

ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS I

Conteúdo: Diagramas de Fases

Diagramas de Fases

1. Definições e conceitos

2. Diagramas de fases de equilíbrio

- Sistemas isomorfos binários
- Sistemas eutéticos binários
- Diagramas de equilíbrio contendo fases ou compostos intermediários (Eutetóides, peritéticas e peritetóides)

3. Diagramas de fases de metais

Definições e conceitos

- **Componente:** São elementos e/ou compostos puros que compõe uma liga e/ou um material. Exemplo: Fe, Al, C, Cu, Ni, Al_2O_3 , ZrO_2 , etc.
- **Sistema:** Neste contexto, sistema está relacionado à série de possíveis misturas compostas pelos componentes. Exemplo: Sistema Fe-C, Sistema Al_2O_3 - ZrO_2 , Sistema Polietileno-Polipropileno.
- **Fases:** Porção homogênea se um sistema que possui características físicas e químicas uniformes. Exemplo: água, gelo, metal puro, uma solução líquida ou sólida, etc. Materiais que possuem formas polimórficas (exemplo Fe CCC e Fe CFC), cada uma dessas estruturas consiste em uma fase separada.

Definições e conceitos

- **Equilíbrio de fases:** Um sistema está em equilíbrio quando sua energia é mínima para com a combinação específica de temperatura, pressão e composição. Quando um sistema está em equilíbrio ele não irá mudar com o tempo. Um sistema fora do equilíbrio irá mudar até atingir o estado de equilíbrio.
- **Diagramas de equilíbrio de fases:** Representação gráfica das fases presentes em um sistema de acordo com as condições de temperatura, composição e pressão.

Formação de Microestruturas e Morfologias

Dependem de duas coisas

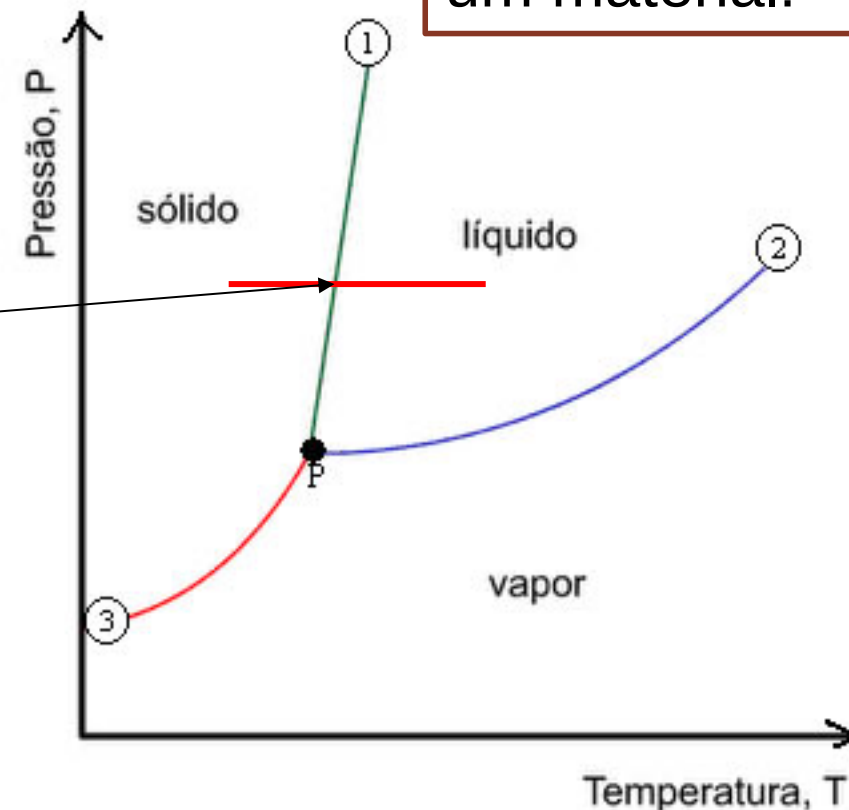
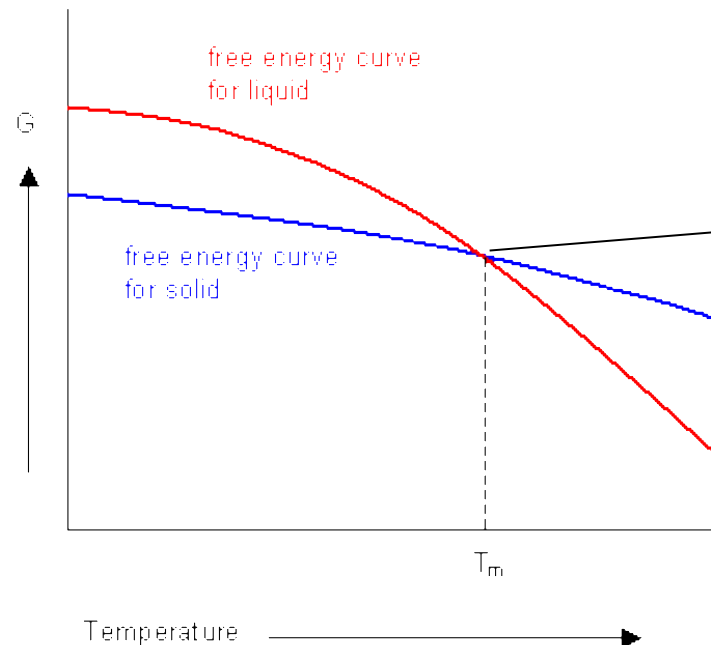
- Termodinâmica
 - Define o que vai formar
 - **Equilíbrio – menor energia**
- Cinética
 - Define **quando** os fenômenos ocorrem

Juntos – o que, quando e com que morfologia as fases se formam

Equilíbrio Termodinâmico

- O que é estar em equilíbrio?
 - Equilíbrio Térmico (T é constante)
 - Equilíbrio Mecânico (P é constante)
 - Menor energia de Gibbs – G

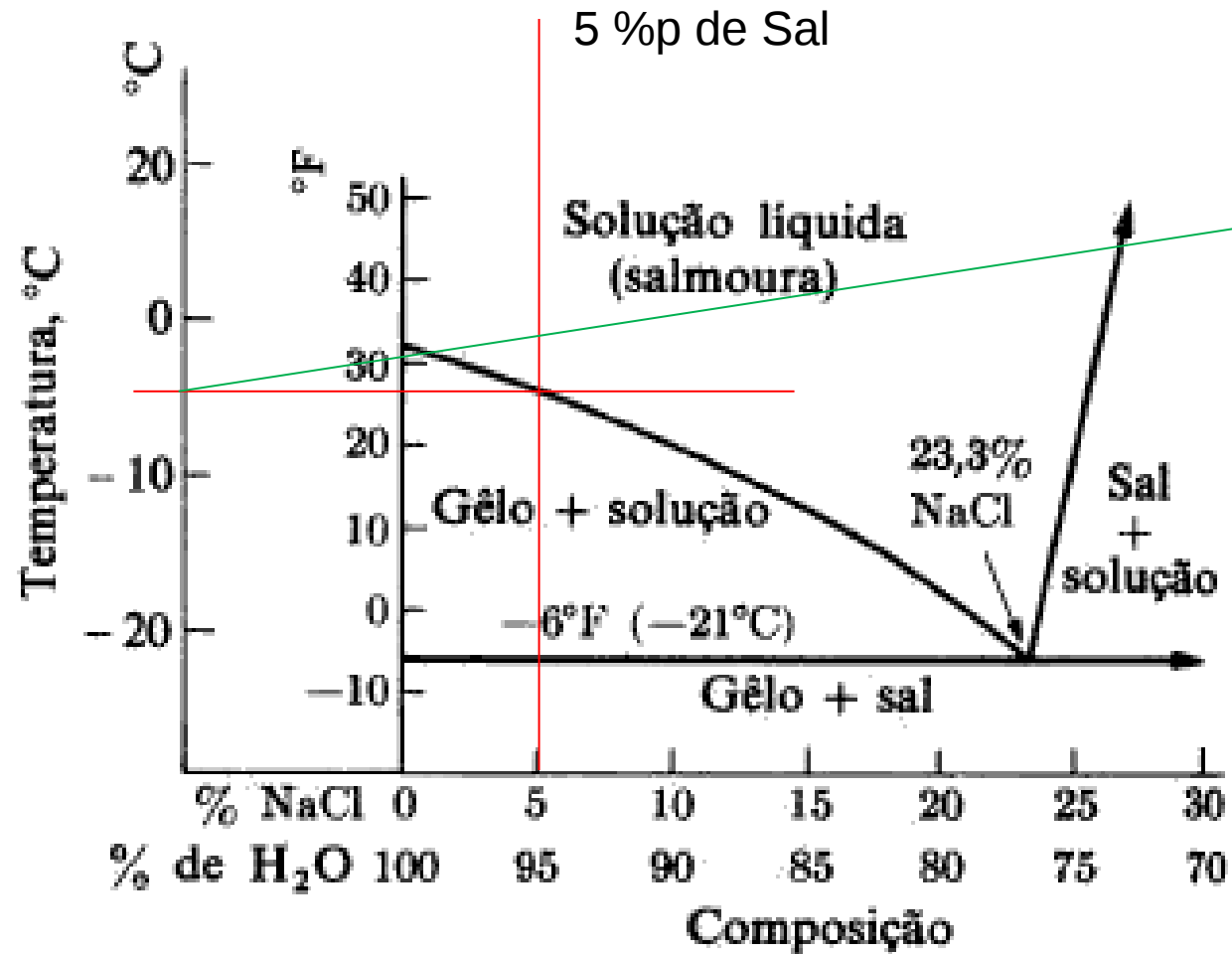
Diagramas que mostram as fases de equilíbrio em um material!



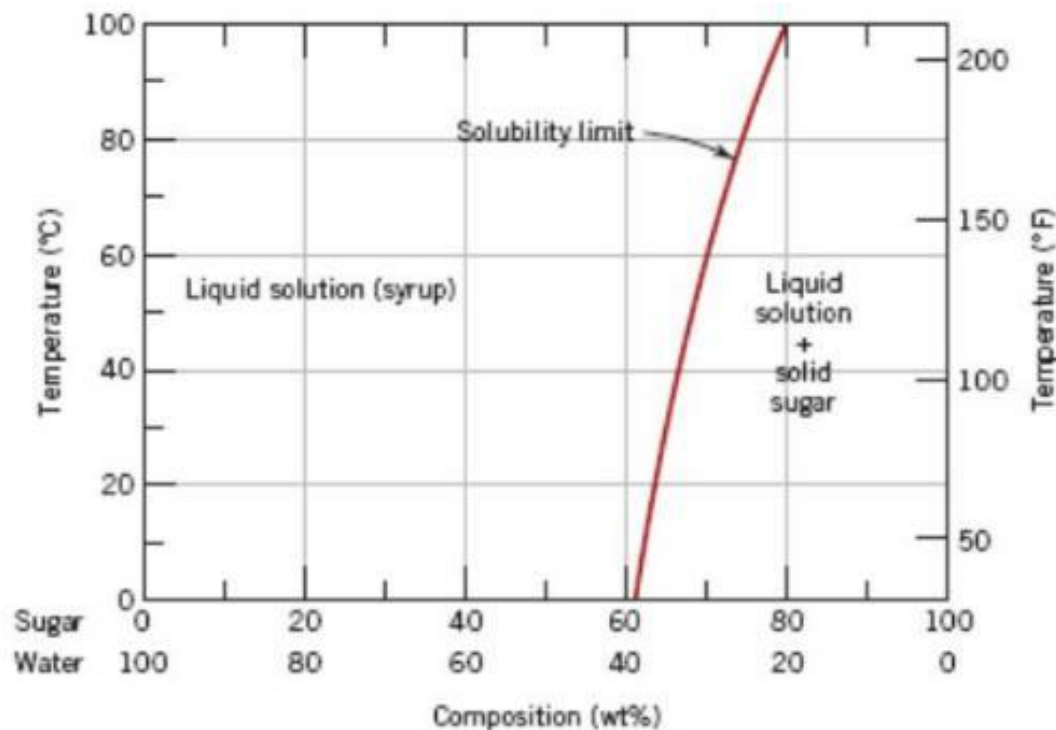
Sistemas com vários componentes



Sistemas com vários componentes



Sistema Água-Açúcar

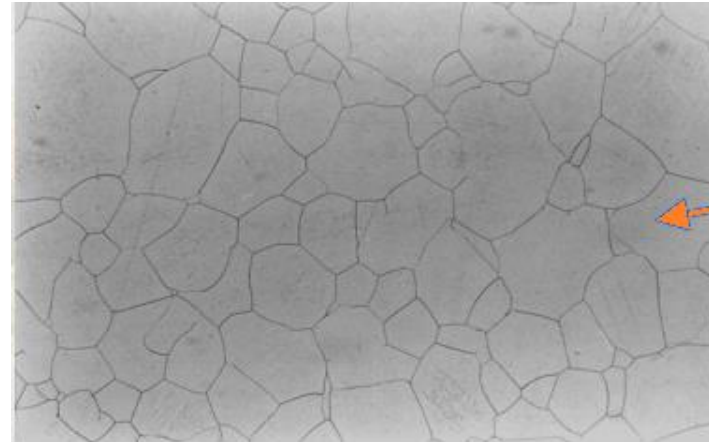


- **Componentes:** H_2O e $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$
- **Fases:** Solução líquida (Xarope) e açúcar sólido.
- **Limite de solubilidade** varia com a **temperatura**, portanto, se alterarmos a temperatura, há uma alteração nas fração e na composição **das fases de equilíbrio**.
- **Limite de solubilidade:** Concentração máxima de átomos de soluto que pode se dissolver no solvente para formar uma solução.

