

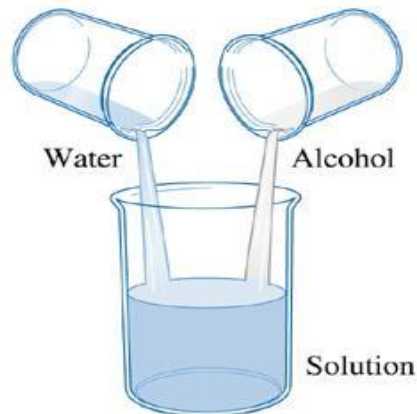
SMM0193 – ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS I

DIAGRAMA DE FASES ISOMORFO E EUTÉTICO REGRA DA ALAVANCA

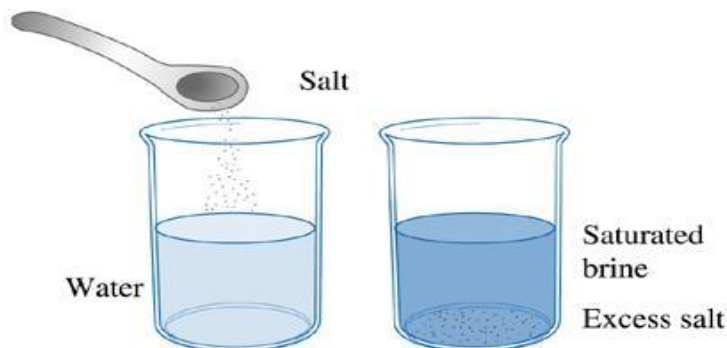
- **Fase** – Qualquer **porção do material** que é fisicamente **homogênea** e pode ser **mecanicamente separada** de qualquer outra.
- **Diagrama de fases** – Diagrama que **descreve a estabilidade termodinâmica** das fases sob diferentes condições de **pressão e temperatura**.



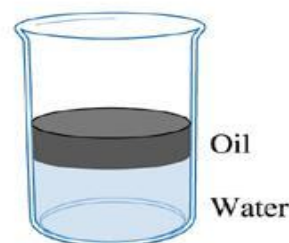
(a)



(b)



(c)



(d)

Ilustração das fases e solubilidade: (a) as três formas da água – gás, líquido e sólido – cada uma é uma fase. (b) Água e álcool são completamente solúveis (Solub. ilimitada). (c) Sal e água tem solubilidade limitada. (d) Óleo e água tem virtualmente nenhuma solubilidade.

Sistema de um componente: Mg

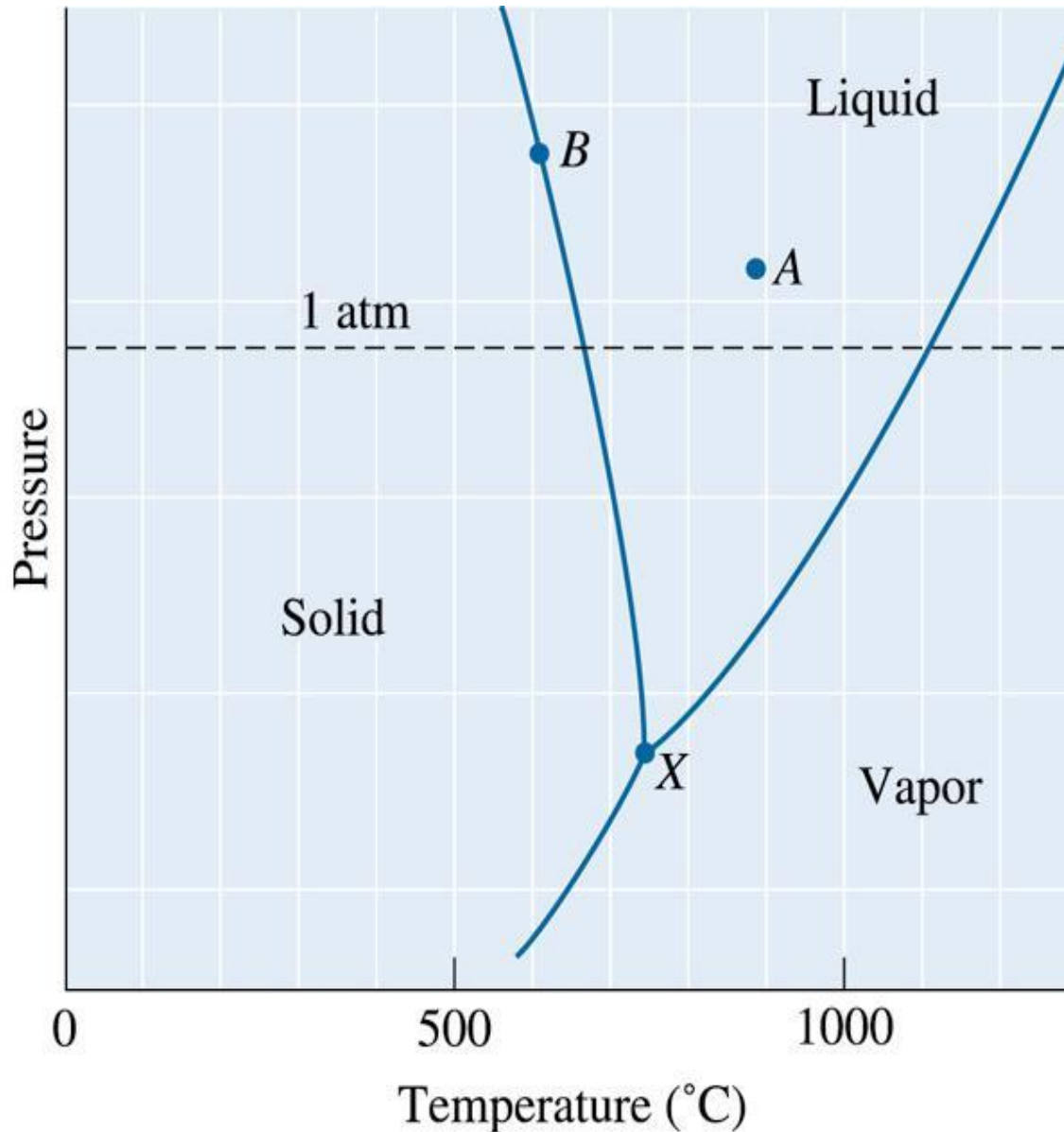


Diagrama de fases para o magnésio, mostrando as temperaturas de fusão e vaporização na pressão de 1 atm.

Soluções Sólidas e Diagrama de Fases.

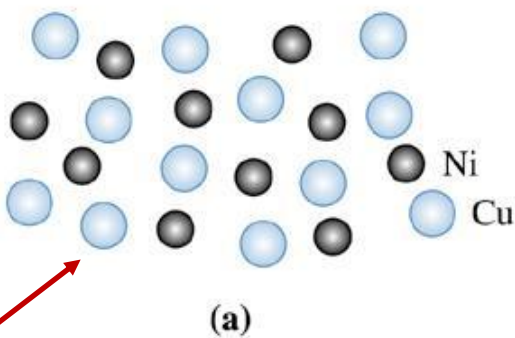
Solubilidade e Soluções Sólidas



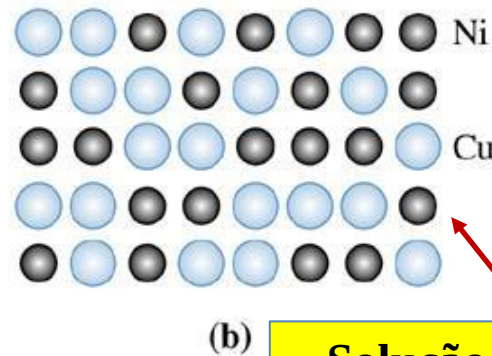
Quando combinamos **diferentes substâncias**, como a adição de um **metal em outro** para formar uma **liga metálica**, nós **produzimos soluções**. Neste caso, estamos interessados em saber **quanto de cada material** pode ser combinado **sem** produzir uma **fase adicional** (como o **sal precipitado** na solução **Sal+água**).

Solubilidade – Quantidade de um material que se dissolverá completamente em um segundo material sem a criação de uma segunda fase:

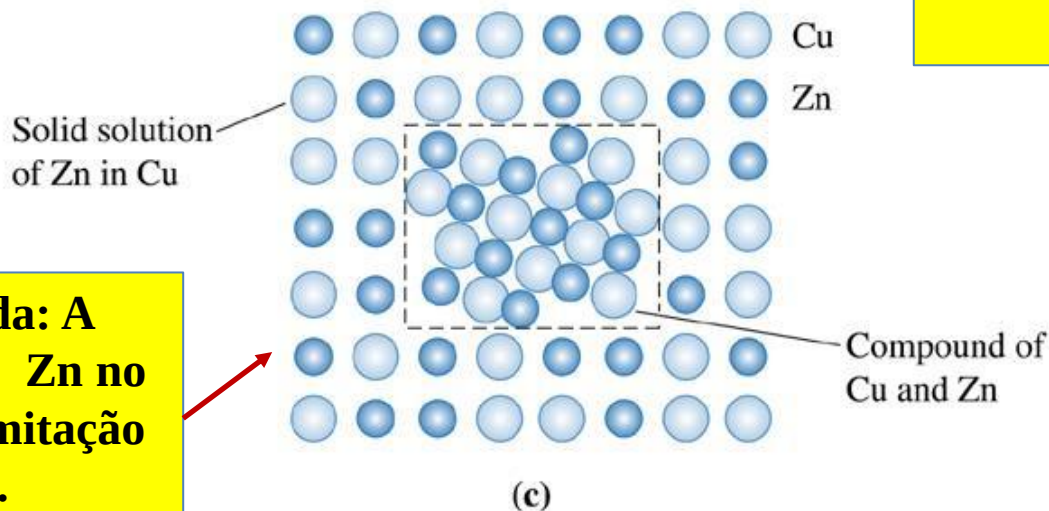
- **Solubilidade Ilimitada**
- **Solubilidade Limitada**



Solução líquida



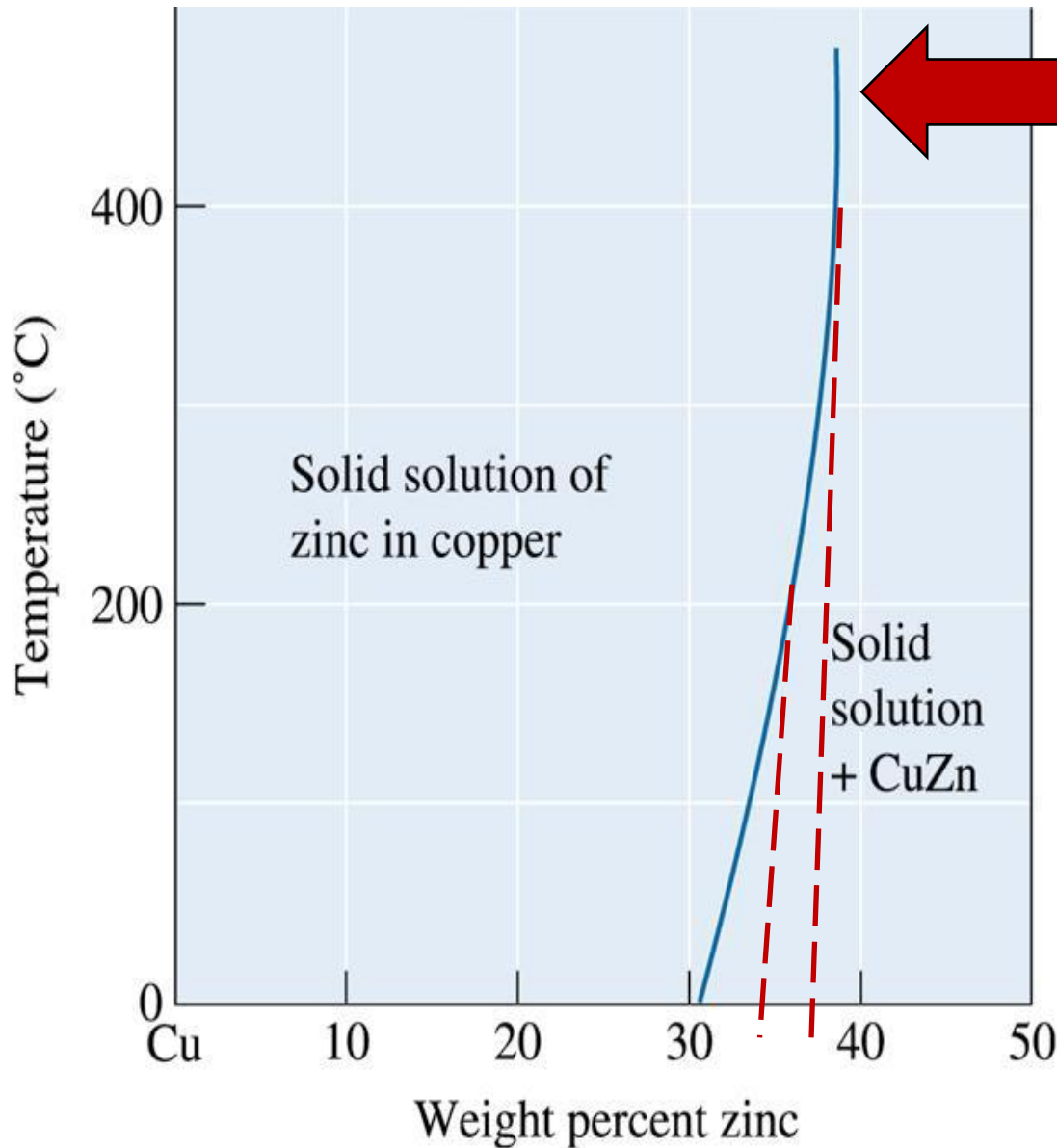
Solução sólida: Cu é completamente solúvel no Ni



Solução sólida: A solubilidade do Zn no Cu tem uma limitação em 30%.

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

(a) Cu e Ni líquidos são completamente solúveis um no outro. (b) Ligas de Cu e Ni sólidas apresentam solubilidade completa com os átomos de Ni ocupando ao acaso os lugares no retículo. (c) Nas ligas de Cu – Zn contendo mais do que 30% Zn, uma segunda fase é formada por causa da solubilidade limitada do Zn no Cu.



LINHA SOLVUS

A solubilidade do Zn no Cu. A linha representa o limite de solubilidade, quando a adição de Zn excede o limite de solubilidade duas fases coexistem.

Condições para Solubilidade Sólida “Ilimitada”

Regras de Hume-Rothery – As condições que uma liga ou sistema cerâmico deve apresentar para que o **soluto seja completamente solúvel** no **solvente** no estado sólido. As regras de Hume-Rothery são necessárias mas **não suficientes** para o material apresentar solubilidade ilimitada. Foram desenvolvidas entre **1920-1930**.

1.Fator Tamanho: os átomos devem ter **tamanho similar**, com não mais de 15% de diferença, de maneira a minimizar distorções no retículo cristalino;

2.Estrutura Cristalina: devem possuir **mesma estrutura cristalina**, ou de outra forma existirá a possibilidade de ocorrência de segunda fase;

3.Eletronegatividade: devem possuir **eletronegatividade similar**, caso contrário favorece a formação de compostos ao invés de solução;

4.Valência: devem possuir a **mesma valência**, pois valências diferentes favorecem a formação de compostos ao invés de solução.



WILLIAM HUME-ROTHERY
1899-1968

- Ligas **Si-Ge**

Regra 1: $r_{Si} = 0.117 \text{ nm}$ and $r_{Ge} = 0.122 \text{ nm}$.

$$\Delta R\% = \frac{r_{\text{solute}} - r_{\text{solvent}}}{r_{\text{solvent}}} \times 100\% = 4\% \quad \text{favorável } \checkmark$$

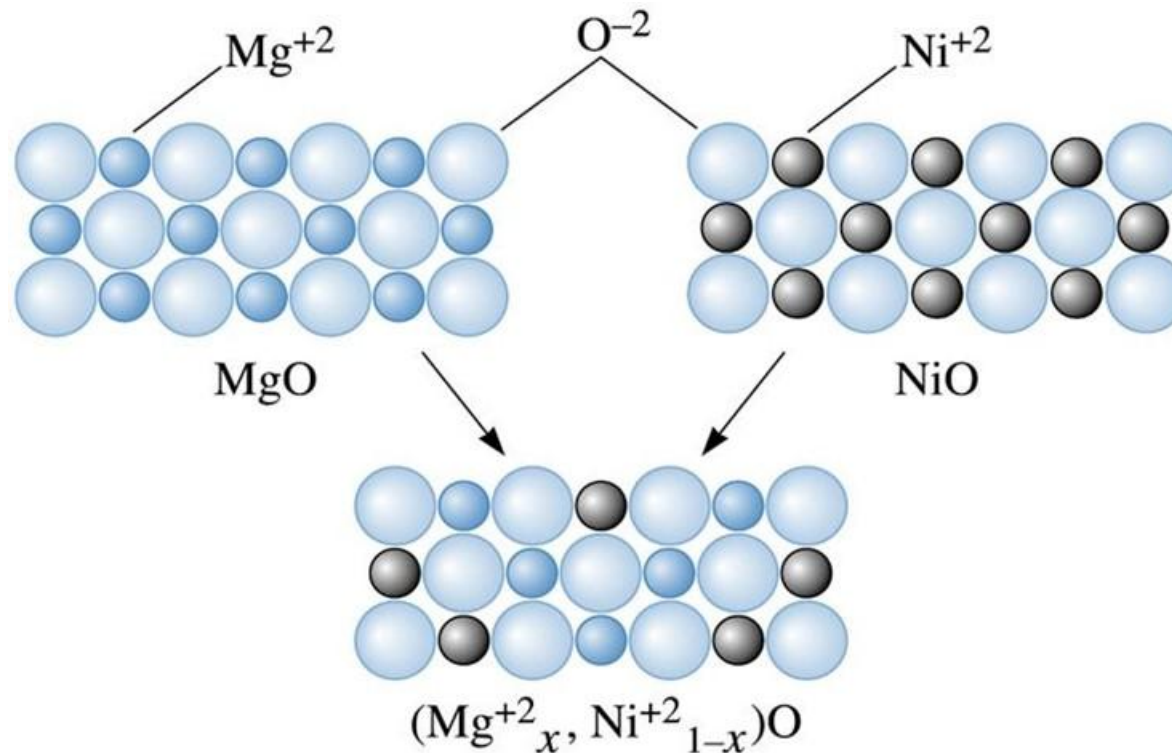
Regra 2: Si e Ge tem mesma estrutura cristalina. favorável $\checkmark$

Regra 3: $E_{Si} = 1.90$ and $E_{Ge} = 2.01$. Assim, $\Delta E\% = 5.8\%$ favorável $\checkmark$

Regra 4: Valência do Si e Ge são ambas = 4. favorável $\checkmark$

É esperado que Si e Ge formem S.S. sob uma ampla faixa de composição.

