



# ***DIAGRAMAS DE FASES***

CAPÍTULO 9  
CALLISTER

***Profa.Dra. Lauralice Canale***

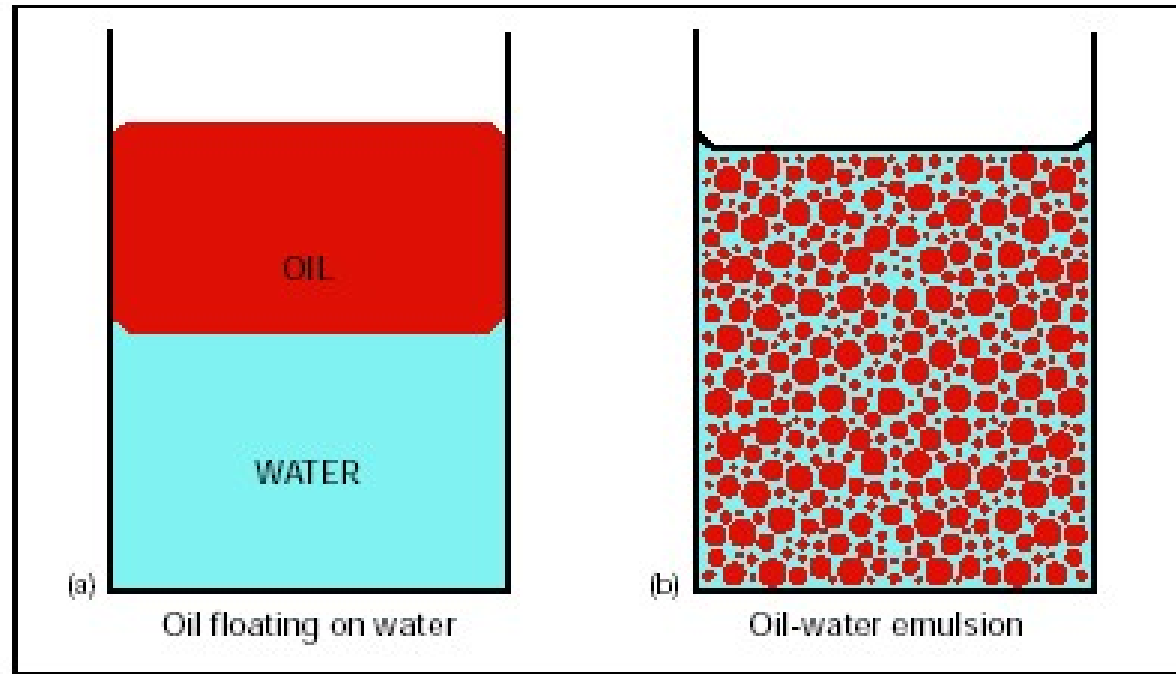


## FASE

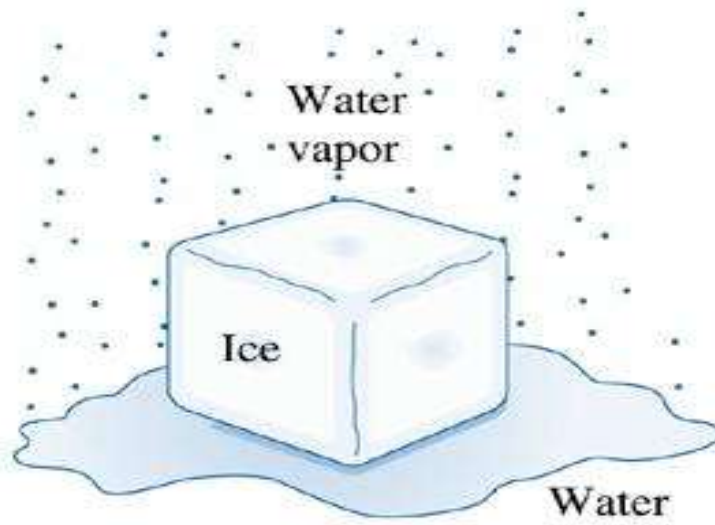
Uma fase pode ser definida como uma porção homogênea de um sistema que possui características físicas e químicas uniformes.

Se mais de uma fase estiver presente em um sistema, cada fase terá suas próprias propriedades individuais e existirá uma fronteira separando as fases, da qual haverá uma mudança descontínua e abrupta nas características físicas e / ou químicas.

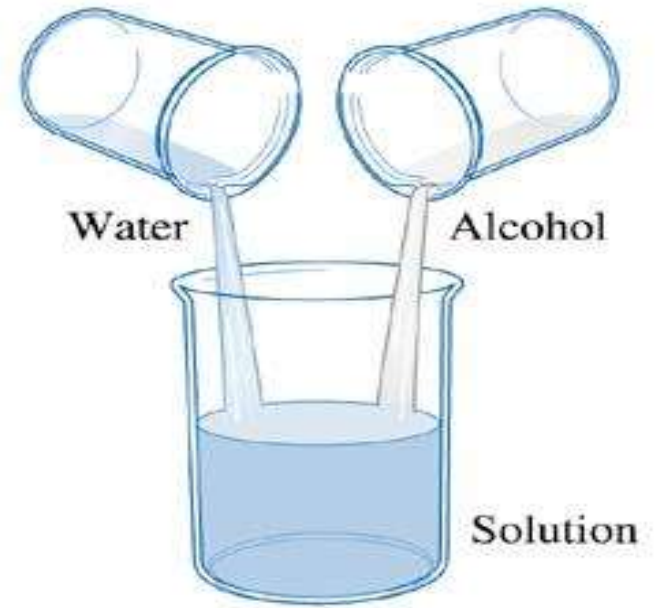
# FASE



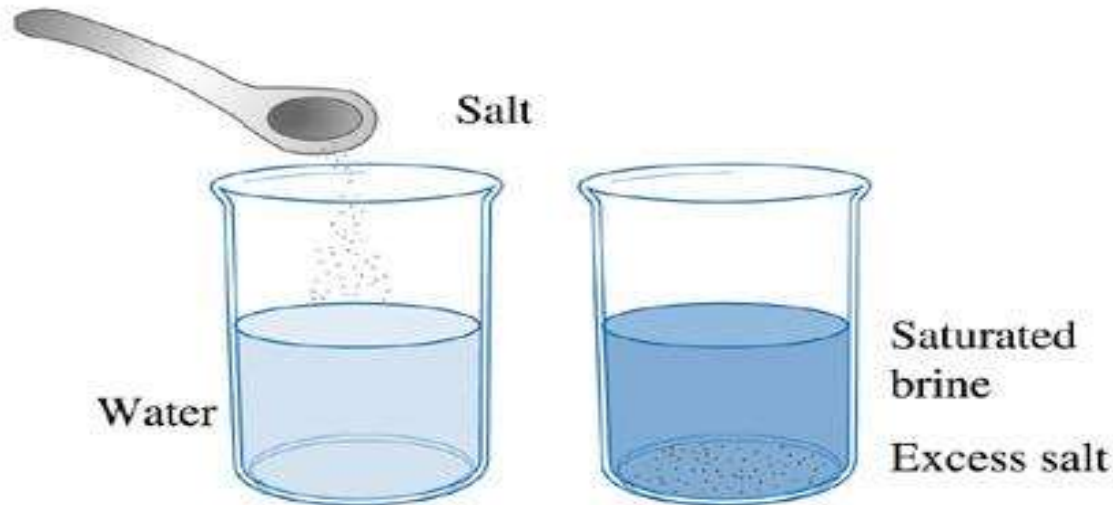
**Duas fases em equilíbrio (a) óleo flutuando em água (b) emulsão de água-óleo. Ambos possuem as mesmas fases mas (a) possui uma microestrutura diferente de (b)**



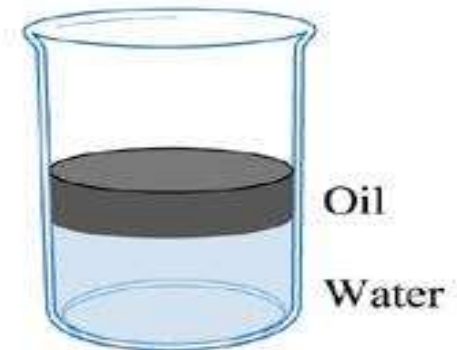
(a)




(b)

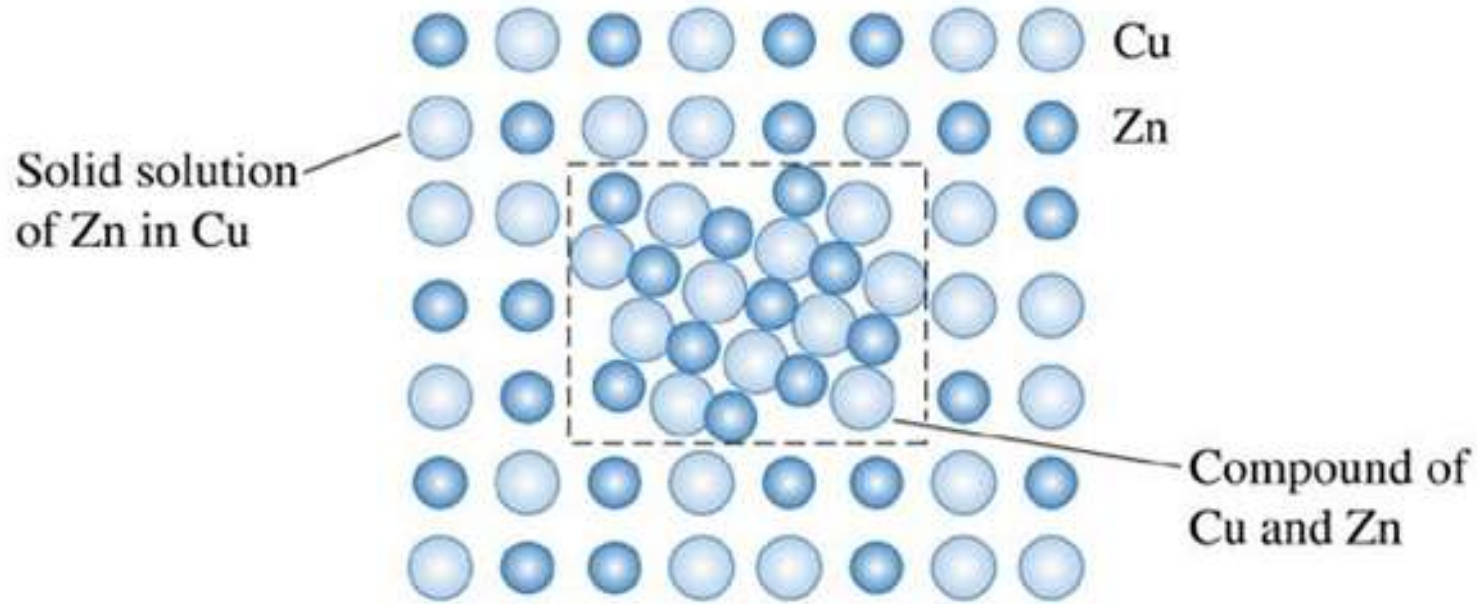


(c)



(d)

- 
- **Solubilidade** – A quantidade de um material que se dissolverá completamente num segundo material sem criar uma segunda fase.
  - **Solubilidade ilimitada** – Quando a quantidade de um material, que se dissolverá no outro sem criar uma nova fase, é ilimitada.
  - **Solubilidade limitada**- Quando existe uma quantidade máxima de um material (soluto), que poderá ser dissolvido em outro material (solvente).



(c)

©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning... is a trademark used herein under license.

(a)

Liga Cu-Zn Átomos de Ni são  $\beta$  e  $\delta$  Zn,  
formações da nova fase, plástica de  
solubilidade limitada



❖ Uma fase é identificada pela composição química e microestrutura

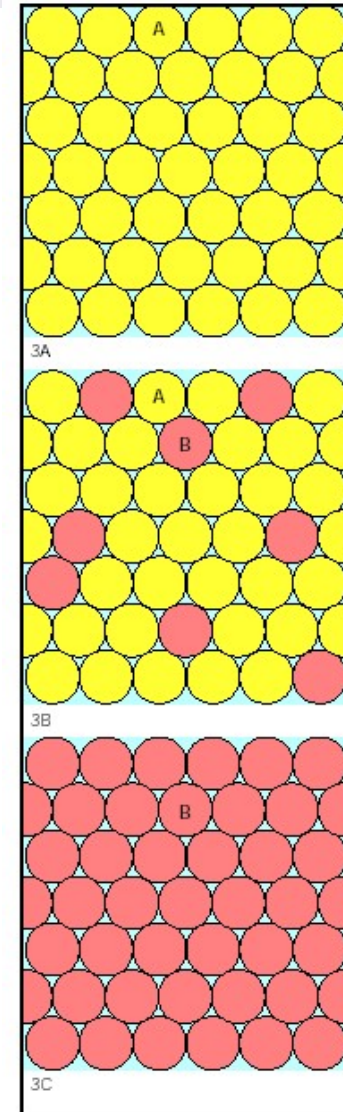
❖ A interação de 2 ou mais fases em um material permite a obtenção de propriedades diferentes

❖ É possível alterar as propriedades do material alterando a morfologia e

distribuição das fases

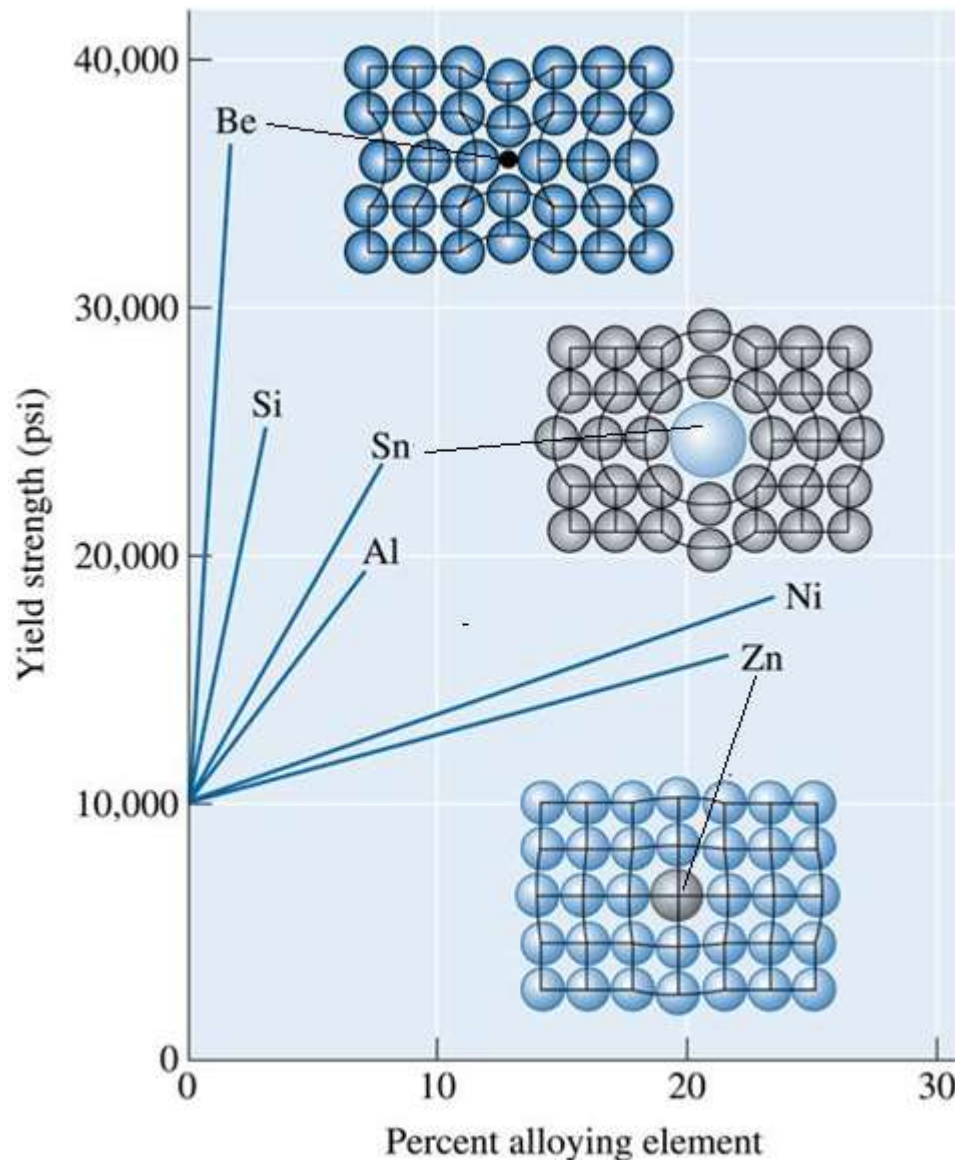
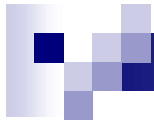
# SOLUÇÕES

As soluções sólidas são formadas quando dois metais se dissolvem uma no outro, formando uma única fase sólida. Este processo é chamado de **solubilidade intersticial**. A adição de soluto além desse limite resulta na formação de uma outra solução sólida ou de outro composto que possui composição diferente.