Número de Fases em um Material

Material monofásico

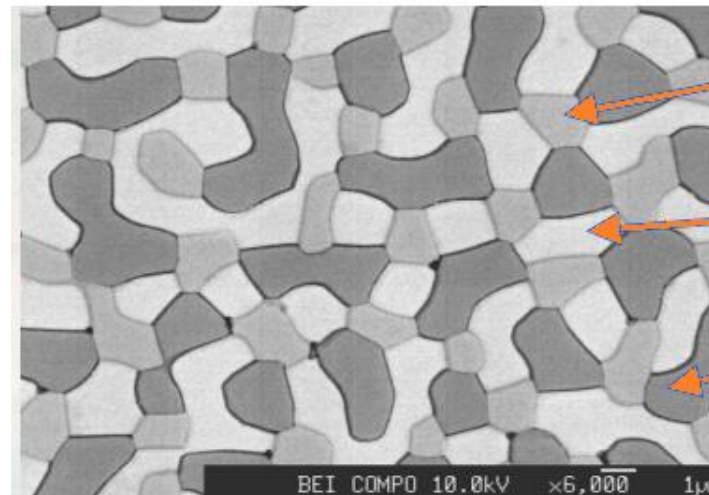
Exemplo: Aço inox autentico (Liga do sistema Fe-Cr-Ni-C)



Austenita
(CFC)

Material polifásico

Exemplo: Ligas do sistema Al-Nb-Ni;
Grande maioria das
blendas poliméricas

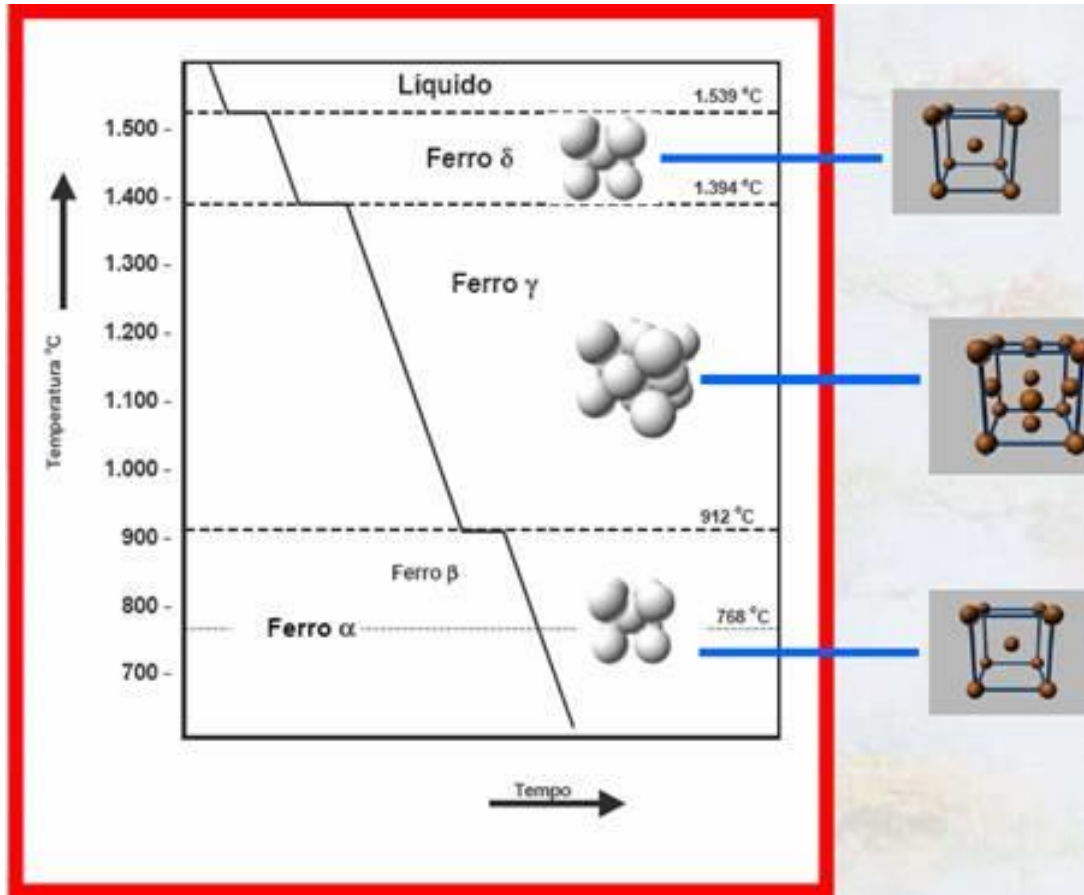


AlNbNi

Nb₂Al

Al₃Nb

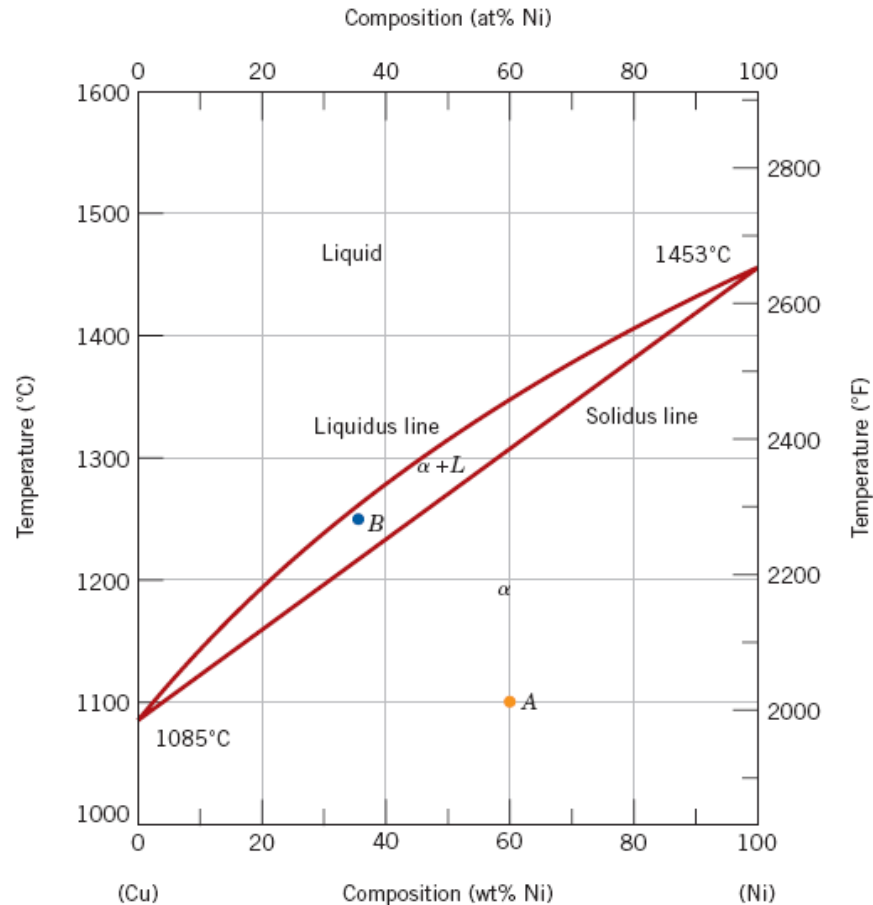
Lembrar – Polimorfismo e Alotropia



Polimorfismo e alotropia

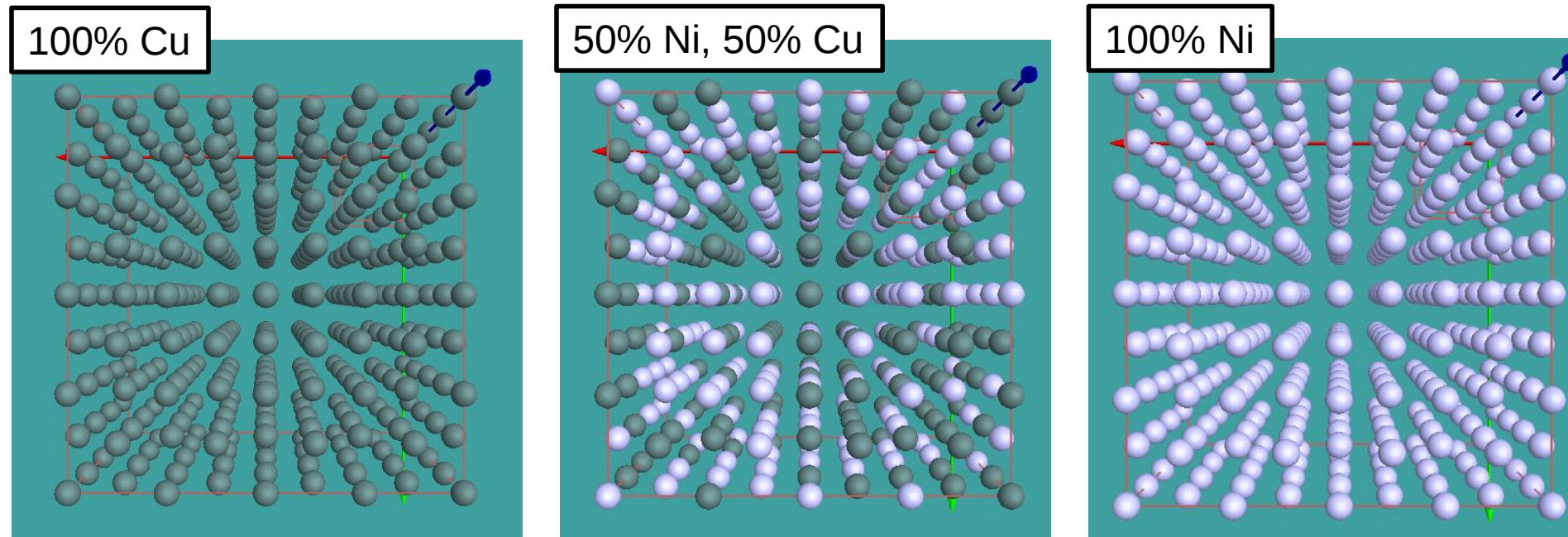
Materiais são ditos polimórficos quando sua estrutura cristalina muda com a temperatura ou pressão.