Este tipo de comportamento pode ser observado em **alguns compostos**, incluindo **materiais cerâmicos**. Os **ions Mg e Ni** possuem o **mesmo tamanho e valência** e conseqüentemente, um **pode substituir o outro na rede cristalina**.



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

MgO e NiO tem estrutura cristalina similar, raio iônico e valência; assim as duas cerâmicas podem formar soluções sólidas.

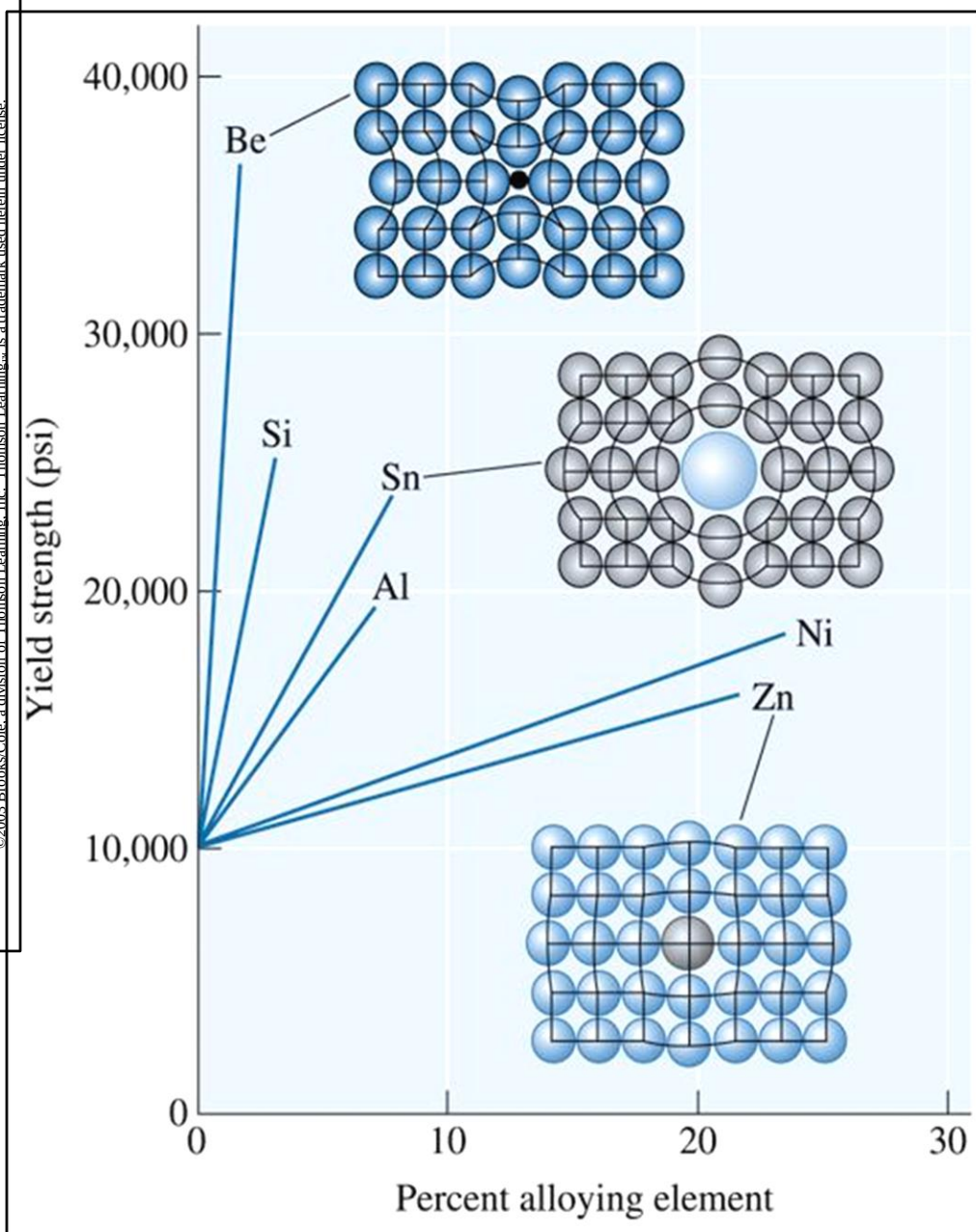
Endurecimento por Solução Sólida



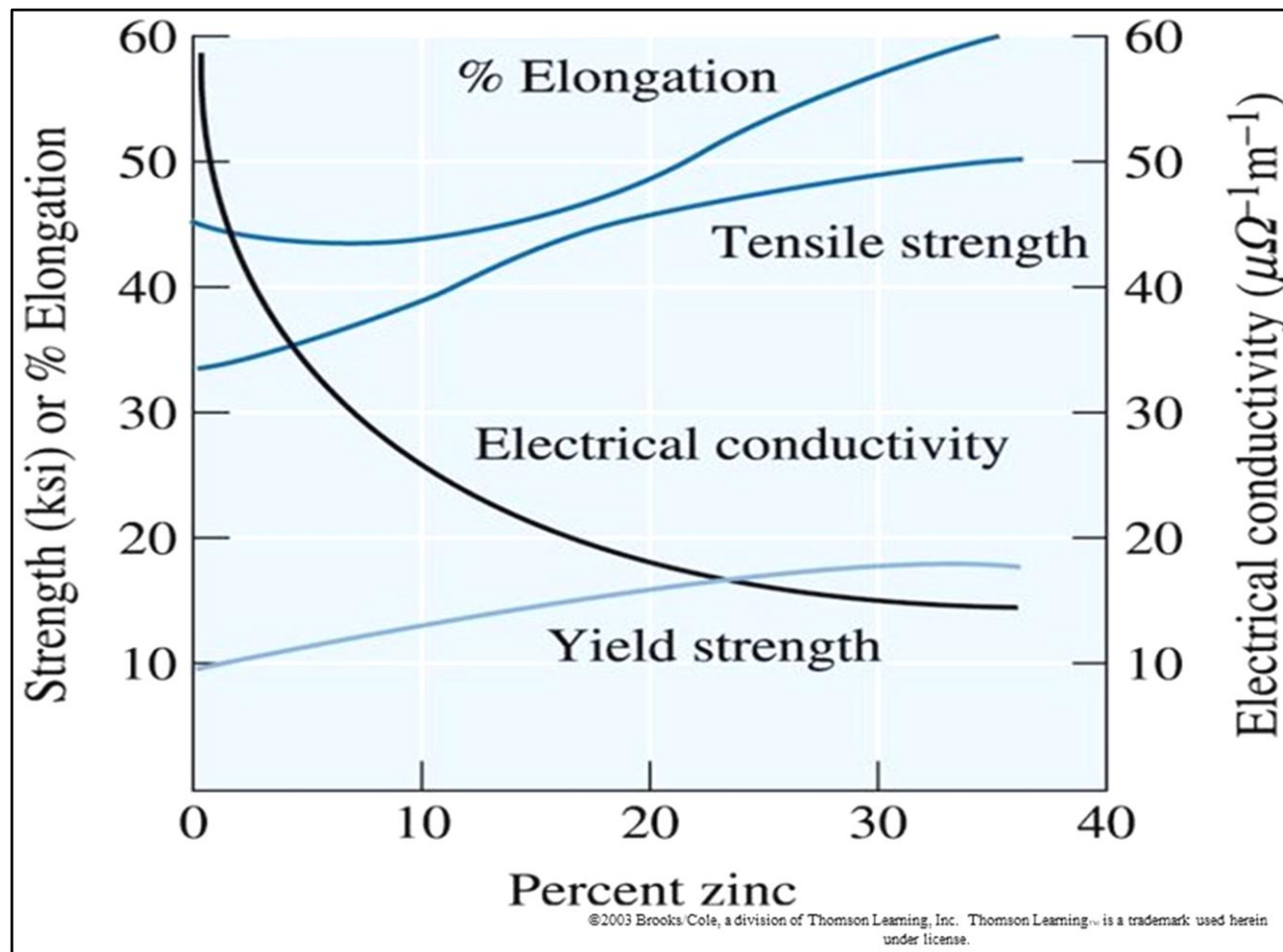
É o aumento de resistência de um material metálico via a formação de uma solução sólida.

O grau de endurecimento por solução sólida depende de dois fatores:

- **Diferença de tamanho** entre os átomos de soluto e solvente. Quanto - maior a diferença, maior é o distúrbio criado no retículo cristalino;
- **Quanto maior a quantidade**, maior é o efeito de endurecimento, até que o **limite de solubilidade** seja atingido.



O efeito de vários elementos de liga sobre o limite de escoamento do Cu. Átomos de Zn e Ni são aproximadamente do mesmo tamanho dos átomos de Cu, mas o Be e o Sn são bem diferentes. Aumentando ambos a diferença entre o tamanho dos átomos e a quantidade, aumenta-se a resistência mecânica por solução sólida.



O efeito da adição de Zn ao Cu sobre as propriedades da solução sólida. O aumento da resistência mecânica por solução sólida permite um aumento no alongamento (nem sempre).

DIAGRAMAS DE FASES

Representações gráficas que mostram, para **diferentes temperaturas, pressões e composições**, quais as **fases presentes** em um material. São **construídos** considerando **condições de equilíbrio (resfriamento lento)** e podem fornecer as seguintes informações:

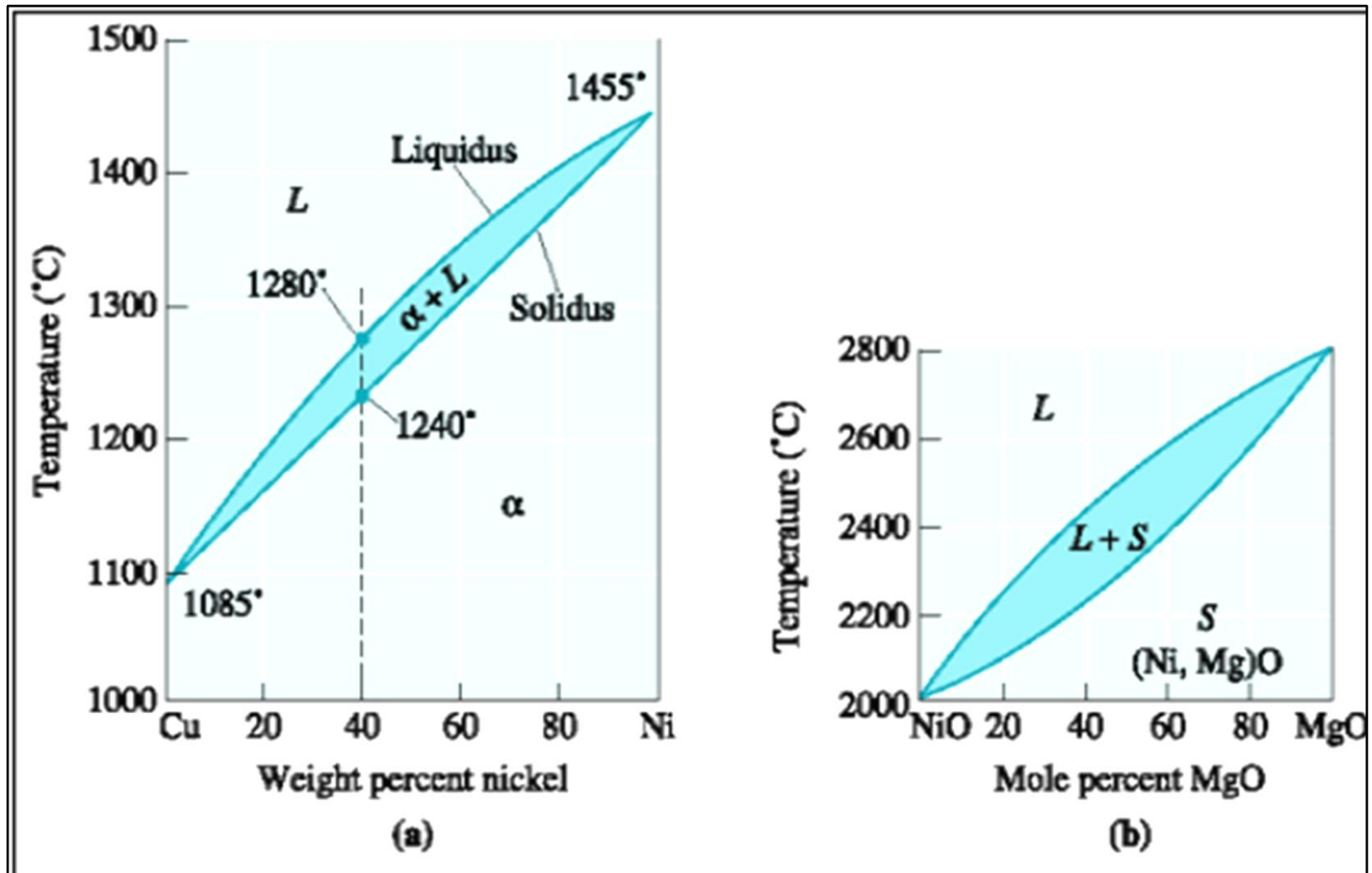
- **Quais as fases presentes** para diferentes **composições e temperaturas**;
- Qual a **solubilidade** de um **elemento em outro**, no estado **sólido**;
- Em que **temperatura** uma liga começa a se **solidificar** e em qual **intervalo de temperatura** isso ocorre;
- A **temperatura** em que as diferentes **fases** começam a **fundir**.

Diagrama de Fases Isomorfos

- **Diagrama de Fases Binário** – Sistema de **dois componentes**;
- **Diagrama de Fases Ternário** – Sistema de **três componentes**;
- **Diagrama de Fases Isomorfo** – Diagrama de fases na qual os componentes apresentam **solubilidade ilimitada no estado sólido**;
- **Temperatura “*Liquidus*”** – Temperatura na qual o **primeiro sólido começa a se formar** durante a solidificação;
- **Temperatura “*Solidus*”** – Temperatura **abaixo da qual o líquido está completamente solidificado**.

Sistemas Binários Isomorfos

- **Isomorfos** porque os dois **elementos** são **completamente solúveis** entre si no estado líquido e/ou sólido;
- Na região acima da “**Linha Líquidus**”, o material está totalmente líquido. A linha contém a mínima temperatura, acima da qual o material está líquido;
- Na região abaixo da “**Linha Sólidus**”, o material está totalmente sólido. Contém a temperatura máxima, abaixo da qual o material está totalmente sólido;
- Na região **entre** as duas linhas coexistem os estados **sólido e líquido. Região “bifásica”**.



(a) Diagrama de fase para os sistemas **Cu-Ni**. A linha tracejada representa a liga **Cu-40% Ni**. (b) **NiO-MgO**.

(fonte: *adaptado de Introduction to Phase Equilibria, by C.G. Bergeron, and S.H. Risbud. Copyright © 1984 American Ceramic Society.*)

Regra das Fases de Gibbs

Em termodinâmica de materiais e diagramas de fase, o **grau de liberdade** (ou **variância**) refere-se ao número de variáveis intensivas independentes (como temperatura, pressão e composição) que podem ser alteradas sem que ocorra uma mudança no número de fases em equilíbrio no sistema.

Regra das Fases de Gibbs



A **Regra de Gibbs** descreve o estado de um material e tem a forma geral:

$$F = C - P + 2$$

- **C** é o número de **componentes**;
- **F** é número de **graus de liberdade**, ou número de variáveis que devem ser fixadas (T, Composição e P) ou que podem variar independentemente sem alterar as fases presentes;
- **P** é a quantidade de **fases** presentes.

Regra das Fases de Gibbs

- Se $F=0$, o sistema é **invariante** (ponto invariante, como em pontos triplos ou eutéticos), onde nenhuma variável pode ser alterada sem perder uma fase;
- Se $F=1$, o sistema é **monovariante**, permitindo a variação de uma variável (ex.: ao longo de uma linha em um diagrama de fase binário);
- Se $F=2$, o sistema é **bivariante**, e duas variáveis podem ser alteradas (ex.: em regiões de fase única).

