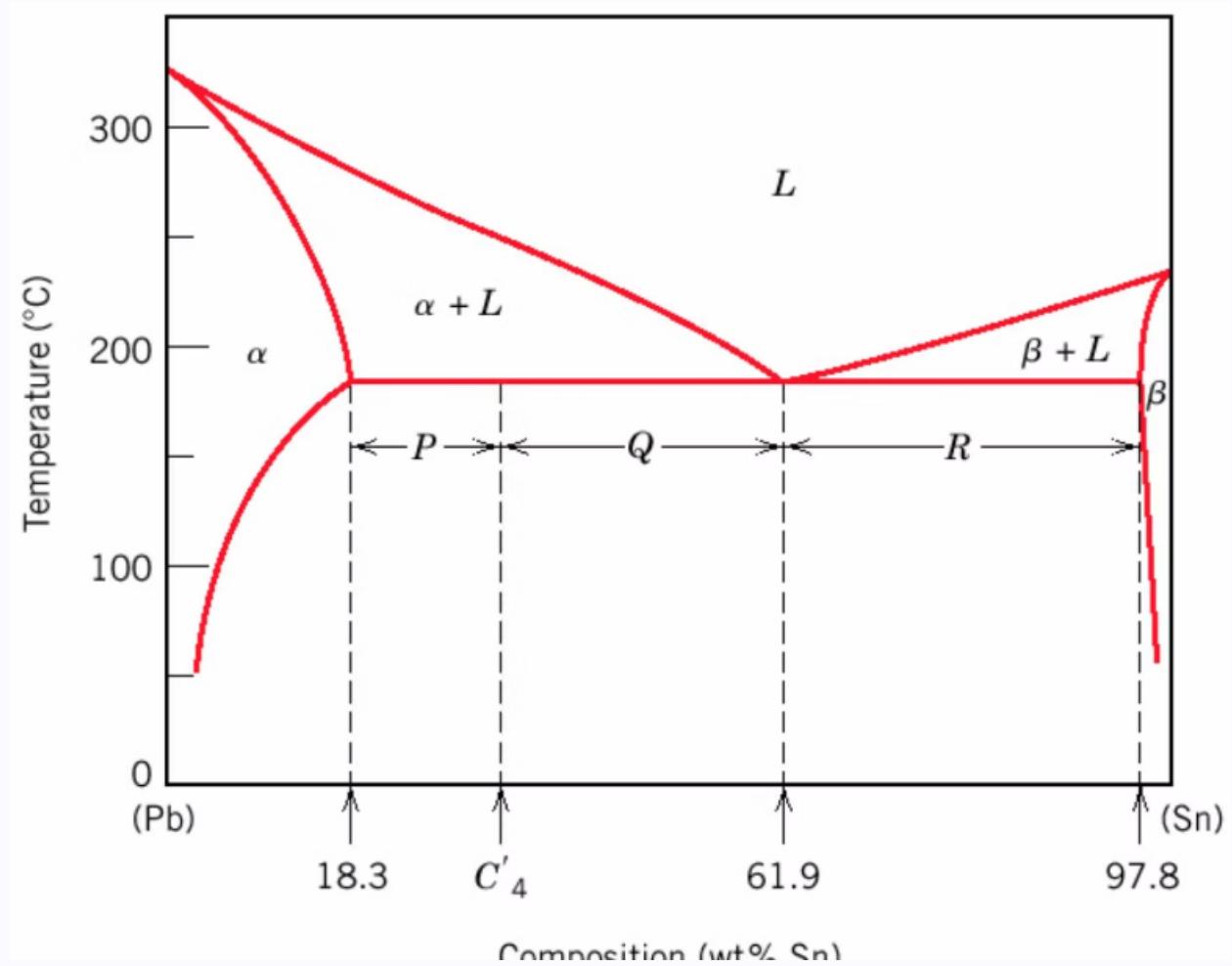
## Aplicación de la regla de la palanca

Podemos tratar el eutéctico como una fase separada y aplicar la regla de la palanca para encontrar las fracciones relativas de la fase α primaria (18,3% en peso de Sn) y la estructura eutéctica (61,9% en peso de Sn)

## Fórmulas para el cálculo

$$W_e = P / (P+Q) \text{ (eutéctico)} \quad W_{\alpha'} = Q / (P+Q) \text{ (primario)}$$

# Cálculo de las cantidades totales de fases

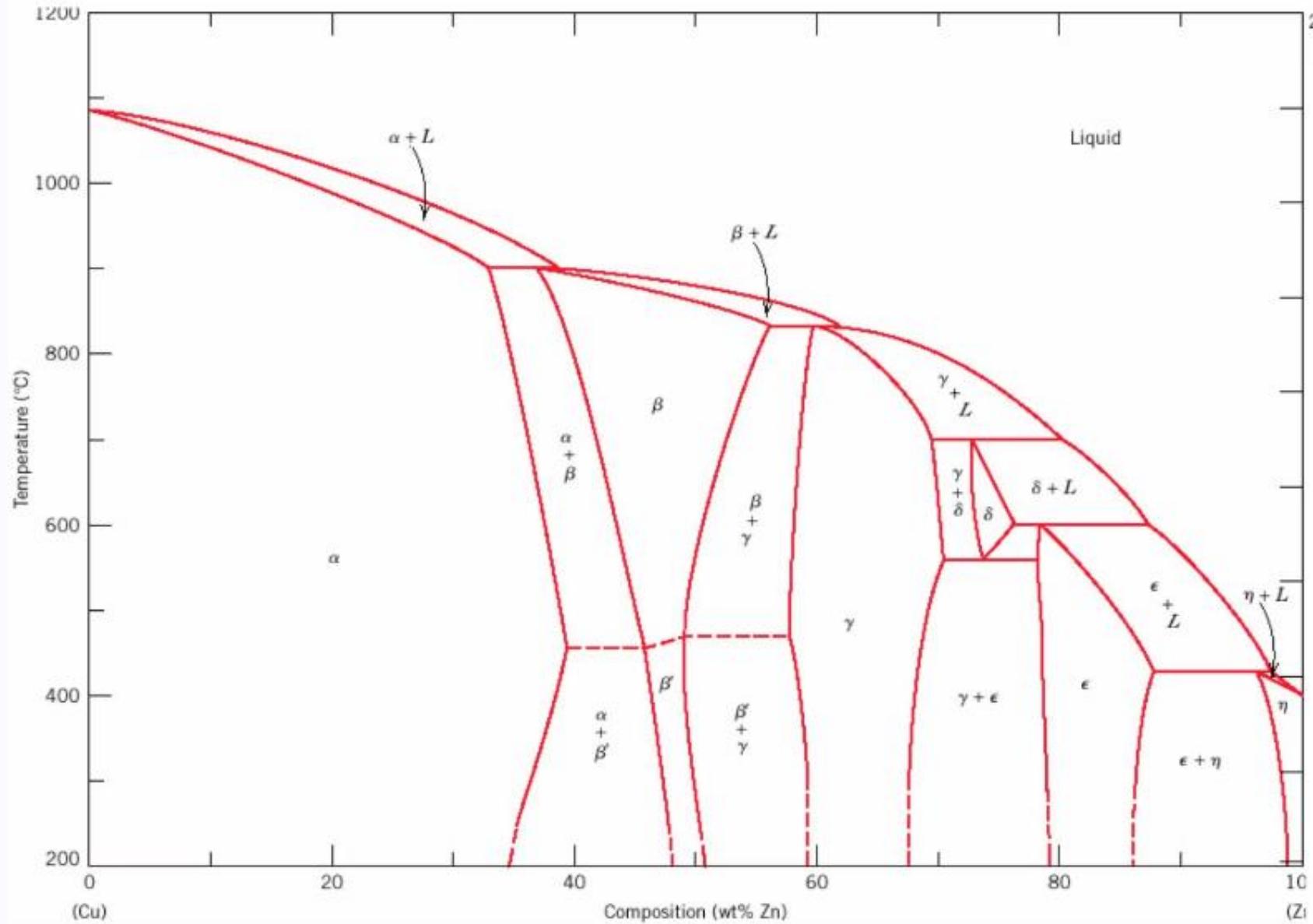


Fracción de fase  $\alpha$  determinada por la aplicación de la regla de la palanca a través de todo el campo de fase  $\alpha + \beta$ :

$$W\alpha = (Q+R) / (P+Q+R) \quad (\text{fase } \alpha)$$

$$W\beta = P / (P+Q+R) \quad (\text{fase } \beta)$$

# Diagramas de fase con fases intermedias



## Ejemplo: Cu-Zn

En Cu-Zn,  $\alpha$  y  $\eta$  son soluciones sólidas terminales,  $\beta$ ,  $\beta'$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\epsilon$  son soluciones sólidas intermedias.