Formação de solução sólida entre dois metais : ouro e prata





Efeitos do tamanho  
**Aumentando** a solução  
sólida tendo Cu como  
**ambos a** solvente  
**diferença em**  
**tamanho atômico**  
**e a quantidade do**  
**elemento de liga**  
**(soluto), aumenta-**  
**se a resistência**  
**da solução sólida.**

# DIAGRAMAS DE FASES

- Muitas das informações sobre o controle da microestrutura ou da estrutura de fases de um sistema de ligas são mostrados no chamado diagrama de fases
- Diagramas de fases são úteis para prever as transformações de fases e as microestruturas resultantes
- Representam as relações entre a temperatura e as composições, e as quantidades de cada fase em condições de equilíbrio.



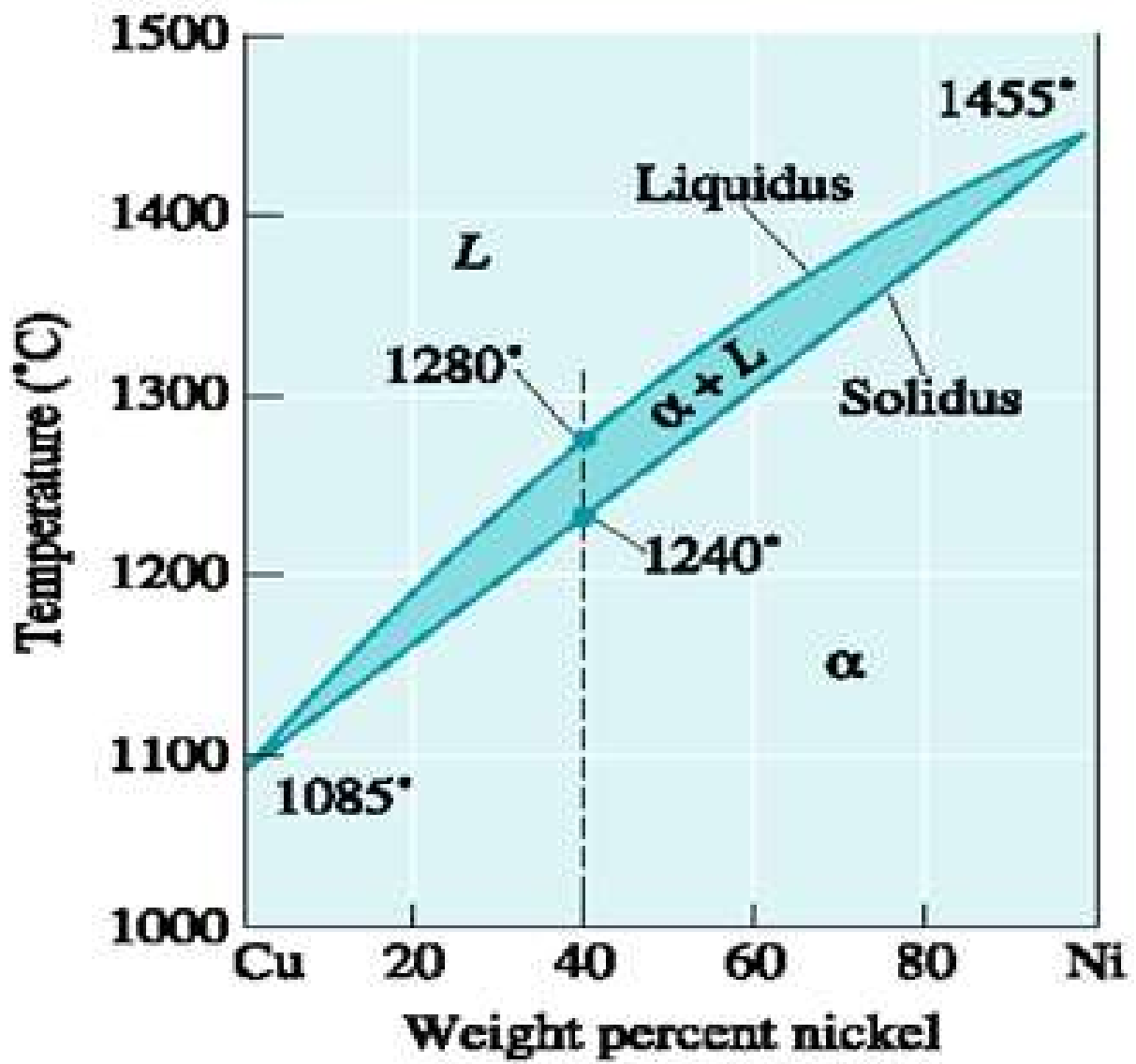
- Diagrama de fase binário –

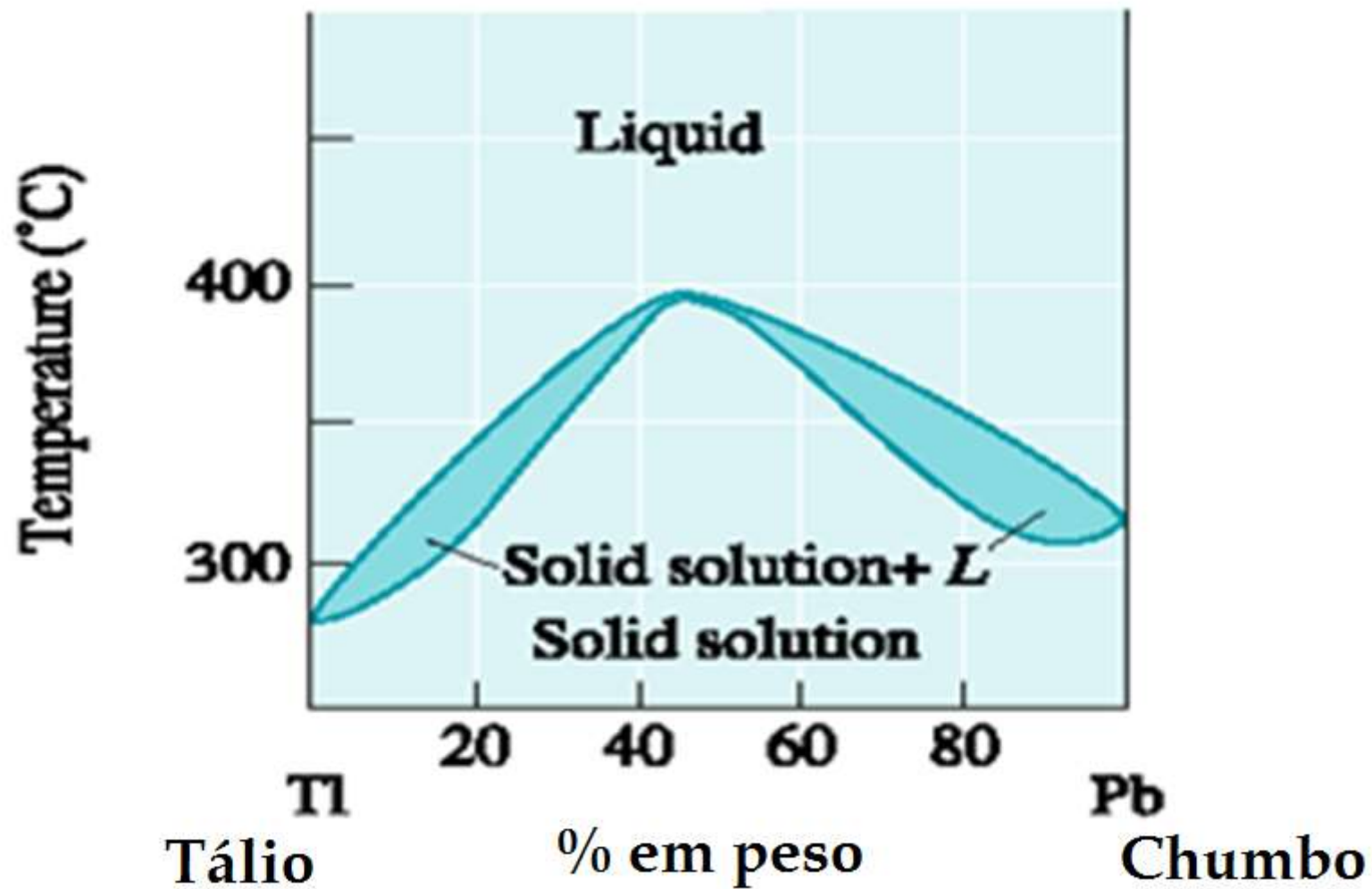
- Diagrama de fase ternário-

- Diagrama Isomorfo- diagrama de fases com solubilidade sólida ilimitada

- **Temperatura liquidus**- A temperatura em que o primeiro sólido se forma durante a solidificação

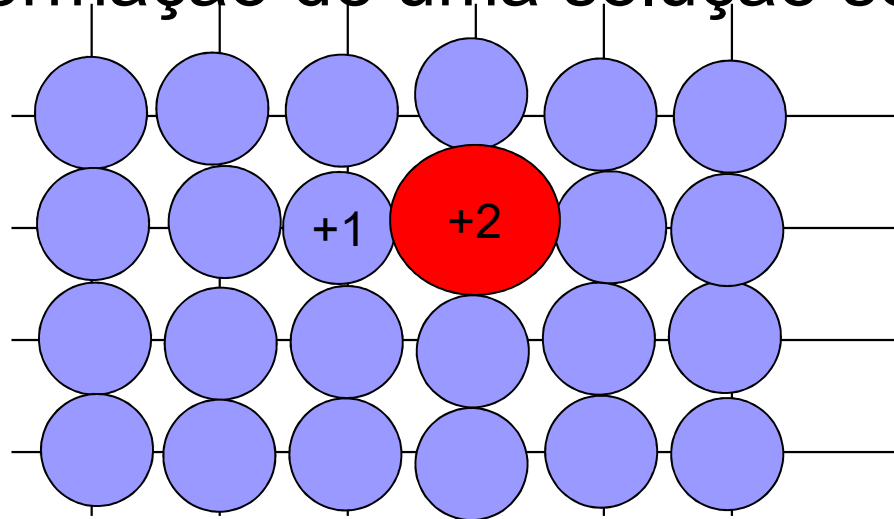
- **Temperatura solidus**- Temperatura abaixo da qual todo o líquido está completamente solidificado.





## Regra de Hume-Rothery Rules para ligas (átomos misturados em uma rede)

Misturando 2 ou mais diferentes tipos de átomos  
haverá a formação de uma solução sólida única?



Observações empíricas têm identificado 4  
características: tamanho do átomo, estrutura do  
cristal, eletronegatividade e valência.



# Regra de Hume-Rothery

**Regras empíricas para soluções sólidas substitucionais mostram que:**

## **1) Tamanho do átomo** **Regra de 15%**

Se a diferença em tamanho entre os átomos de soluto e solvente for maior do que  $\pm 15\%$ , as distorções da rede serão tão grandes que a solução sólida não será favorecida.



# Regra de Hume-Rothery

**Regras empíricas para soluções sólidas substitucionais mostram que:**

**1) Tamanho do átomo**

**2) Estrutura do cristal**

**Para uma boa solubilidade, as estruturas dos cristais dos metais devem ser as mesmas.**





# Regra de Hume-Rothery

**Regras empíricas para soluções sólidas substitucionais mostram que:**

1) Tamanho do átomo

2) Estrutura do cristal

3) Eletronegatividade

**$\Delta E \sim 0$  favorece a solução sólida.**



# Regra de Hume-Rothery

**Regras empíricas para soluções sólidas substitucionais mostram que:**

- 1) Tamanho do átomo
- 2) Estrutura do cristal
- 3) Eletronegatividade



# Regra de Hume-Rothery

Regras empíricas para soluções sólidas substitucionais mostram que:

1) Tamanho do átomo

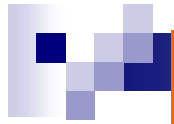
2) Estrutura do cristal

3) Eletronegatividade

*Tendência que cada um tem de atrair os elétrons em uma ligação química. Corresponde à capacidade que o núcleo de um átomo tem de atrair os elétrons envolvidos em uma ligação química.*

4) Valências

*Número que indica a capacidade que um átomo de um elemento tem de se combinar com outros átomos, capacidade essa que é medida pelo número de elétrons que um átomo pode dar, receber, ou compartilhar de forma a constituir uma ligação química.*



## Regras de Hume-Rothery em ação

- Liga Cu-Ni


**Regra 1** :  $r_{\text{Cu}} = 0.128 \text{ nm}$  and  $r_{\text{Ni}} = 0.125 \text{ nm}$ .

$$\Delta R\% = \frac{r_{\text{solute}} - r_{\text{solvent}}}{r_{\text{solvent}}} \times 100\% = 2,3\%$$

**favoravel** ✓

**Regra 2:** Ni and Cu tem estrutura CFC

**favoravel** ✓

- 
- **Regra 3:**  $E_{\text{Cu}} = 1.90$  and  $E_{\text{Ni}} = 1.80$ . Thus,  $\Delta E\% = -5.2\%$

**favoravel** ✓

- **Regra 4:** Valência do Ni e Cu são ambas iguais a +2.

**favoravel** ✓



Favorável?

- Ligas Cu-Ag

Regra 1:  $r_{\text{Cu}} = 0.128 \text{ nm}$  and  $r_{\text{Ag}} = 0.144 \text{ nm}$ .

$$\Delta R\% = \frac{r_{\text{solute}} - r_{\text{solvent}}}{r_{\text{solvent}}} \times 100\% = 9.4\%$$

**favorável** ✓

Regra 2: Ag e Cu tem estrutura CFC.

**favorável** ✓

- 
- Regra 3:  $E_{\text{Cu}} = 1.90$  and  $E_{\text{Ni}} = 1.80$ . Assim,  
 $\Delta E\% = -5.2\%$

**favorável** ✓

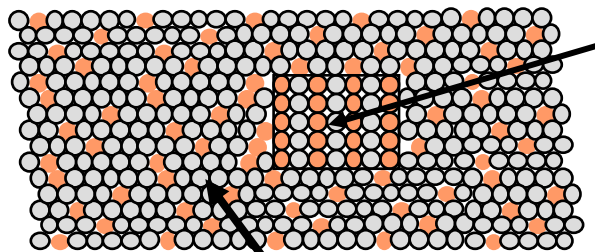
- Regra 4: Valência do Cu é +2 e Ag is +1.  
**Nãofavorável**

**Ag e Cu tem limite de solubilidade.**

**Realmente, o diagrama de fases Cu-Ag mostra que a solubilidade é de somente 18%**

## Partículas de uma nova fase em ligas

- Solução sólida de **B** em A mais partículas de uma nova fase  
(usualmente para maiores quantidades de B)



Partículas de segunda fase  
--diferente **composição**  
--frequentemente diferente estrutura.

Solução Sólida átomos de B em A





## Regra de fases de Gibbs

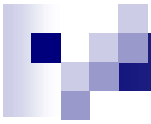
- $F = C - P + 1$  para pressão constante

Freedom

Components

Phase

Graus de liberdade: número de variáveis (temperatura e composição) que podem variar independentemente sem alterar o número de fases em equilíbrio.