Regra das Fases de Gibbs



Considere um sistema que contém água líquida, vapor de água e gelo, todos em equilíbrio. Nesse caso:

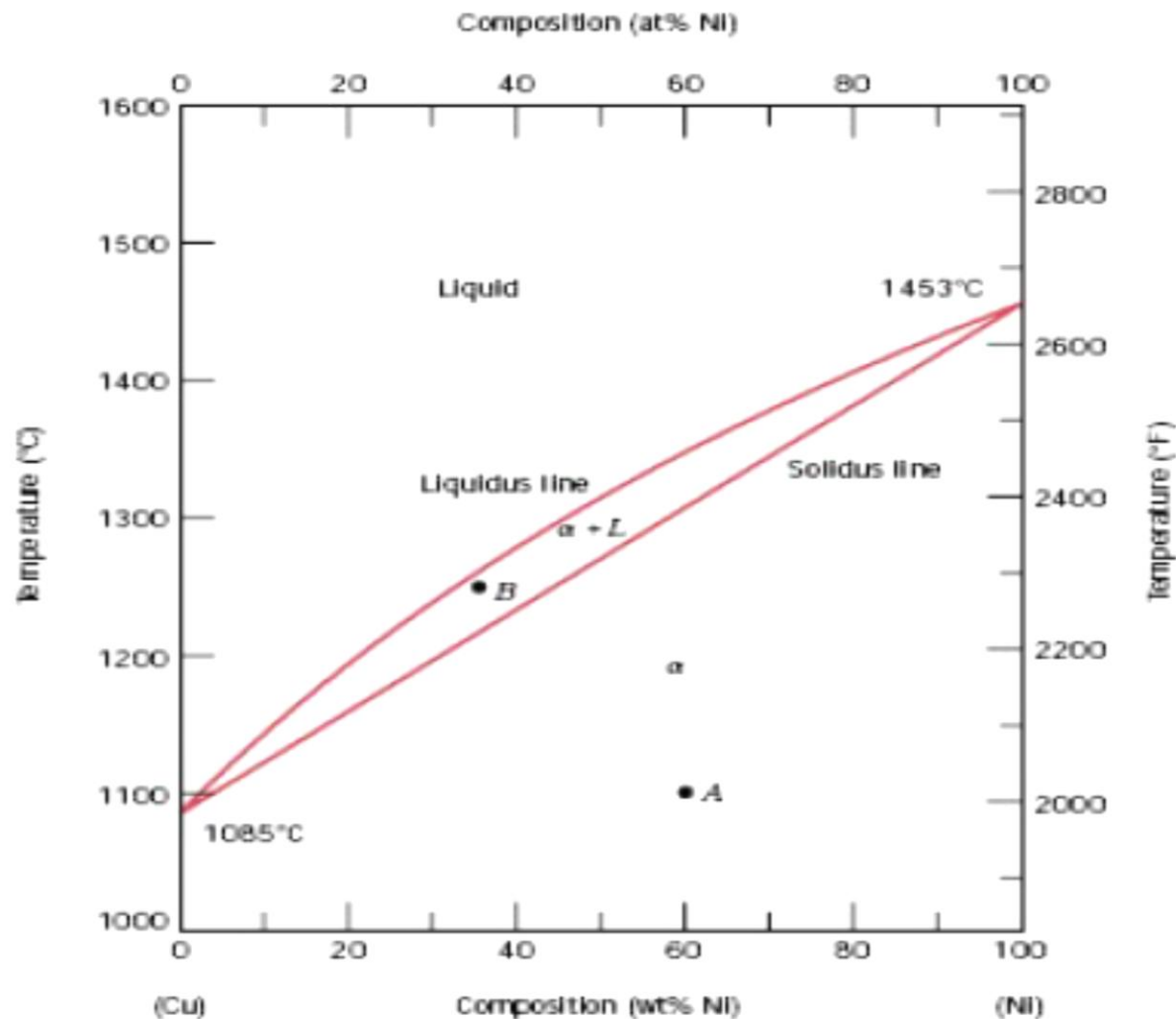
- Número de Componentes (C): O sistema tem apenas um componente: a água (**H₂O**). Portanto, **C = 1**.
- Número de Fases (P): O sistema possui três fases: **líquida, vapor e sólida (gelo)**. Portanto, **P = 3**.
- Número de Graus de Liberdade (F): Aplicando a Regra de Gibbs:

$$F = C - P + 2$$

$$F = 1 - 3 + 2$$

$$F = 0$$

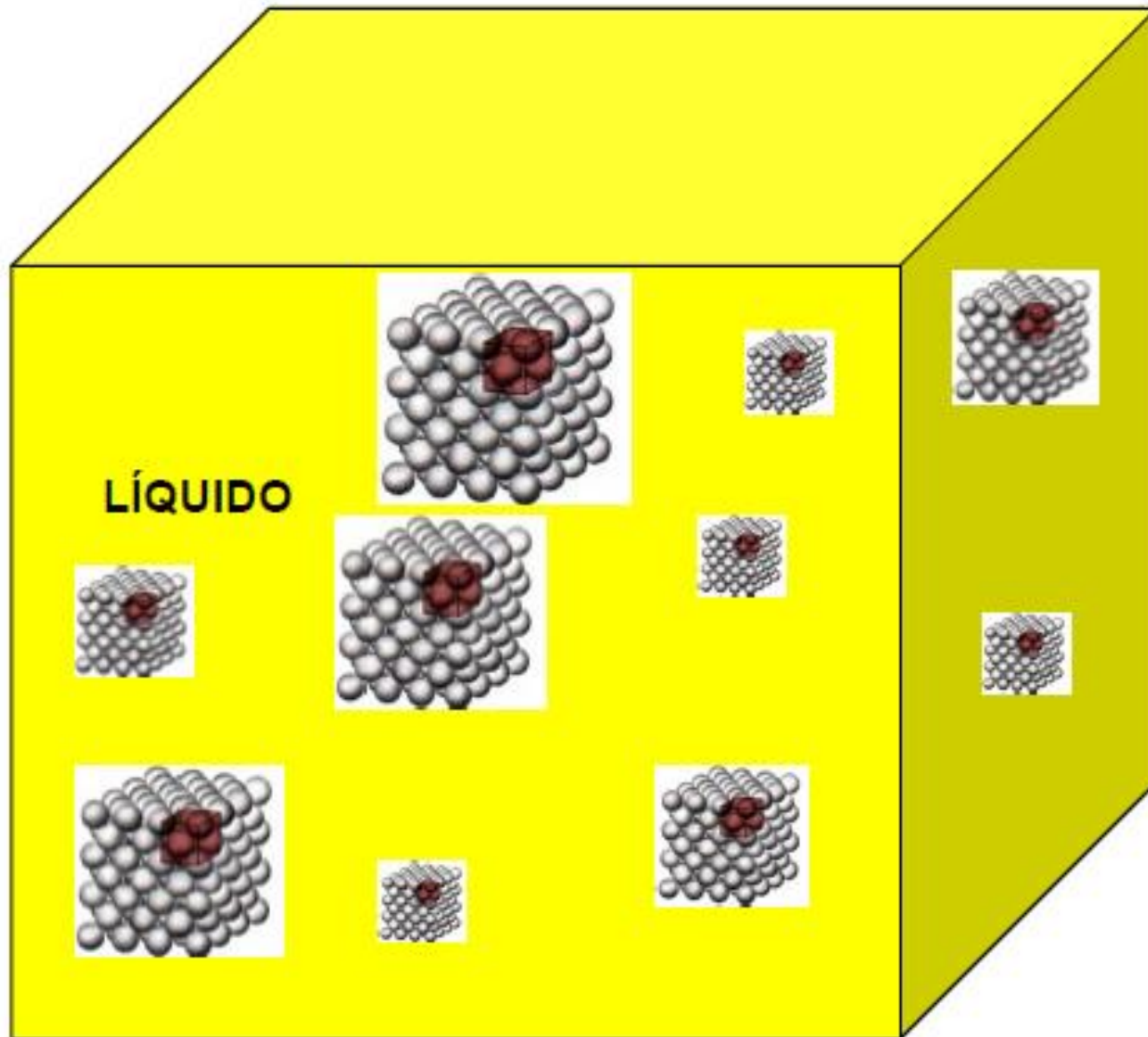
Sistemas Binários Isomorfos

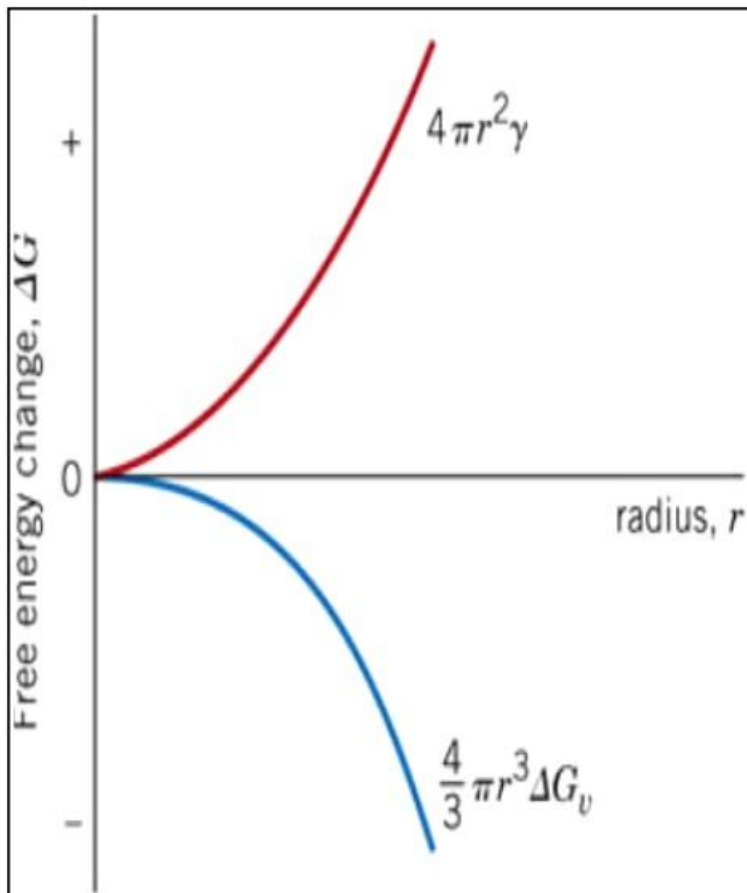


SOLIDIFICAÇÃO DE UMA LIGA (SOLUÇÃO SÓLIDA)

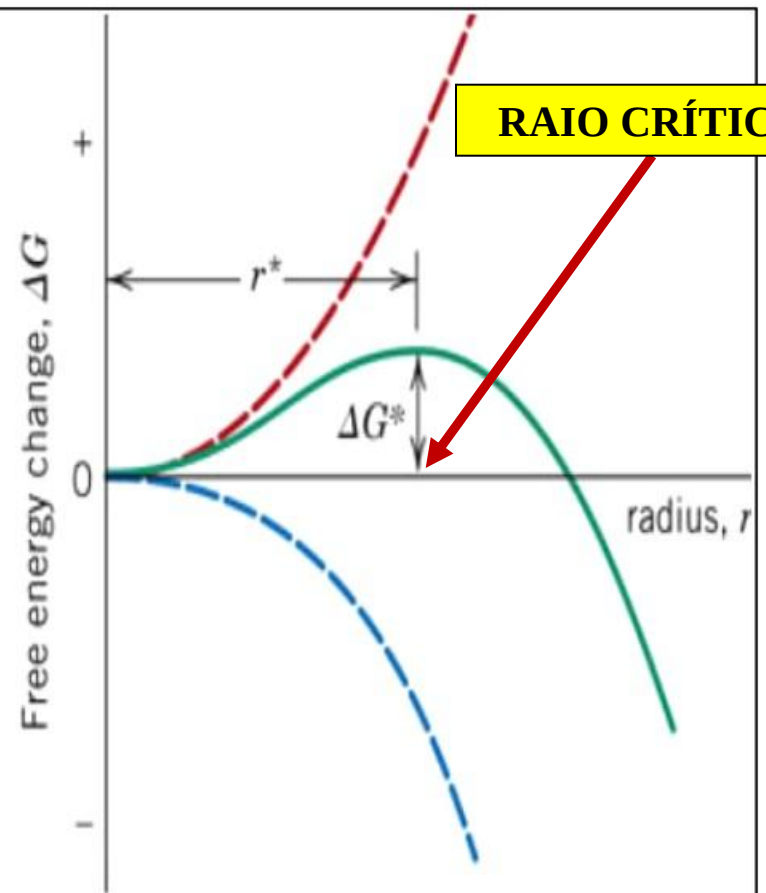
Tomando como exemplo a solidificação de uma liga binária isomorfa **Cu-40%Ni**, ocorre a **fusão (líquido)** e posterior **solidificação**.

- Durante a solidificação deve ocorrer **nucleação (embriões)** e **crescimento do grão**;
- O resfriamento deve ser **lento: difusão para formação da liga** ;
- **Na prática**, as velocidades envolvidas **são maiores** e ocorrem algumas modificações nos diagramas.





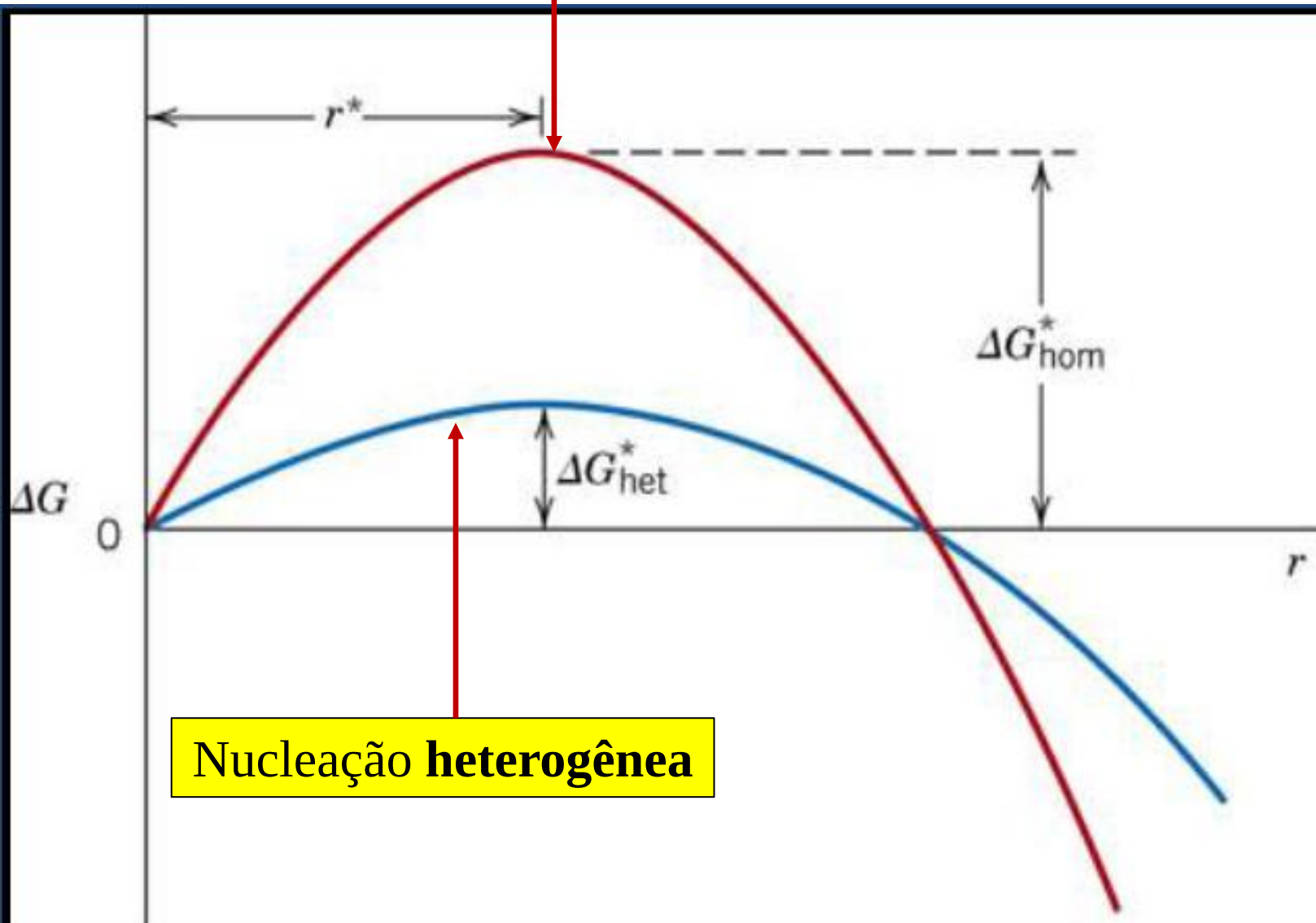
(a)