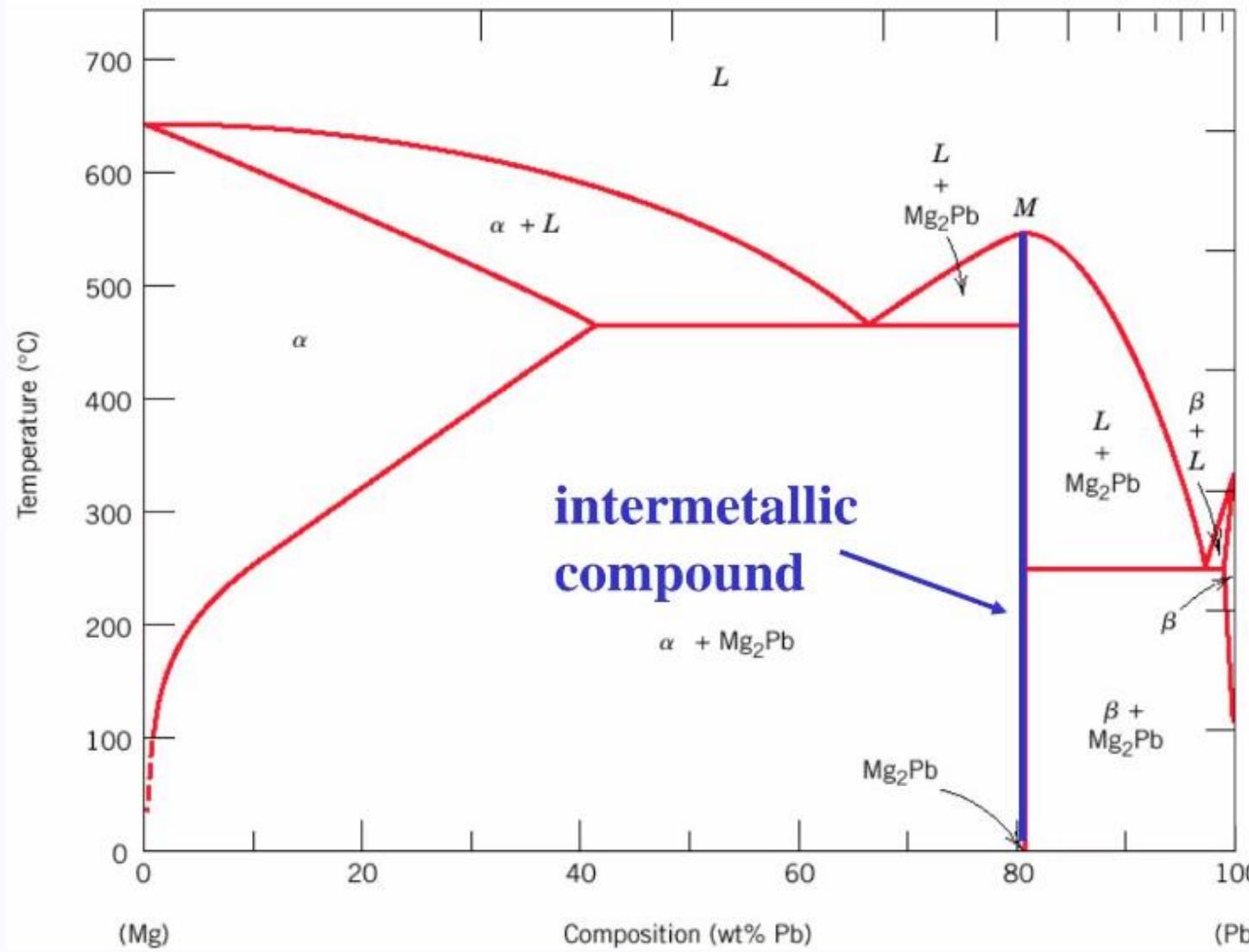
## Soluciones sólidas terminales

Los sistemas eutécticos que hemos estudiado hasta ahora tienen solo dos fases sólidas ( $\alpha$  y  $\beta$ ) que existen cerca de los extremos de los diagramas de fase. Estas fases se denominan **soluciones sólidas terminales**.

## Soluciones sólidas intermedias

Algunos sistemas de aleación binaria tienen **fases de solución sólida intermedias**. En los diagramas de fase, estas fases están separadas de los extremos de composición (0% y 100%).

# Diagramas de fase con compuestos intermetálicos



## Compuestos intermetálicos

Además de las soluciones sólidas, pueden existir compuestos intermetálicos que tienen composiciones químicas precisas en algunos sistemas.

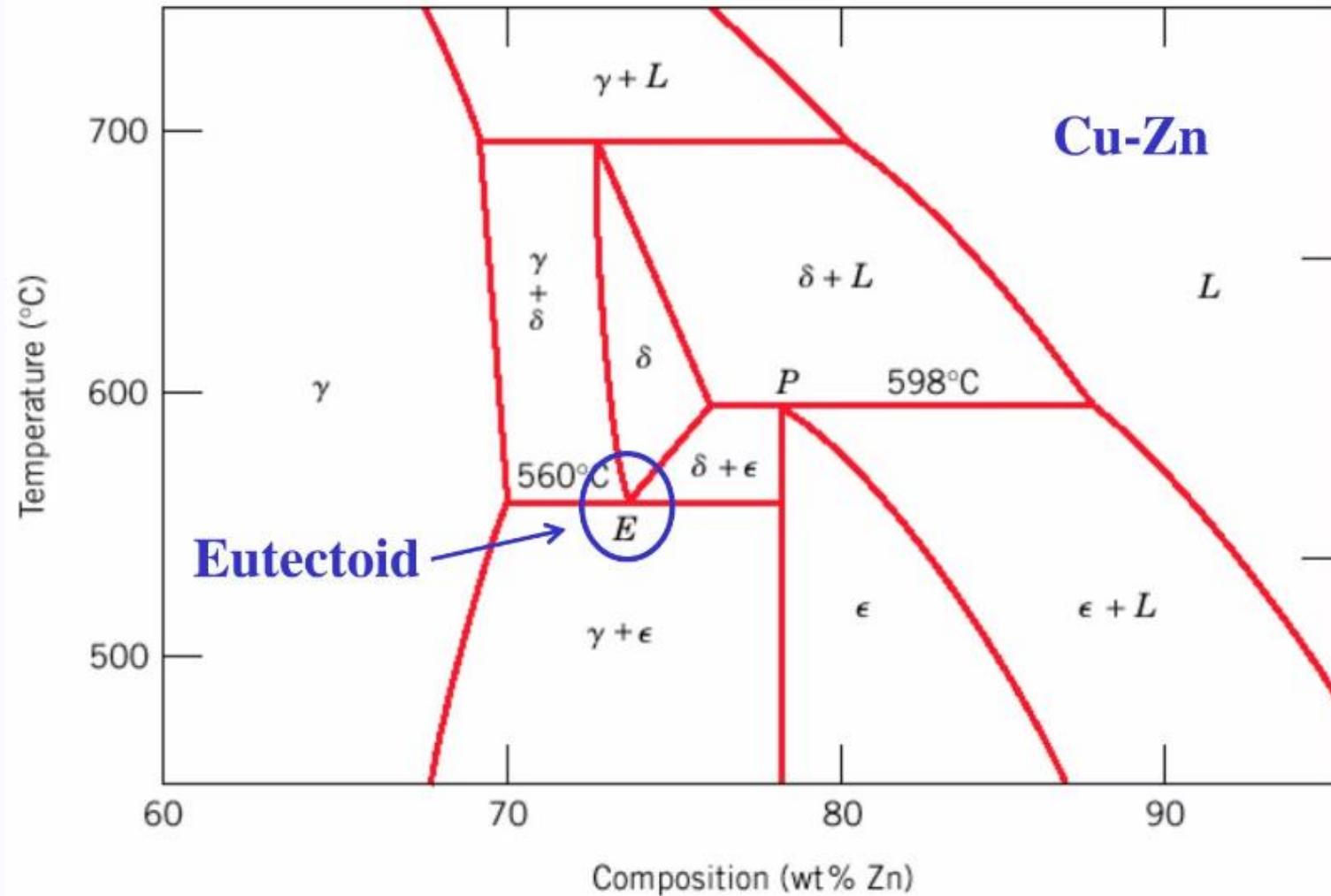
## Aplicación de la regla de la balanca

Al usar las reglas de la balanca, los compuestos intermetálicos se tratan como cualquier otra fase, excepto que aparecen no como una región amplia sino como una línea vertical.

## Interpretación del diagrama

Este diagrama puede considerarse como dos diagramas eutécticos unidos, para Mg-Mg<sub>2</sub>Pb y Mg<sub>2</sub>Pb-Pb. En este caso, el compuesto Mg<sub>2</sub>Pb puede considerarse como un componente.

# Reacciones Eutectoides (I)



## Reacción eutectoide

La reacción **eutectoide** (*similar a eutéctica* en griego) es similar a la reacción eutéctica pero ocurre de una fase sólida a dos nuevas fases sólidas.



## Punto invariante

El punto eutectoide es donde tres fases sólidas están en equilibrio.



## Transformación durante enfriamiento

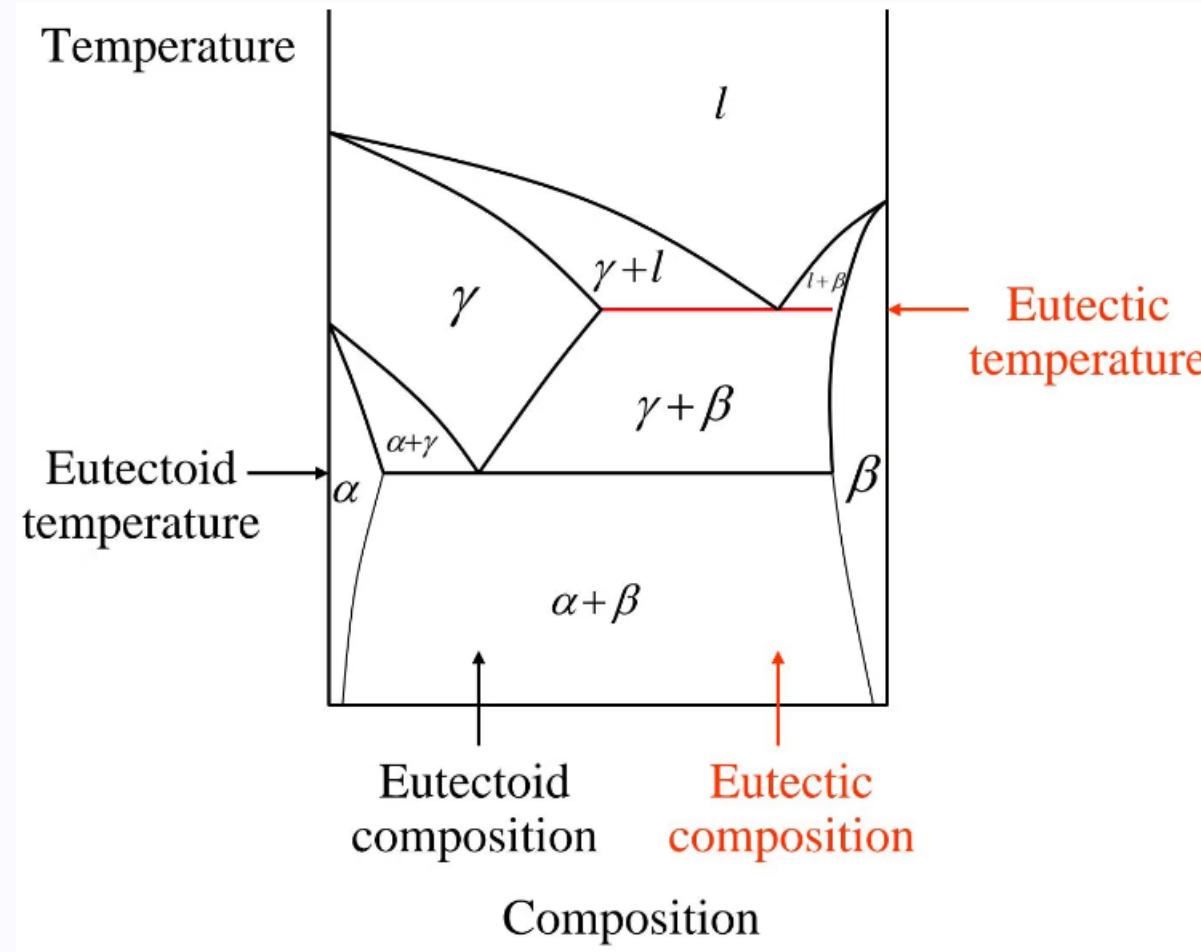
Al enfriarse, una fase sólida se transforma en otras dos fases sólidas ( $\delta \leftrightarrow \gamma + \epsilon$  en el ejemplo).



## Representación gráfica

Aparece como una V en la parte superior de una línea de enlace horizontal (isoterma eutectoide) en el diagrama de fase.

# Reacciones Eutécticas vs Eutectoides



## Diagrama combinado

El diagrama de fase contiene tanto una reacción eutéctica como su análogo en estado sólido, una reacción eutectoide.