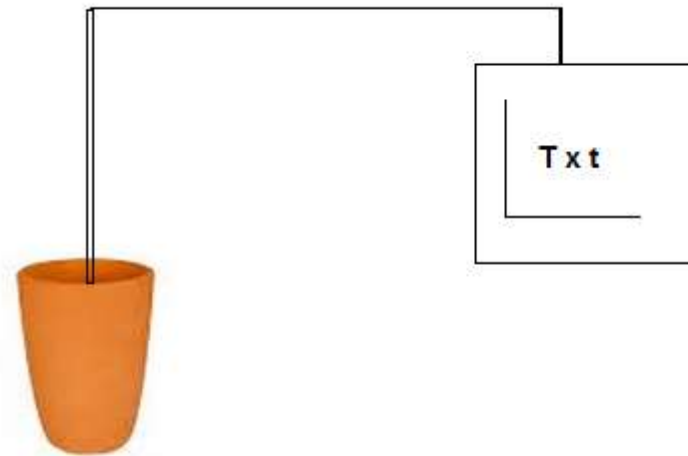
Exposed

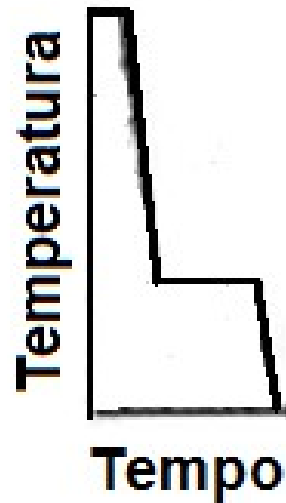


Ungrounded

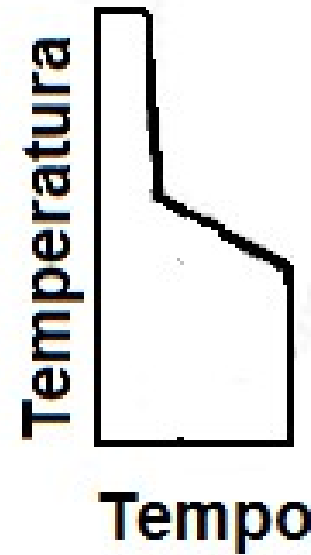


Grounded

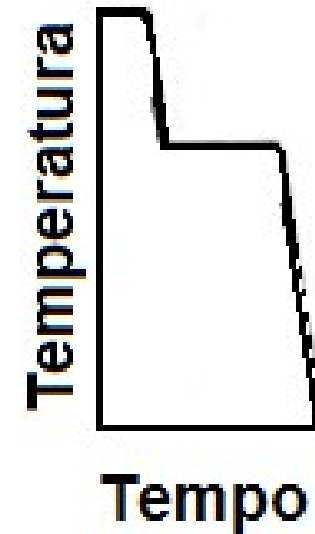




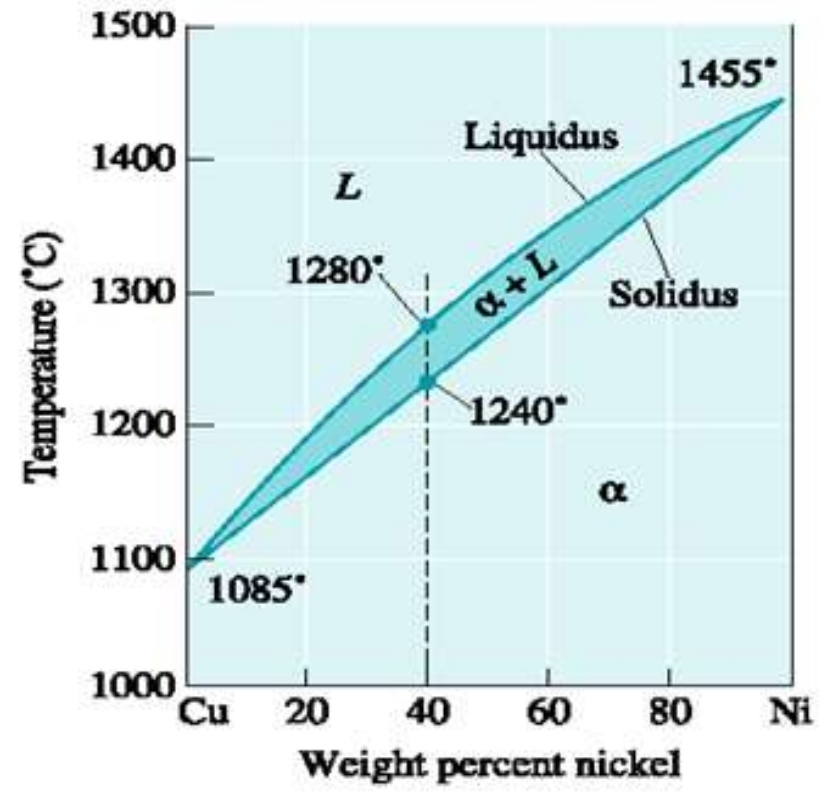
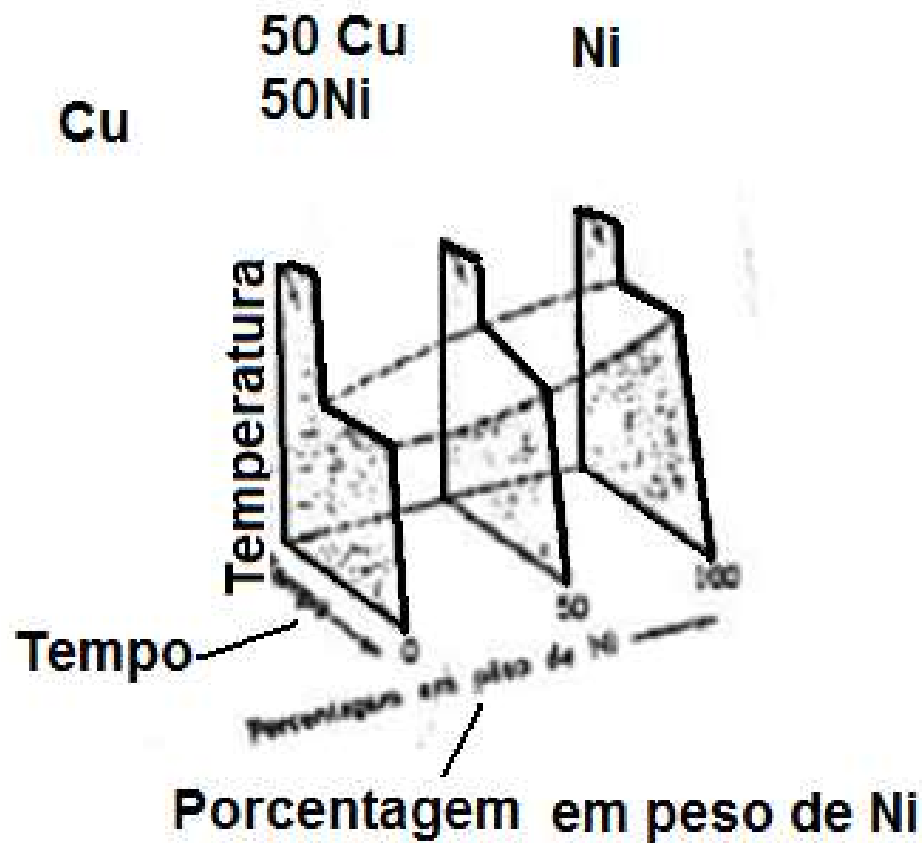
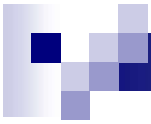
Ni puro



50% Ni  
50% Cu



Cu puro

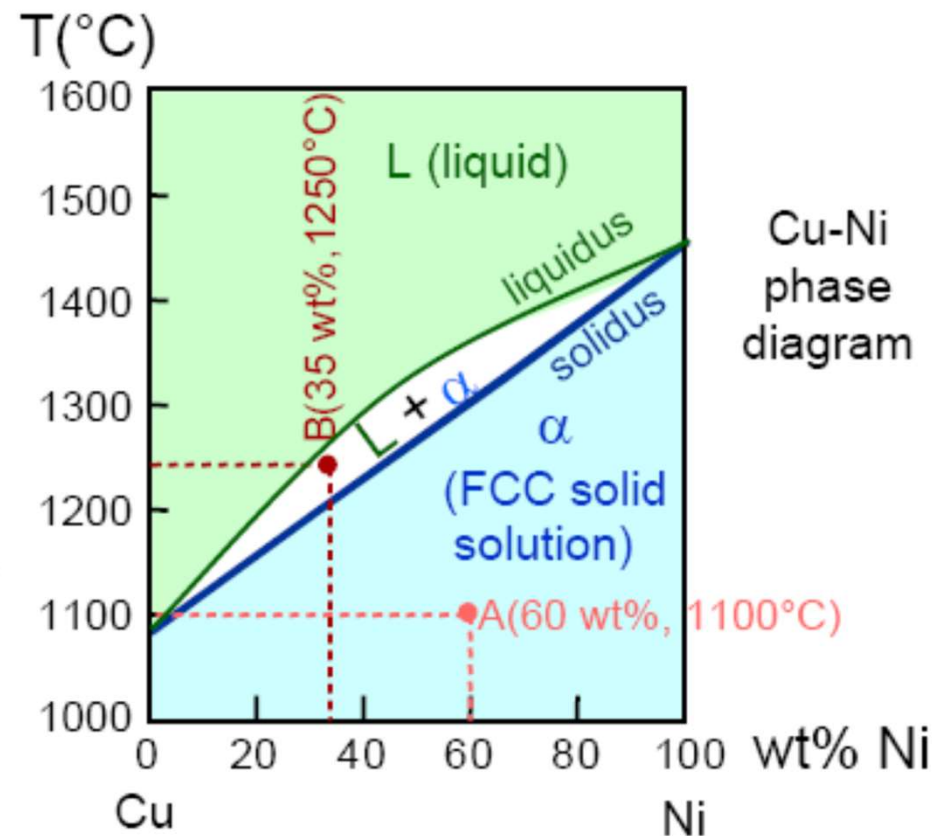


## FASES PRESENTES

Para o estabelecimento de quais fases estão presentes precisa-se apenas localizar o ponto temperatura-composição no diagrama de fases e observar com qual(is) fase(s) o campo de fases correspondente está identificado.

A: 60% WT , 1100° C  
1 fase :  $\alpha$

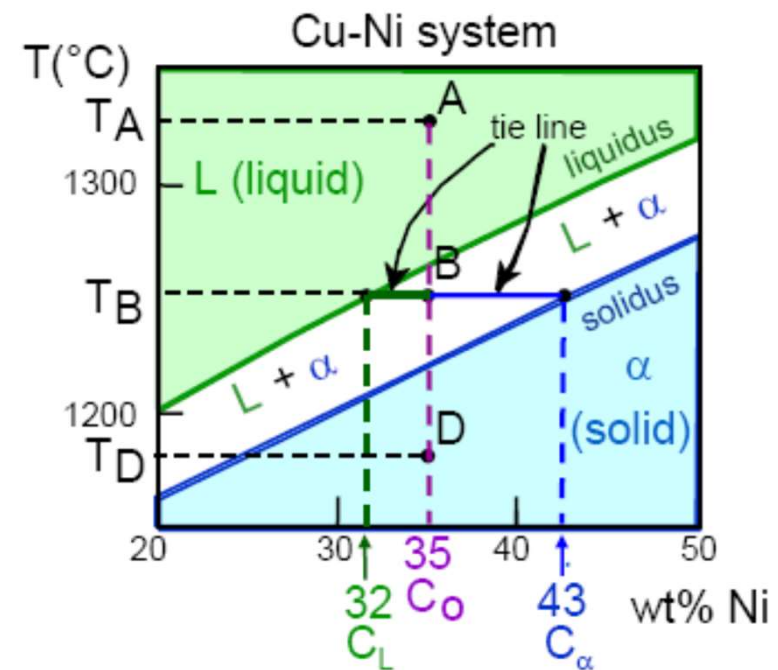
B: 35% WT, 1250° C  
2 fases: L +  $\alpha$



# DETERMINAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES DAS FASES

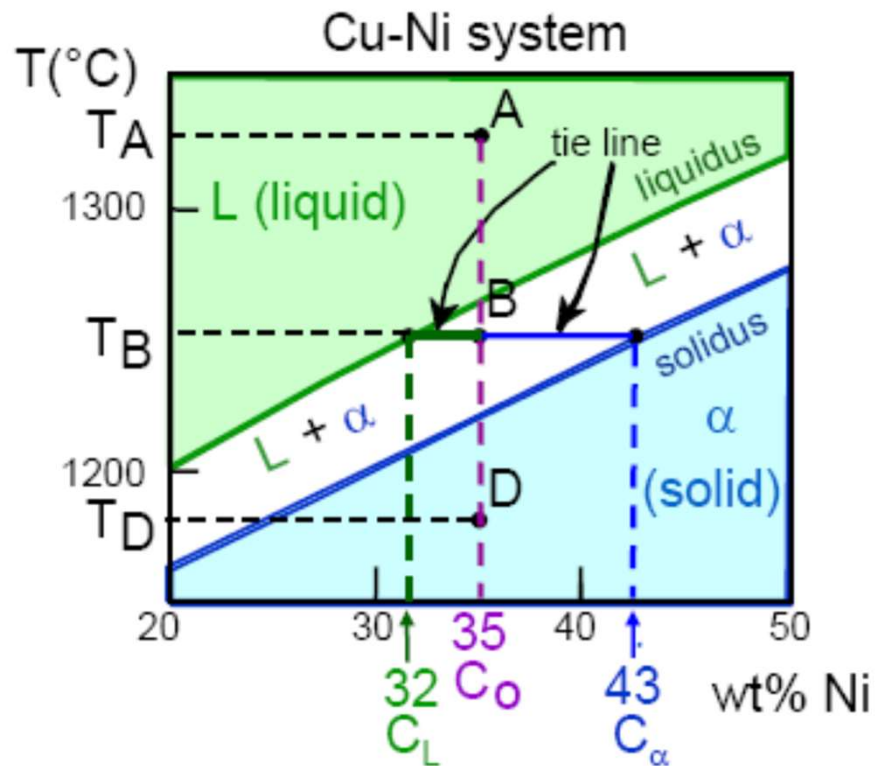
- Se apenas uma fase está presente a composição dessa fase é simplesmente a mesma da composição global da liga
- Para uma liga que possui composição e temperatura localizadas em uma região bifásica é utilizado o seguinte procedimento:

1. Constrói-se uma linha de amarração através da região bifásica à temperatura da liga
2. Anotam-se as intersecções da linha de amarração com as fronteiras entre as fases em ambos os lados
3. Traçam-se linhas perpendiculares à linha de amarração a partir dessas intersecções até o eixo horizontal das composições, onde cada uma das respectivas fases pode ser lida:



# DETERMINAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES DAS FASES

No exemplo do sistema Cu - Ni tem-se :



Composição:  $C_0 = 35\% \text{ Ni}$

Em  $T_A$ :  
Somente líquido  
 $C_L = C_0$

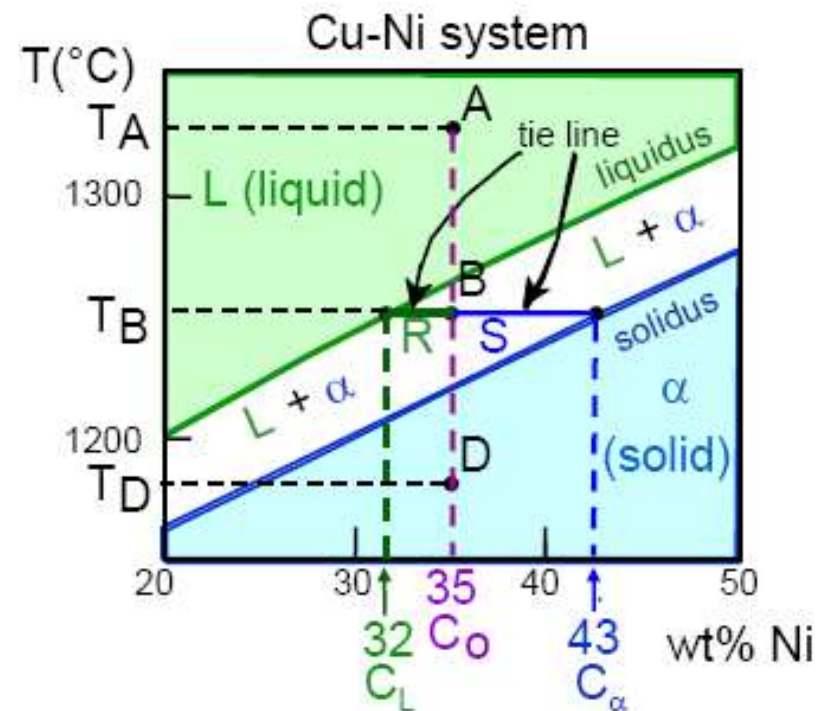
Em  $T_D$ :  
Somente sólido  
 $C_\alpha = C_0$

Em  $T_B$ :  
 $C_L = C_{\text{liquido}} = 32\% \text{ Ni}$   
 $C_\alpha = C_{\text{sólido}} = 43\% \text{ Ni}$

# DETERMINAÇÃO DAS QUANTIDADES DAS FASES

- Para uma região monofásica a liga é composta inteiramente por aquela fase, ou seja percentual de 100% da fase
- Para regiões em que a composição e temperatura estão dentro de uma região bifásica é utilizado o seguinte procedimento (Regra da alavanca):

1. A linha de amarração é construída através da região bifásica na temperatura da liga
2. A composição global da liga é localizada sobre a linha de amarração.
3. A fração de uma fase é calculada tomando-se o comprimento da linha de amarração desde a composição global da liga até a fronteira com a outra fase e divide-se pelo comprimento total da linha de amarração
4. A fração da outra fase é determinada de maneira semelhante