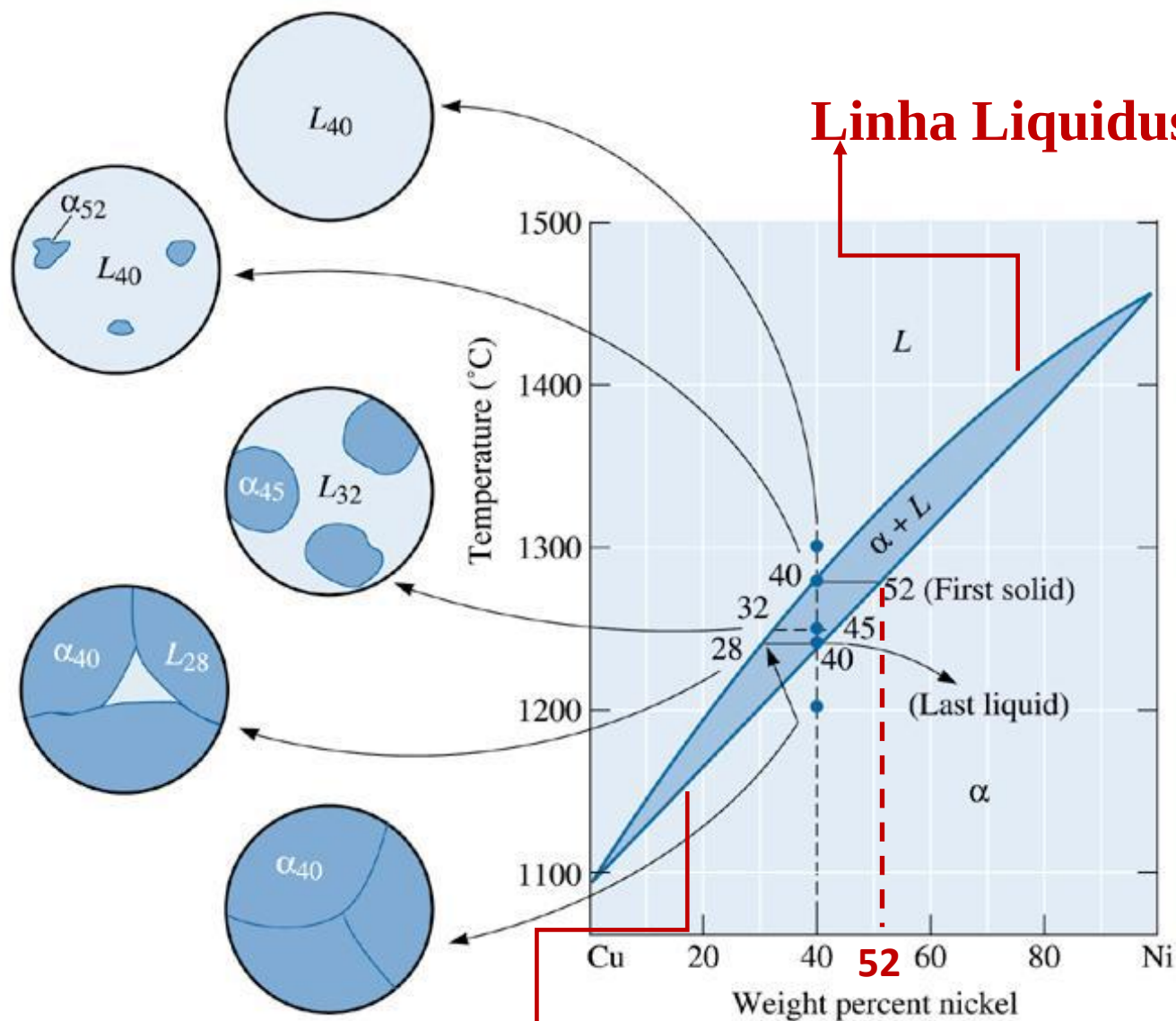


(b)

$$\Delta G = \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \gamma$$

Nucleação homogênea





Linha Liquidus

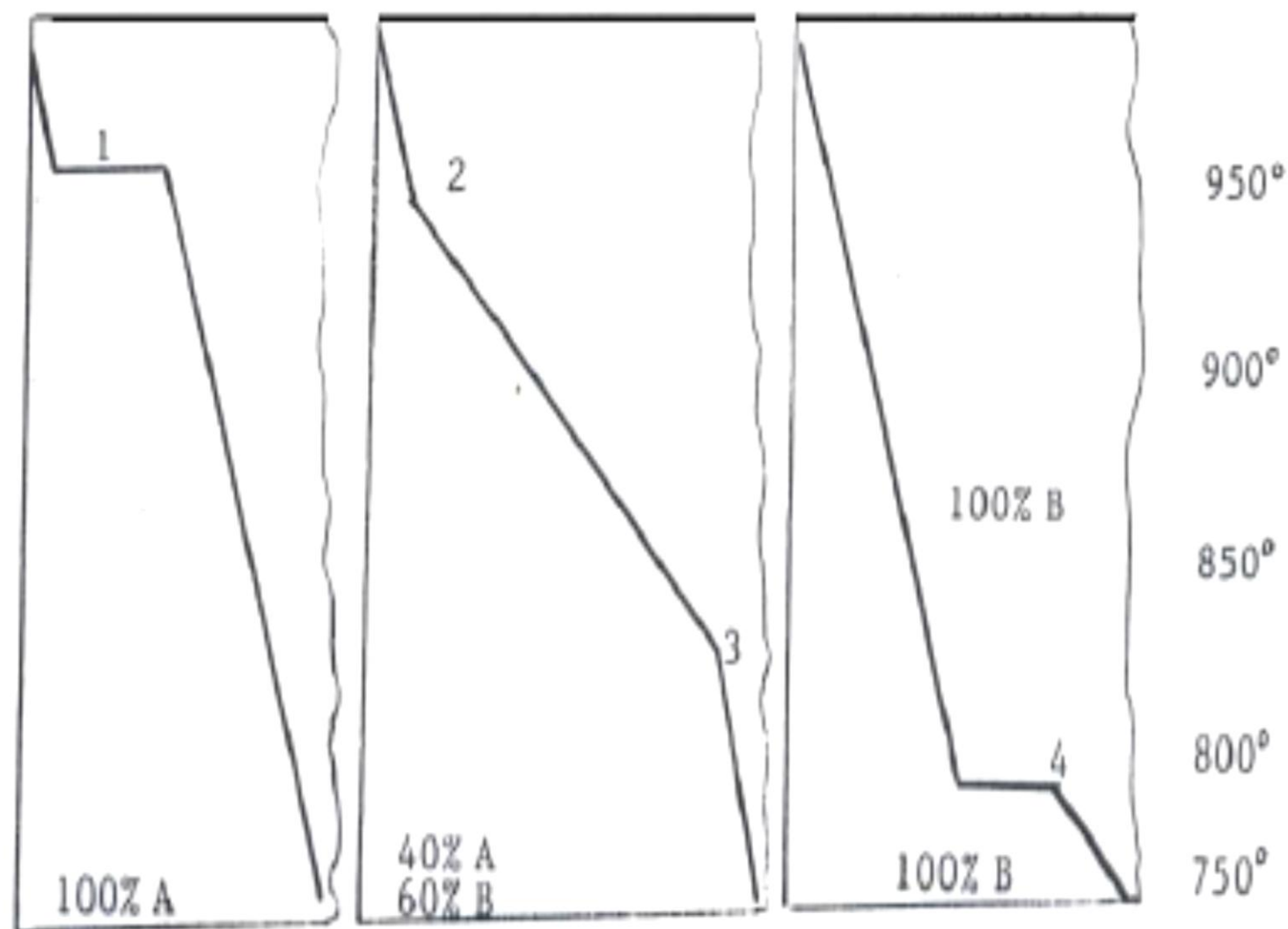
Linha Solidus

Estrutura da liga **Cu-40% Ni** durante **solidificação** em equilíbrio. Os **átomos** de **Ni e Cu** devem **difundir (Lei de Fick-da maior concentração para a menor)** durante o resfriamento de maneira a satisfazer a **formação da fase sólida** e produzir uma **estrutura de equilíbrio, uniforme.**

CONSTRUÇÃO DOS DIAGRAMAS DE FASES

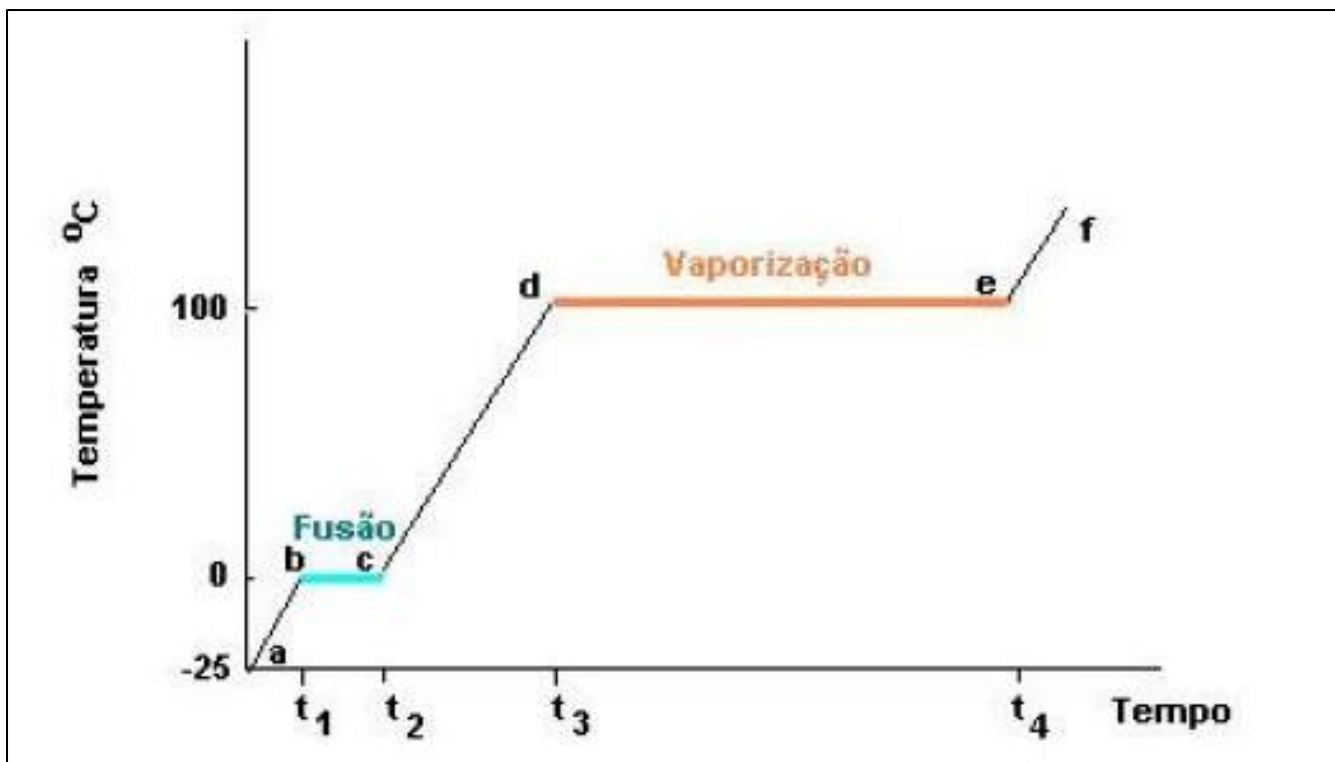
Por meio do **resfriamento** de ligas com teores diferentes, a **variação da temperatura** é medida **em função do tempo**, com os pontos de **inflexão** (ai está ocorrendo a **transformação de fase**). Quando a **temperatura não varia**, esse ponto é marcado e a **reação** é chamada de **invariante** (também ocorre **transformação de fase**). Na **prática**, a medida é feita com **termopares**. Existe uma **relação** entre **temperatura**, **diferença de potencial** (Seebeck) e **intensidade de corrente elétrica** (Peltier/Thompson).

TEMPERATURA



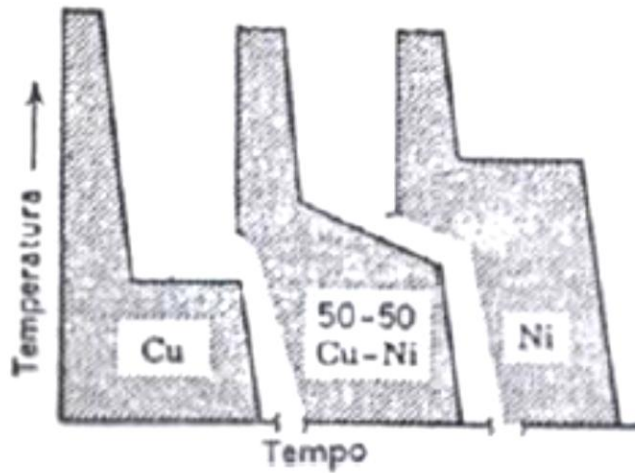
TEMPO

RECORDAÇÃO DA QUÍMICA

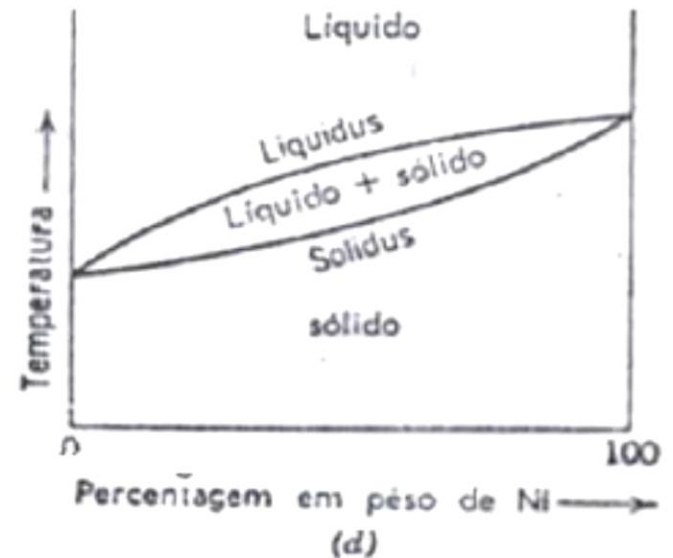
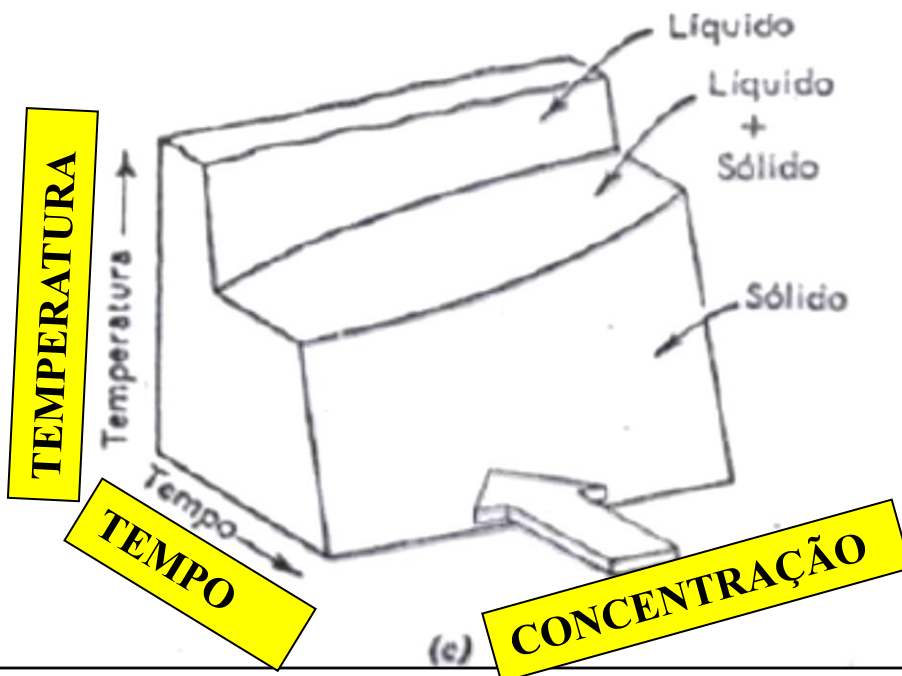
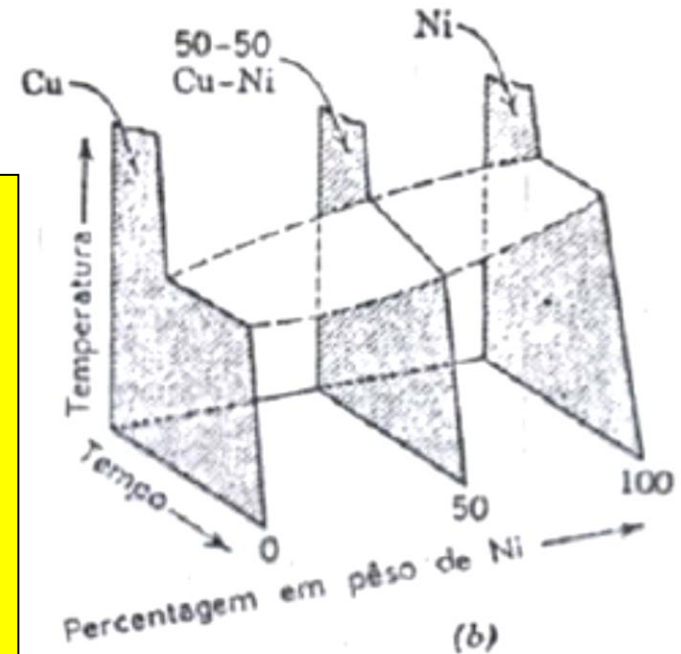