Sistemas Isomorfos



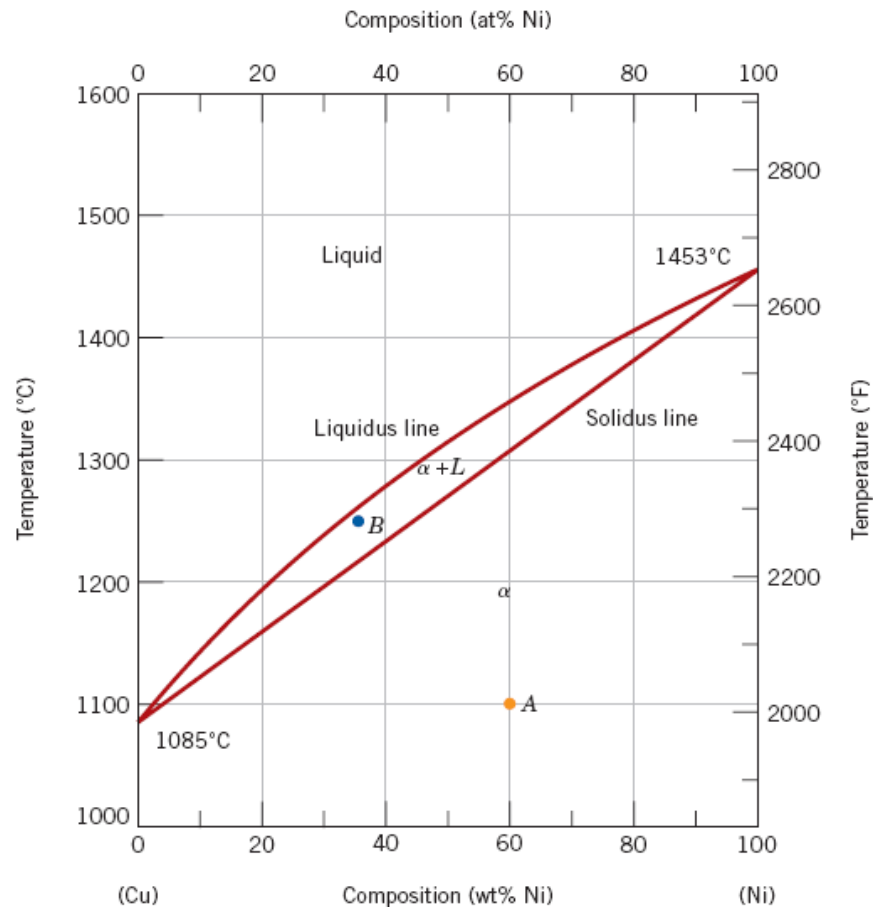
- **Diagramas binários:** Apenas dois componentes.
- Diagramas de fases são chamados **isomorfos** quando os dois componentes apresentam **solubilidade completa** nos estados líquido e sólido.
- **Exemplo:** Sistema Cu-Ni.
 - **Componentes:** Cu e Ni.
 - **Fases:** **Líquido** e α (solução sólida substitucional que contém tanto átomos de Cu como de Ni e que possui estrutura cristalina CFC).
- Definições:
 - Linha **liquidus** e Linha **solidus**.

Estrutura Atômica da Solução Sólida



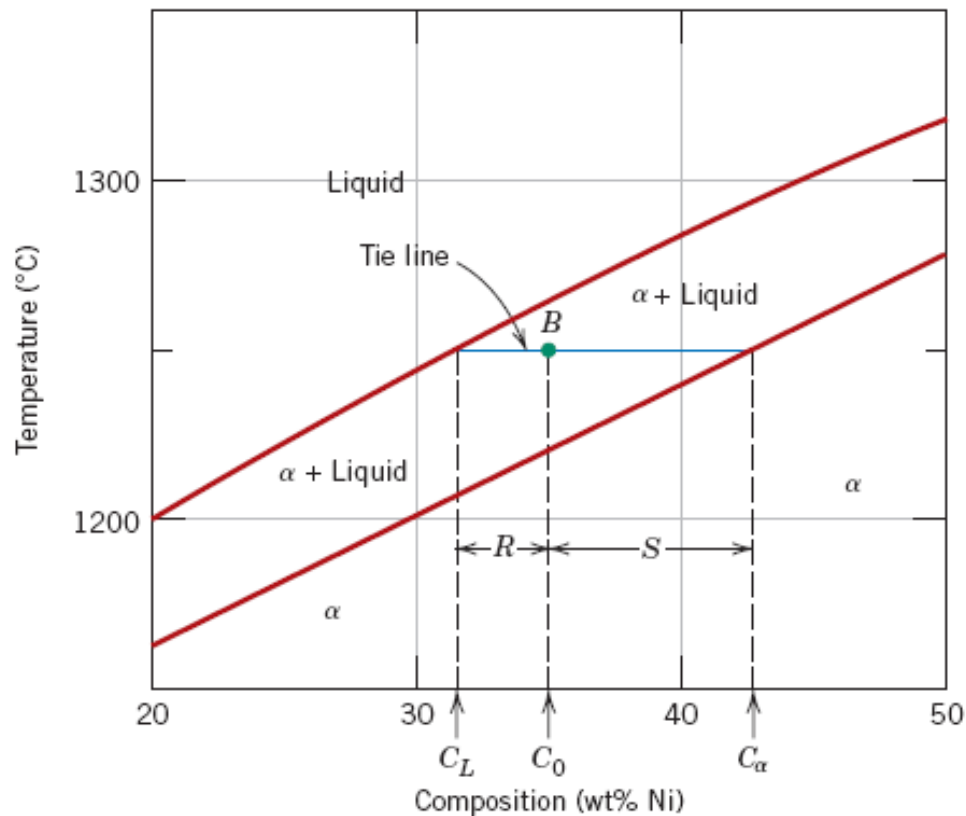
- Mesma estrutura para todas as composições
- Átomos ocupam as posições atômicas de forma aleatória

Sistemas Isomorfos



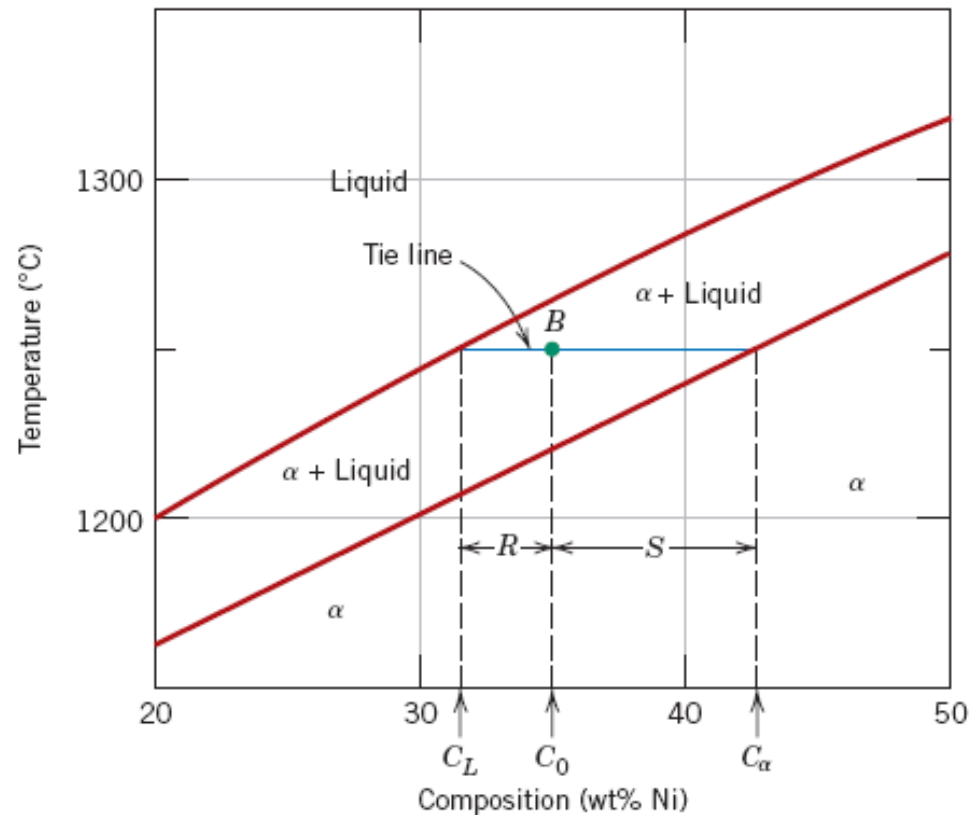
- **Diagramas binários:** Apenas dois componentes.
- Diagramas de fases são chamados **isomorfos** quando os dois componentes apresentam **solubilidade completa** nos estados líquido e sólido.
- **Exemplo:** Sistema Cu-Ni.
 - **Componentes:** Cu e Ni.
 - **Fases:** **Líquido** e α (solução sólida substitucional que contém tanto átomos de Cu como de Ni e que possui estrutura cristalina CFC).
- Definições:
 - Linha **liquidus** e Linha **solidus**.

Campo Bifásico



- Para esse sistema metálico, Não é possível obter no equilíbrio nenhum material monofásico no ponto B
 - Não existe nenhuma fase estável com a composição C_0 na temperatura de 1250°C
 - Ocorre uma mistura e duas fases!
- **Exemplo:** As composições das fases de equilíbrio da liga Cu-35%p.Ni à 1250 °C?
 - Líquido com composição **C_L** : 31,5%p. de Ni.
 - α com composição **C_s** : 42,5%p. de Ni.

A Regra da Alavanca



- Determinação das quantidade de fases**

Exemplo: Qual a fração em massa de equilíbrio de líquido e fase α da liga Cu-35%p.Ni à 1250 °C?