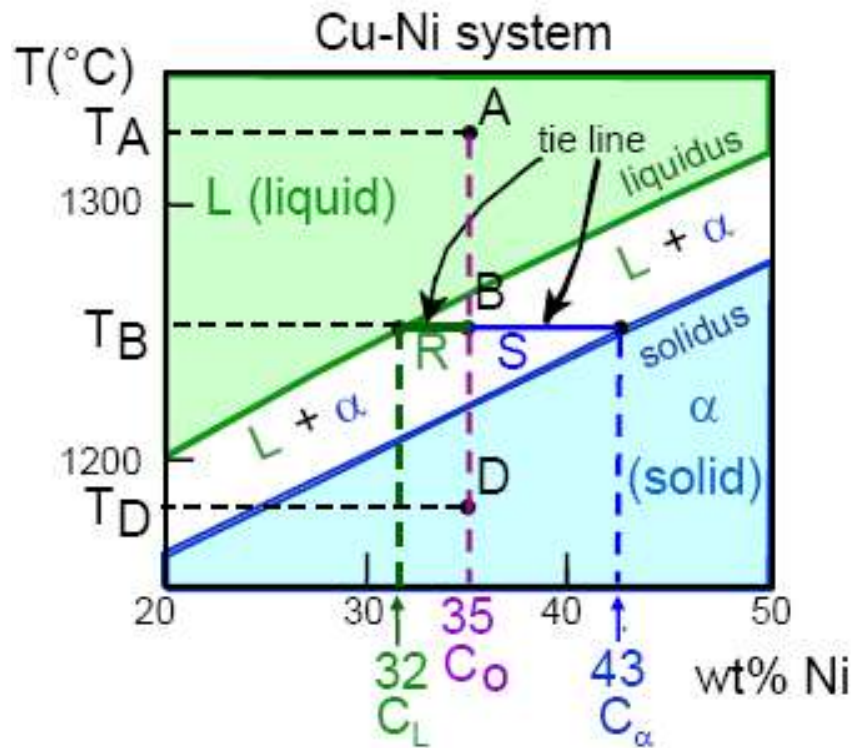


# DETERMINAÇÃO DAS QUANTIDADES DAS FASES

No emprego da regra da alavanca, os comprimentos dos segmentos podem ser determinados pela medição direta usando-se régua com escala linear ou através da subtração das composições

Em um sistema Cu-Ni por exemplo:

Composição:  $C_0 = 35\% \text{ Ni}$



Em  $T_A$ : somente líquido

$$W_L = 100\% , W_\alpha = 0$$

Em  $T_D$ : somente sólido

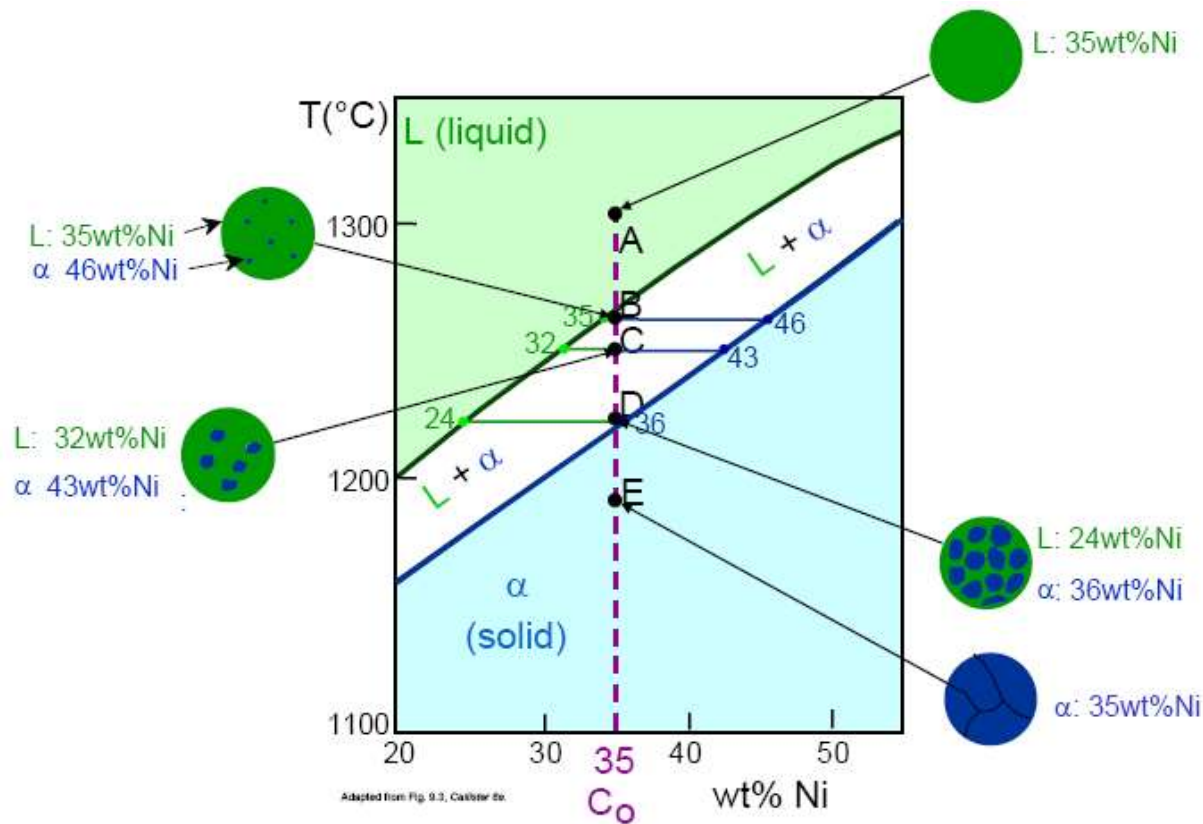
$$W_\alpha = 100\% , W_L = 0$$

Em  $T_B$ : regra da alavanca

$$W_L = \frac{S}{R+S} = \frac{43 - 35}{43 - 32} = 73 \text{ wt\%}$$

$$W_\alpha = \frac{R}{R+S} = 27 \text{ wt\%}$$

# Desenvolvimento da microestrutura em ligas isomorfas



A: completamente líquida

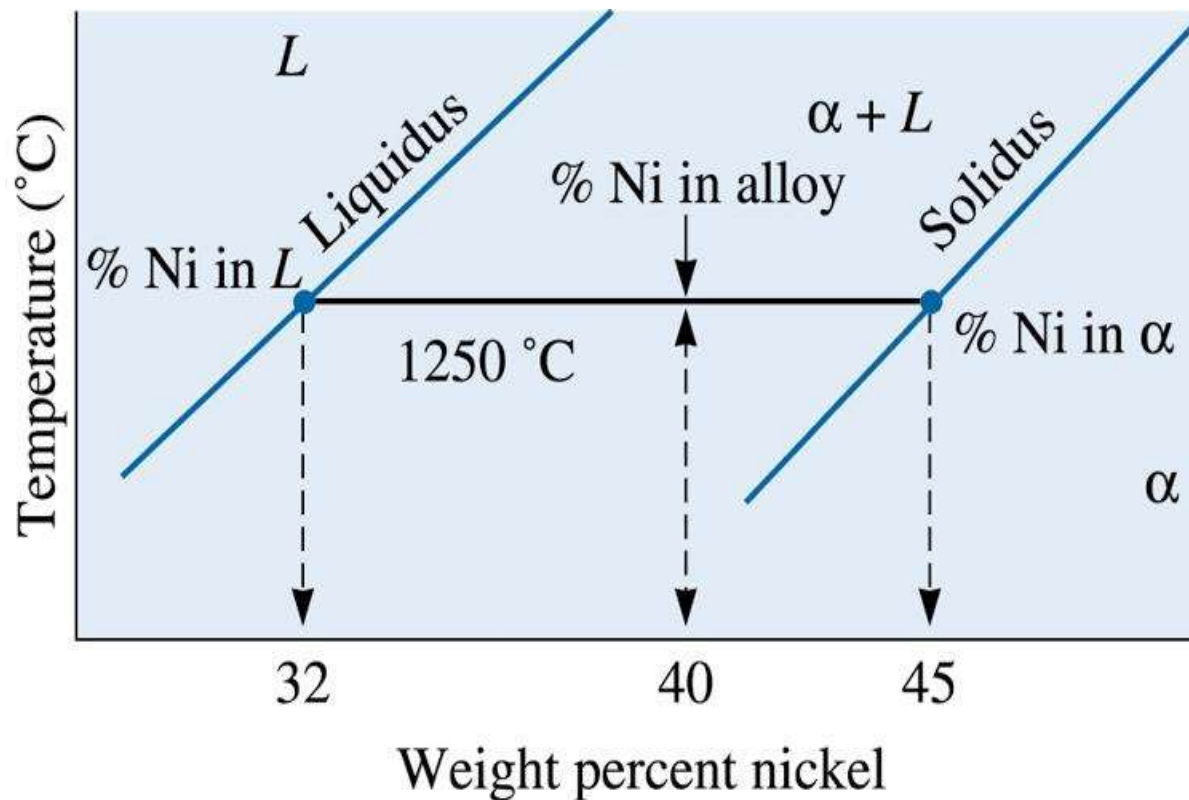
B: linha liquidus - primeiro sólido  $\alpha$  começa a se formar


C: fases líquida e  $\alpha$

D: linha solidus - termina o processo de solidificação, fração mínima de líquido

E: Resto da fase líquida se solidifica, completamente fase  $\alpha$

Calcule a quantidade de alfa e de líquido a 1250 graus C na liga Cu 40%Ni.





Admitindo que  $x$  seja a fração de sólido  $\alpha$

Desde que possuímos 2 fases, a fração de líquido será:

$$1 - x.$$

A massa total de Ni em 100 gramas será:

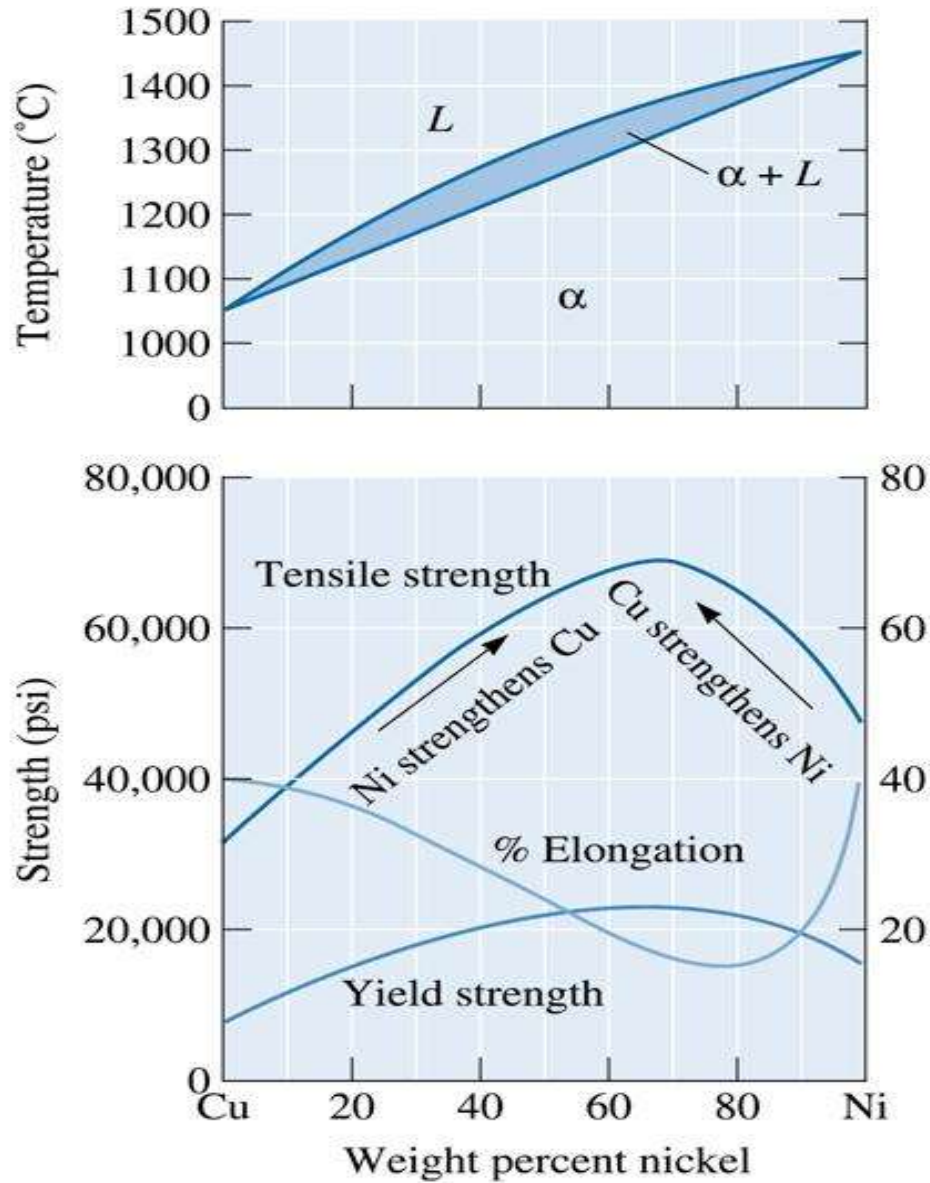
massa de Ni no líquido + massa de Ni em  $\alpha$

Assim,  $100 \times (\% \text{ Ni na liga}) = [(100)(1 - x)](\% \text{ Ni do L}) + (100)[x](\% \text{ Ni no } \alpha)$


$$x = (40-32)/(45-32) = 8/13 = 0.62$$

Convertendo fração de massa em porcentagem de massa

a liga a 1250°C contem 62%  $\alpha$  e 38% L.



**Propriedades mecânicas de ligas Cu Ni. O Cu aumenta linearmente a resistência com a adição de até 60% Ni. O Ni com até 40% de Cu.**

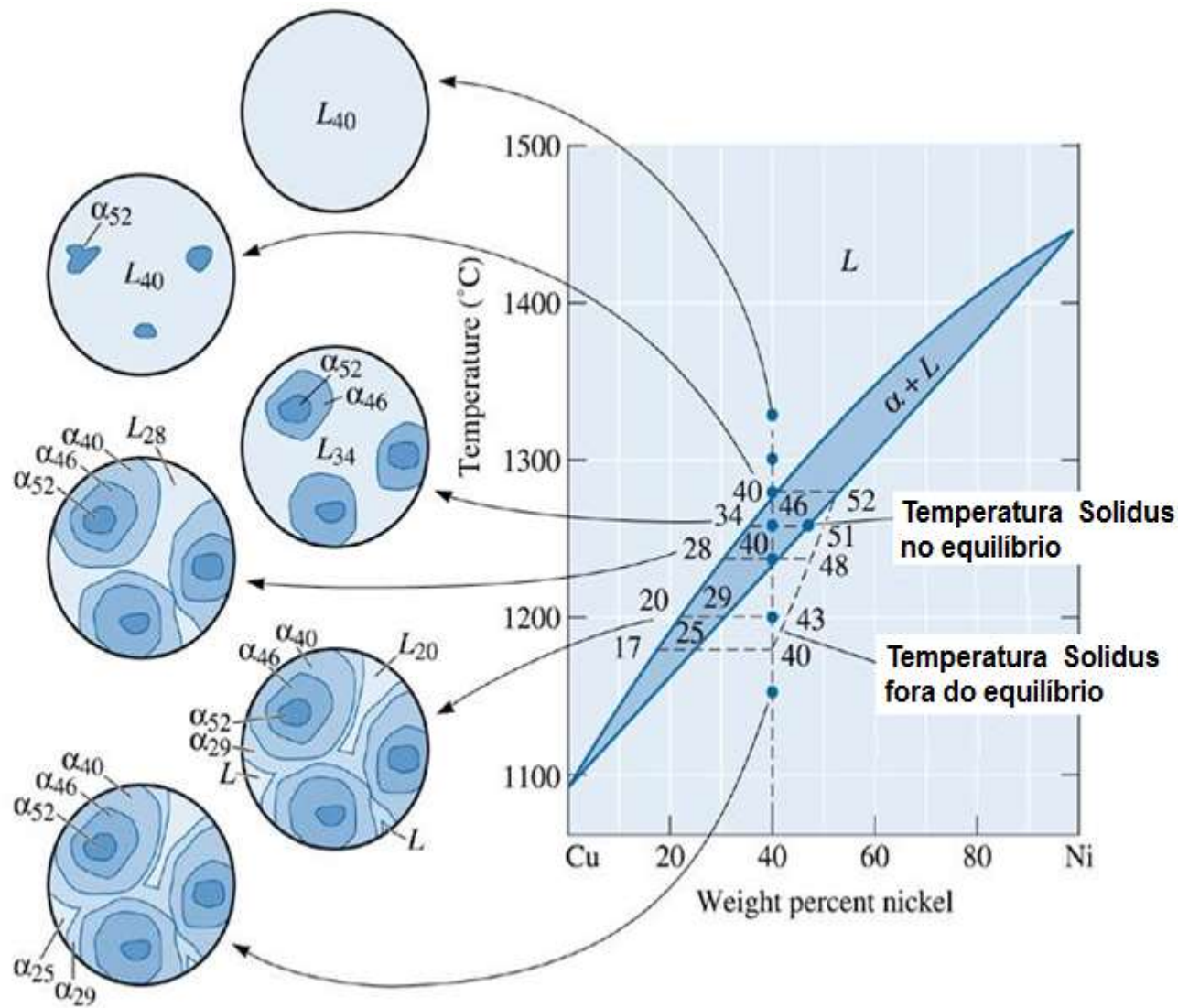
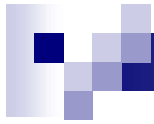


Para atingir o equilíbrio na estrutura final, a taxa de resfriamento deve ser extremamente baixa.