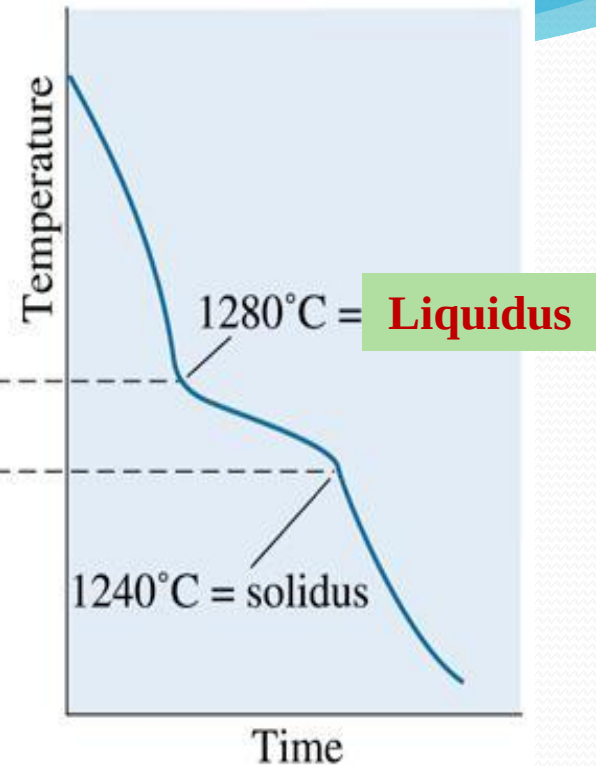
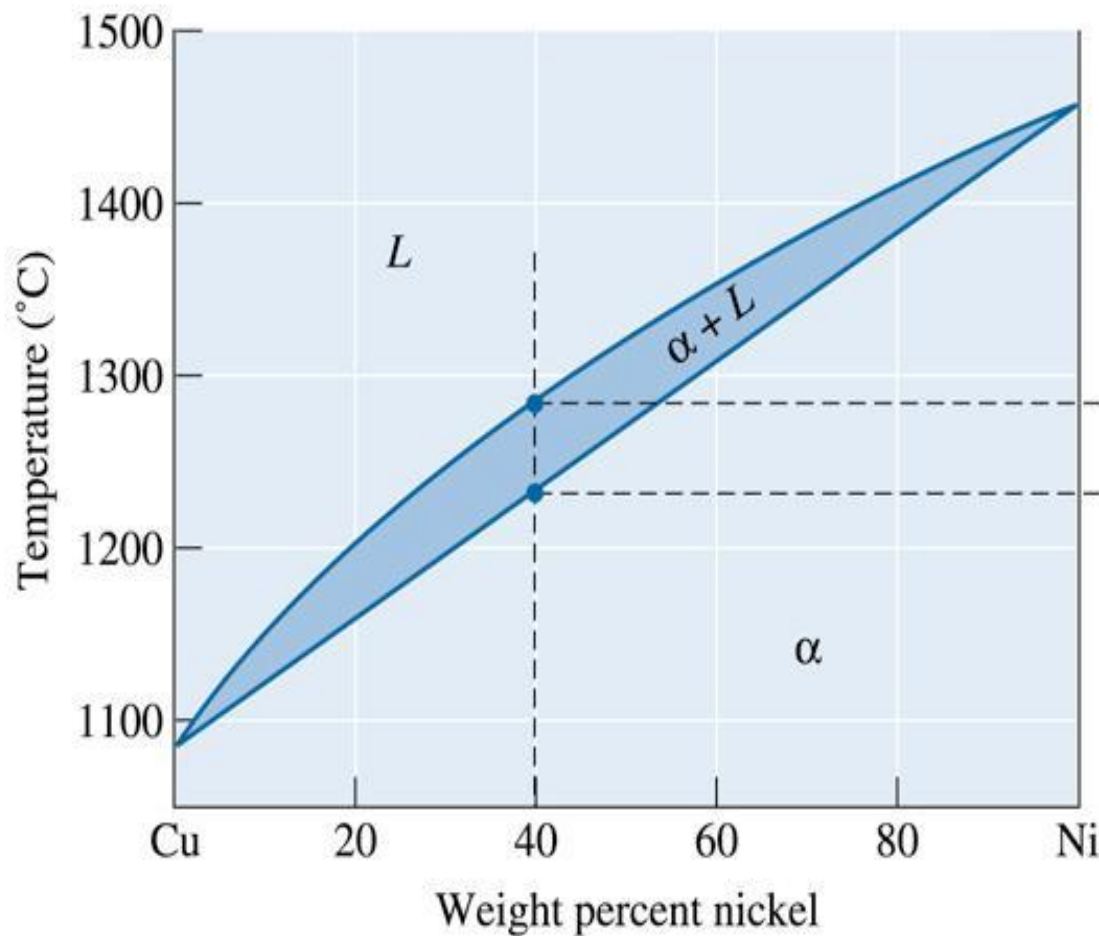
Os pontos nos quais não há alteração da temperatura, ocorre a mudança de fase de uma substância pura: calor latente, absorvido para a transformação de fase e não para mudança de temperatura (entalpia de Formação).

Variando o teor de soluto: Ni



Marcando os pontos de inflexão: constroi o diagrama de fases





Curva de resfriamento para um diagrama **isomorfo**. As **taxas de resfriamento** devem ser **lentas** para permitir o **equilíbrio térmico**. A **mudança na inclinação** das curvas (**pontos de inflexão**) indicam as temperaturas **liquidus e solidus** para a liga **Cu-40% Ni**.

A FÍSICA DOS TERMOPARES



Deve-se a 3 físicos:

- **Seebeck (1822);**
- **Peltier (1834);**
- **Thomson (Lord Kelvin, 1851).**

Peltier's heat rate for the electric current I is:

$$dQ/dt = (\Pi_A - \Pi_B)I.$$

Peltier's coefficients calculated by the model are:

$$\Pi_A = kT \ln(n_L) \quad \Pi_B = kT \ln(n_R).$$

Seebeck's EMF of two junctions at different temperatures T_H and T_C is: $V = -S(T_H - T_C)$.

Seebeck's coefficient calculated by the model is:

$$S = k \ln(n_L/n_R).$$

Thomson's heat rate for the current density J is:

$$dq/dt = -K J \Delta T.$$

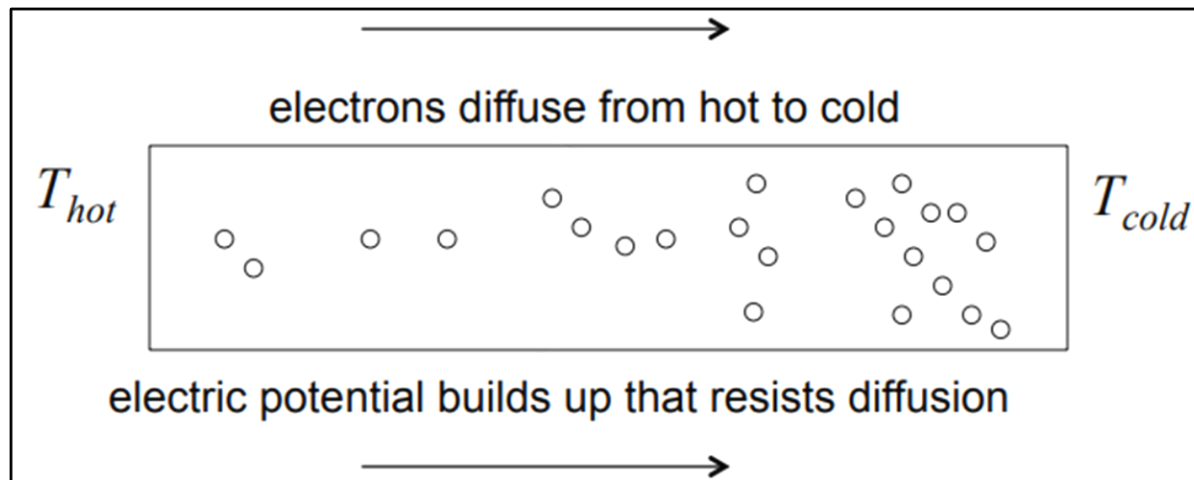
Thomson's coefficient calculated by the model is:

$$K = (3/2)k.$$

O efeito Seebeck e Peltier são processos termodinamicamente reversíveis.

A FÍSICA DOS TERMOPARES

Descoberto acidentalmente pelo físico alemão **Thomas Johann Seebeck, 1822** : dois metais diferentes **conectados**, em que as junções se encontravam em **temperaturas diferentes**, **defletiam** uma agulha magnética (**bússola**): **campo induzido** por uma **corrente (DC)-feixe de elétrons-** da **extremidade mais quente para a mais fria**, gerada por **ddp** devido à **diferença de temperatura** (**Efeito Seebeck** ou **efeito termoelétrico**).





O físico francês, **Jean Charles Athanase Peltier**, em 1834, descobriu que quando uma **corrente** passa por uma junta, ela gera **calor** que é **absorvido** pela outra junta;

O físico inglês **William Thomson (Lord Kelvin)**, em 1851, percebeu que o **coeficiente de Seebeck** não é constante em função da temperatura, **i.e.**, um gradiente **espacial de temperatura** leva a um **gradiente do coeficiente de Seebeck**. Esta teoria prevê uma taxa de **geração de calor por unidade de volume**.

TIPOS DE TERMOPARES

Table 8-1 Standard thermocouples.

ANSI-ISA Thermocouple Designation	Positive Component	Negative Component	Nominal Temperature Range, ^a °C
Type S	Pt ₉₀ Rh ₁₀ (SP) ^b	Pt (SN)	−50 to 1767
Type R	Pt ₈₇ Rh ₁₃ (RP)	Pt (RN)	−50 to 1767
Type B	Pt ₇₀ Rh ₃₀ (BP)	Pt ₉₄ Rh ₆ (BN)	0 to 1820
Type J	"iron" (JP)	constantan ^c (JN)	−210 to 1200
Type K	<i>nickel</i> -Cr alloy (KP)	<i>nickel</i> -Al alloy (KN)	−270 to 1372
Type E	<i>nickel</i> -Cr alloy (EP)	constantan (EN)	−270 to 1000
Type T	copper (TP) ^d	constantan (TN)	−270 to 400
Type N	<i>nickel</i> -Cr-Si alloy (NP)	<i>nickel</i> -Si (NN)	−270 to 1260 ^e

^aTaken from Ref 8. These are not the ranges recommended by the ANSI/ISA specifications.

^bANSI-ISA Thermoelement (thermocouple component) designation.

^cConstantan is a generic name for *copper*-nickel alloys.

^dUsually electrolytic, tough-pitch copper.

^eTaken from Ref 16.

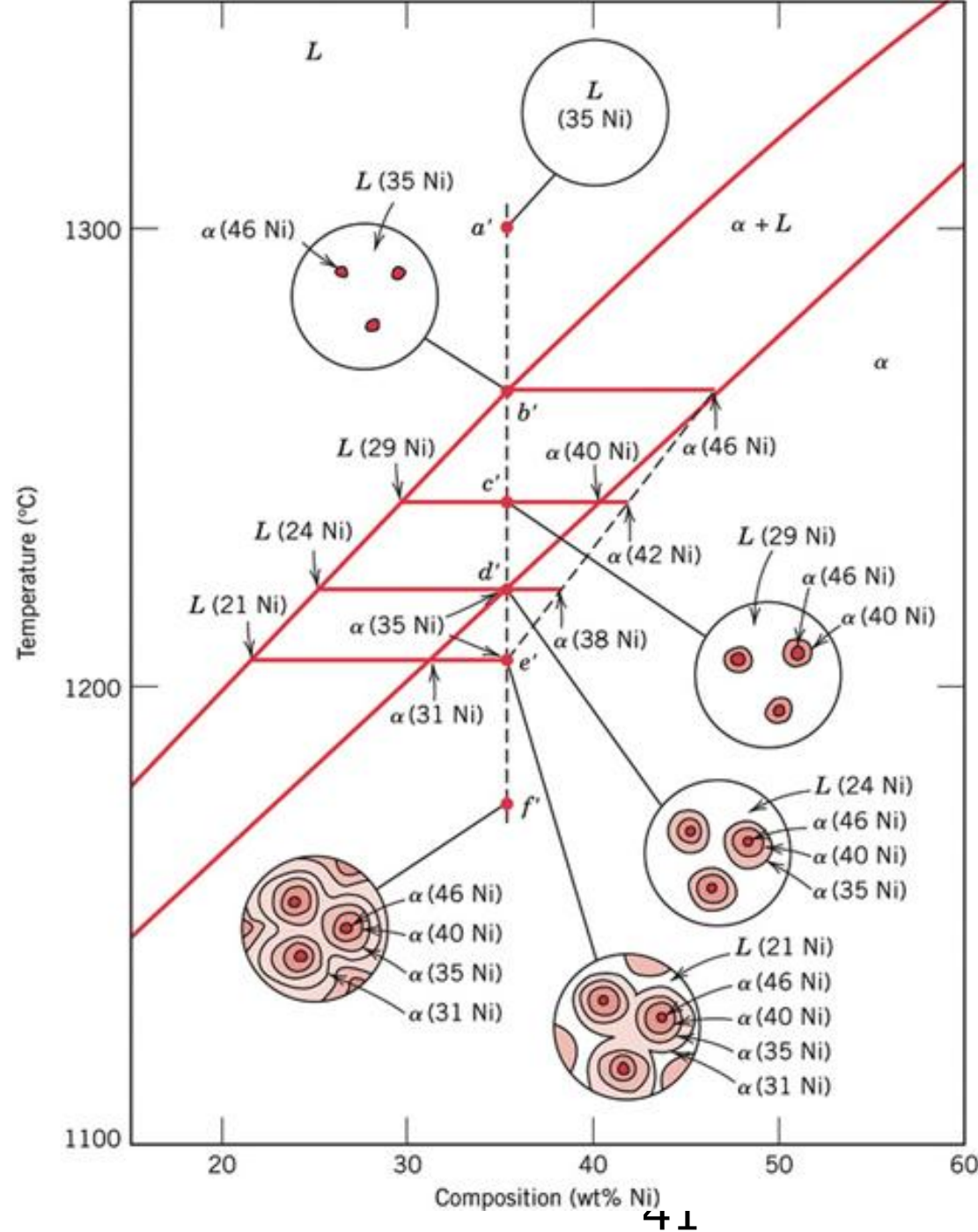
Para cada tipo de termopar existem tabelas com a relação entre tensão/corrente e temperatura

SOLIDIFICAÇÃO FORA DO EQUILÍBRIO

Alguns **fenômenos** podem ocorrer durante a solidificação com **maiores velocidades** (fora do equilíbrio):

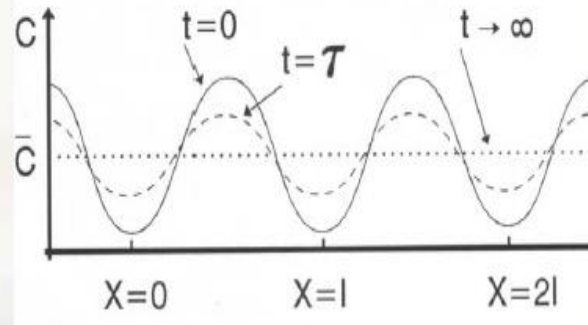
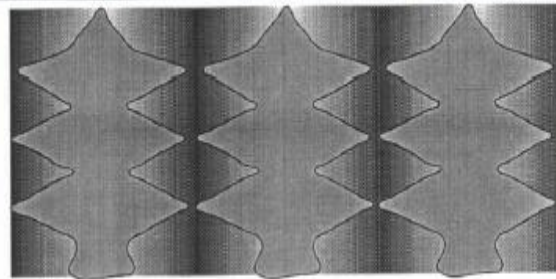
- **Segregação:** heterogeneidade de composição no material, devido ao tempo insuficiente para difusão;
- **Microsegregação** ou **segregação dendrítica/interdendrítica:** áreas microscópicas do material com diferentes composições. Quando acontece entre as “**dendritas**” (**grego-dendro:árvore**): segregação dendrítica;
- **Macrosegregação:** heterogeneidade de composição em grandes áreas do material

Microestruturas formadas durante o resfriamento da liga 35%Ni-65%Cu, **fora do equilíbrio**. Com velocidade de resfriamento maior, o **tempo para difusão do Ni, do sólido para o líquido é insuficiente: segregação**. Isto significa que as **linhas do diagrama, variam com a velocidade**.



- SE EXISTE UMA VARIAÇÃO SENOIDAL DE SOLUTO, ONDE A CONCENTRAÇÃO MÉDIA É $\bar{C}$, HAVERÁ MOVIMENTO DE ÁTOMOS DE REGIÃO RICAS EM SOLUTO PARA POBRES EM SOLUTO.