## Reacción eutéctica

Transformación de líquido a dos fases sólidas diferentes.

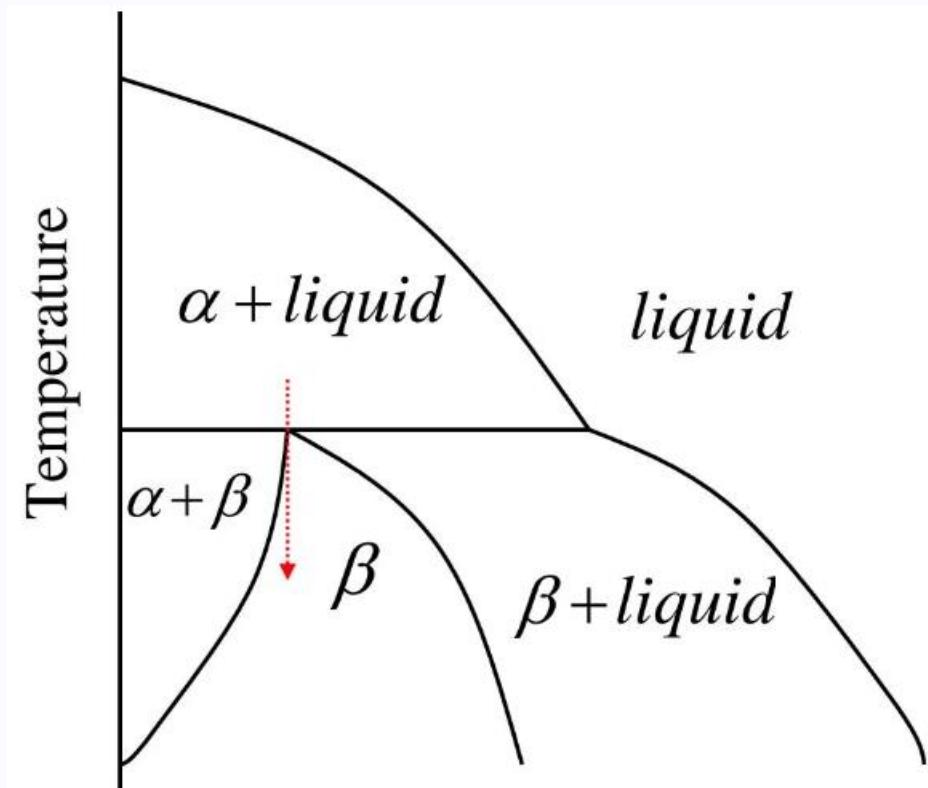


## Reacción eutectoide

Transformación de una fase sólida a dos fases sólidas diferentes.



# Reacciones Peritécticas



1

2

3

## Definición

Una **reacción peritéctica** - la fase sólida y la fase líquida juntas formarán una segunda fase sólida a una temperatura y composición particulares durante el enfriamiento, por ejemplo,  $L + \alpha \leftrightarrow \beta$

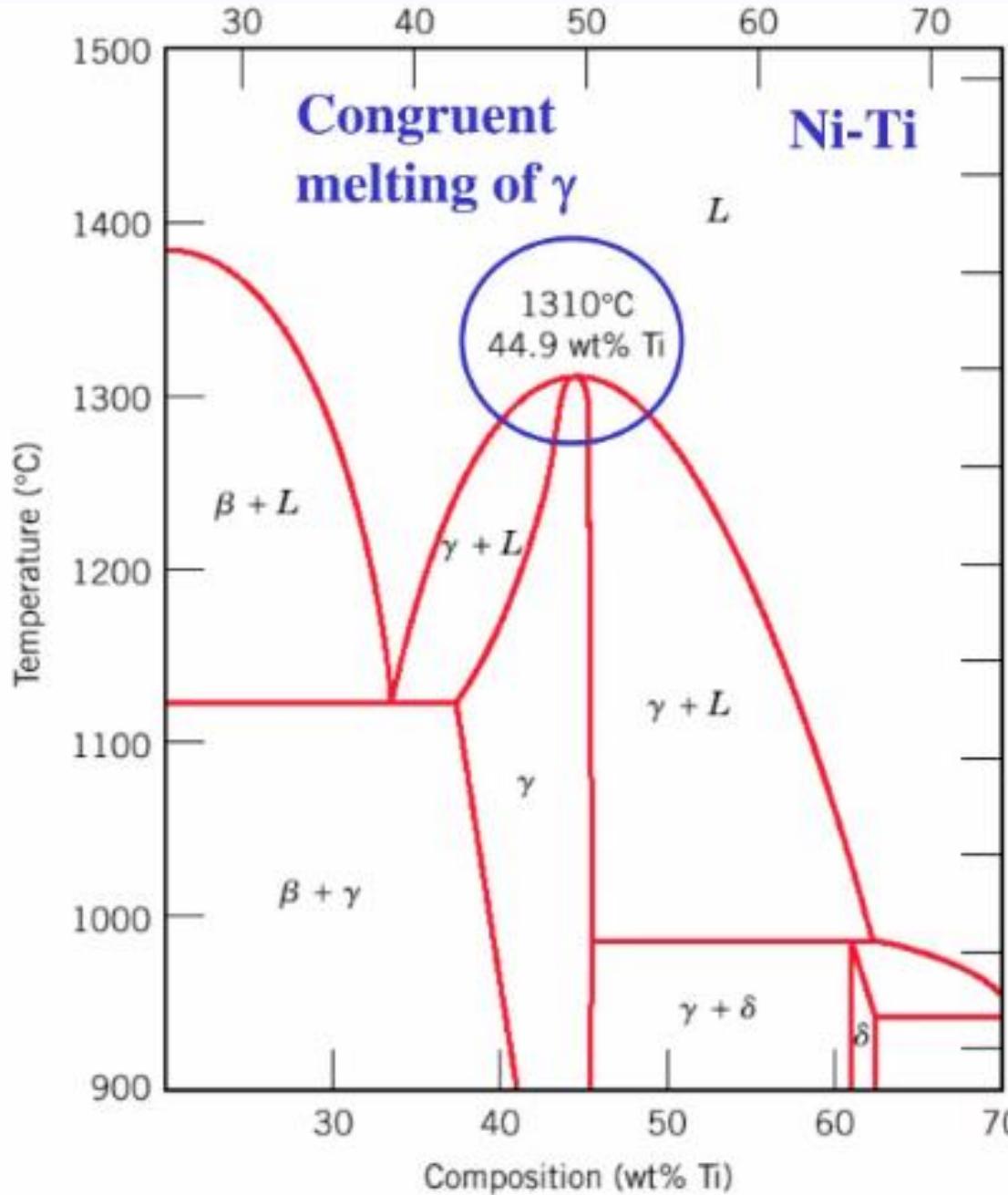
## Cinética lenta

Estas reacciones son bastante lentas ya que la fase producto se formará en el límite entre las dos fases reaccionantes, separándolas y ralentizando cualquier reacción adicional.

## Ocurrencia

Los peritécticos no son tan comunes como los eutécticos y eutectoides, pero ocurren en algunos sistemas de aleación. Hay uno en el sistema Fe-C que consideraremos más adelante.

# Transformaciones de fase congruentes



Una transformación congruente no implica ningún cambio en la composición (por ejemplo, transformación alotrópica como  $\text{Fe}_\alpha$  a  $\text{Fe}_\gamma$  ó la fusión en materiales puros).

Para una transformación incongruente, al menos una fase cambia de composición (por ejemplo, reacciones eutécticas, eutectoides, peritécticas).

# Diagramas de Fase Binarios y resumen de puntos (reacciones) invariantes

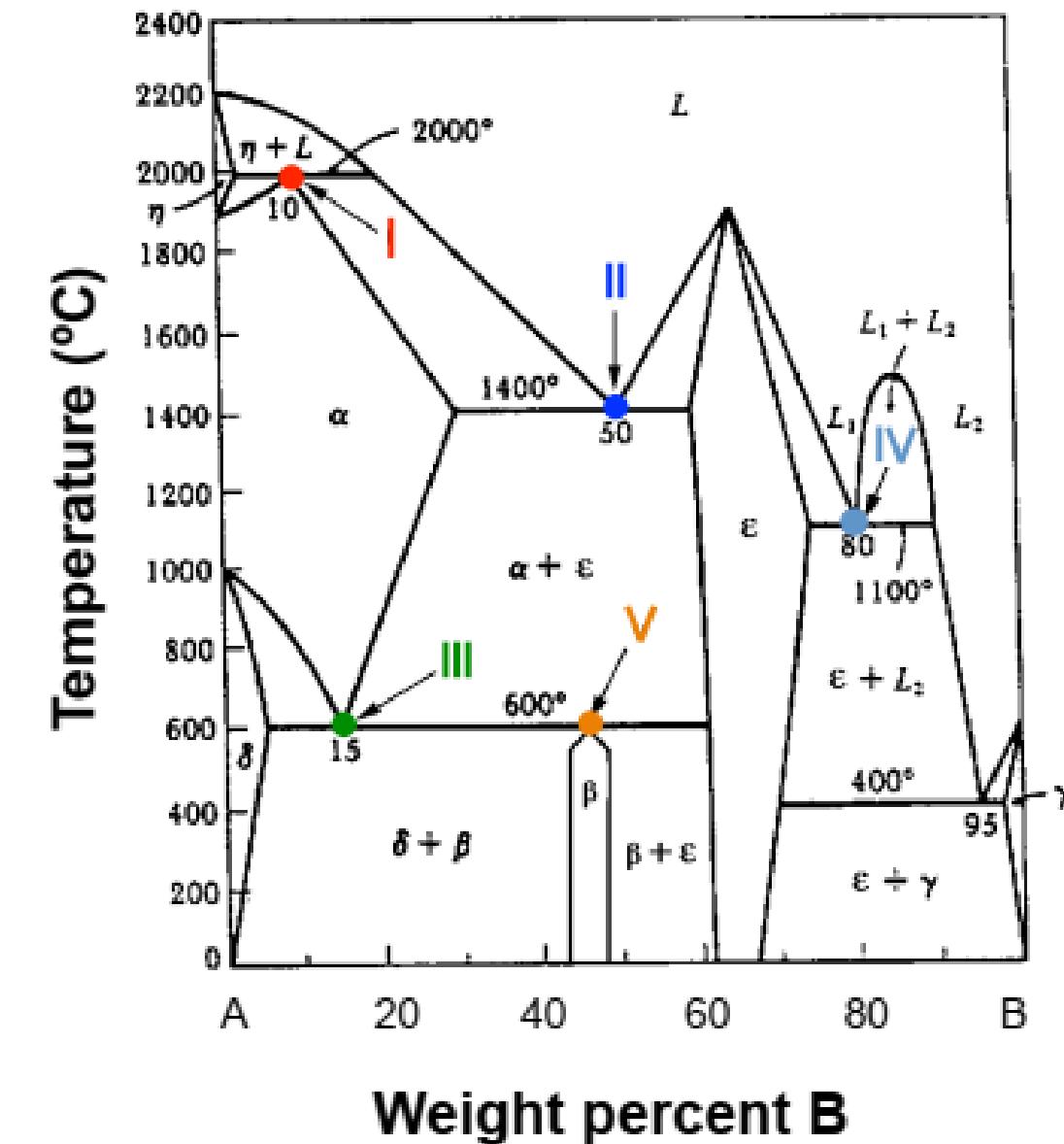
I. Peritéctico.