Deve haver tempo suficiente para permitir a difusão dos átomos de Cu e Ni, produzindo as composições dadas no diagrama de equilíbrio.

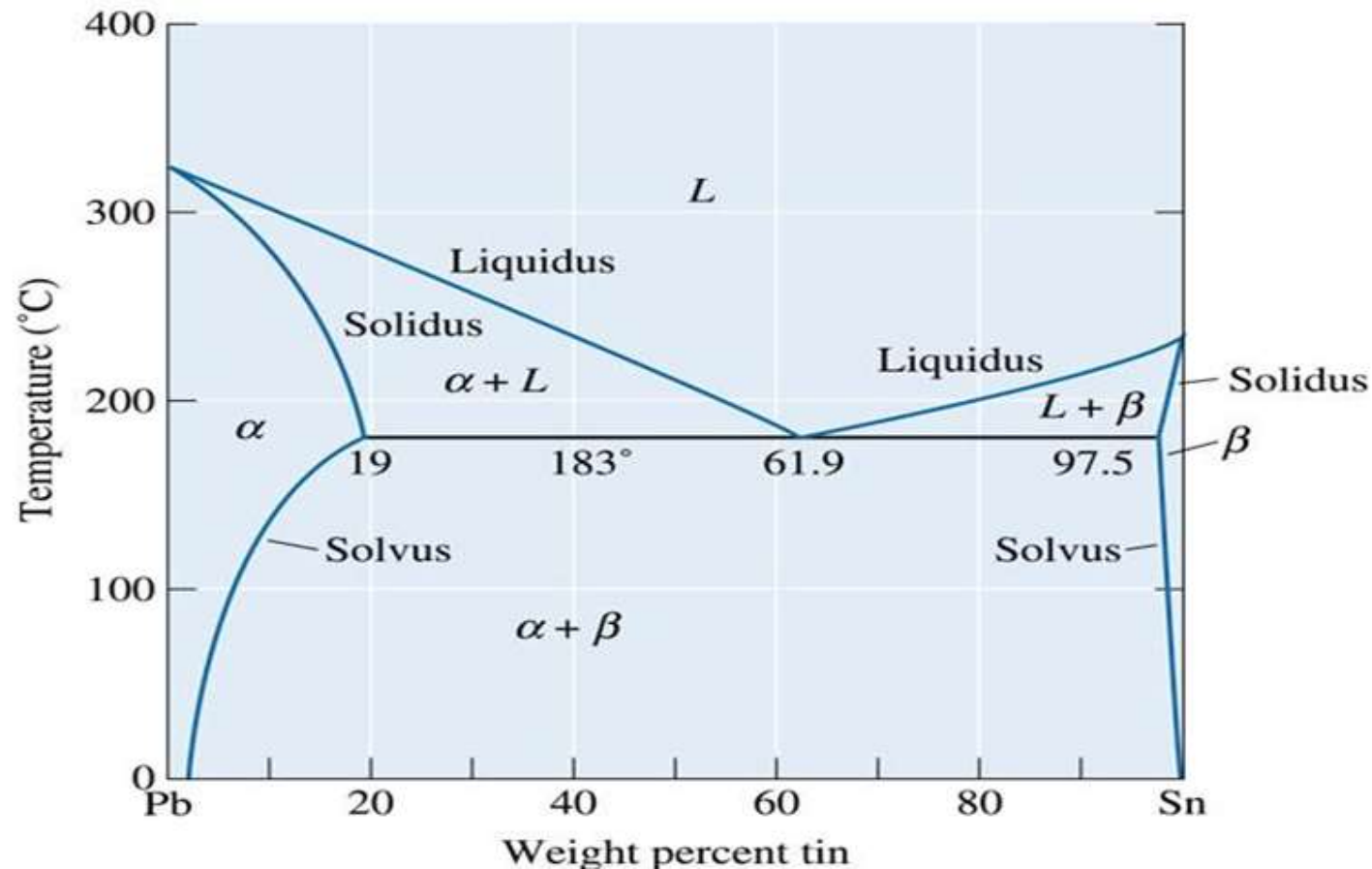
Em muitas situações práticas de fundição, a taxa de resfriamento é muito rápida para permitir o equilíbrio.

Essa é uma das causas da microsegregação.



**Insuficiente tempo para difusão no processo de solidificação produz uma estrutura segregada.**

# Diagrama de fase eutético

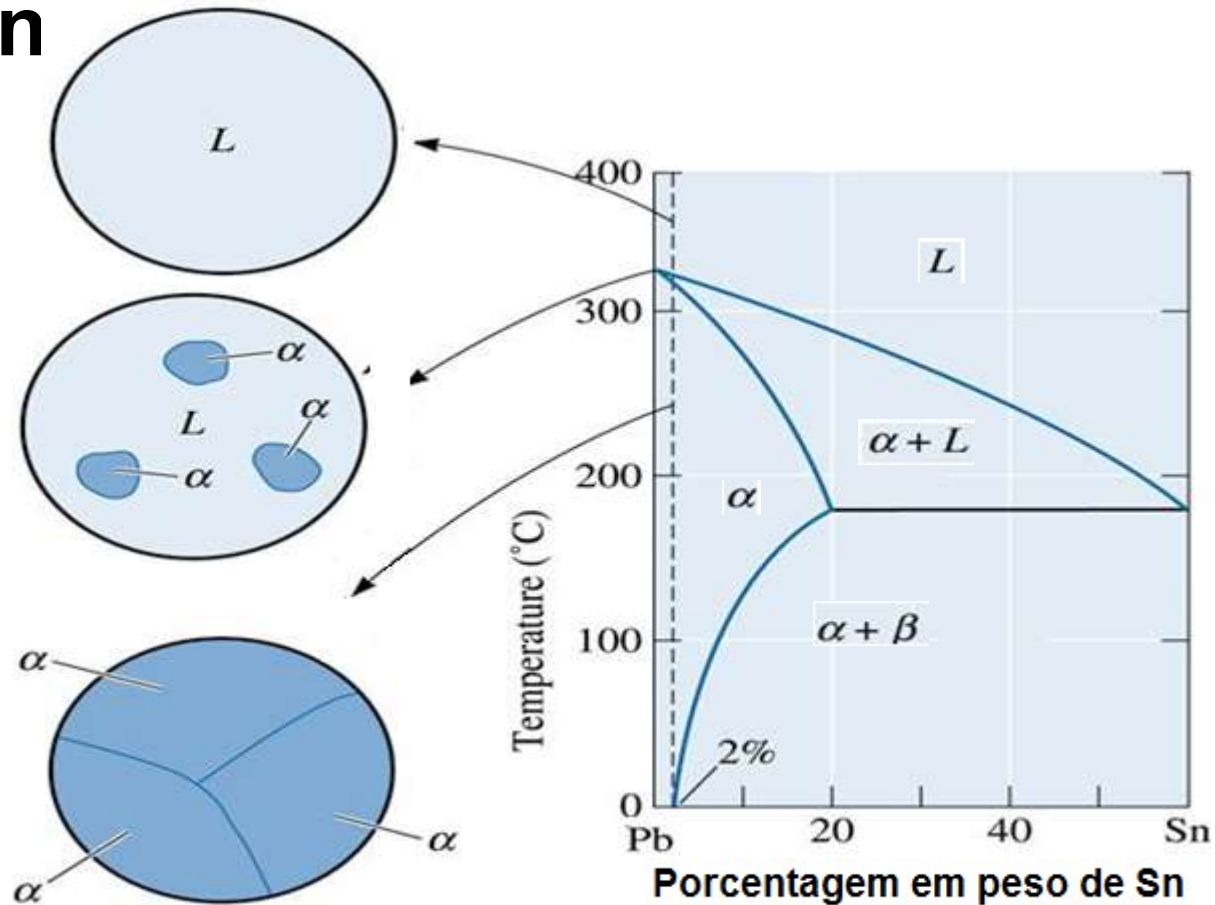


SOLVUS –

Uma curva de solubilidade que separa uma região de uma única fase para uma região de duas fases .

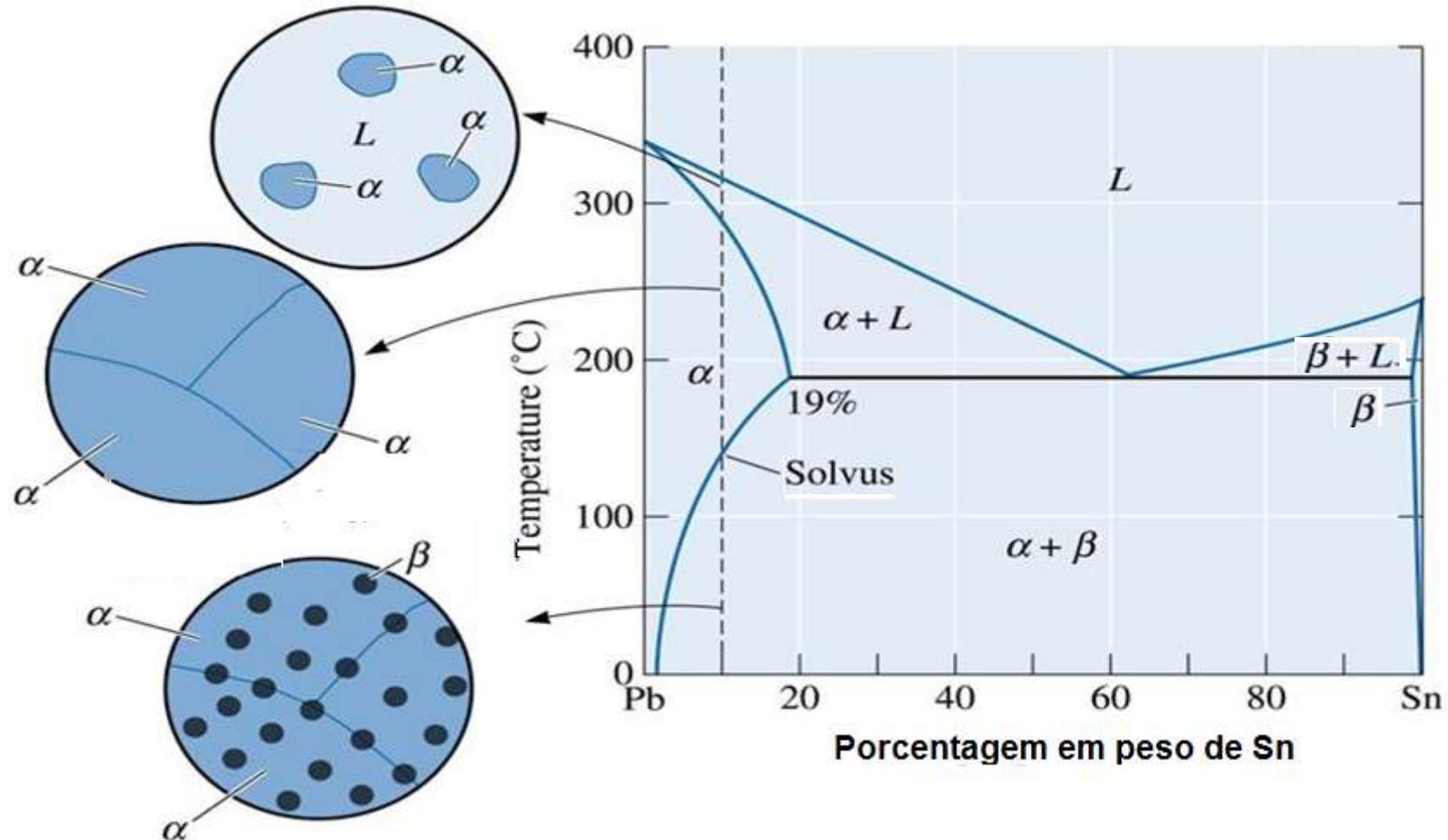


# Solidificação e microestrutura de uma liga de Pb-2% Sn



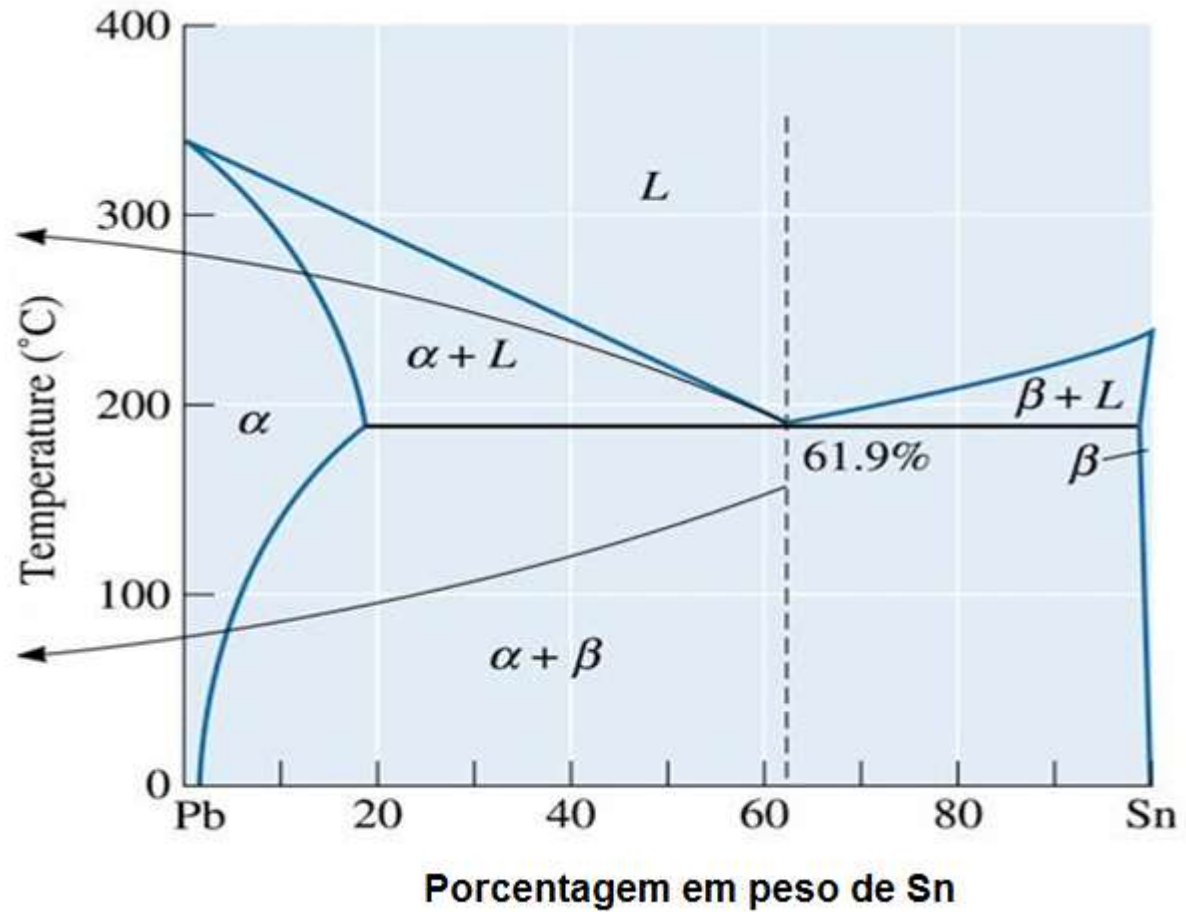
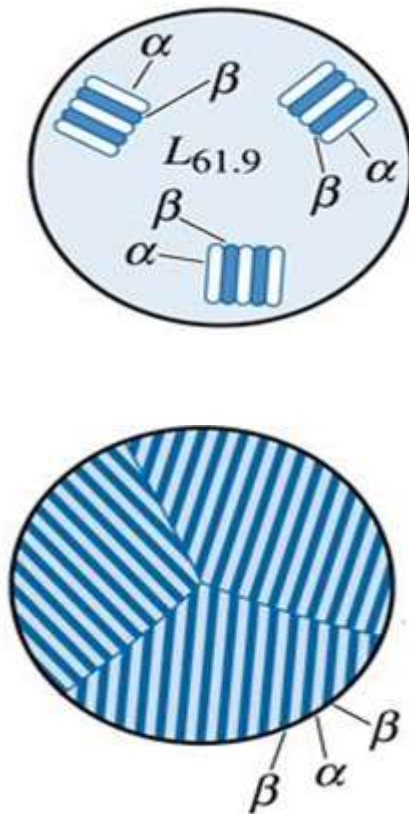
**A liga é uma solução sólida de fase única.**