DENDRITAS MICROSCÓPIO ÓTICO



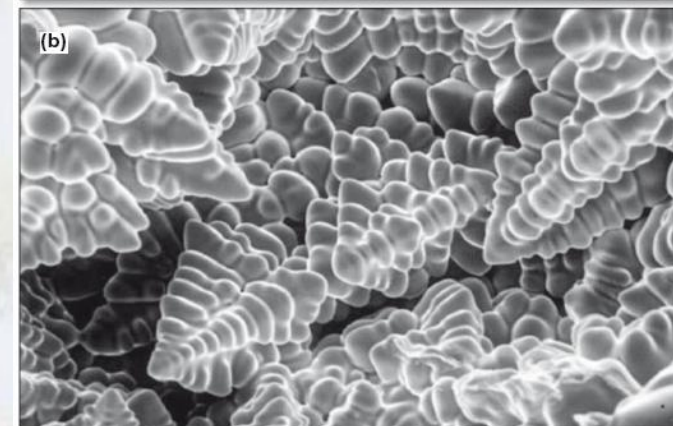
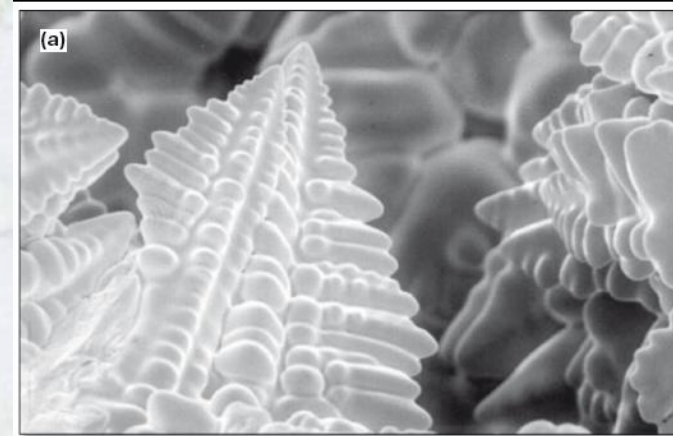
SOLUÇÃO DA LEI DE FICK

$$C(x,t) = \bar{C} + \beta \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right) \cdot e^{-\frac{Dt\pi^2}{l^2}}$$

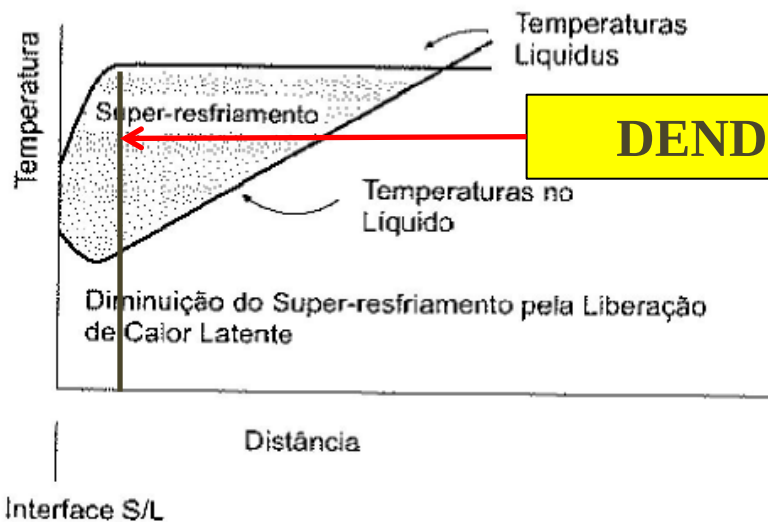
TRATAMENTO TÉRMICO DE HOMOGENEIZAÇÃO

**DENDRITAS (IMAGEM DE
MEV)-FLUTUAÇÃO
SENOIDAL DE
CONCENTRAÇÃO
INTERDENDRÍTICA.**

**MEV: Microscópio Eletrônico de
Varredura**



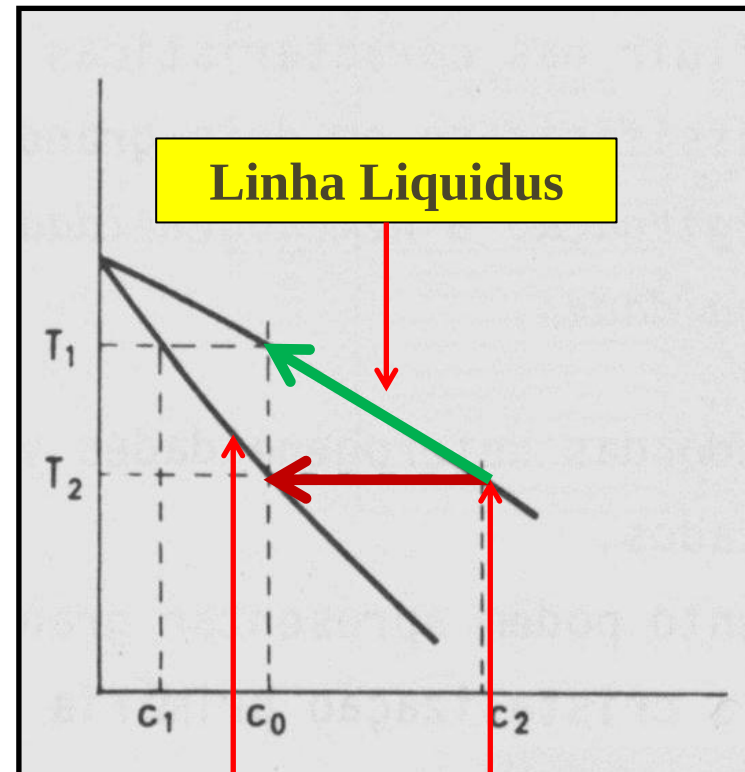
SUPER-RESFRIAMENTO CONSTITUCIONAL



Varição do super-resfriamento no líquido à frente da interface sólido/líquido.

SUPER-RESFRIAMENTO PROVOCADO PELA CONSTITUIÇÃO DO LÍQUIDO

(Fonte: Amaury Garcia - solidificação)



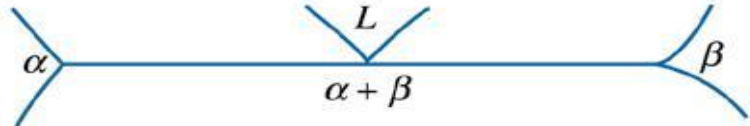
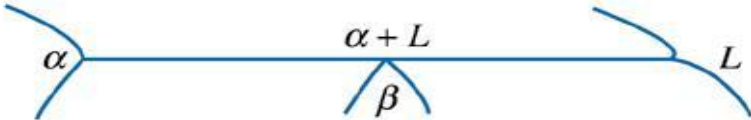
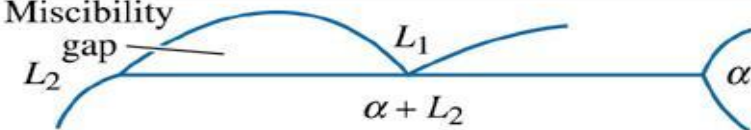
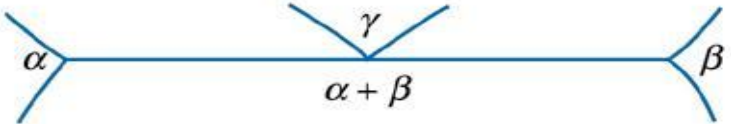
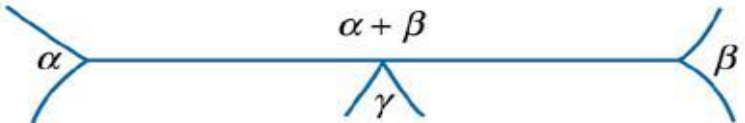
Linha Solidus

Redistribuição de soluto: redução de concentração do líquido à frente da interface de c_2 para c_0 e aumento da temperatura na linha *liquidus*, de T_2 para T_1 → Realidade: líquido → T mais baixa



REAÇÕES INVARIANTES

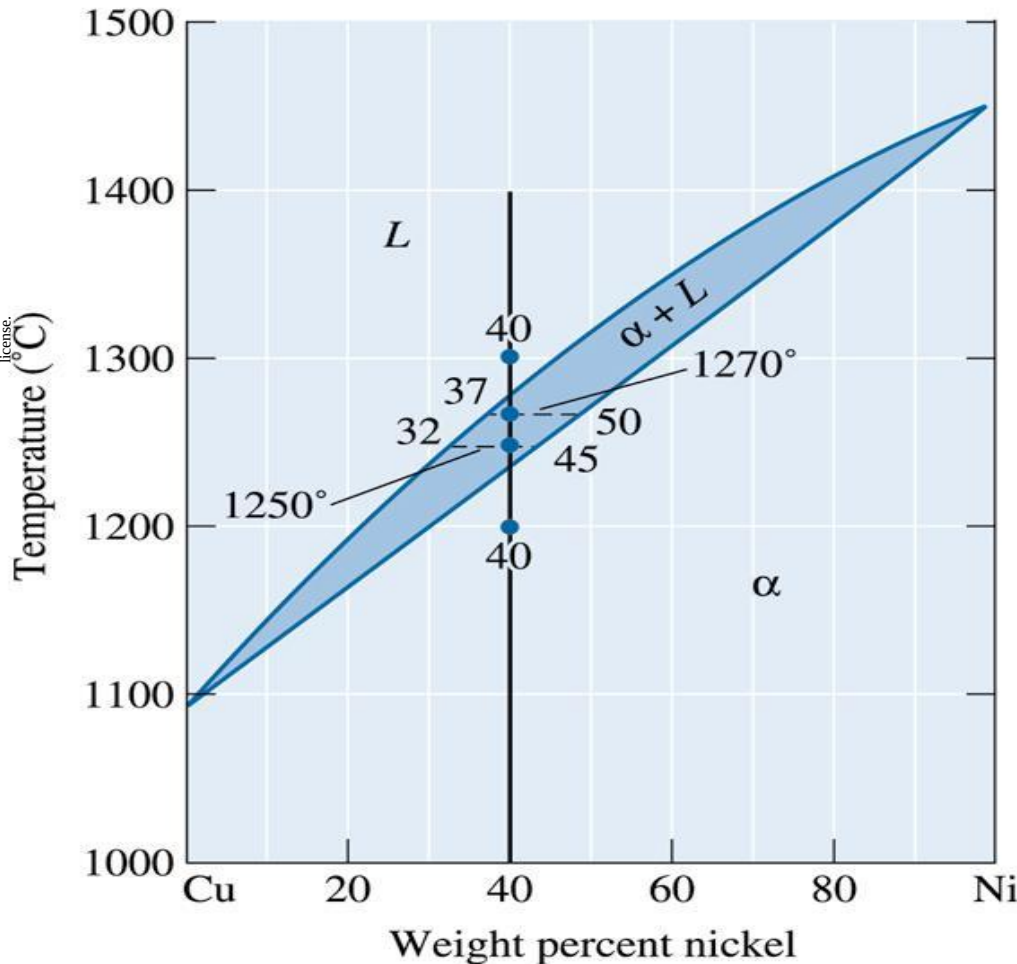
As cinco reações mais importantes, envolvendo três-fases, em diagramas binários.

Eutectic	$L \rightarrow \alpha + \beta$	
Peritectic	$\alpha + L \rightarrow \beta$	
Monotectic	$L_1 \rightarrow L_2 + \alpha$	
Eutectoid	$\gamma \rightarrow \alpha + \beta$	
Peritectoid	$\alpha + \beta \rightarrow \gamma$	

ANÁLISE DOS DIAGRAMAS DE FASES COMPOSIÇÃO E PERCENTUAL DAS FASES

Composição de fases em um sistema Cu-Ni

Determine a composição de cada fase na liga Cu-40% Ni nas temperaturas de 1300°C, 1270°C, 1250°C e 1200°C.



composição de fases para a liga Cu-40% Ni em diferentes temperaturas.

SOLUÇÃO:

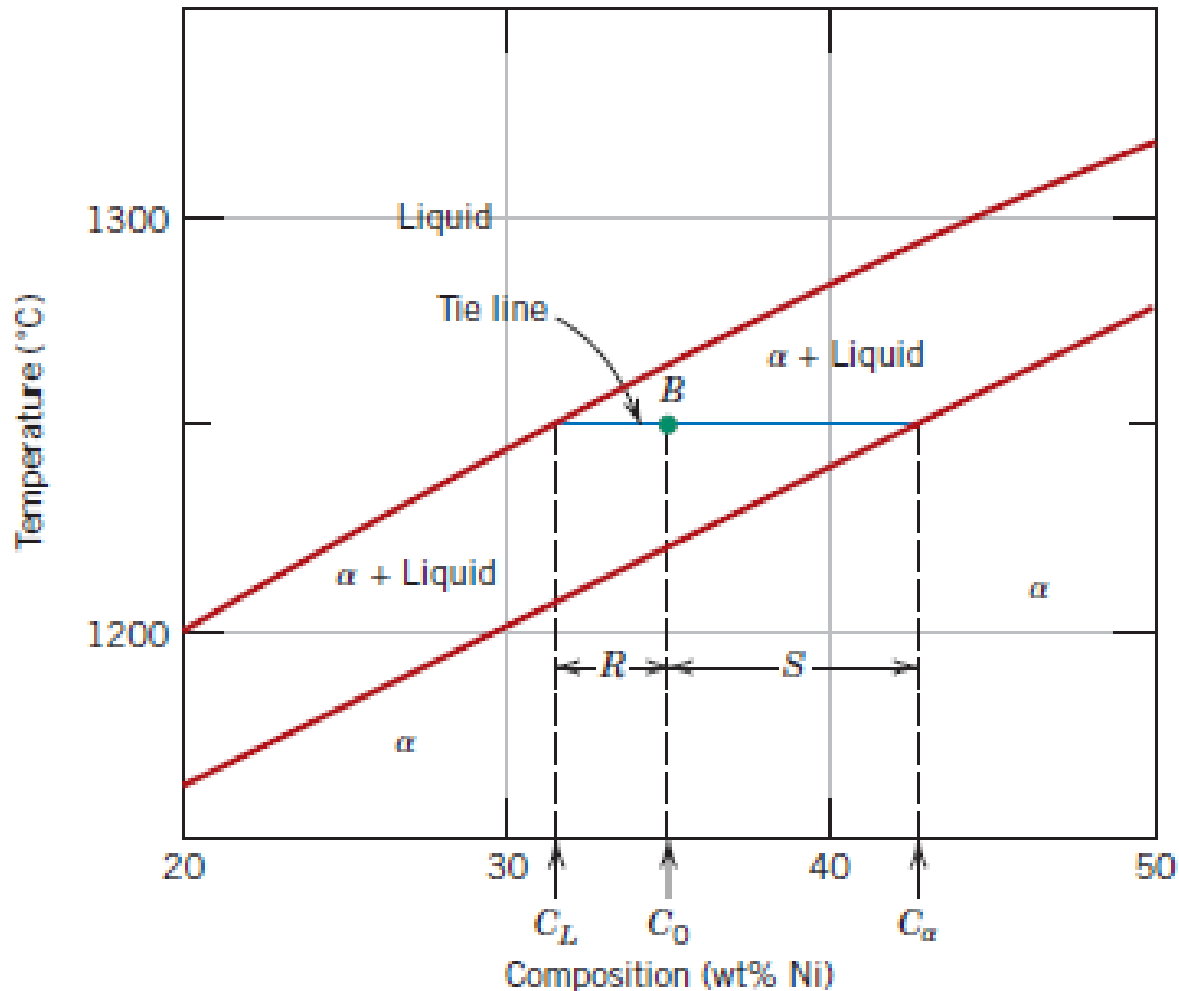
A linha vertical em 40% Ni representa a composição média da liga:

- **1300°C**: somente o líquido está presente. O líquido deve conter **40% Ni**, a composição média da liga.
- **1270°C**: **2 fases** estão presentes. **O líquido** contém **37% Ni** e o **sólido** contém **50% Ni**.
- **1250°C**: novamente **2 fases** estão presentes. Nesta temperatura o **líquido** contém **32% Ni** e o **sólido** contém **45% Ni**.
- **1200°C**: somente **um sólido (α)** está presente, assim ele deve conter **40% Ni**.

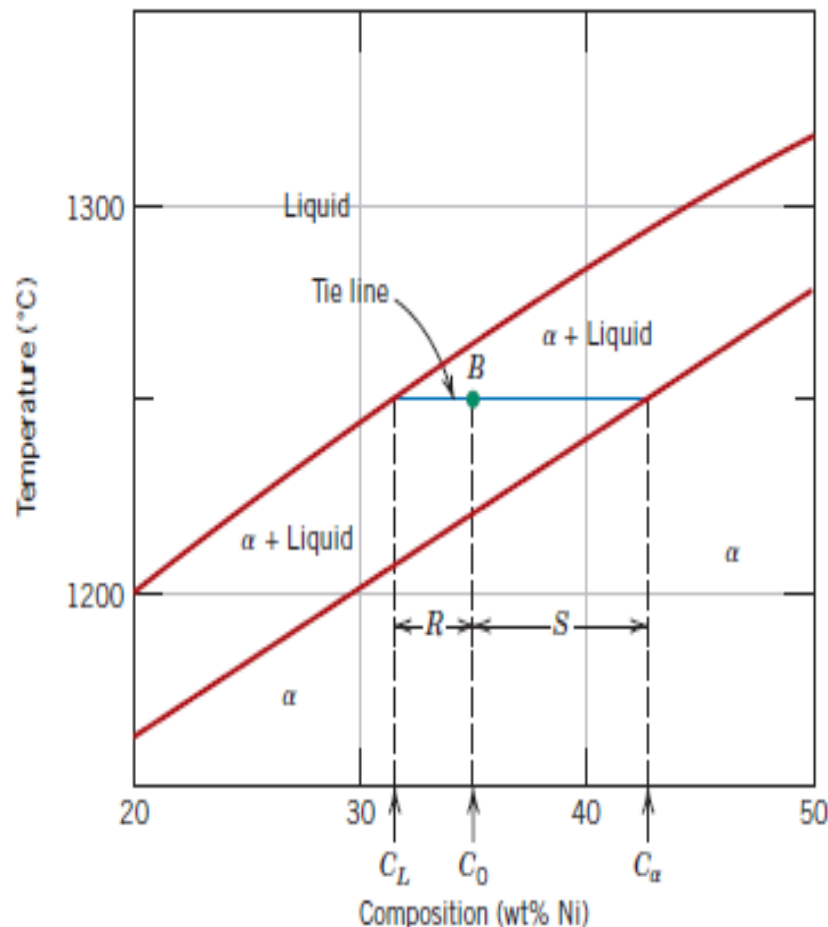
REGRA DA ALAVANCA



Utilizada para a determinação das quantidades das fases presentes



- Para saber a concentração de cada fase no ponto B é preciso traçar um linha reta até as linhas *liquidus* e *solidus*, e da extremidade destes pontos, linhas perpendiculares até o eixo da composição.