Fração de líquido

$$W_L = \frac{S}{R + S}$$

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

$$W_L = \frac{42,5 - 35}{42,5 - 31,5} = 0,68$$

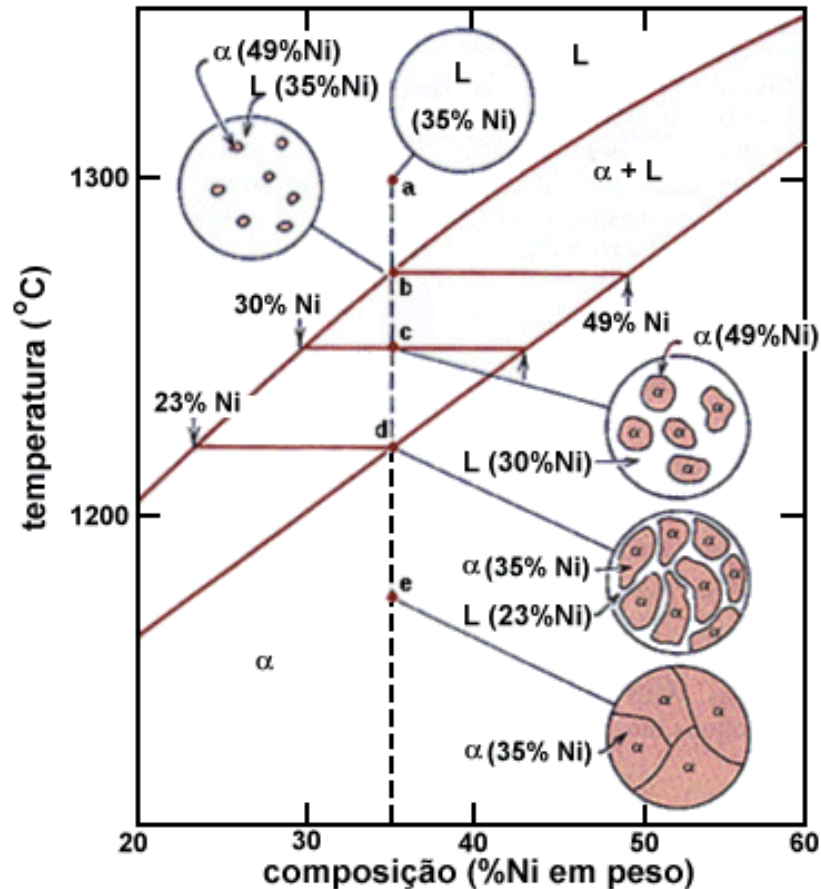
Fração de sólido

$$W_\alpha = \frac{R}{R + S}$$

$$= \frac{C_0 - C_L}{C_\alpha - C_L}$$

$$= \frac{35 - 31,5}{42,5 - 31,5} = 0,32$$

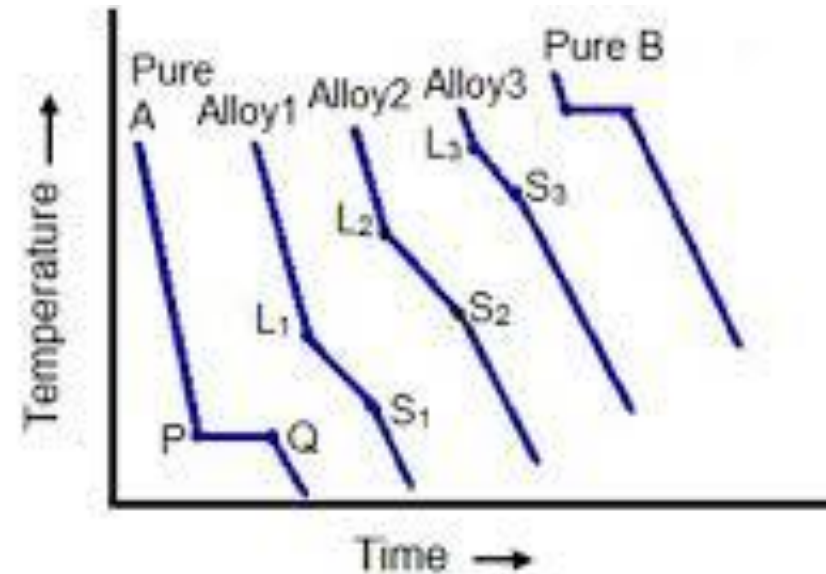
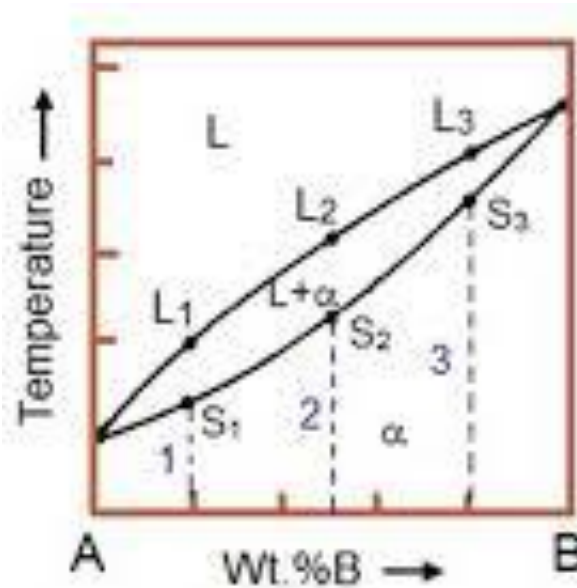
Formação de Morfologia



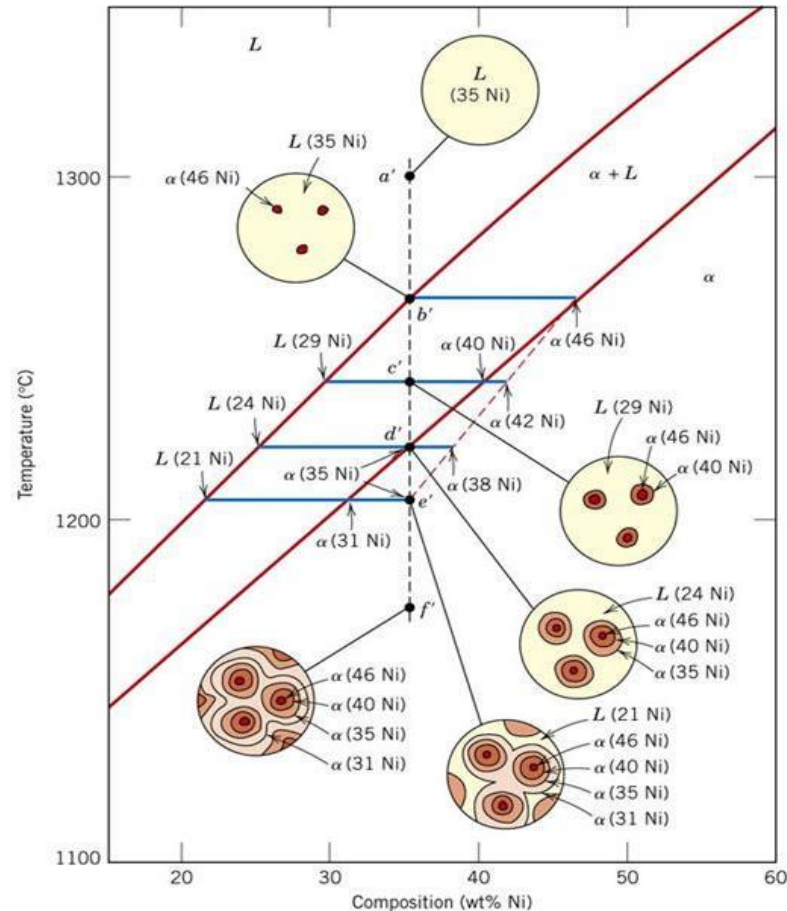
- Desenvolvimento da microestrutura em ligas isomorfas com **resfriamento em condições de equilíbrio**.
- Composição e fração do líquido e do sólido mudam com a temperatura
- Lembrar:
 - MATERIAIS NÃO SÃO FICHAS
 - Propriedades dependem da estrutura

Solidificação no Equilíbrio – Curva de Resfriamento

- Solidificação para ligas ocorre em uma faixa de temperaturas
- Dado pelas linhas liquidus e solidus!

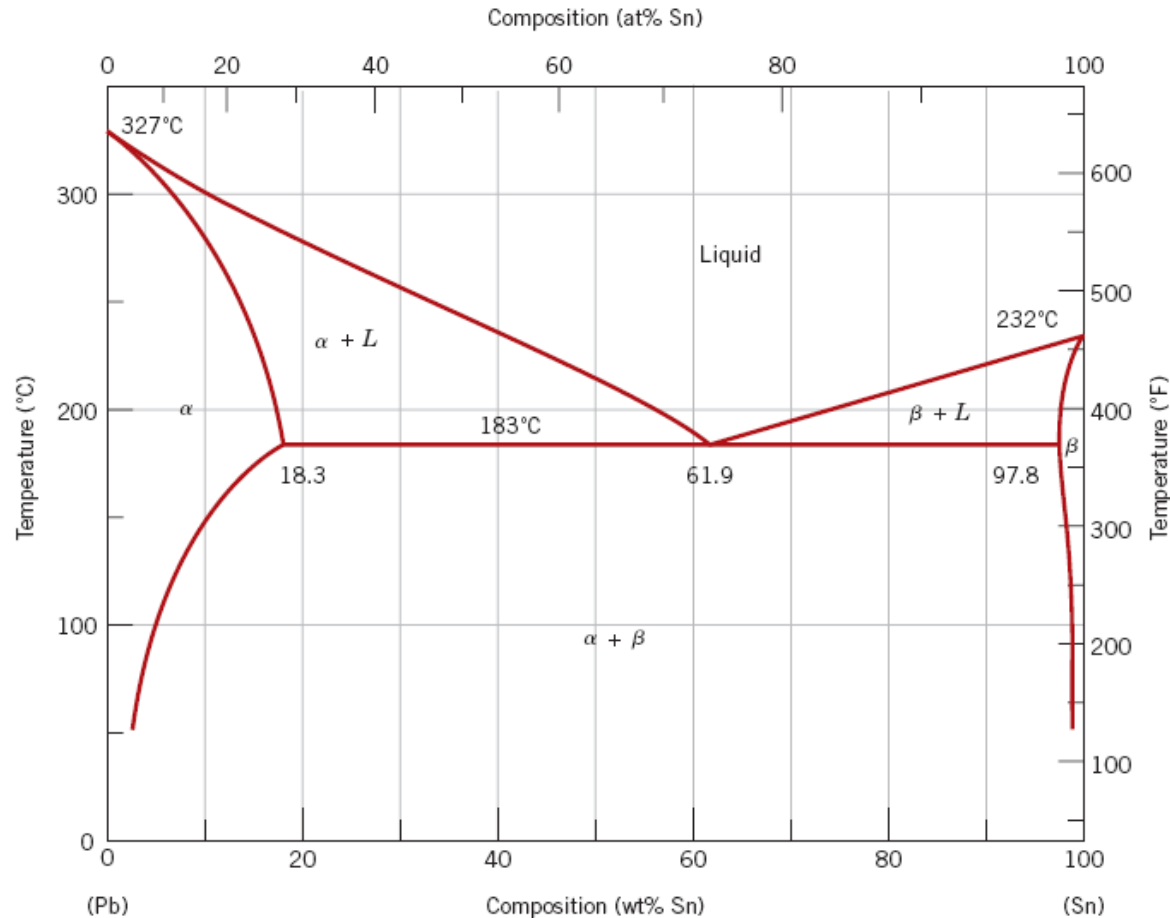


Resfriamento Fora do Equilíbrio



- Desenvolvimento da microestrutura em ligas isomorfas com **resfriamento fora das condições de equilíbrio**.
- Depende da difusão no estado sólido
 - Elementos substitucionais – lenta, não há tempo para homogeneizar a composição
 - Intersticiais – na maioria dos casos isso não ocorre

Sistemas eutéticos binários



Reação eutética:



• Exemplo: Sistema Cu-Ag.

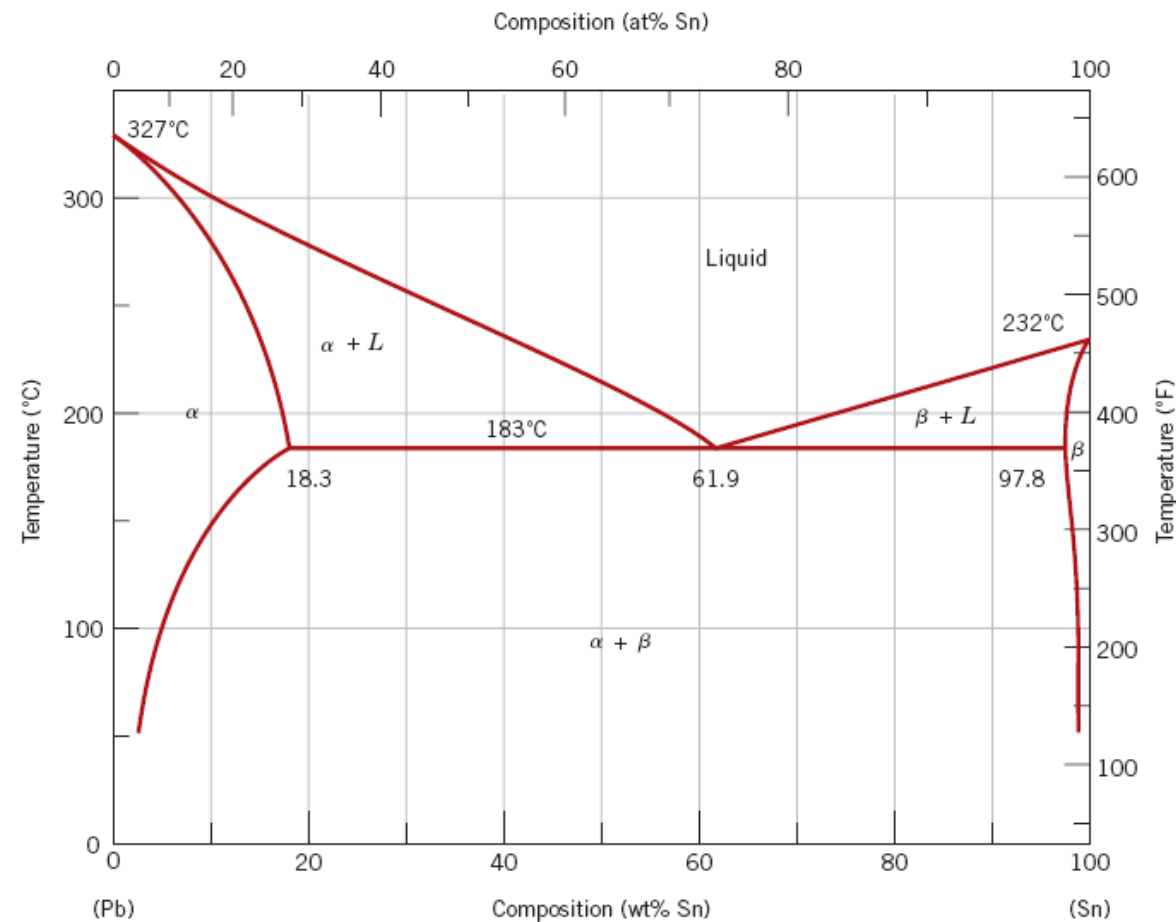
- **Componentes:** Cu e Ag.
- **Fases:** Líquido e α (solução sólida substitucional rica em Cu com estrutura cristalina CFC) e β (solução sólida substitucional rica em Ag com estrutura cristalina CFC).