II. Eutéctico.

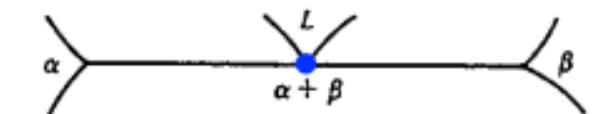
III. Eutectoide.

IV. Monotéctico.

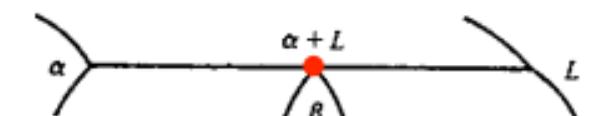
V. Peritectoide.



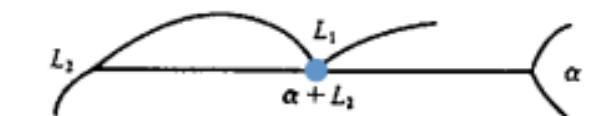
**Eutectic**  $L \rightarrow \alpha + \beta$



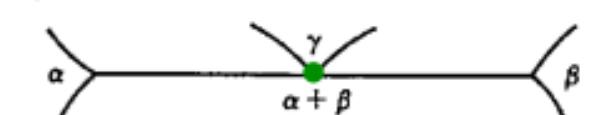
**Peritectic**  $\alpha + L \rightarrow \gamma$



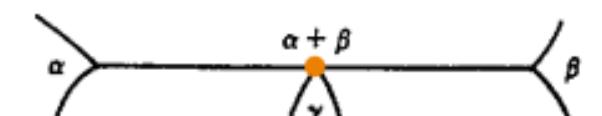
**Monotectic**  $L_1 \rightarrow L_2 + \beta$



**Eutectoid**  $\gamma \rightarrow \alpha + \beta$



**Peritectoid**  $\alpha + \beta \rightarrow \gamma$

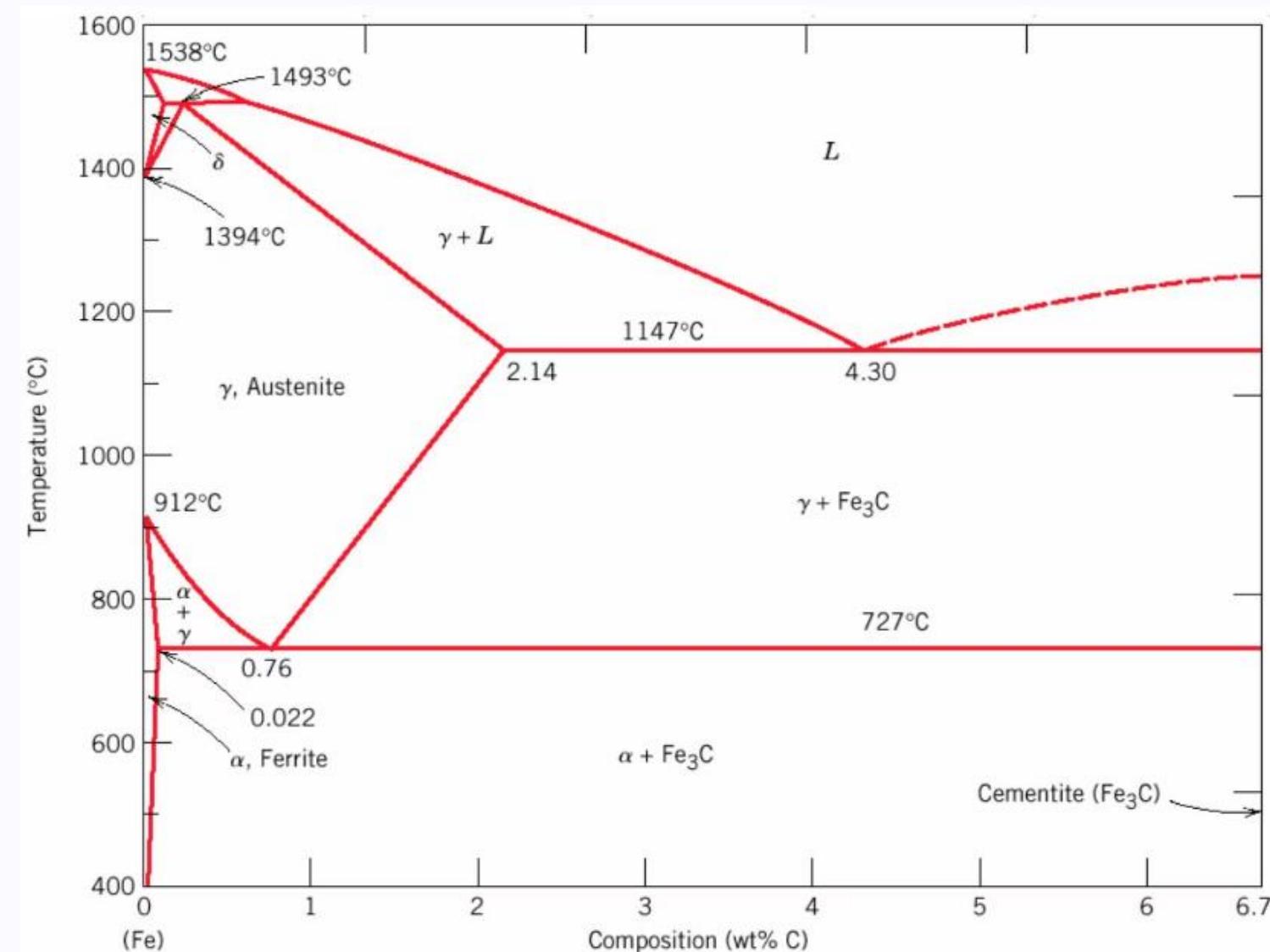


# Diagramas de Fase: El Sistema Hierro-Carburo de Hierro

En este caso, nos centraremos en comprender la estructura y propiedades de los aceros y fundiciones.

# El Diagrama de Fase Hierro-Carburo de Hierro (Fe-Fe<sub>3</sub>C)

En su forma más simple, los aceros son aleaciones de Hierro (Fe) y Carbono (C). El diagrama de fase Fe-C es bastante complejo, pero consideraremos solo la parte hasta aproximadamente un 6,7% de Carbono.



# Fases en el Diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C



## δ-ferrita

Solución sólida de C en Fe BCC. Misma estructura que la α-ferrita. Estable solo a alta temperatura, por encima de 1394°C. Se funde a 1538°C.



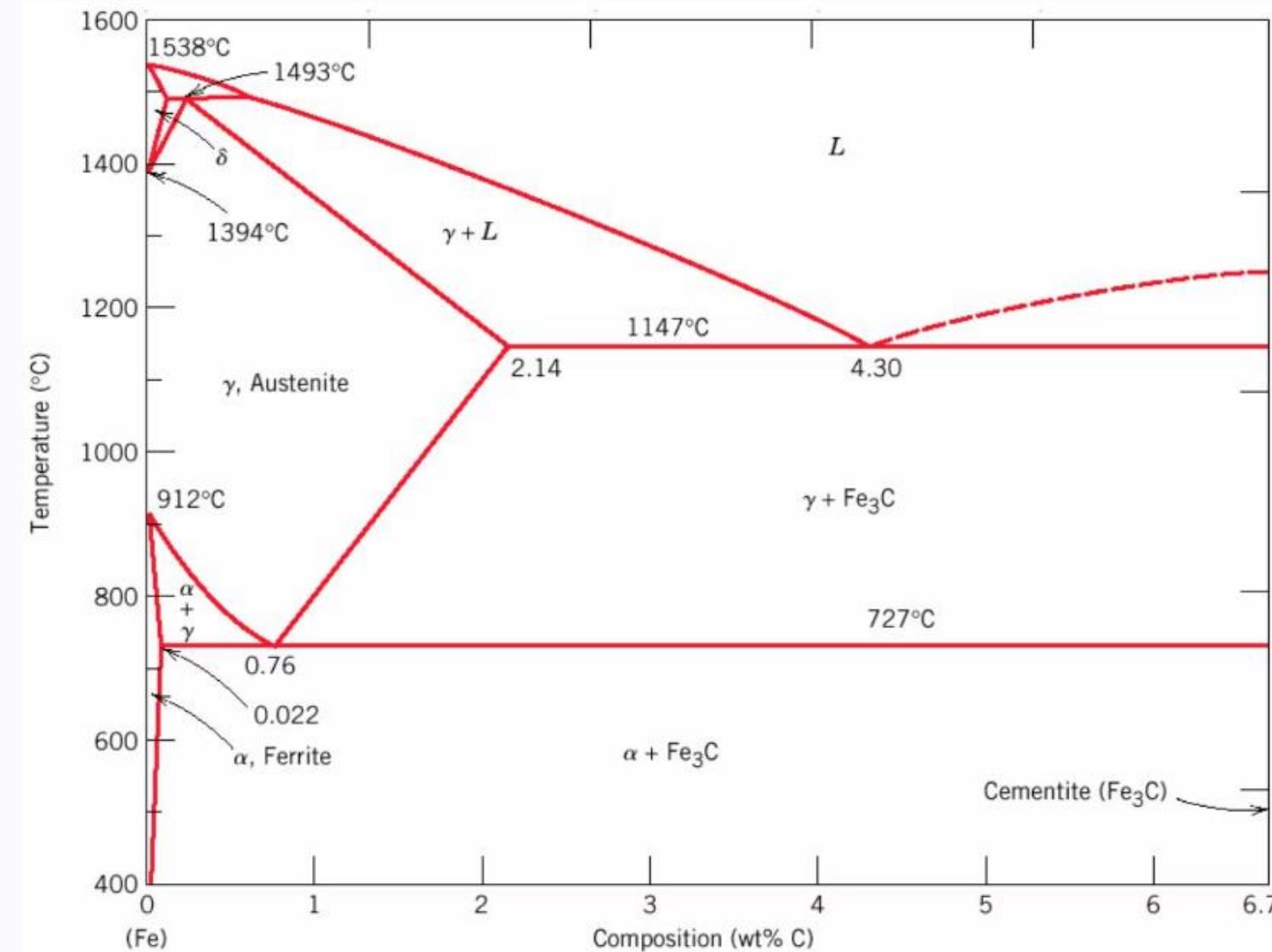
## γ-austenita

Solución sólida de C en Fe FCC. La solubilidad máxima de C es 2,14% en peso. Se transforma en ferrita δ BCC a 1395°C. No es estable por debajo de la temperatura eutectoide (727°C) a menos que se enfríe rápidamente.