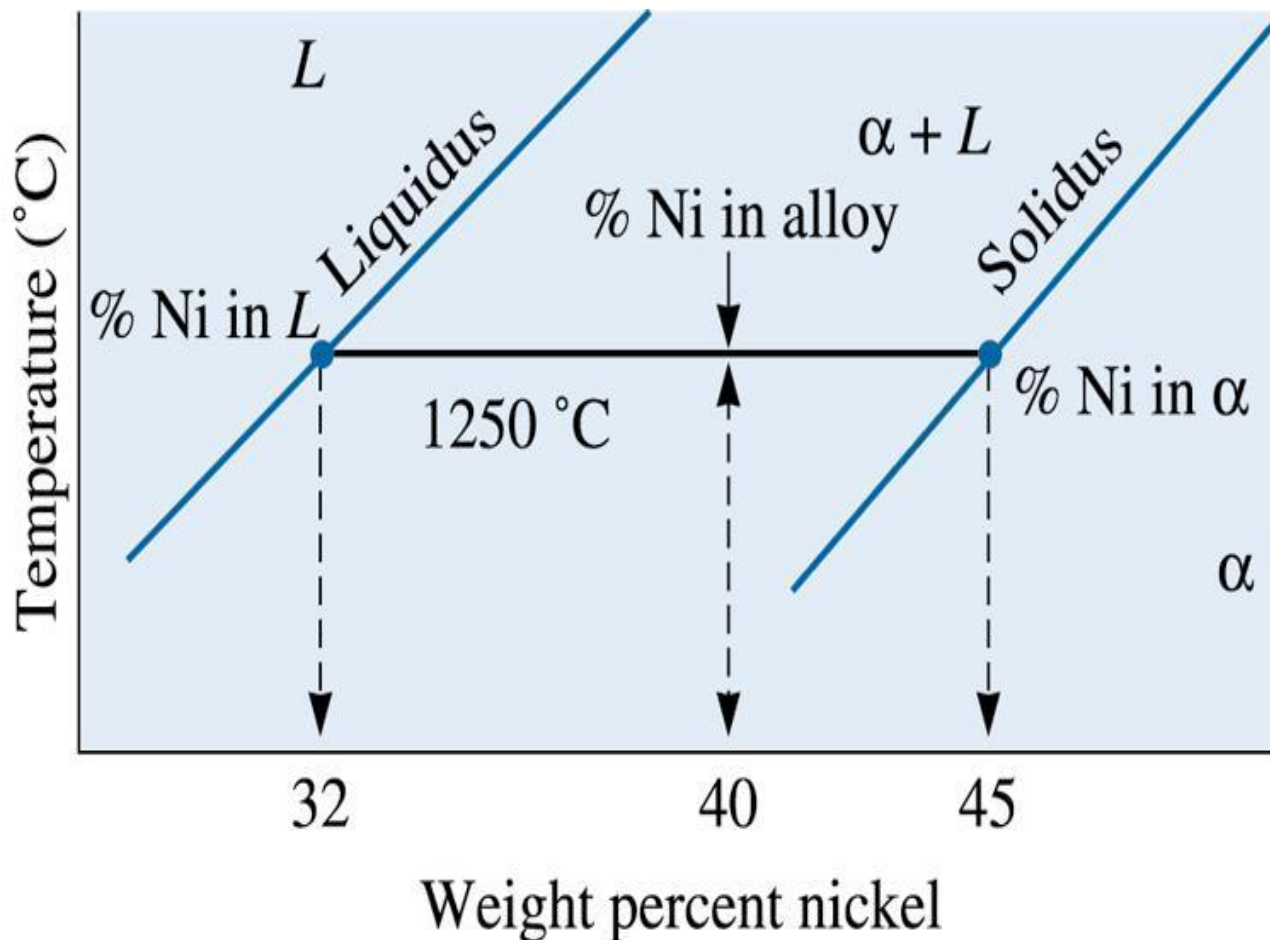


$$\alpha = \frac{C_o - C_l}{C_s - C_l} \times 100 = \frac{R}{R + S} \times 100$$

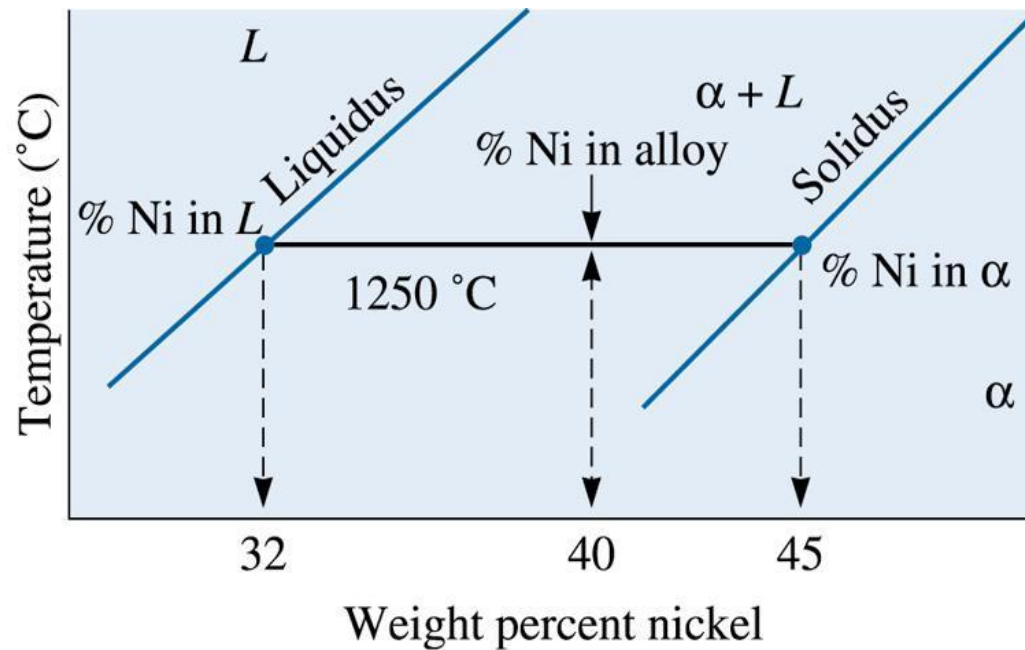
$$L = \frac{C_s - C_o}{C_s - C_l} \times 100 = \frac{S}{R + S} \times 100$$

Aplicação da regra da alavanca

Calcule a quantidade de α e de L em 1250°C na liga Cu-40% Ni como mostrado na figura.



Reta em 1250°C para encontrar a quantidade de cada fase.

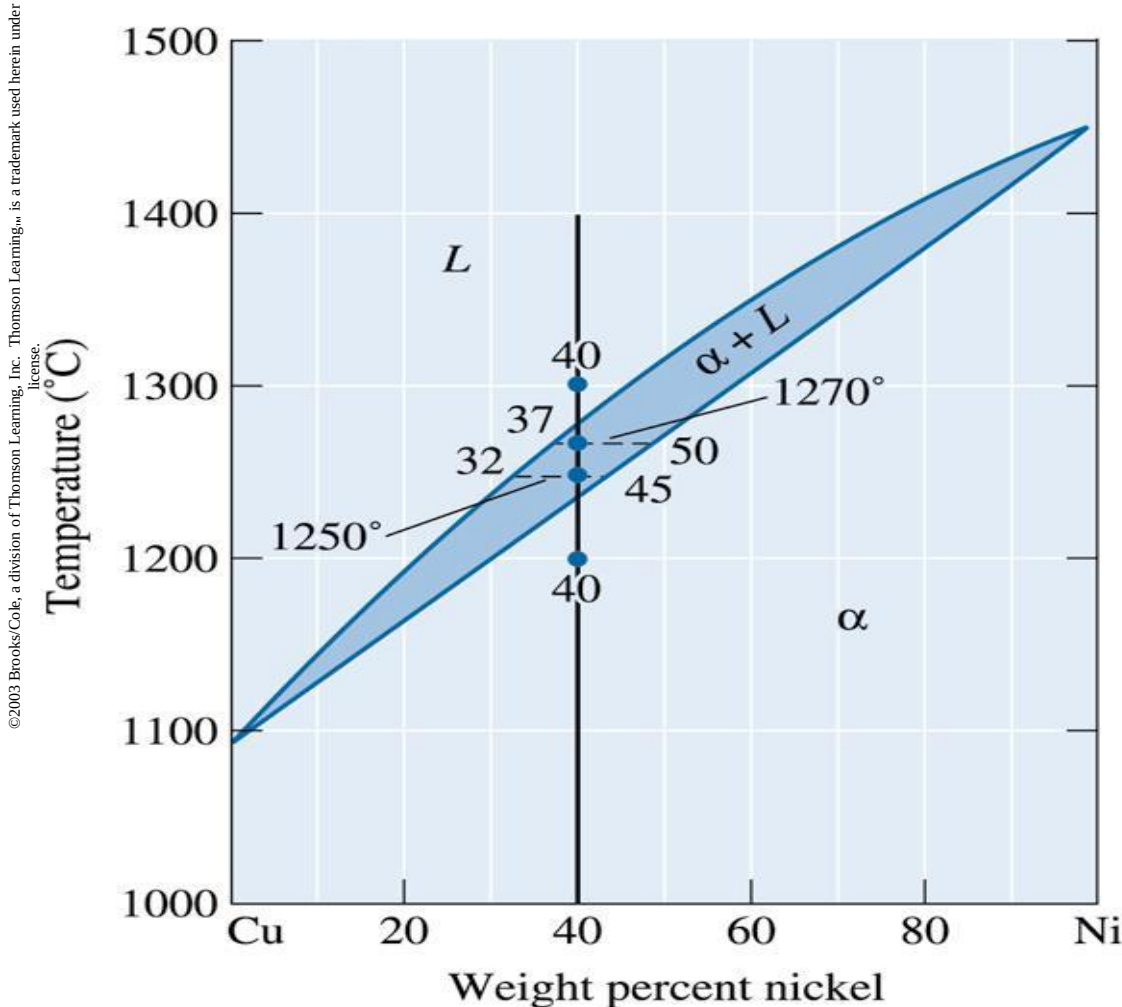


$$\%L = \frac{45 - 40}{45 - 32} \times 100 = 38\%$$

$$\%\alpha = \frac{40 - 32}{45 - 32} \times 100 = 62\%$$

Solidificação de uma liga com Cu-40% Ni

Determine a quantidade de cada fase na liga Cu-40% Ni mostrado na figura, nas temperaturas de 1300°C, 1270°C, 1250°C e 1200°C.



SOLUÇÃO

$$-1300^{\circ}C : 100\%L$$

$$-1270^{\circ}C : \%L = \frac{50 - 40}{50 - 37} \times 100 = 77\%$$

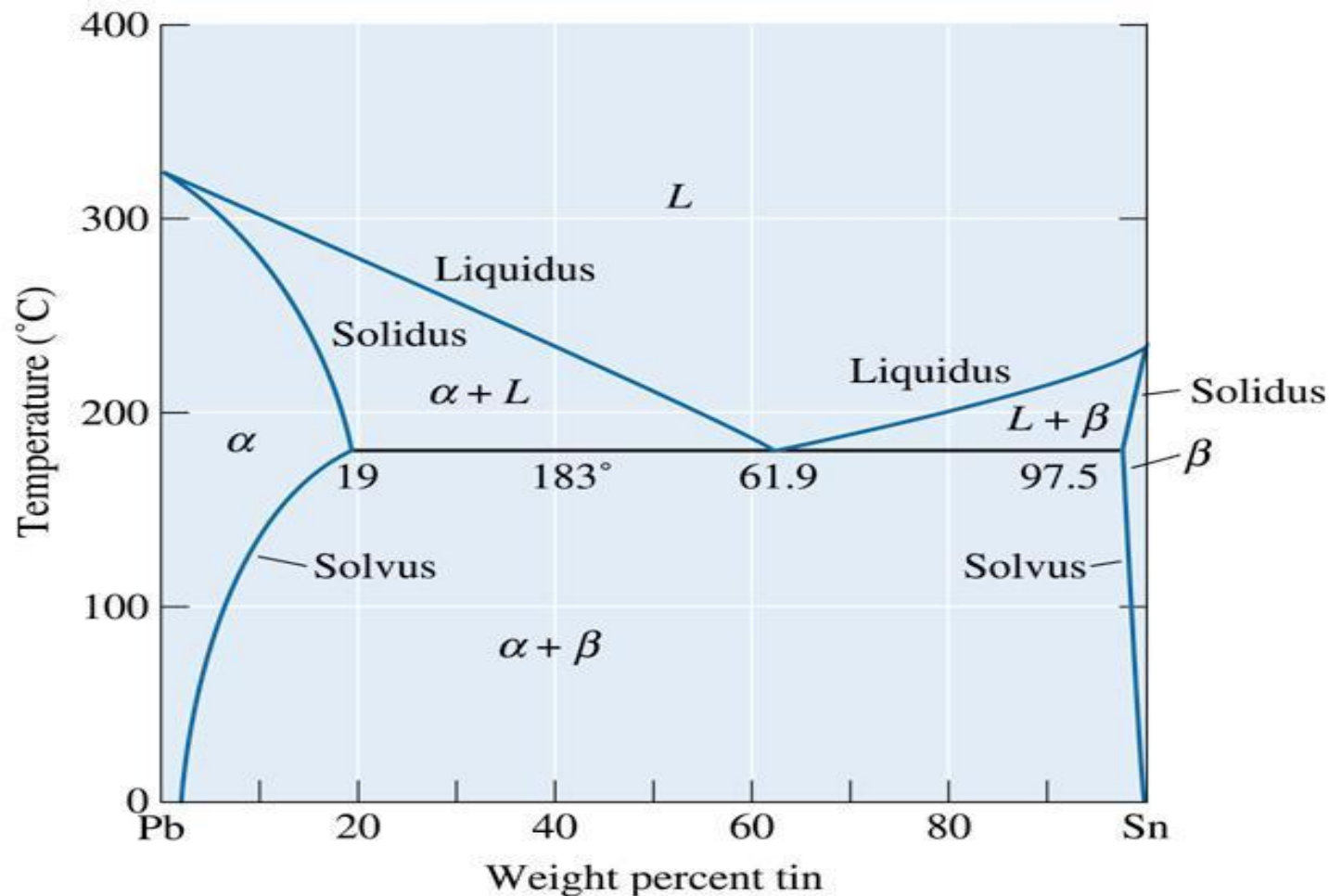
$$\% \alpha = \frac{40 - 37}{50 - 37} \times 100 = 23\%$$