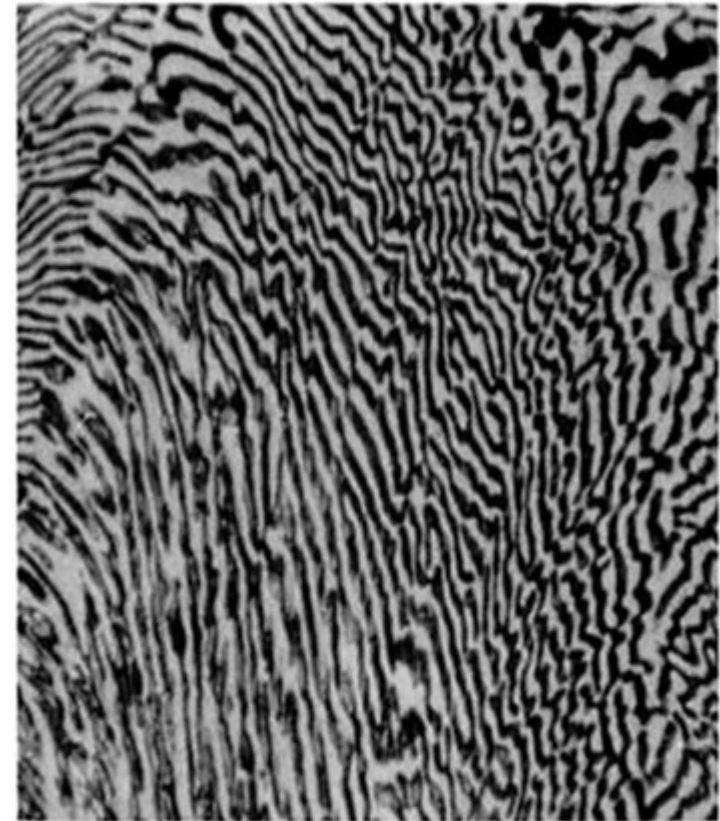
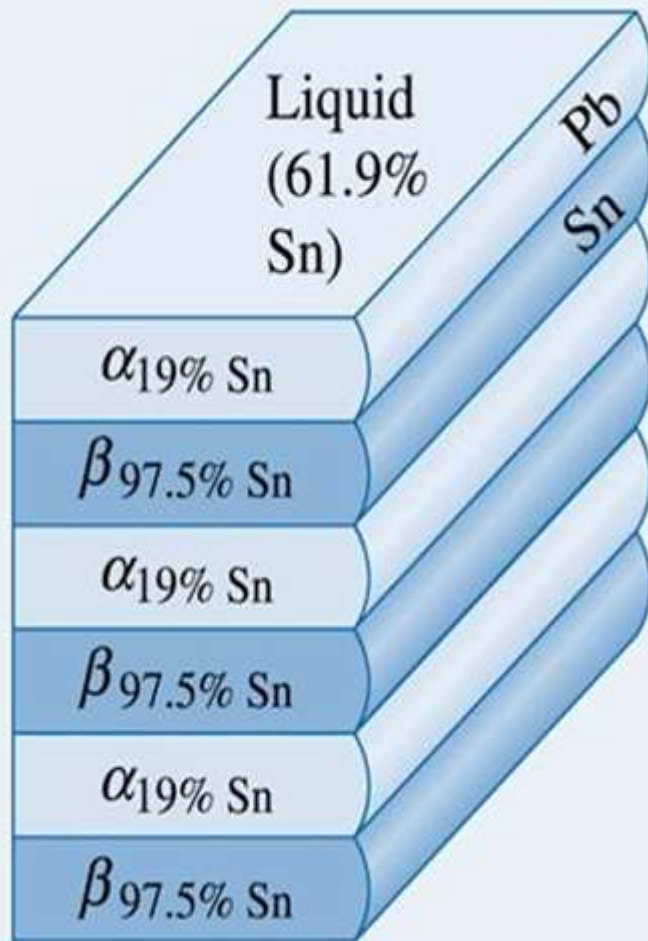
# Solidificação, precipitação e microestrutura de uma liga Pb-10% Sn .



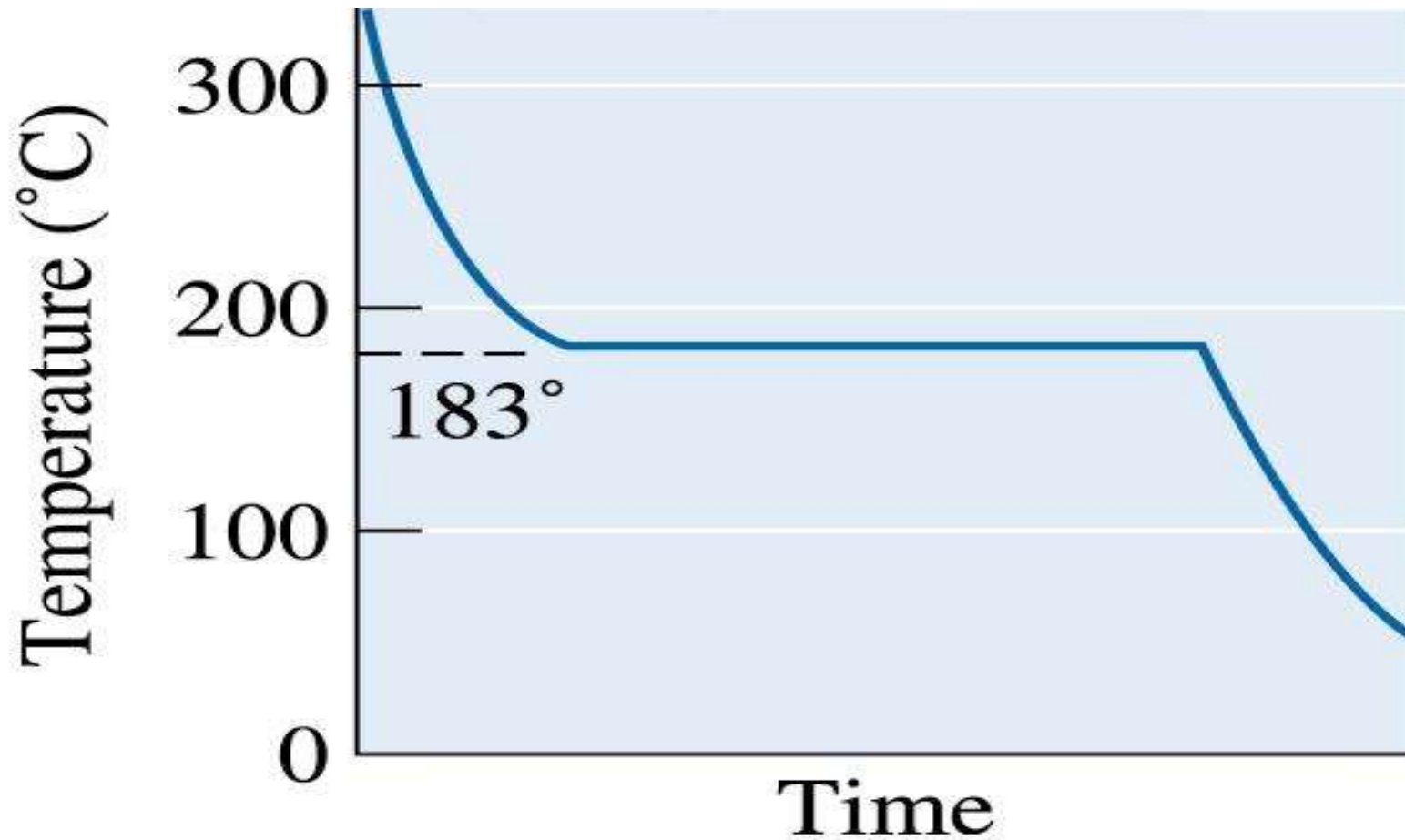
**Algun endurecimento por precipitação ocorre com os precipitados sólidos  $\beta$ .**

# Solidificação e microestrutura de uma liga eutética Pb-61.9% Sn

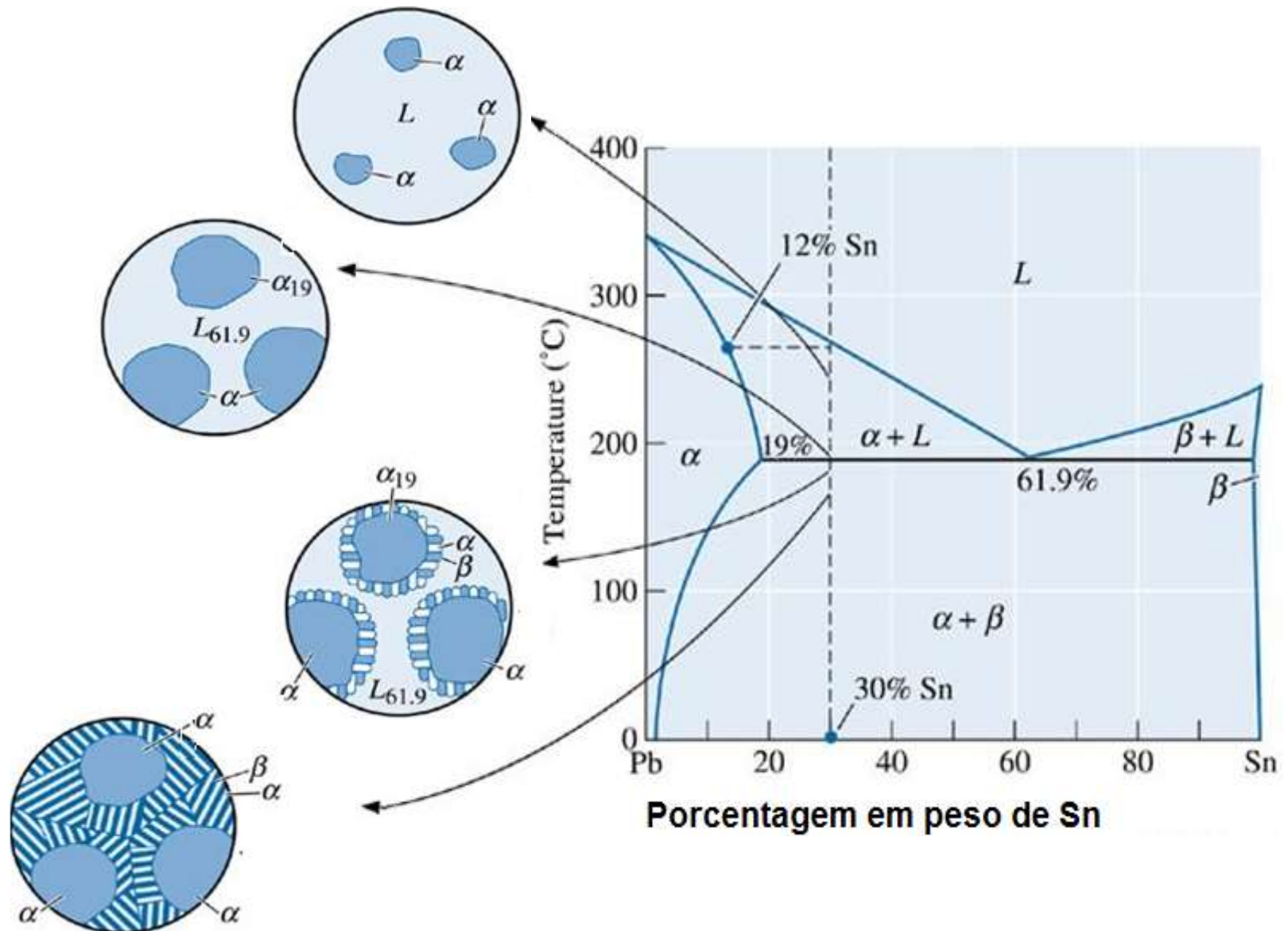




# Regra de Gibbs

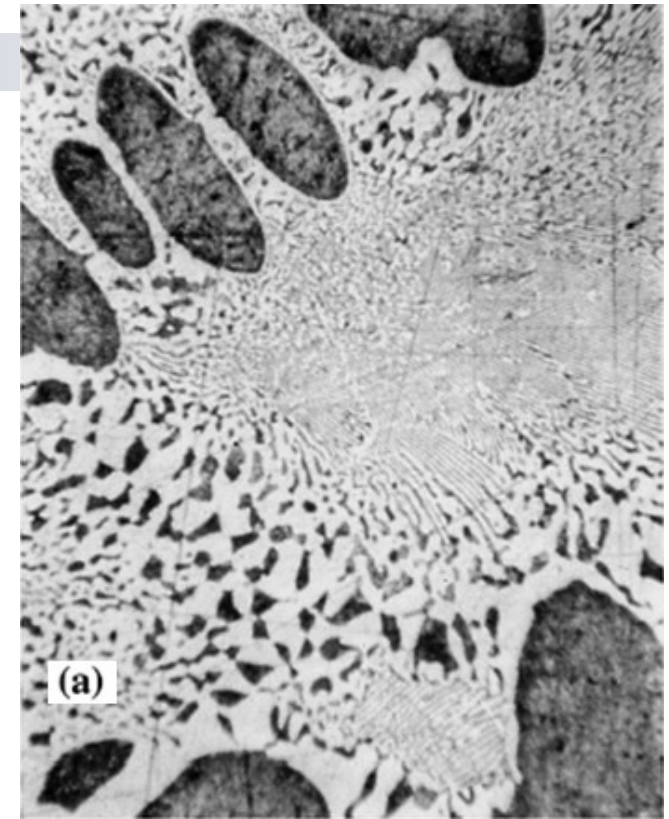
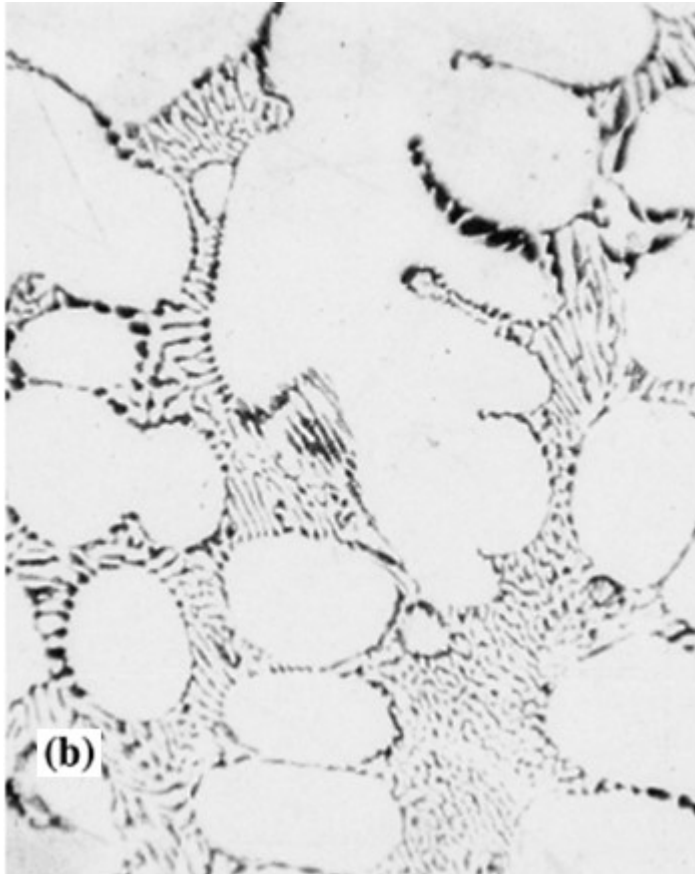