## α-ferrita

Solución sólida de C en Fe BCC. Forma estable del hierro a temperatura ambiente. La solubilidad máxima de C es 0,022% en peso. Se transforma en austenita γ FCC a 912°C.



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

Este compuesto intermetálico es metaestable, permanece como compuesto indefinidamente a temperatura ambiente, pero se descompone (muy lentamente, en varios años) en α-Fe y C (grafito) a 650-700°C.

# Algunos comentarios sobre el Sistema Fe-Fe<sub>3</sub>C

## Carbono como impureza intersticial

El C es una impureza intersticial en Fe. Forma una solución sólida con las fases α, γ, δ del hierro.

## Solubilidad limitada en BCC

La solubilidad máxima en α-ferrita BCC es limitada (máx. 0,022% en peso a 727°C) - BCC tiene posiciones intersticiales relativamente pequeñas.

## Mayor solubilidad en FCC

La solubilidad máxima en austenita FCC es 2,14% en peso a 1147°C - FCC tiene posiciones intersticiales más grandes.

## Propiedades mecánicas y magnéticas

La cementita es muy dura y frágil, puede fortalecer los aceros. Las propiedades mecánicas también dependen de la microestructura (es decir, como se mezclan ferrite y cementite). La α-ferrita es magnética por debajo de 768°C, la austenita no es magnética.

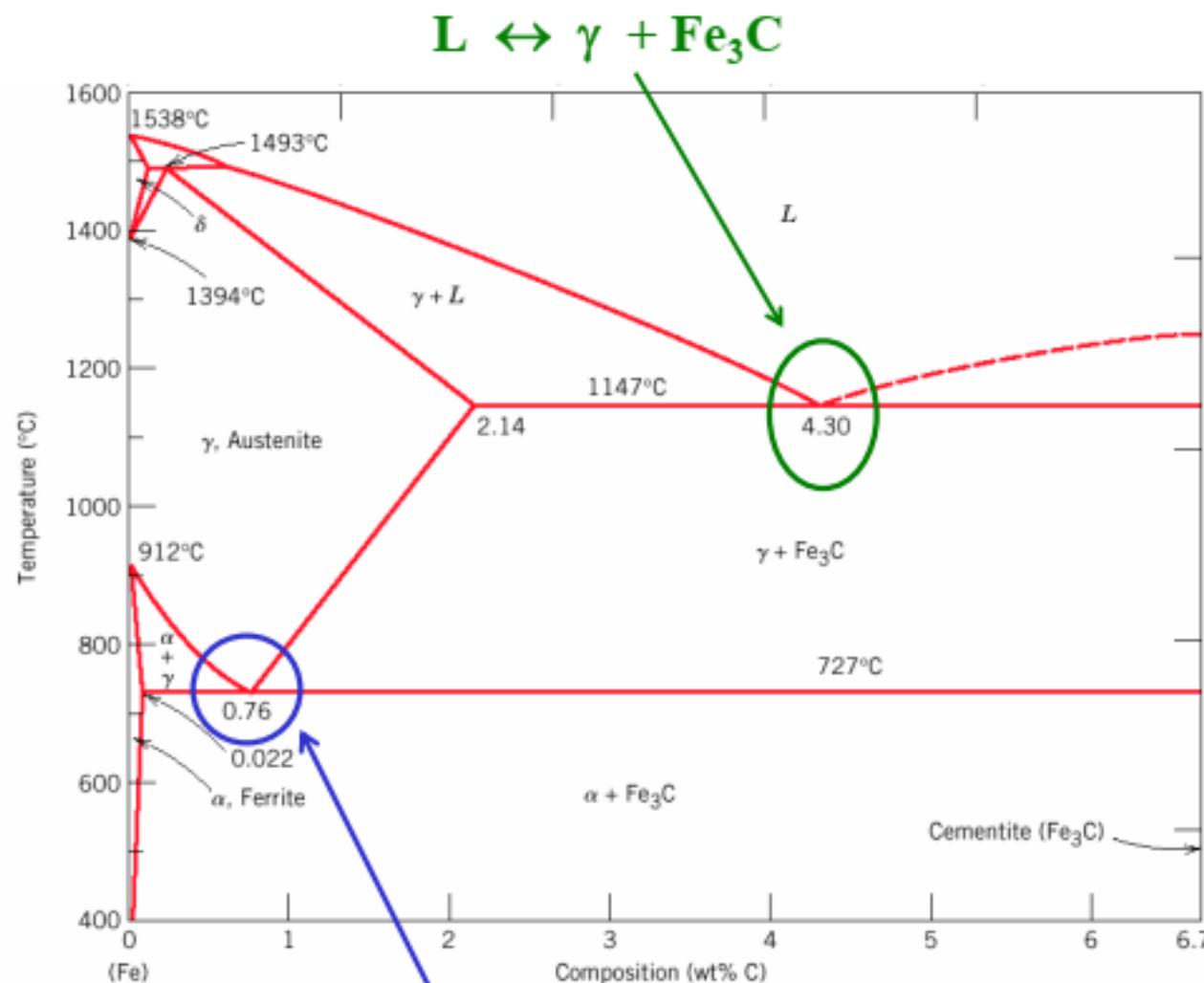
# Clasificación General de Aleaciones Ferrosas



Ejemplo: Los aceros pueden incluir ejemplos como acero para herramientas (Fe + 1% C + 2% Cr o Fe + 1% C + 5% W + 6% Mo) y acero inoxidable (Ej.:12-20% Cr). Las fundiciones se utilizan comúnmente por ej. para carcchas de equipos pesados.

# Reacciones Eutéctica y Eutectoide en Fe-Fe<sub>3</sub>C

**Eutectic:** 4.30 wt% C, 1147 °C



**Eutectoid:** 0.76 wt% C, 727 °C



## Reacción Eutectoide

0,76% en peso de C, 727°C

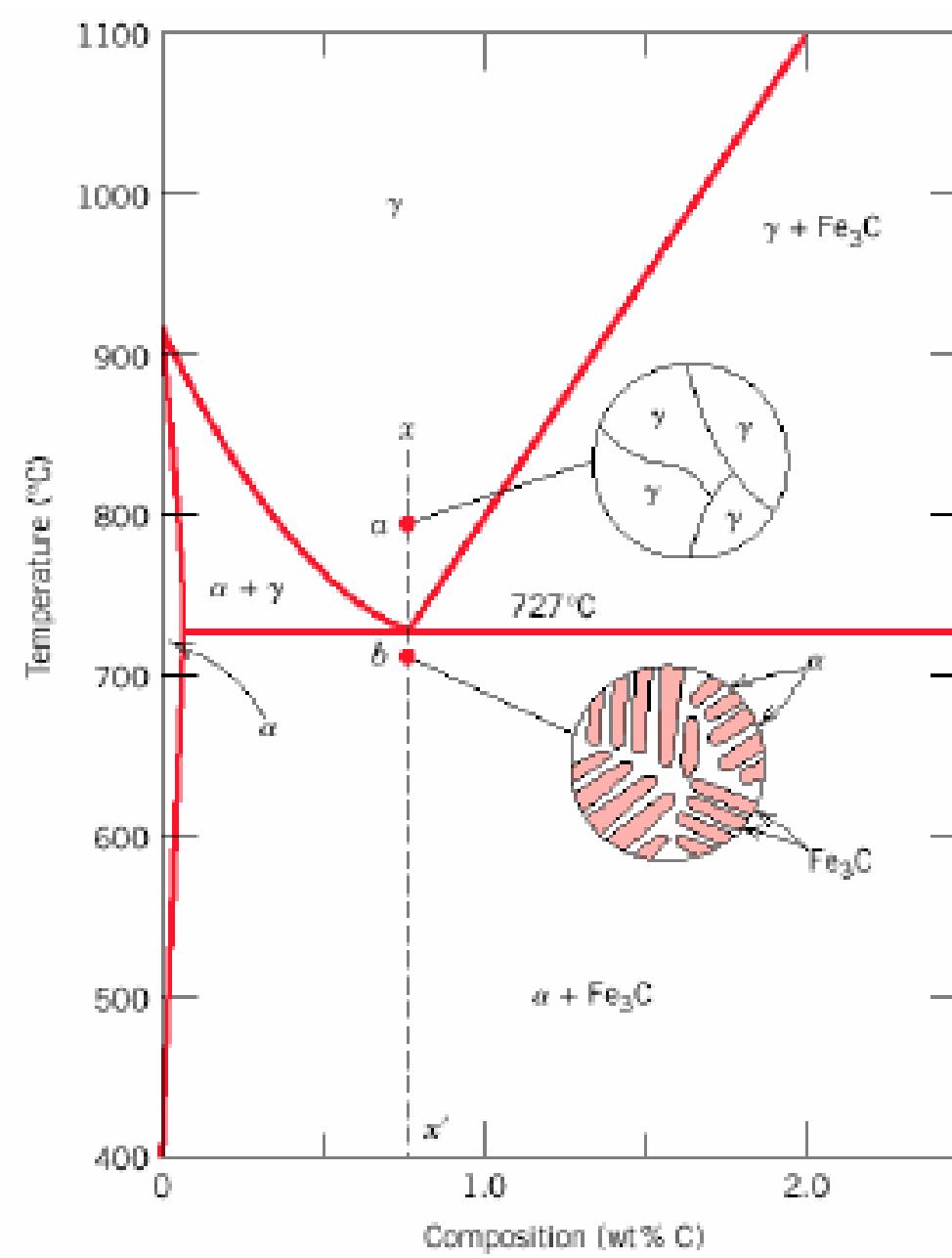


Las reacciones eutéctica y eutectoide son muy importantes en el tratamiento térmico de aceros.

# Microestructura del Acero Eutectoide (I)

## Desarrollo de Microestructura en Aleaciones Hierro-Carbono

La microestructura depende de la composición (contenido de carbono) y el tratamiento térmico. En la siguiente discusión consideramos enfriamiento lento en el que se mantiene el equilibrio.