• Definições:

- Linha ***solvus***.
- **Ponto invariante** designado pela temperatura T_E e C_E

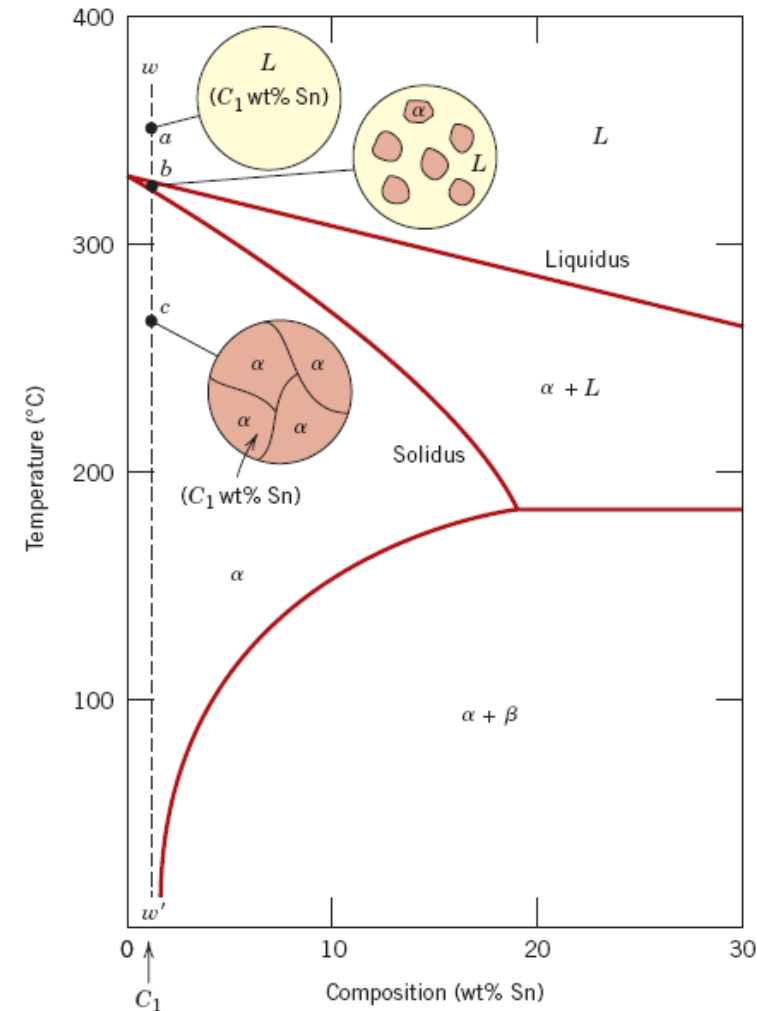
Sistemas eutéticos binários

Muito comum! Presente em vários sistemas metálicos e cerâmicos



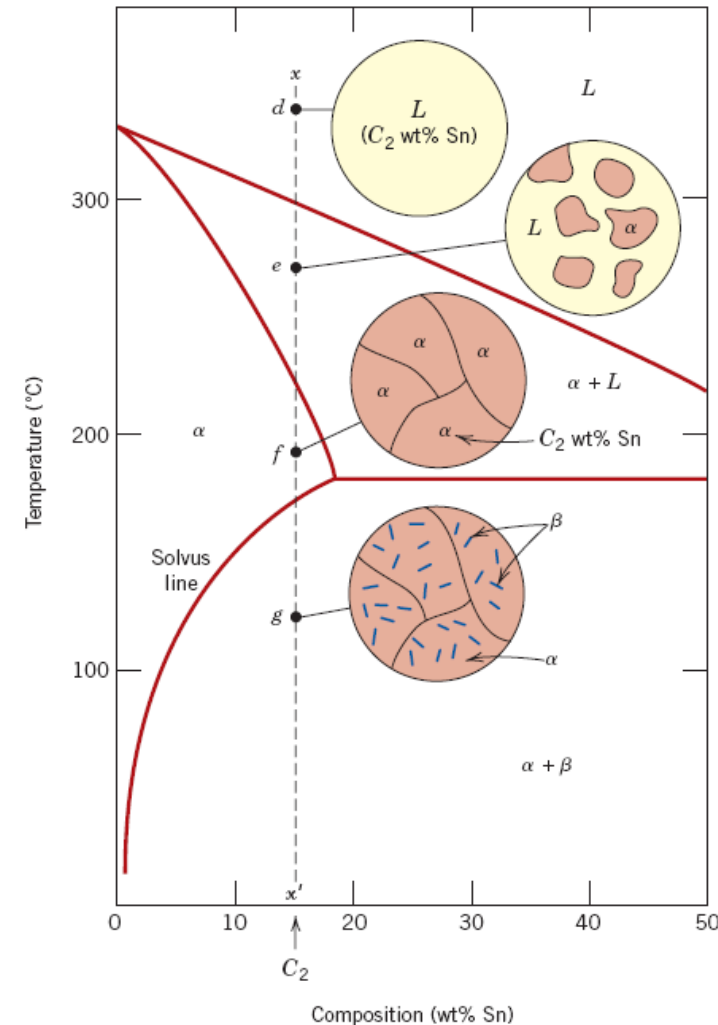
Formação de Morfologia em Sistemas Eutéticos

Morfologia: Uma fase, vários grãos



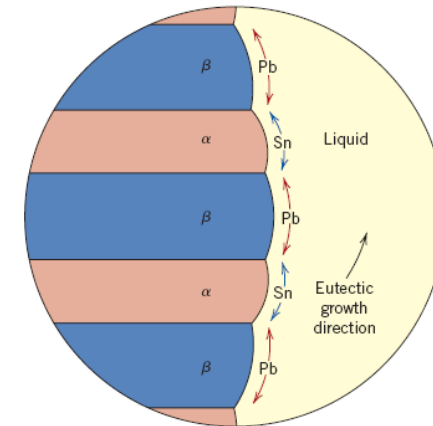
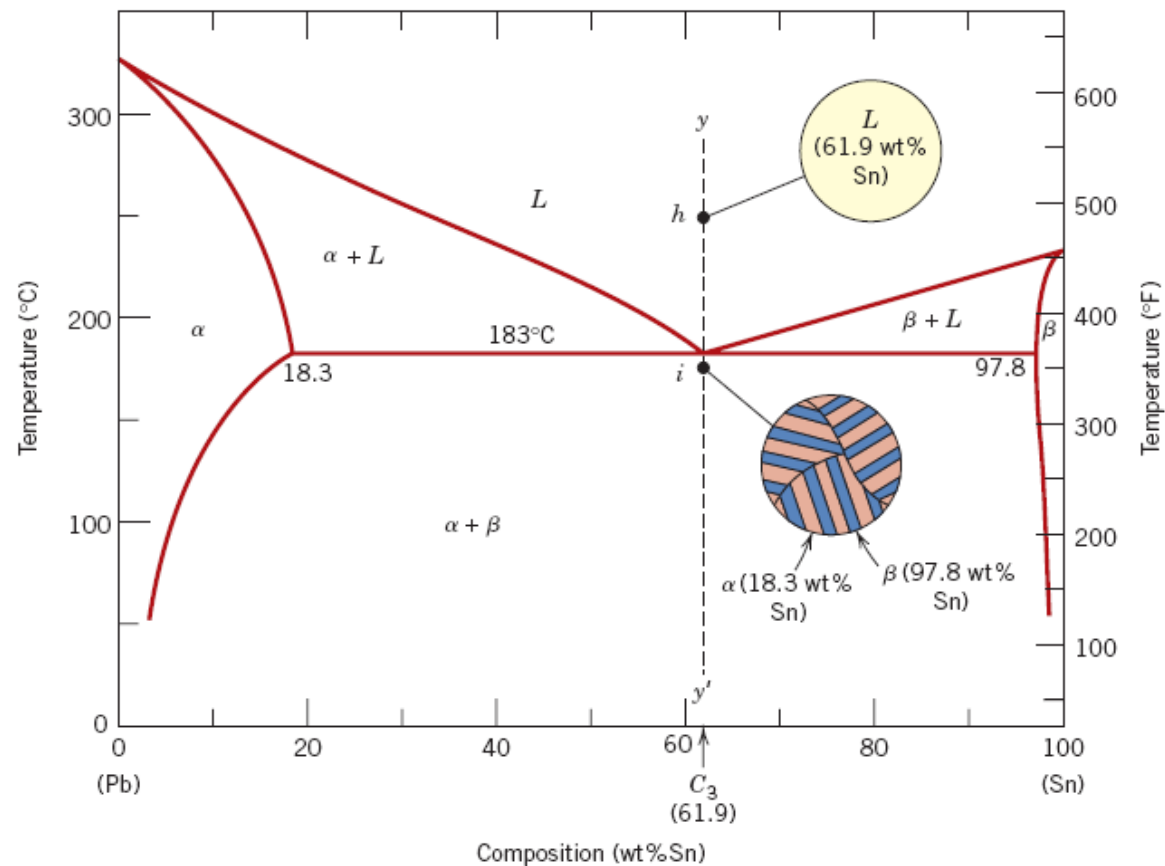
Formação de Morfologia em Sistemas Eutéticos

Morfologia: duas fases, grãos da fase α contendo **precipitados** de β

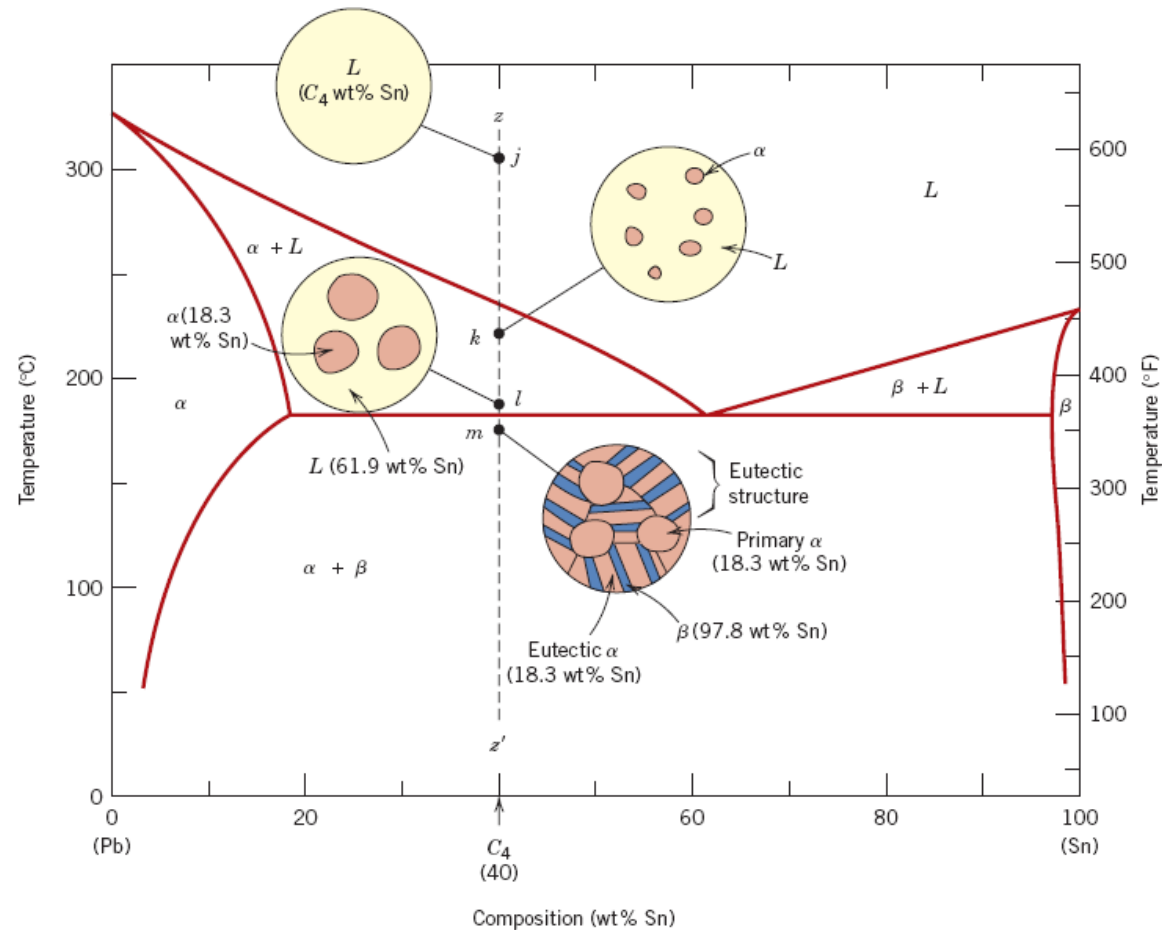


Formação de Morfologia em Sistemas Eutéticos

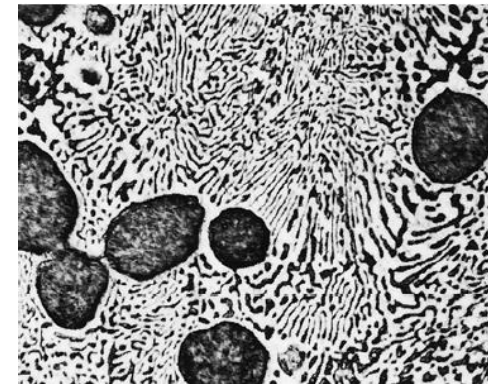
Fenômeno chamado **crescimento acoplado**
Crescimento conjunto de ambas fases