# Solidificação e microestrutura de uma liga hipoeutética (Pb-30% Sn).

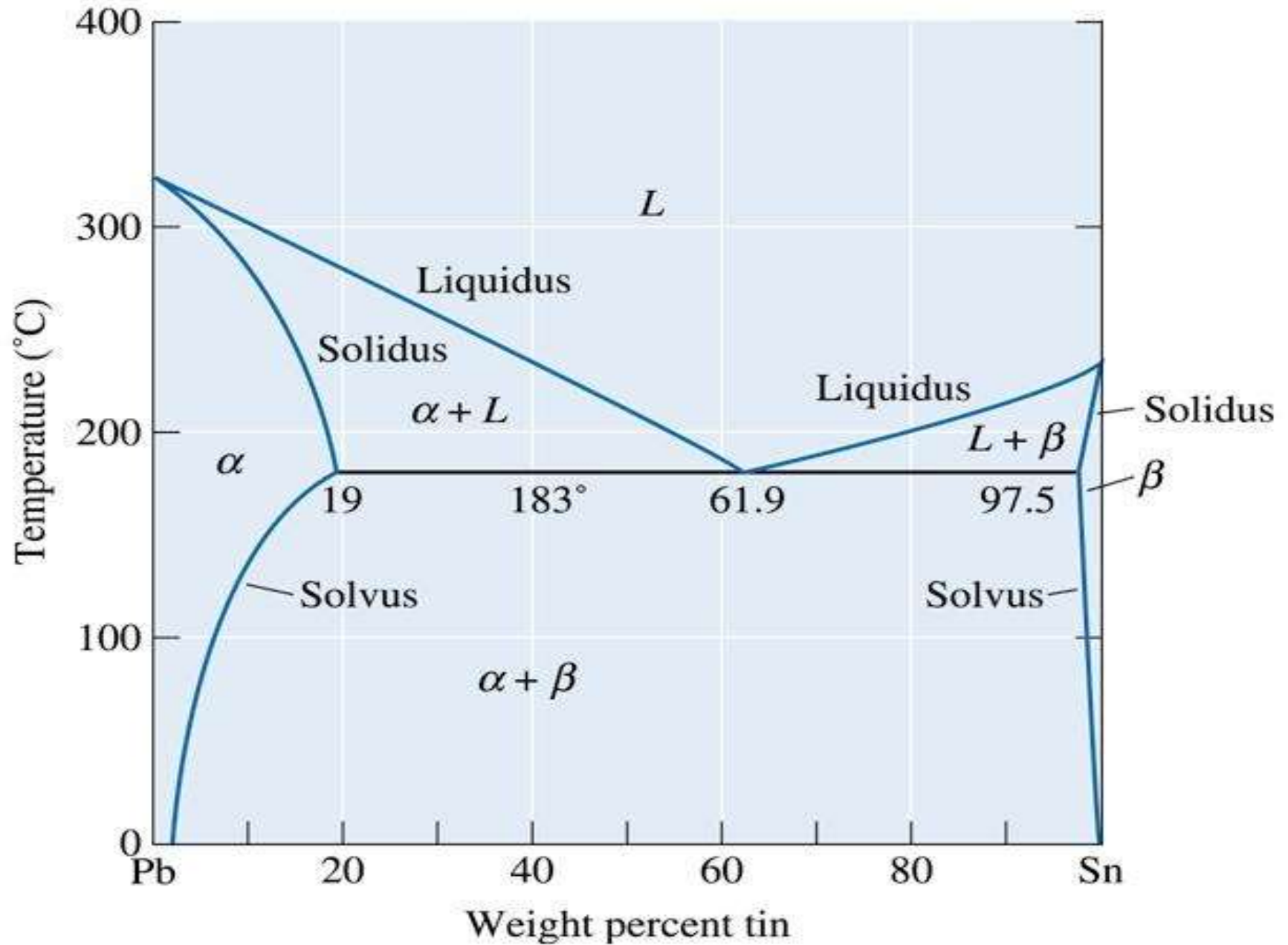


**a) Liga hipoeutética de Pb/Sn.**

**(b) Liga hipereutética de Pb/Sn.**

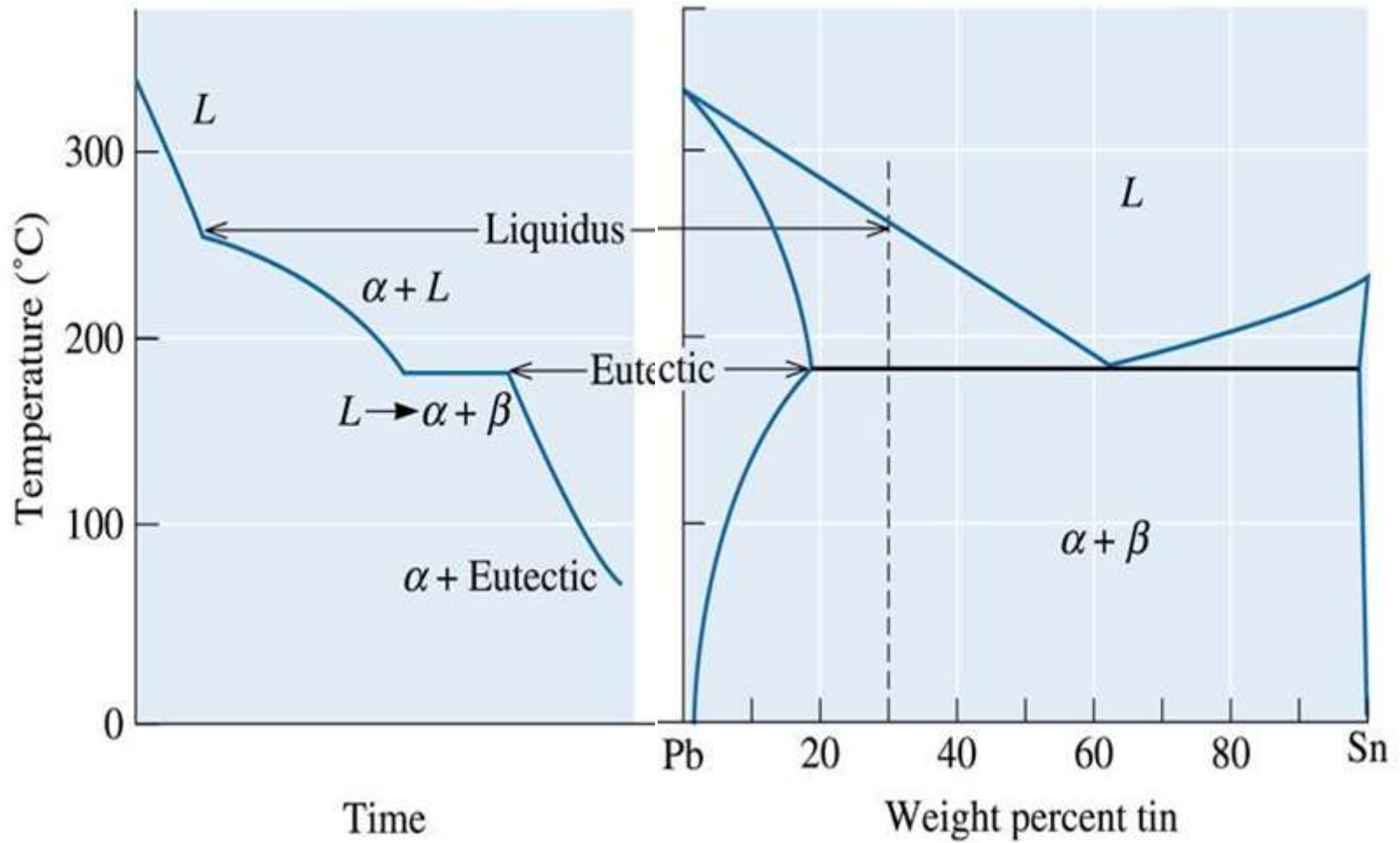


**O constituinte escuro é rico em chumbo, fase  $\alpha$ , o claro é rico em estanho, fase  $\beta$ , a estrutura “listrada” é o eutético .**

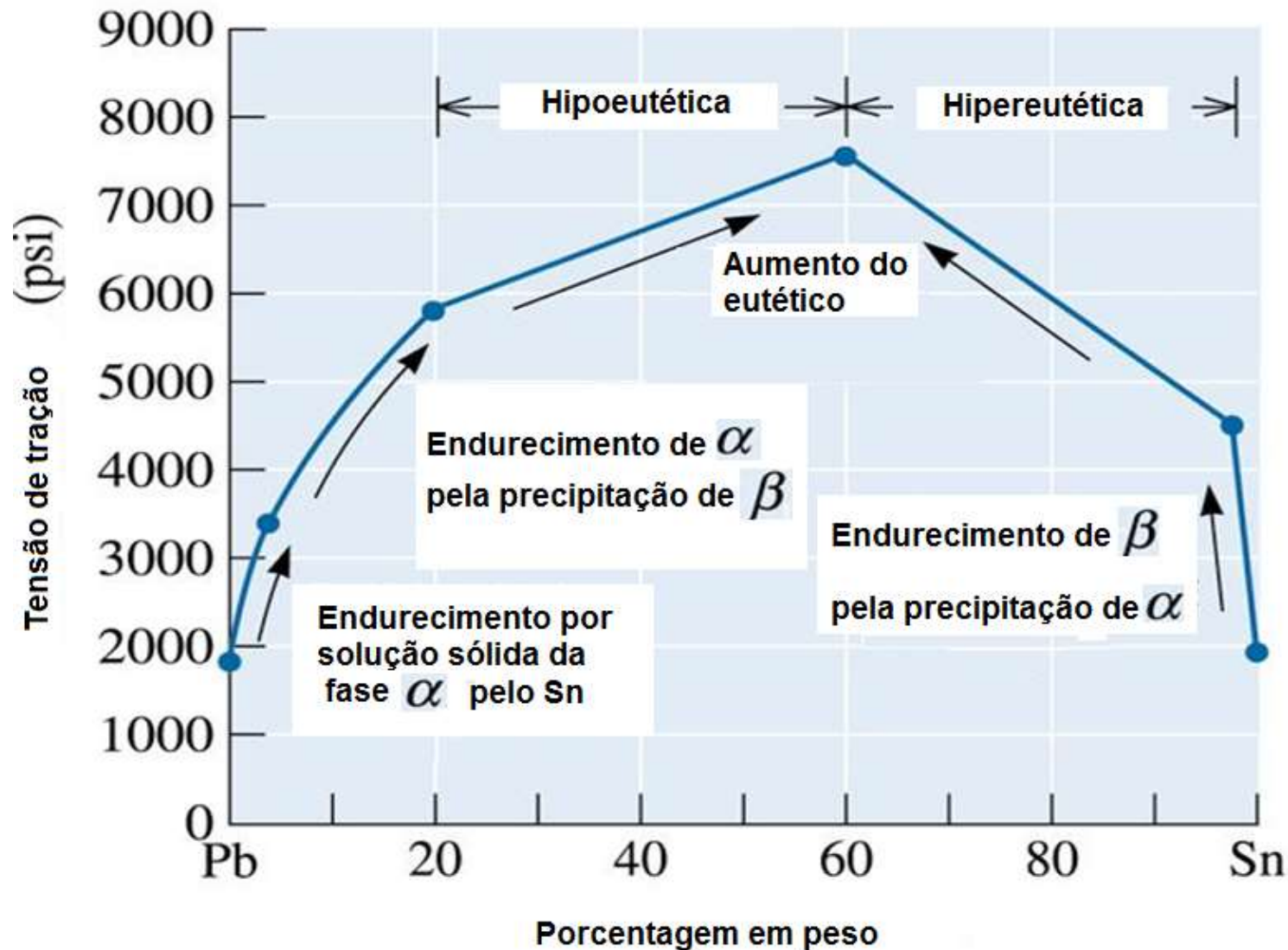


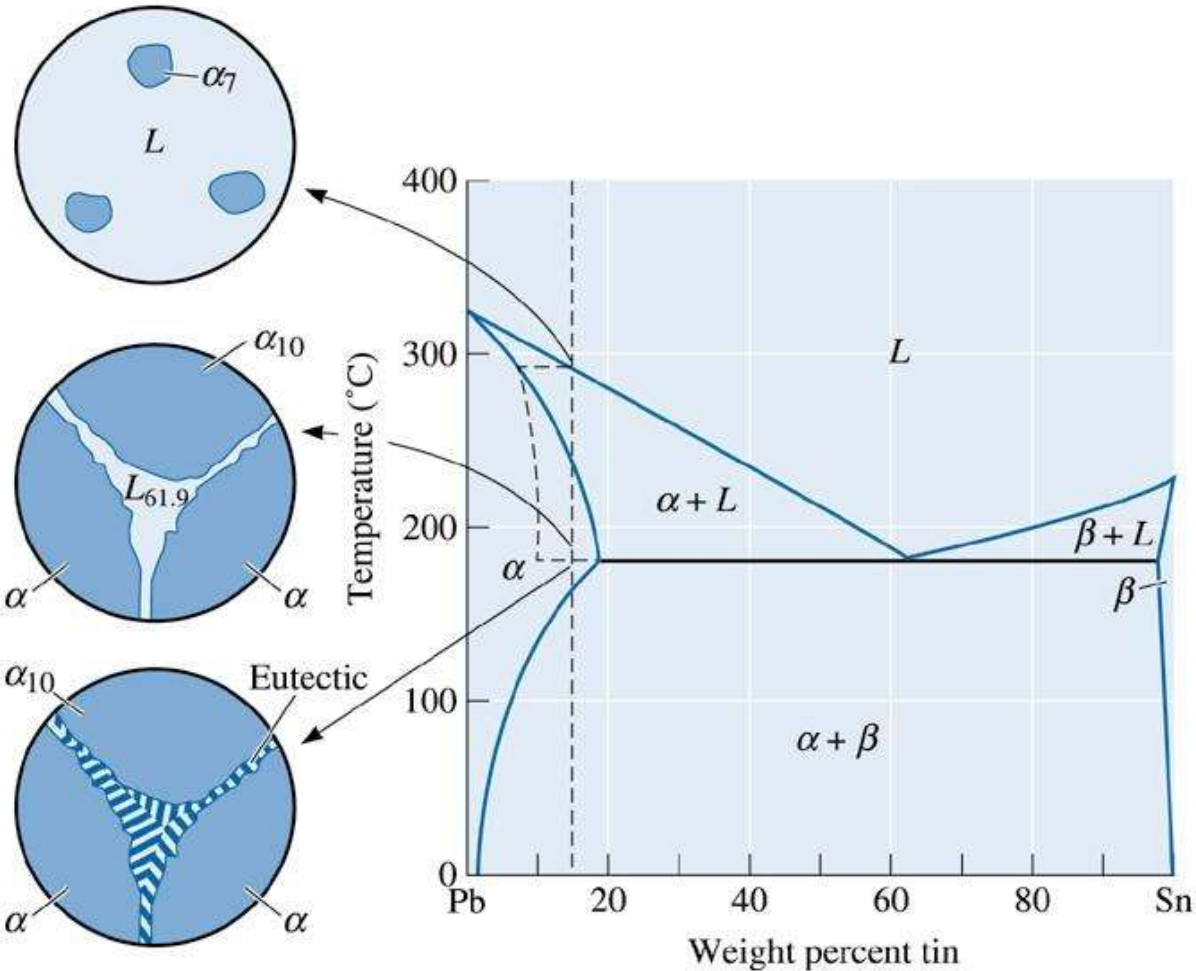


# Regra de Gibbs



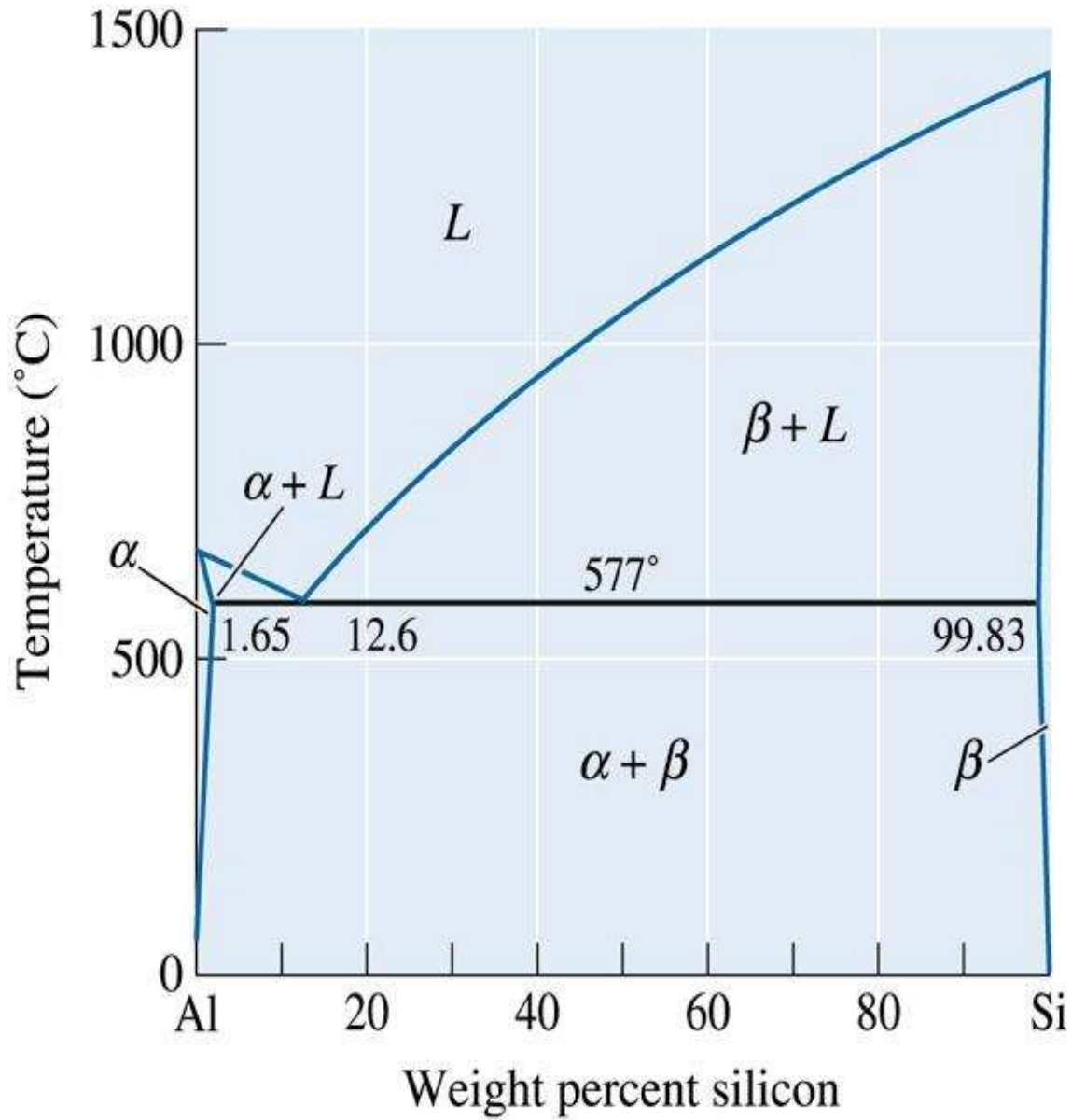
# O efeito da composição e mecanismos de resistência na resistência à tração de ligas Pb/Sn.