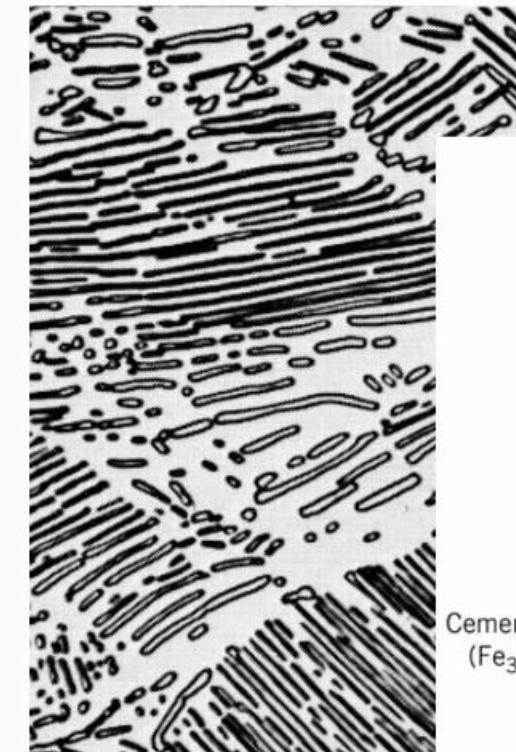


# Microestructura del Acero Eutectoide (II)

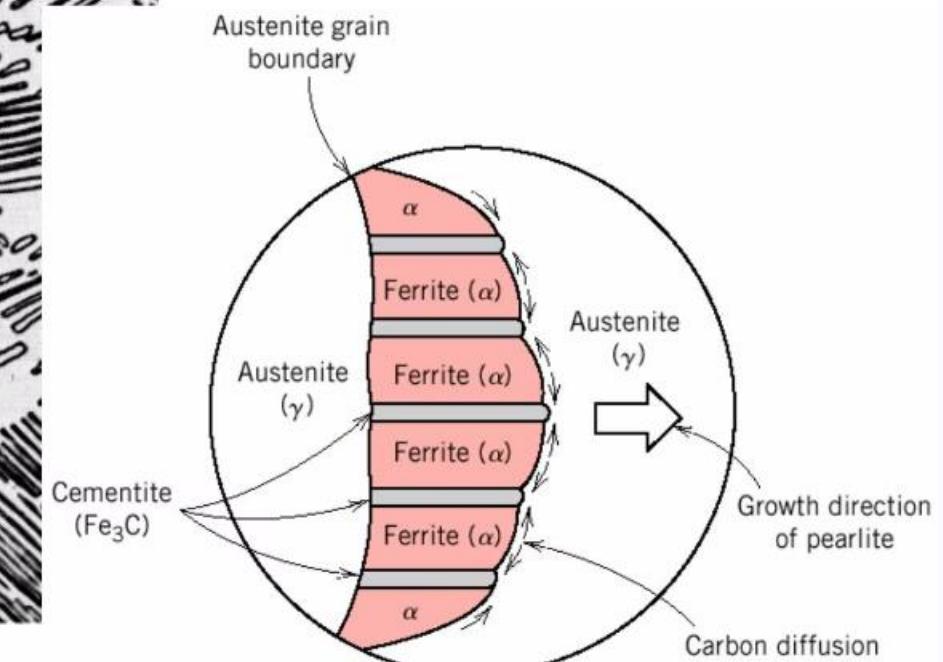
Cuando una aleación de composición eutectoide (0,76% en peso de C) se enfria lentamente, forma perlita, una estructura laminar o en capas de dos fases:  $\alpha$ -ferrita y cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ).

Las capas de fases alternadas en la perlita se forman por la misma razón que la estructura en capas de las estructuras eutécticas: redistribución de átomos de C entre ferrita (0,022% en peso) y cementita (6,7% en peso) mediante difusión atómica.

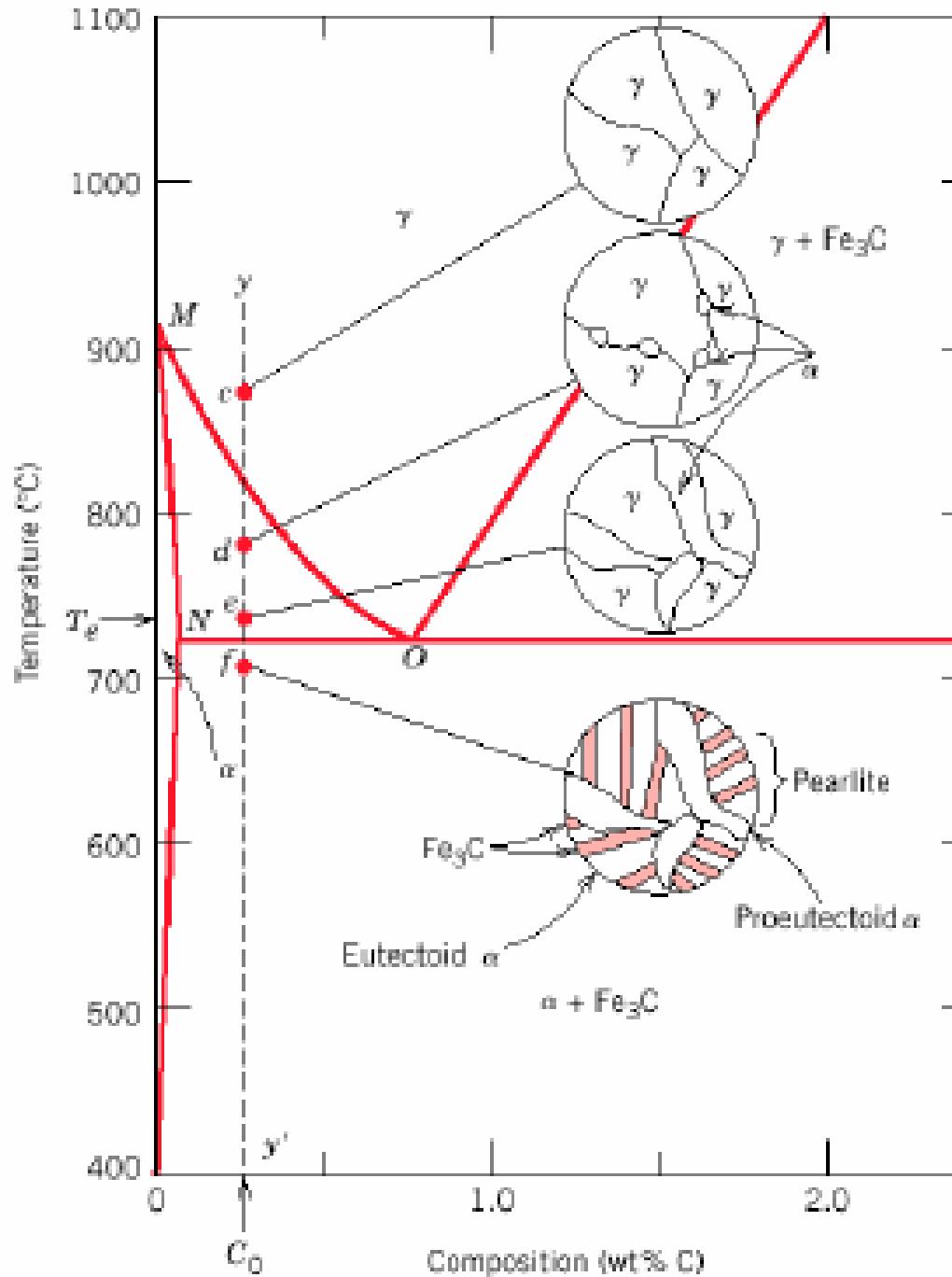
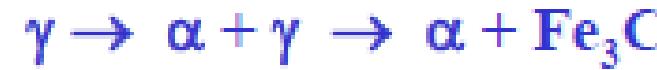
Mecánicamente, la perlita tiene propiedades intermedias entre la ferrita blanda y dúctil y la cementita dura y frágil.



In the micrograph, dark areas are  $\text{Fe}_3\text{C}$  layers, light phase is  $\alpha$ -ferrite



# Microestructura del Acero Hipoeutectoide (I)



## Composición

Composiciones a la izquierda del eutectoide (0,022 - 0,76% en peso de C) aleaciones hipoeutectoides (menos que eutectoide - Griego).