Morfologia Hipoeutética

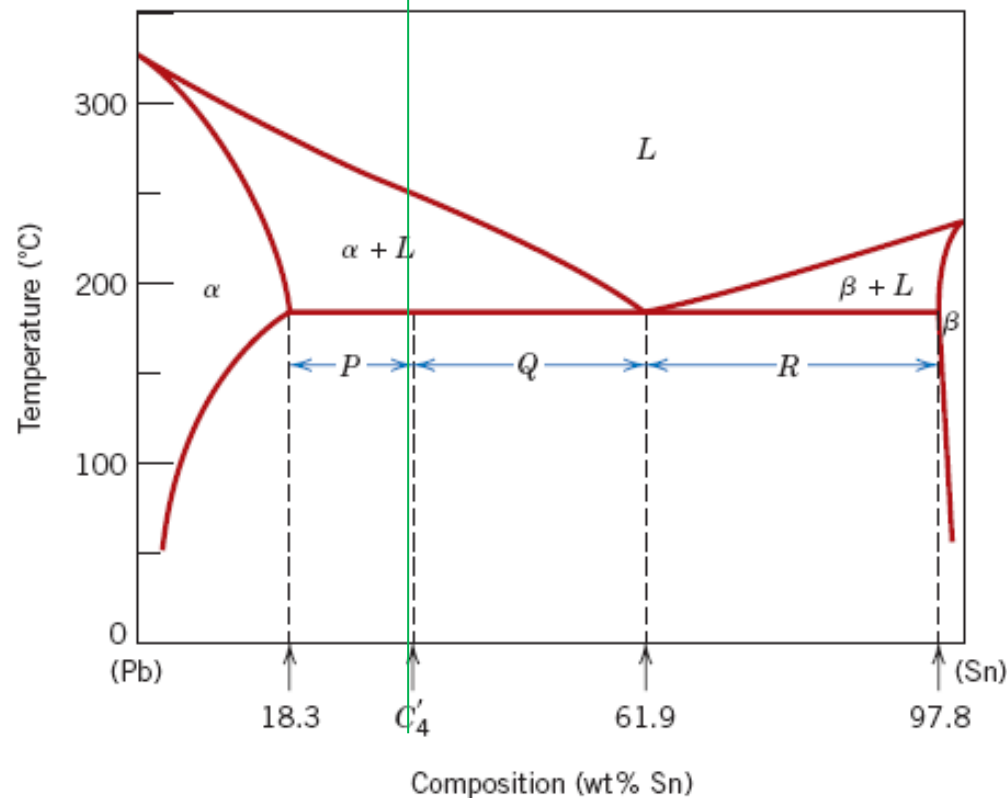


Morfologia: Ilhas da fase α com matriz eutética



Regra da Alavanca com Eutético

Liga com composição C4:



Fração de fase α, logo abaixo da T eutética:

$$W_{\alpha} = \frac{Q + R}{P + Q + R}$$

$$= \frac{97.8 - C'_4}{97.8 - 18.3} = \frac{97.8 - C'_4}{79.5}$$

Fração de fase β, logo abaixo da T eutética :

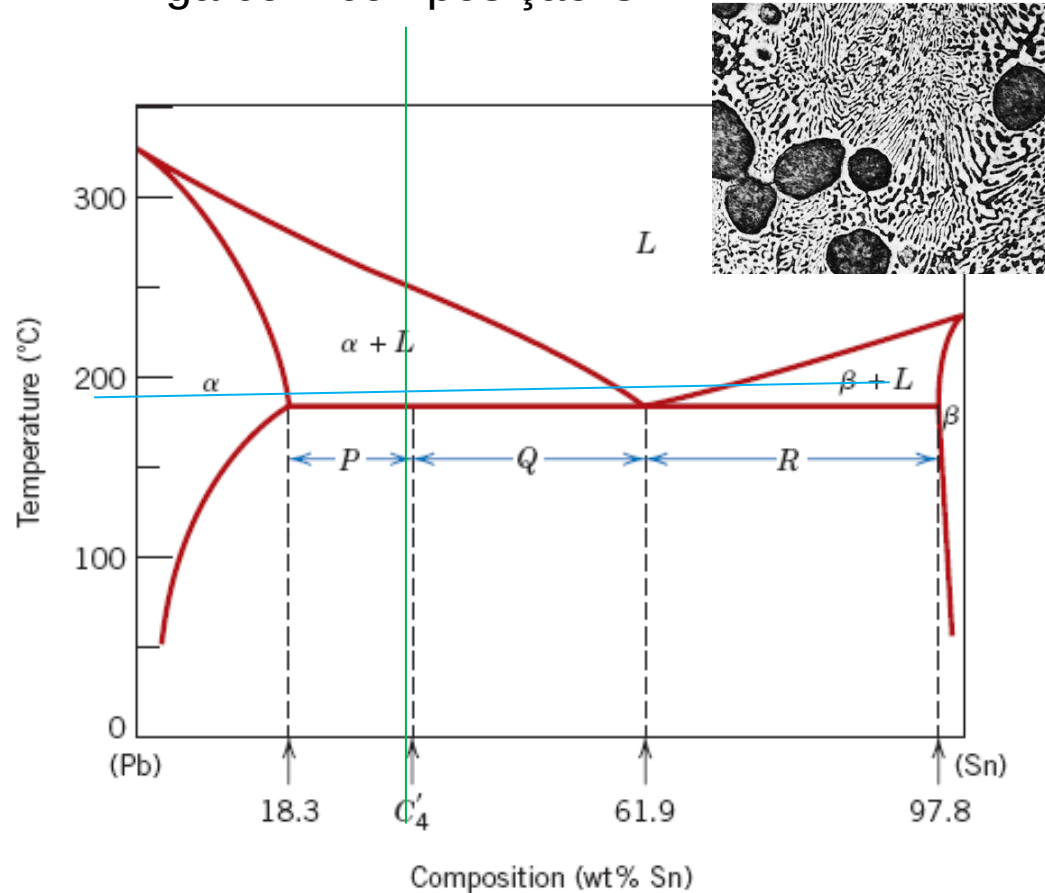
$$W_{\beta} = \frac{P}{P + Q + R}$$

$$= \frac{C'_4 - 18.3}{97.8 - 18.3} = \frac{C'_4 - 18.3}{79.5}$$

E como seria a expressão para calcular a fração do microconstituente eutético?

Regra da Alavanca com Eutético

Liga com composição C4:



Fração de fase α primária, logo acima da T eutética :

$$W_{\alpha'} = \frac{Q}{P + Q}$$

$$= \frac{61.9 - C'_4}{61.9 - 18.3} = \frac{61.9 - C'_4}{43.6}$$

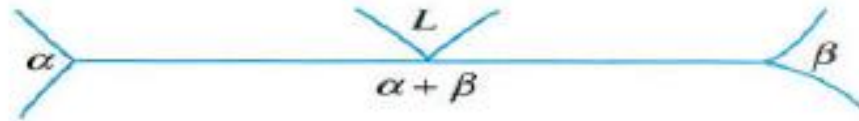
Fração da estrutura eutética (ou microconstituente eutético):

$$W_e = W_L = \frac{P}{P + Q}$$

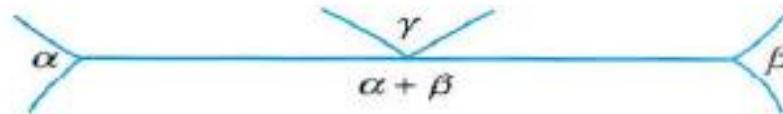
$$= \frac{C'_4 - 18.3}{61.9 - 18.3} = \frac{C'_4 - 18.3}{43.6}$$

Reações Invariantes: Eutetóides, peritéticas e peritedóides

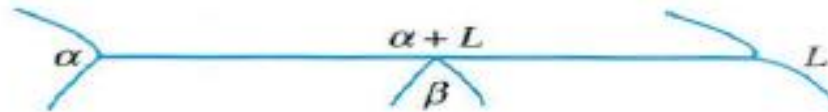
Eutética: $L \rightarrow \alpha + \beta$



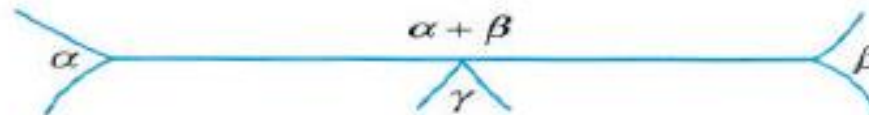
Eutetóide: $\gamma \rightarrow \alpha + \beta$



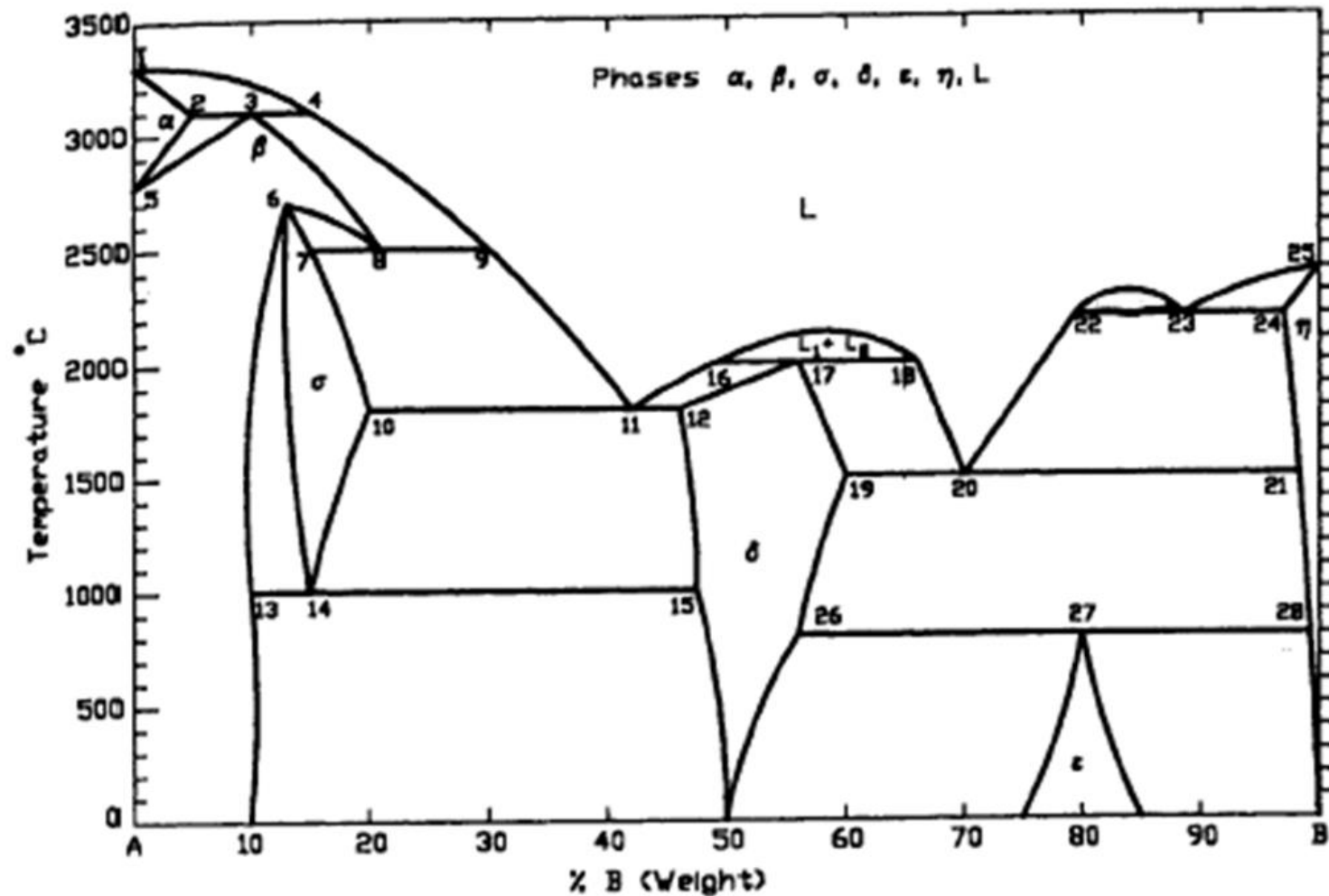
Peritética: $L + \alpha \rightarrow \beta$