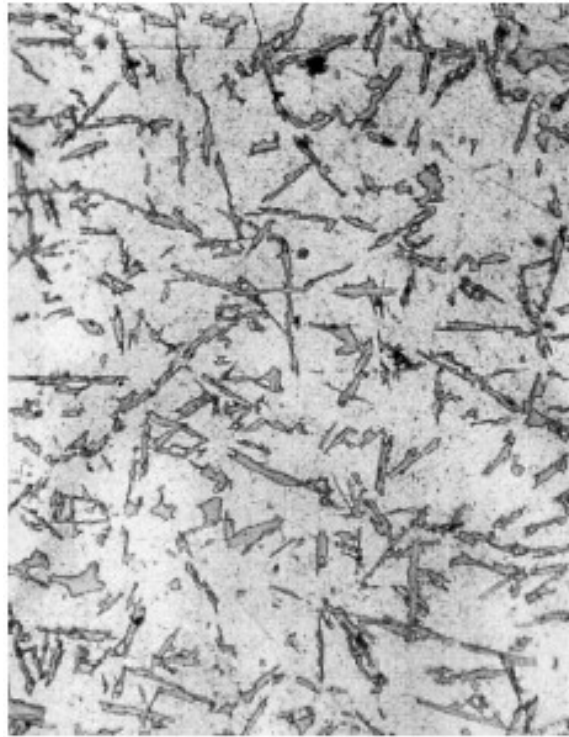




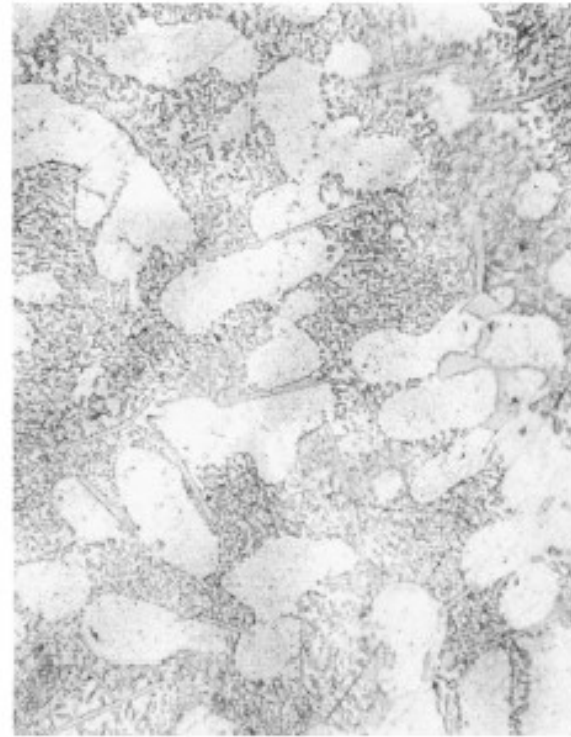
**Solidificação de não equilíbrio de uma liga Pb-15% Sn . Um microconstituente de não equilíbrio eutético poderá ser formado se a solidificação for muito rápida.**

(c)2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning, is a trademark used herein under license.





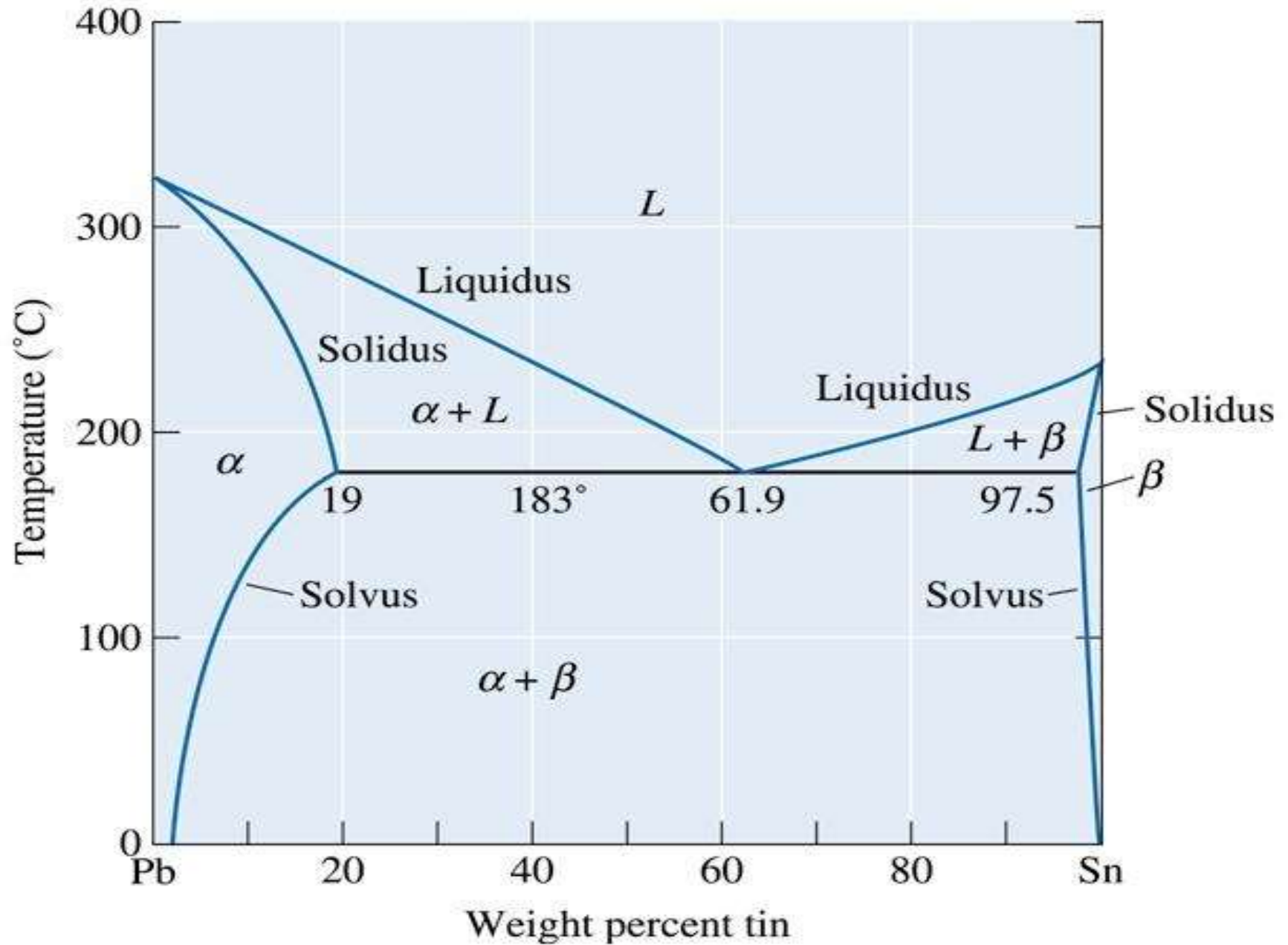
(a)



(b)

a) Eutético de Al Si

b) Eutético de Al Si modificada



## Quantidade de fases na liga eutética

- a) Determine a quantidade e composição de cada fase presente na composição eutética da liga Pb/Sn
- (a) A liga eutética contém 61.9% Sn.

$$\alpha : (\text{Pb} - 19\% \text{ Sn}) \quad \% \alpha = \frac{97.5 - 61.9}{97.5 - 19.0} \times 100 = 45.35\%$$

$$\beta : (\text{Pb} - 97.5\% \text{ Sn}) \quad \% \beta = \frac{61.9 - 19.0}{97.5 - 19.0} \times 100 = 54.65\%$$

Alfa tem 19% Sn e 81% Pb

Beta tem 97.5% Sn e 2.5% Pb



b) Calcule a massa das fases presentes em 200g da liga

(b) A uma temperatura abaixo e bem próxima da eutética:

A massa da fase  $\alpha$  em 200 g da liga =

Massa da liga  $\times$  fração da fase


$$= 200 \text{ g} \times 0.4535 = 90.7 \text{ g}$$

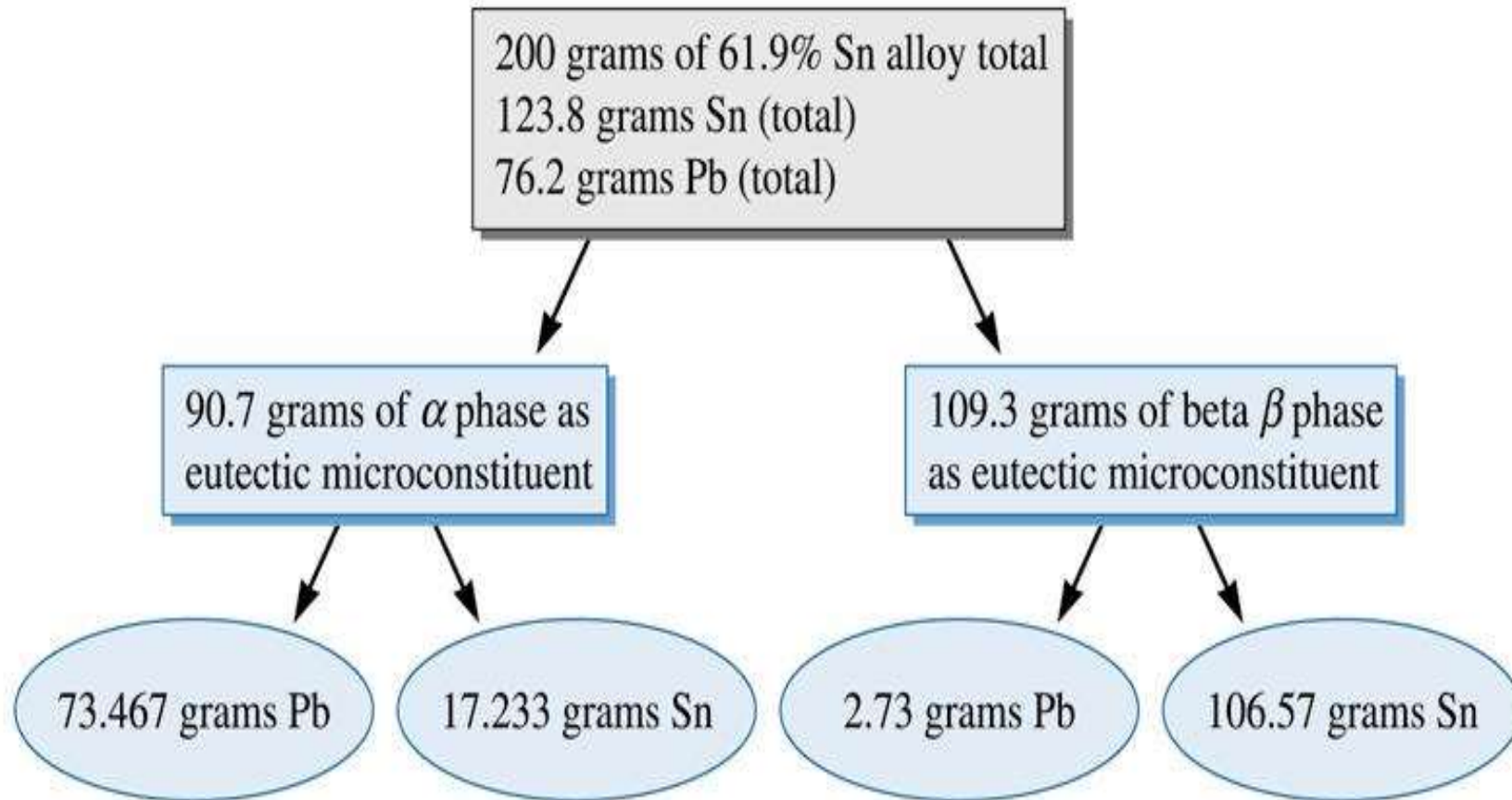
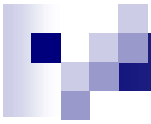
A quantidade de fase  $\beta$  em 200 g da liga =

Massa da liga  $\times$  fração da fase

$$\blacksquare = 200.0 \text{ g} \times 0.5465 = 109.3 \text{ g}$$



- 
- - Massa do Pb na fase  $\alpha$  = massa da fase em 200 g  $\times$  (concentration of Pb in  $\alpha$ ) =  $(90.7 \text{ g}) \times (0.81) = 73.467 \text{ g}$
  - Massa do Sn na fase  $\alpha$  = massa da fase em 200 g  $\times$  (concentration of Sn in  $\alpha$ ) =  $(90.7 \text{ g}) \times (0.19) = 17.233 \text{ g}$
  - - Mass of Pb in  $\beta$  phase = mass of the  $\beta$  phase in 200 g  $\times$  (concentração Pb in  $\beta$ ) =  $(109.3 \text{ g}) \times (0.025) = 2.73 \text{ g}$
  - Mass of Sn in  $\beta$  phase = mass of the  $\beta$  phase in 200 g  $\times$  (concentração Sn in  $\beta$ ) =  $(109.3 \text{ g}) \times (0.975) = 106.57 \text{ g}$



# ■ Determinação das fases e quantidades em uma liga hipoeutética de Pb-30% Sn

- Para uma liga Pb – 30% Sn determine as fases presentes, suas quantidades e suas composições a  $300^{\circ}\text{C}$ ,  $200^{\circ}\text{C}$ ,  $184^{\circ}\text{C}$ ,  $182^{\circ}\text{C}$ , e  $0^{\circ}\text{C}$ .


**Temperature  
(°C)**
**Phases**
**Compositions**
**Amounts**

300

 $L$  $L$ : 30% Sn $L = 100\%$ 

200

 $\alpha + L$  $L$ : 55% Sn

$$L = \frac{30 - 18}{55 - 18} \times 100 = 32\%$$

 $\alpha$ : 18% Sn

$$\alpha = \frac{55 - 30}{55 - 18} \times 100 = 68\%$$

184

 $\alpha + L$  $L$ : 61.9% Sn

$$L = \frac{30 - 19}{61.9 - 19} \times 100 = 26\%$$

 $\alpha$ : 19% Sn

$$\alpha = \frac{61.9 - 30}{61.9 - 19} \times 100 = 74\%$$

182

 $\alpha + \beta$  $\alpha$ : 19% Sn

$$\alpha = \frac{97.5 - 30}{97.5 - 19} \times 100 = 86\%$$

 $\beta$ : 97.5% Sn

$$\beta = \frac{30 - 19}{97.5 - 19} \times 100 = 14\%$$

0

 $\alpha + \beta$  $\alpha$ : 2% Sn

$$\alpha = \frac{100 - 30}{100 - 2} \times 100 = 71\%$$

 $\beta$ : 100% Sn

$$\beta = \frac{30 - 2}{100 - 2} \times 100 = 29\%$$