## Transformación



## Transformación Final



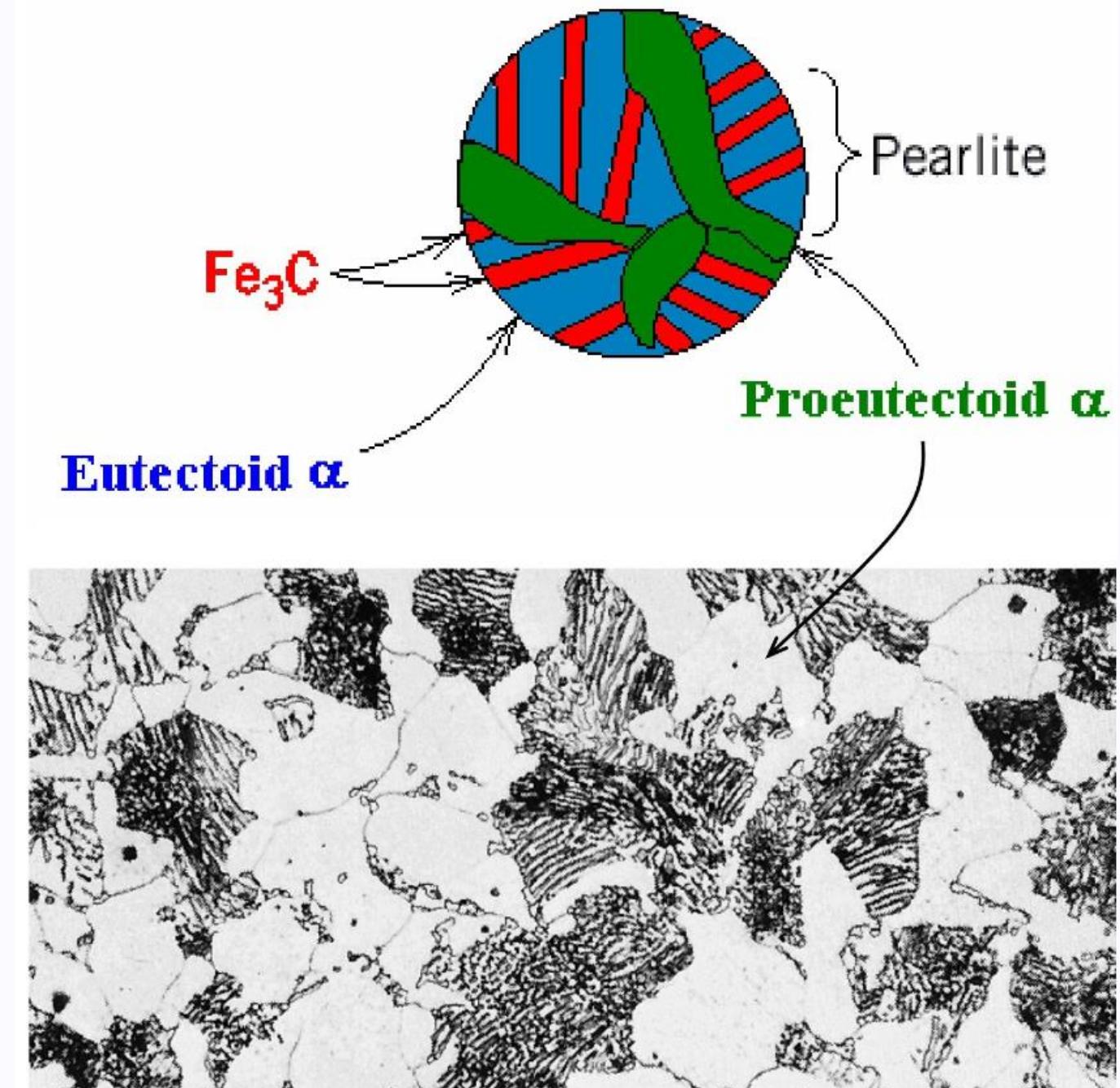
1

2

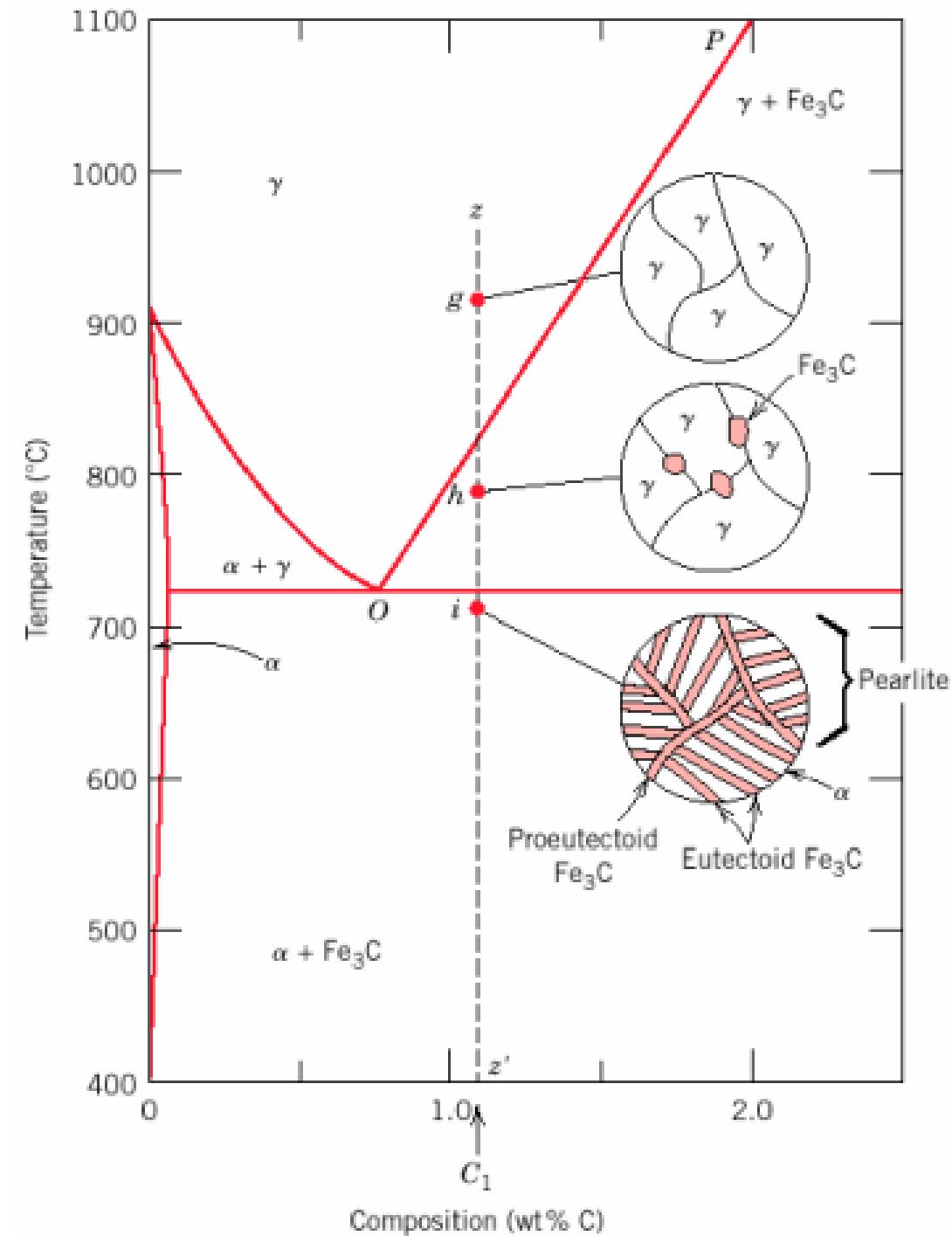
3

# Microestructura del Acero Hipoeutectoide (II)

Las aleaciones hipoeutectoides contienen ferrita proeutectoide (formada por encima de la temperatura eutectoide) más la perlita eutectoide que contiene ferrita eutectoide y cementita.



# Microestructura del Acero Hipereutectoide (I)



Composición

Composiciones a la derecha del eutectoide (0,76 - 2,14% en peso de C) aleaciones hipereutectoides (más que eutectoide - Griego).

Transformación

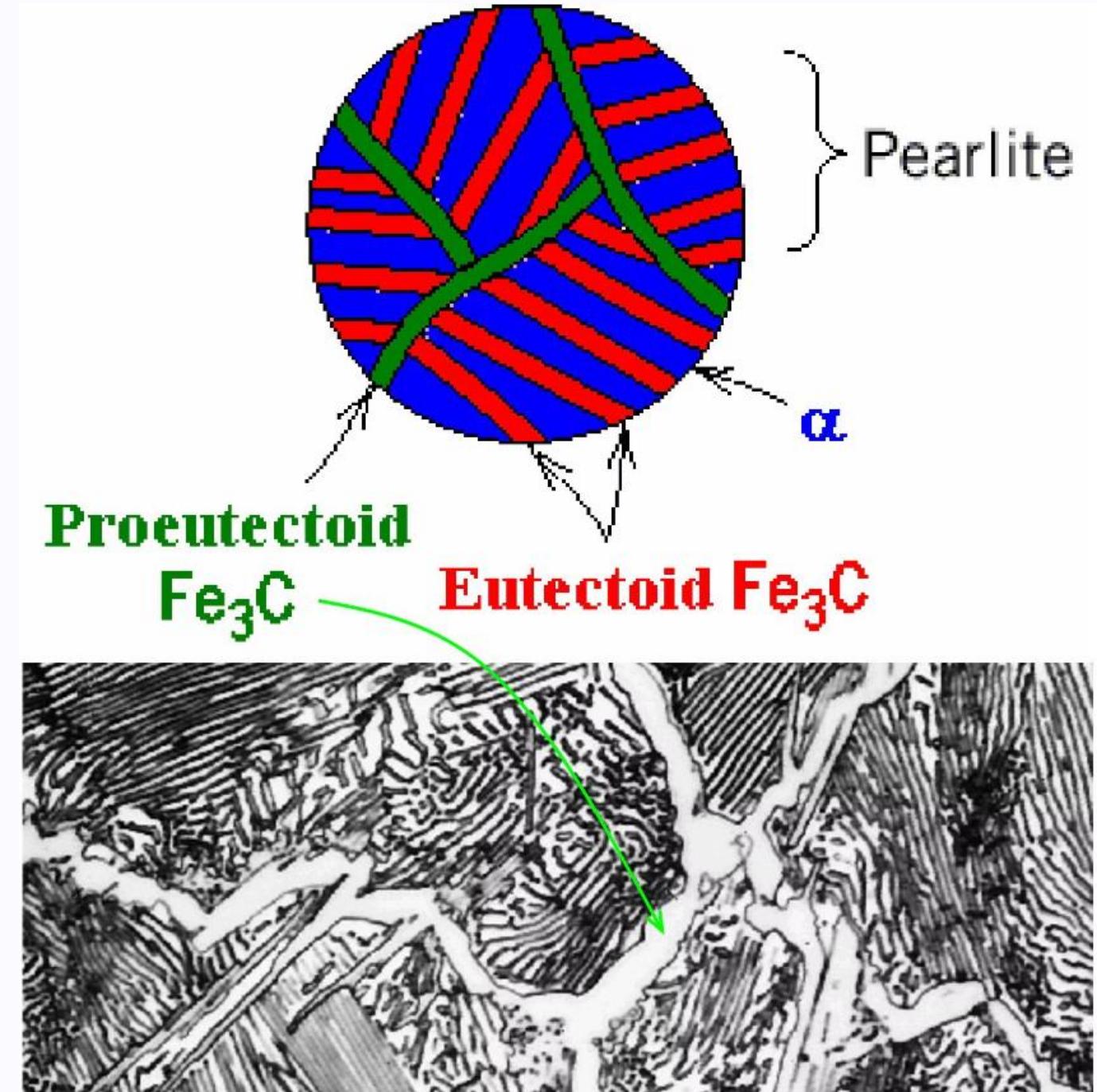
$\gamma \rightarrow \gamma + \text{Fe}_3\text{C}$

Transformación Final

$\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$

# Microestructura del Acero Hipereutectoide (II)

Las aleaciones hipereutectoides contienen cementita proeutectoide (formada por encima de la temperatura eutectoide) más perlita que contiene ferrita eutectoide y cementita.



# Cálculo de Cantidades Relativas de Fases

## Aplicación de la regla de la palanca

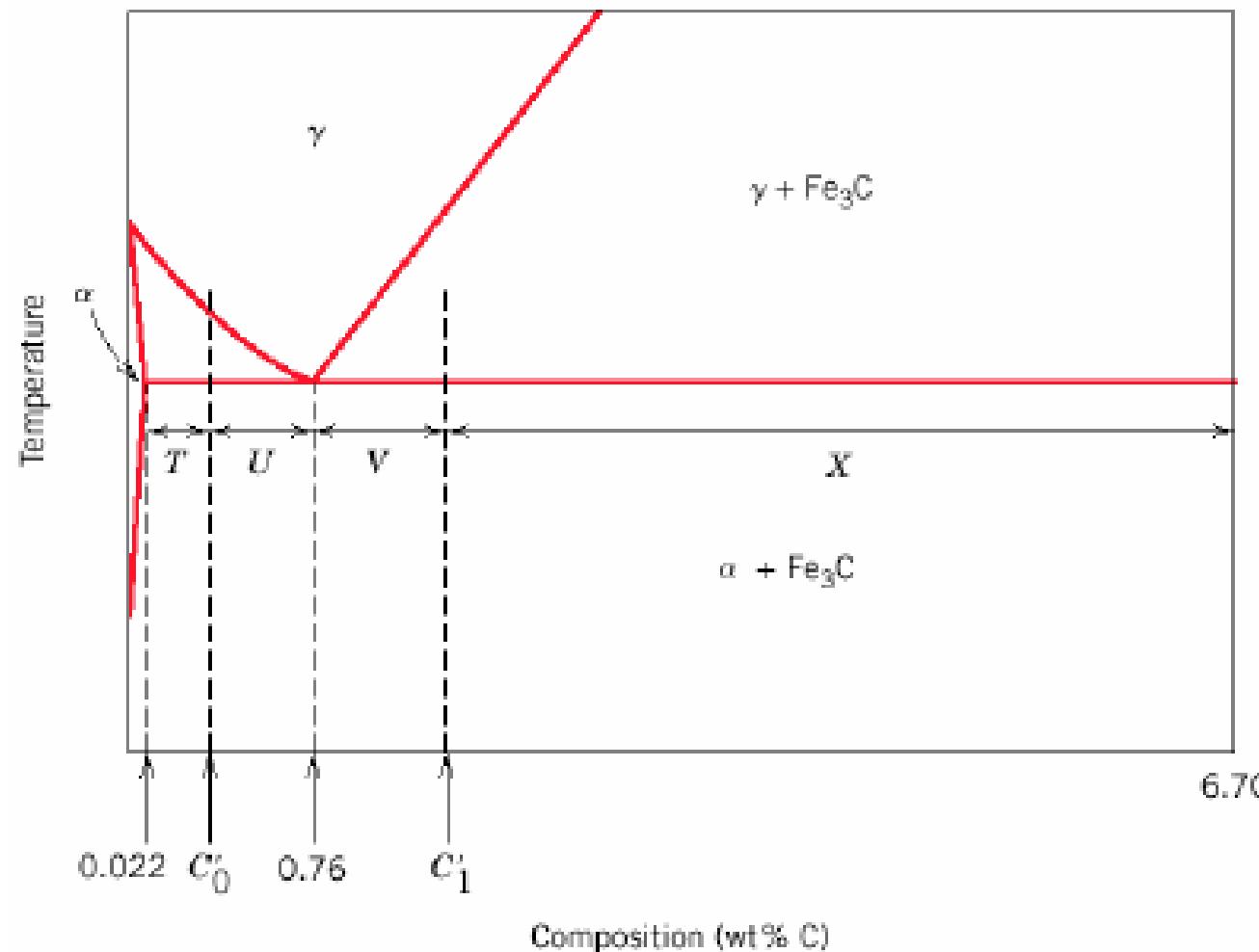
Con línea de enlace que se extiende desde la composición eutectoide (0,75% en peso de C) hasta el límite  $\alpha - (\alpha + \text{Fe}_3\text{C})$  (0,022% en peso de C) para aleaciones hipoeutectoides y hasta el límite  $(\alpha + \text{Fe}_3\text{C}) - \text{Fe}_3\text{C}$  (6,7% en peso de C) para aleaciones hipereutectoides.