Peritetóide: $\alpha + \beta \rightarrow \gamma$

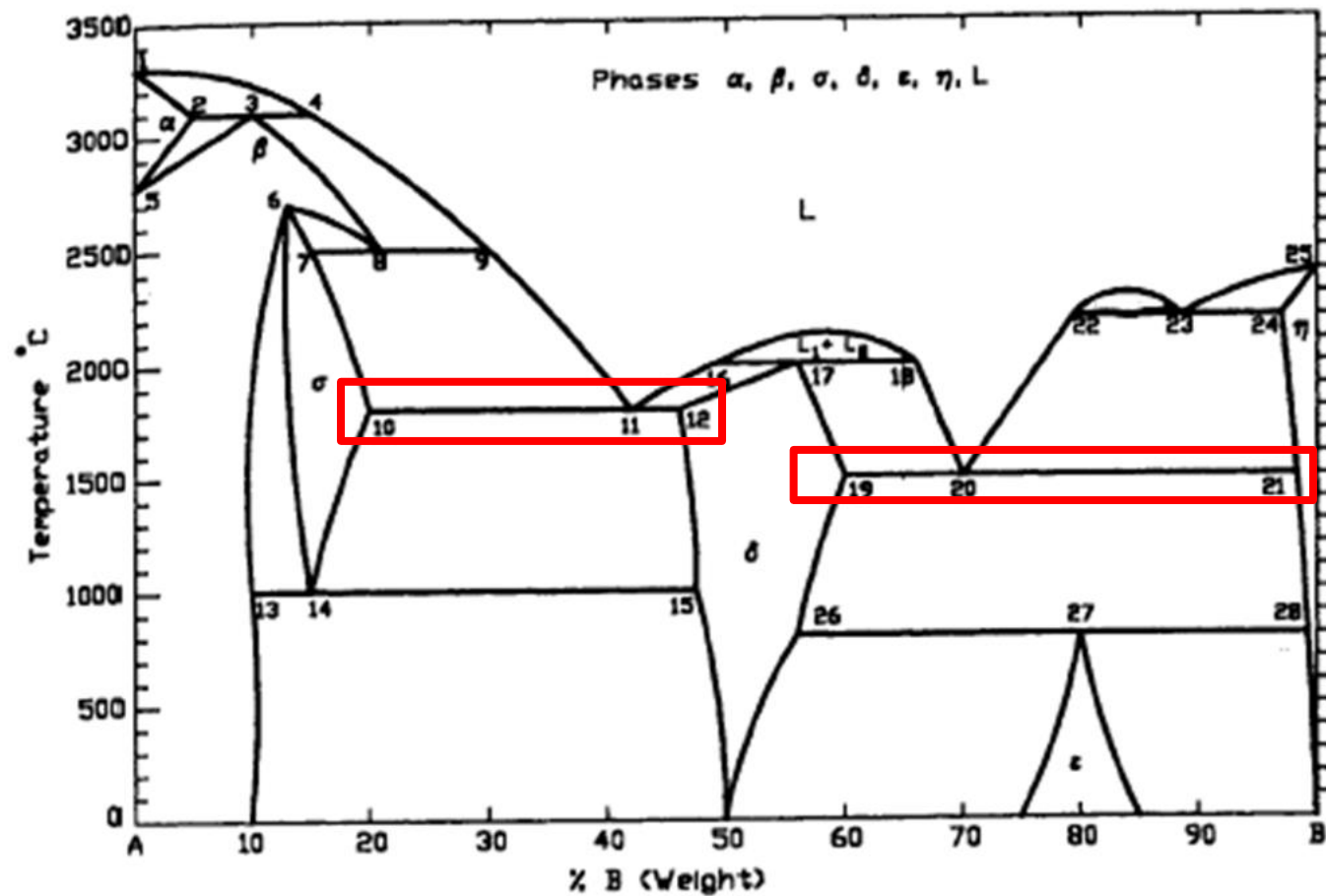


Tipos de Reação Invariante



L – Fase Líquida
S – Fase Sólida

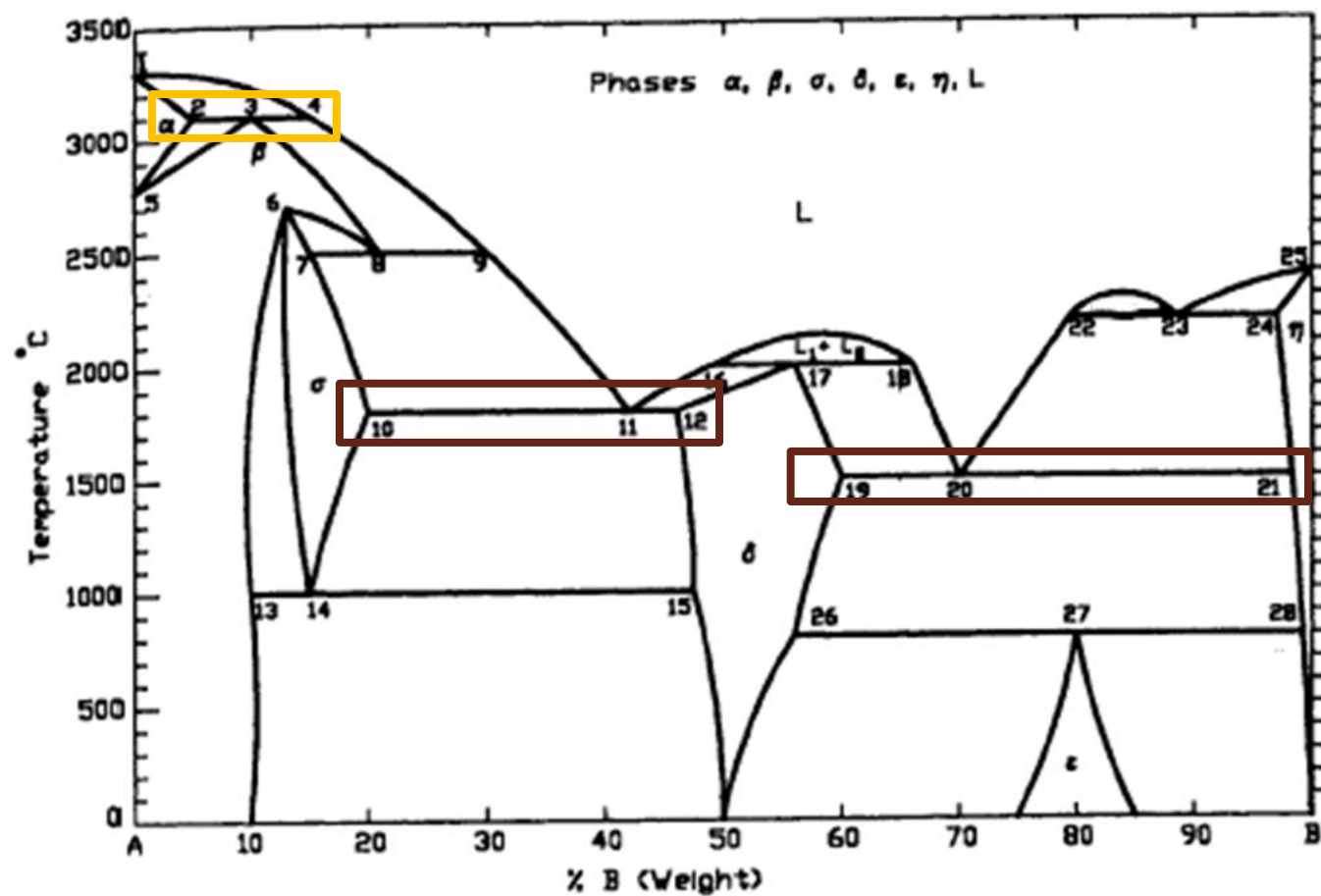
Tipos de Reação Invariante



Reação eutética
 $L \rightarrow S_1 + S_2$

L – Fase Líquida
S – Fase Sólida

Tipos de Reação Invariante



Reação eutética



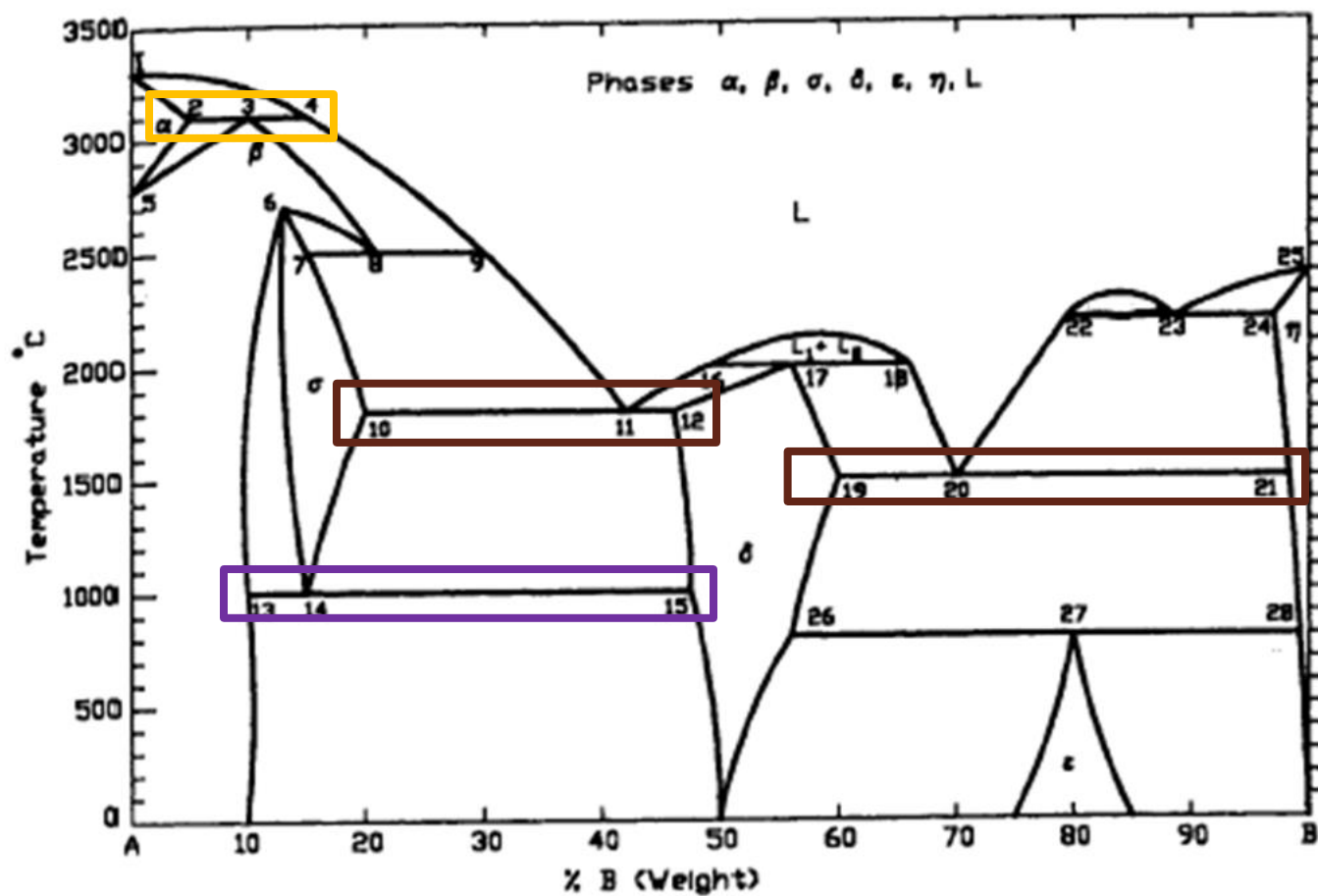
Reação peritética



L – Fase Líquida

S – Fase Sólida

Tipos de Reação Invariante



Reação eutética



Reação peritética



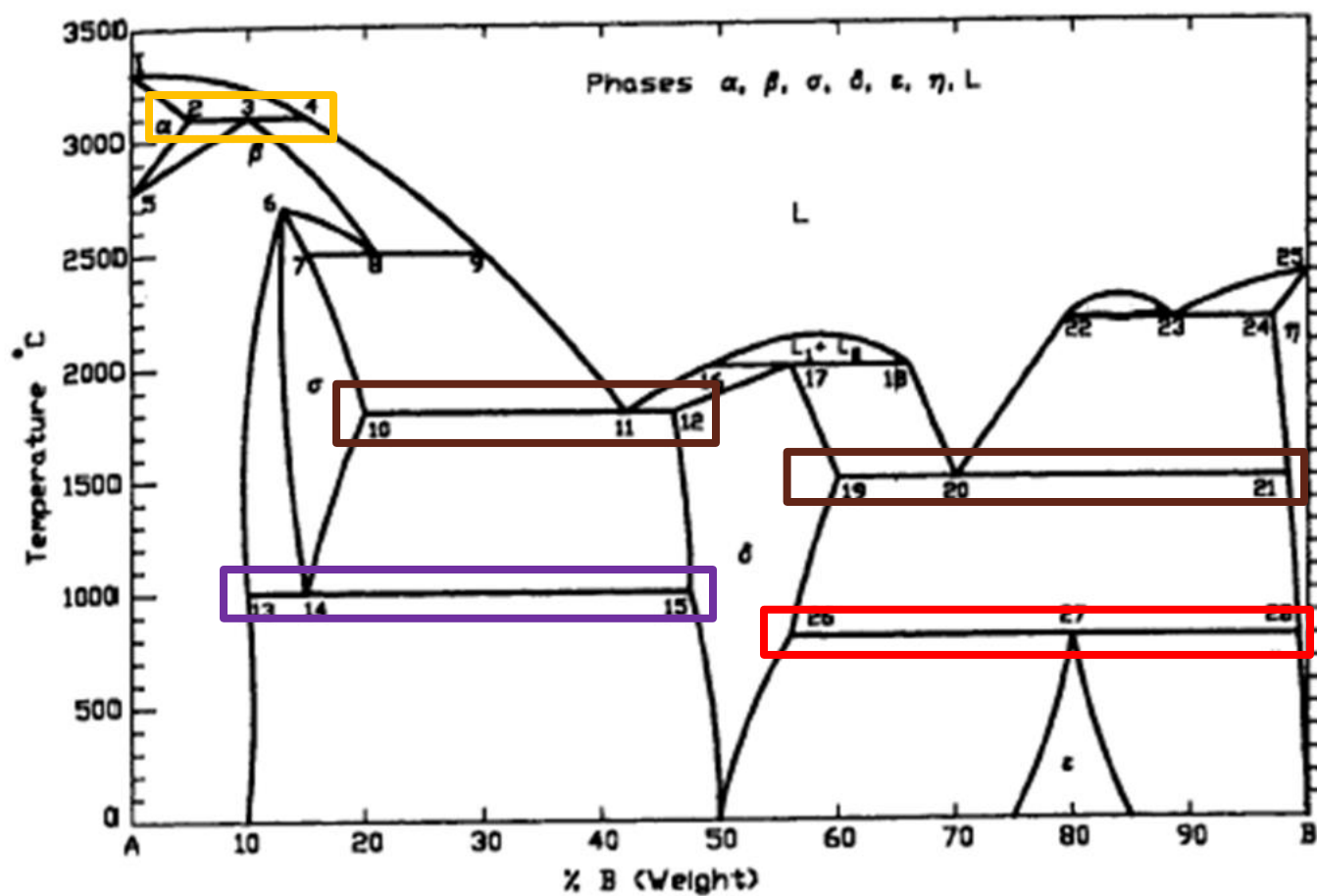
Reação eutetóide



L – Fase líquida

S – Fase Sólida

Tipos de Reação Invariante



Reação eutética



Reação peritética



Reação eutetóide



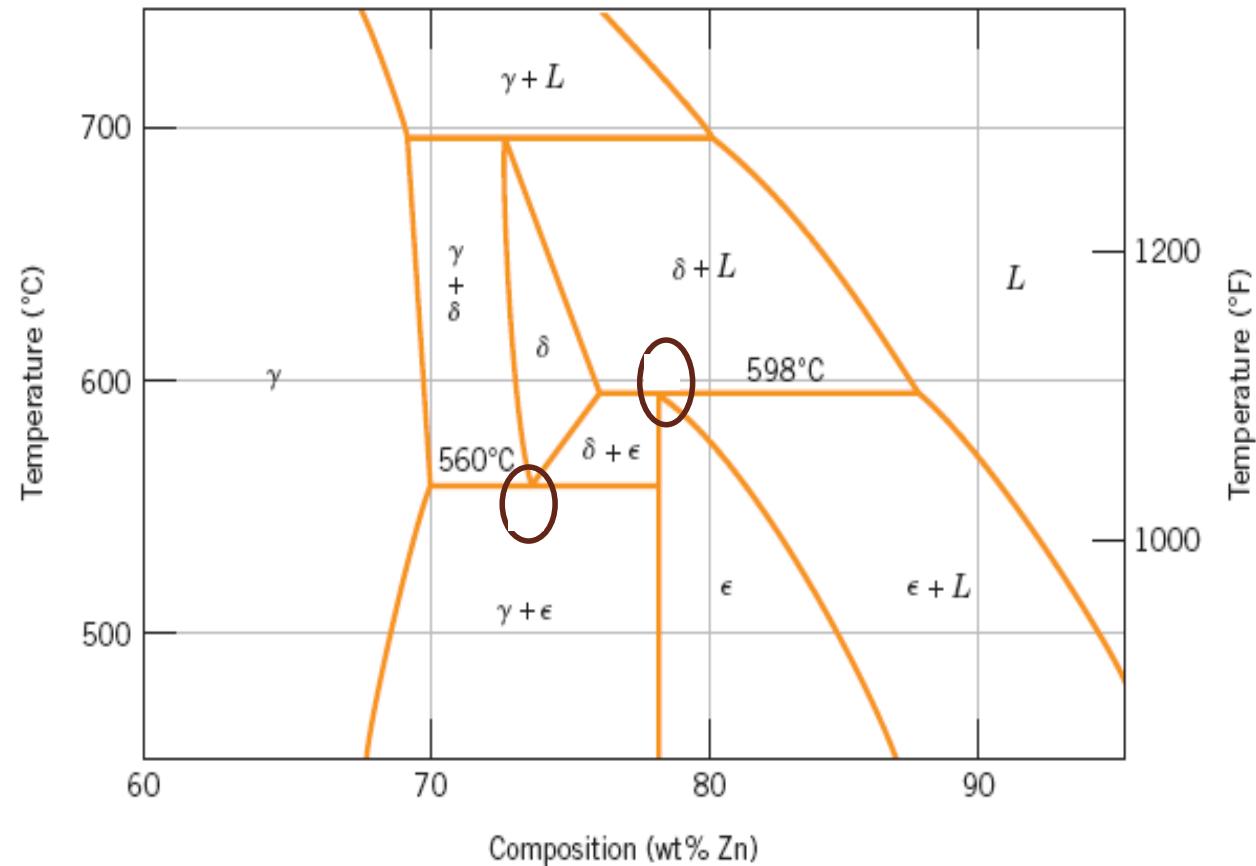
Reação peritetóide



L – Fase líquida

S – Fase Sólida

Exemplo 2 – Identificar as Reações Abaixo



Exemplo 2 – Identificar as Reações Abaixo

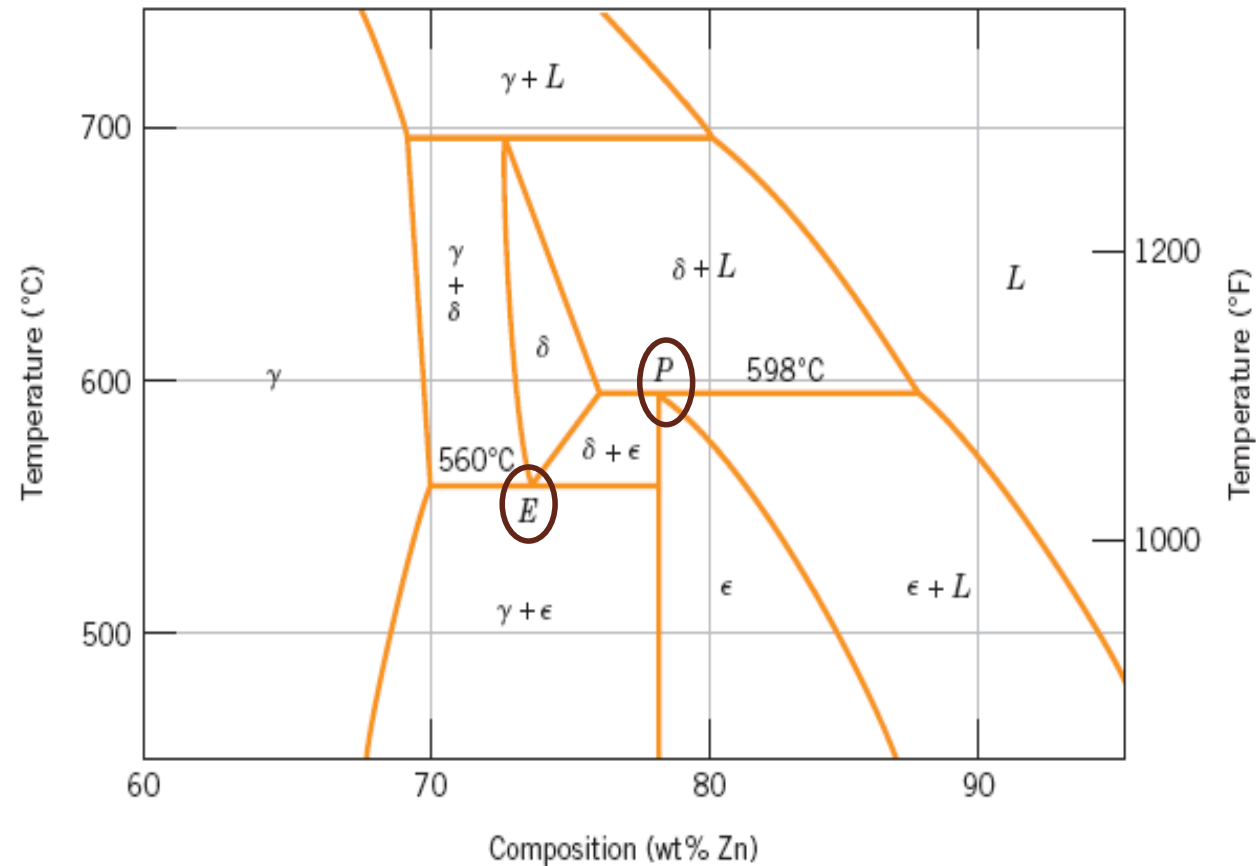


Diagrama do sistema Fe-Fe₃C

- Diagrama **fundamental** para Aços (liga metálica mais usada)