## Determinación de fracciones

La fracción de fase  $\alpha$  se determina mediante la aplicación de la regla de la palanca a través de todo el campo de fase  $(\alpha + \text{Fe}_3\text{C})$ .

## Visualización gráfica

El diagrama muestra cómo aplicar estas reglas para determinar las proporciones exactas de cada fase presente.



# Ejemplo para Aleación Hipereutectoide

## Composición

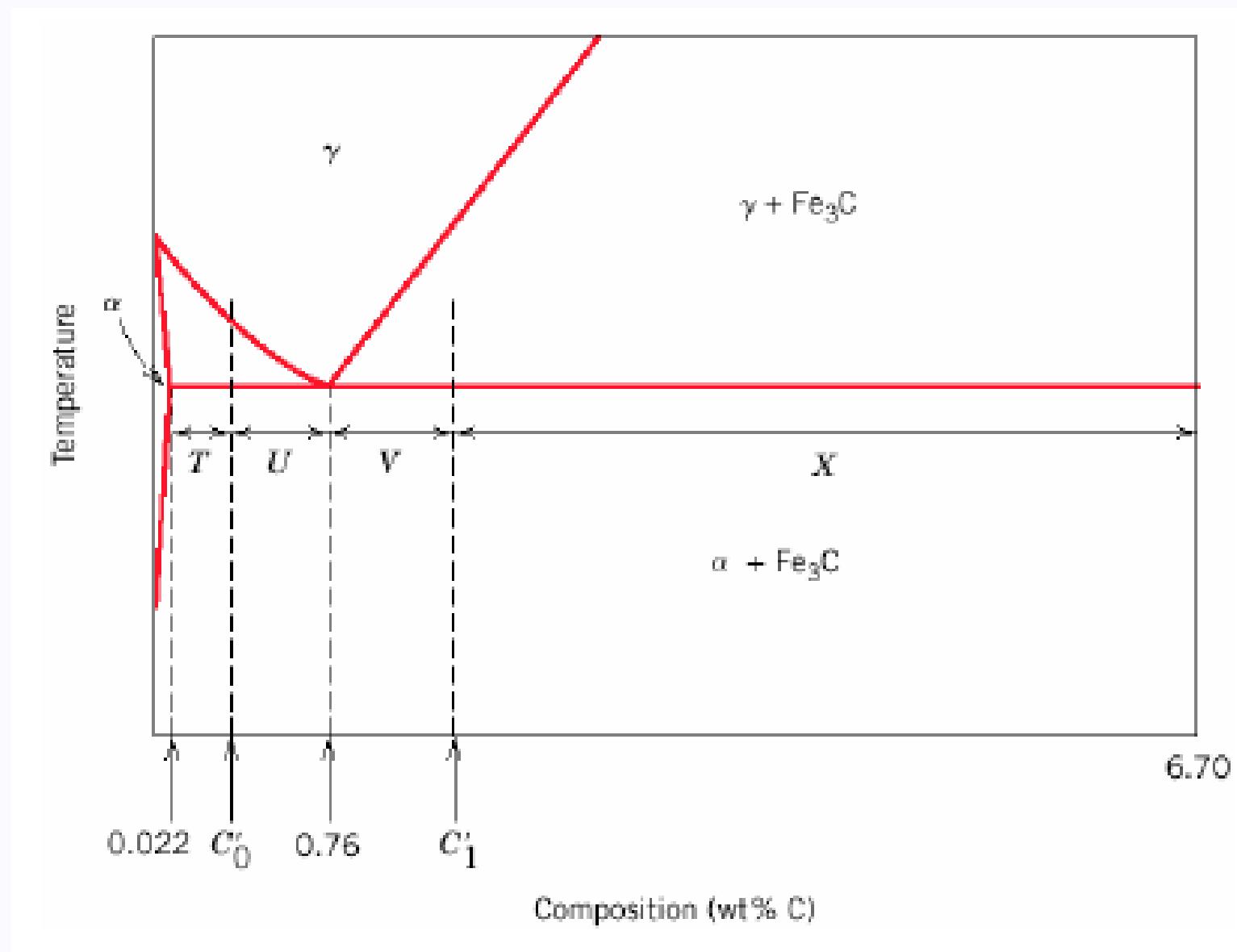
Contenido de carbono en la aleación hipereutectoide

## Fracción de perlita

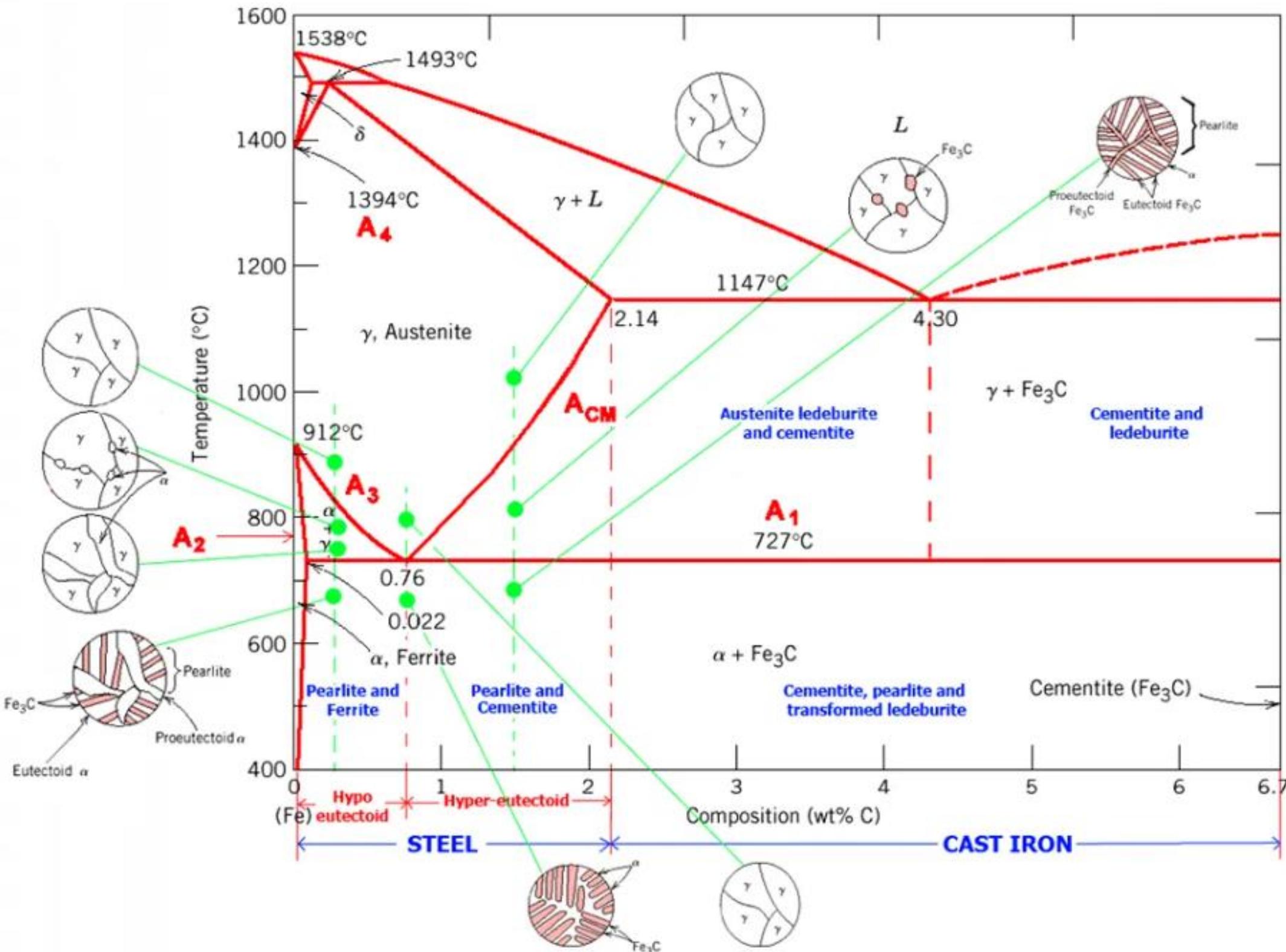
$$WP = X / (V+X) = (6,7 - C_1) / (6,7 - 0,76)$$

## Fracción de cementita proeutectoide

$$WFe_3C = V / (V+X) = (C_1 - 0,76) / (6,7 - 0,76)$$



# Resumen



# Aplicaciones Prácticas del Diagrama Fe-Fe3C



## Industria Automotriz

Los aceros con diferentes contenidos de carbono se utilizan en diversas partes de vehículos, desde la carrocería hasta componentes del motor.



## Construcción

Las estructuras de acero requieren propiedades específicas que se logran mediante el control preciso de la microestructura.



## Herramientas

Los aceros para herramientas necesitan alta dureza y resistencia al desgaste, propiedades que se obtienen con contenidos específicos de carbono.



## Investigación

El estudio de la microestructura del acero continúa siendo un campo activo de investigación para desarrollar nuevos materiales con propiedades mejoradas.