$$-1250^{\circ}C : \%L = \frac{45 - 40}{45 - 32} \times 100 = 38\%$$

$$\% \alpha = \frac{40 - 32}{45 - 32} \times 100 = 62\%$$

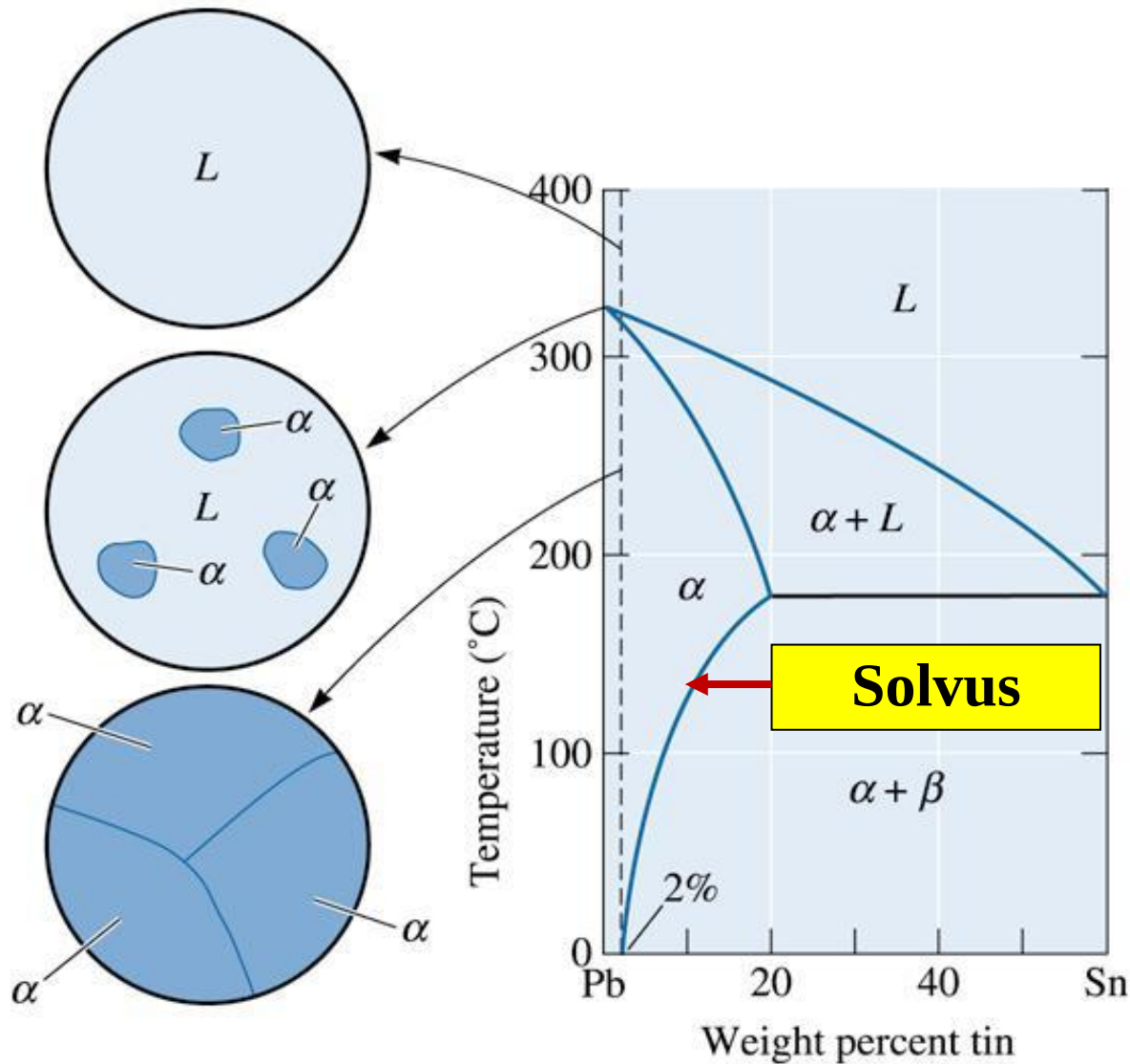
$$-1200^{\circ}C : 100\% \alpha$$

Diagrama de Fases Eutético

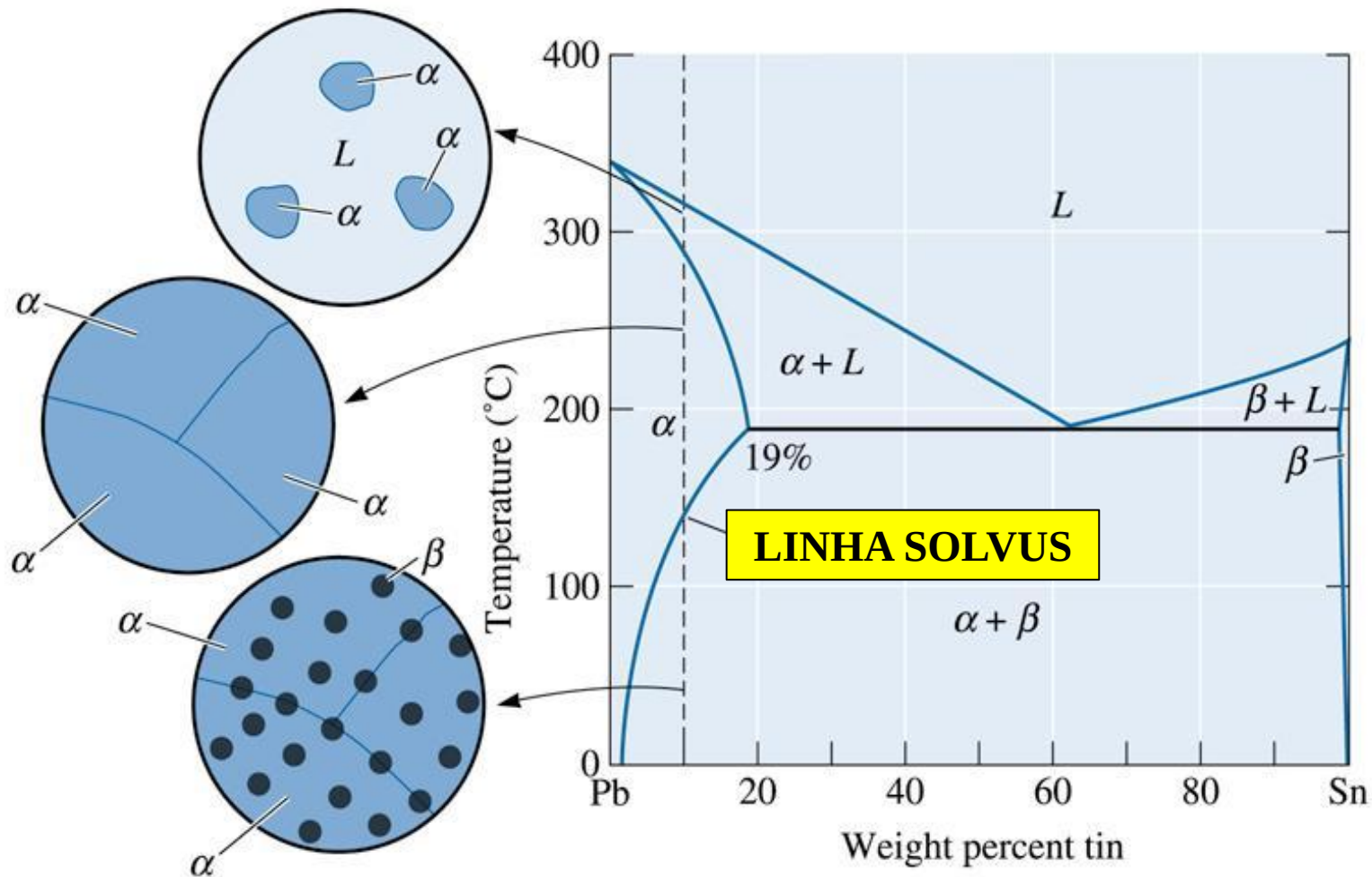


(c)2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning[™] is a trademark used herein under license.

Diagrama de fase Chumbo - Estanho.

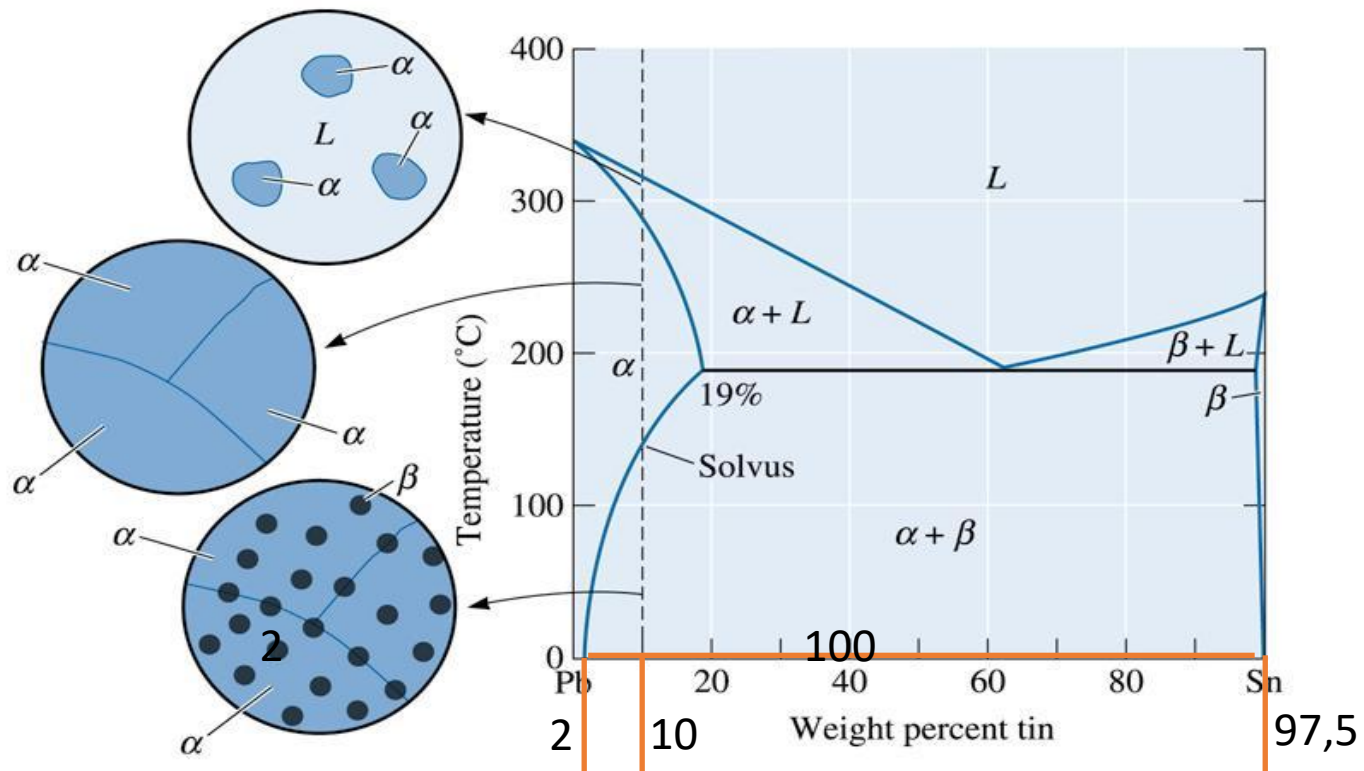


Solidificação e microestrutura de uma liga com Pb-2% Sn. A liga é uma solução sólida simples.



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

Solidificação, precipitação e microestrutura de uma liga Pb-10% Sn. Algum endurecimento por dispersão ocorre quando β precipita.

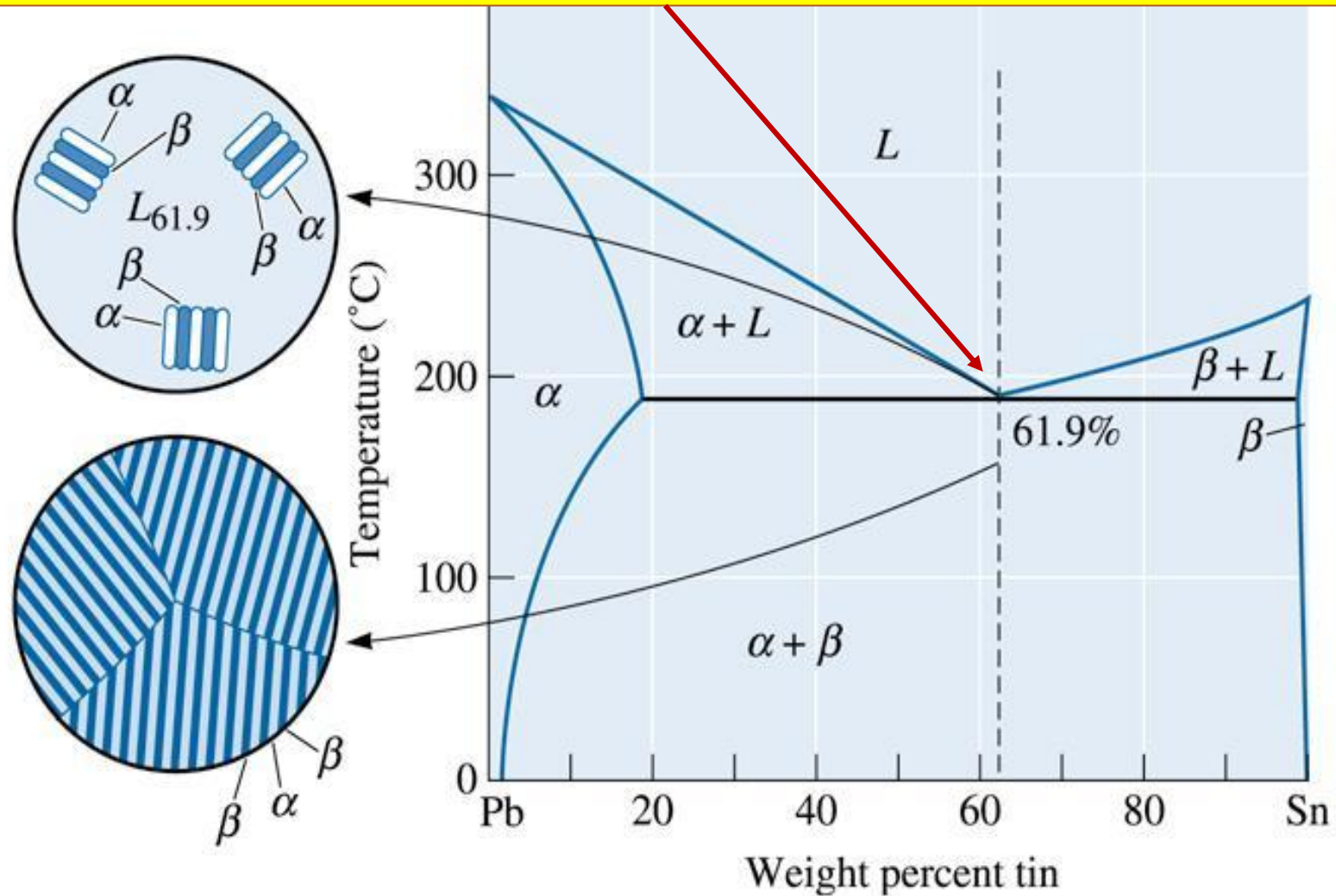


(c)2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning, Inc. is a trademark used herein under license.

Em 0°C, a liga com 10% Sn possui as fases $\alpha + \beta$. Pela aplicação da regra da alavanca determine a porcentagem da fase β .

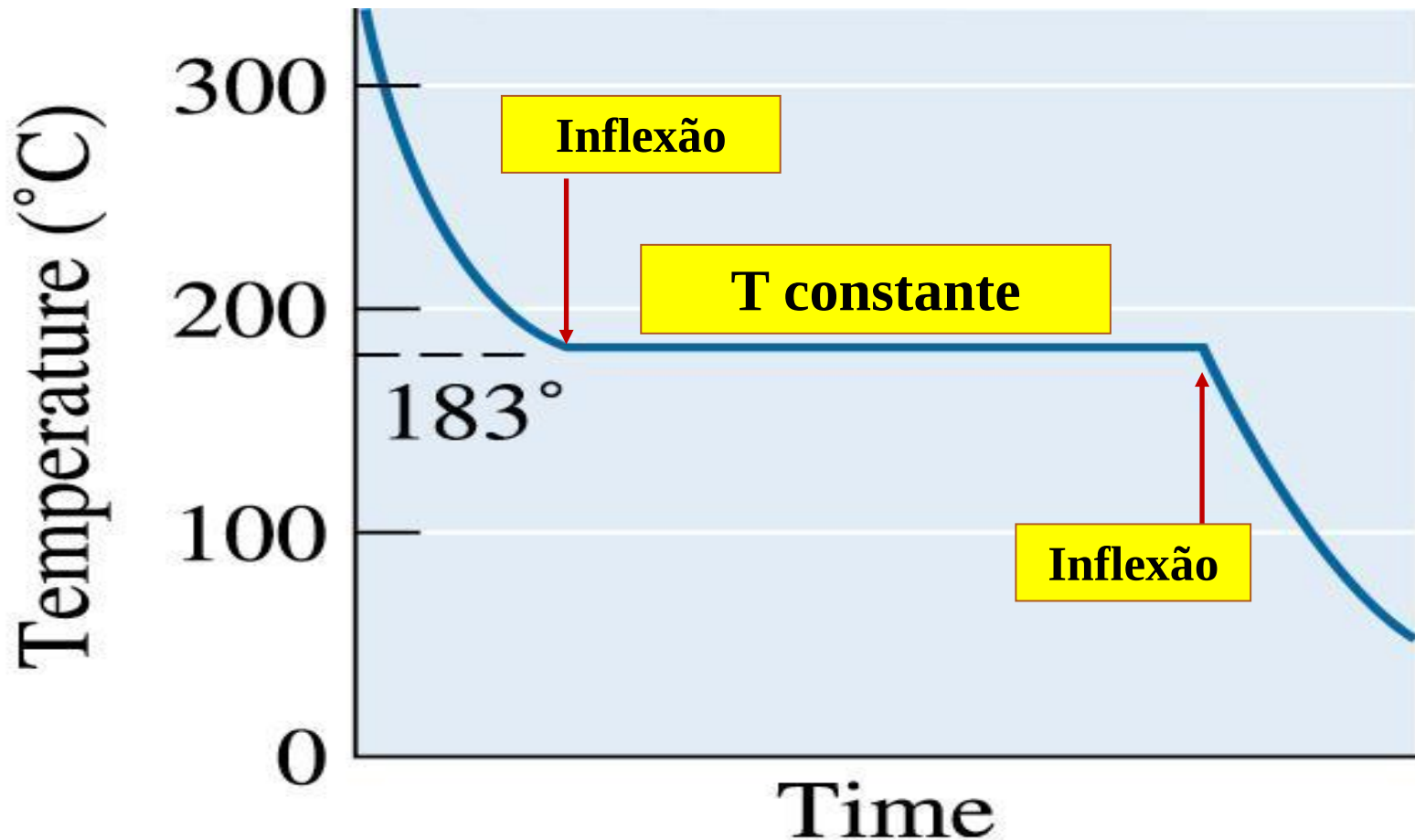
$$\beta = \frac{10 - 2}{97,5 - 2} \times 100 \cong 8,4\%$$

Superresfriamento-solidifica-Sn difunde (tempo)-região empobrecida de Sn- α e um região alto Sn (lamelas).



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

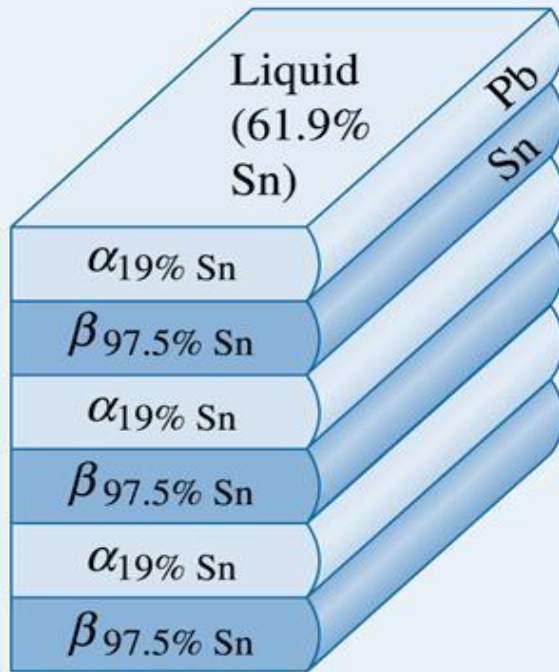
A solidificação e microestrutura da liga eutética Pb-61.9% Sn.



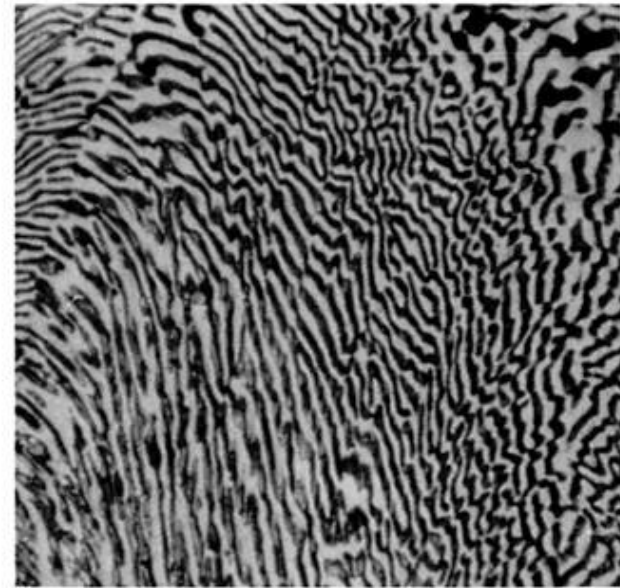
(c)2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning, Inc. is a trademark used herein under license.

Curva de resfriamento para a liga eutética. Esta solidifica ou funde em um patamar de temperature (reação invariante: similar à substância pura.

Superresfriamento-solidifica-Sn difunde (tempo)-região empobrecida de Sn- α e um região alto Sn (lamelas).



(a)



(b)

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

Redistribuição atômica durante o crescimento lamelar do eutético Pb – Sn (crescimento cooperativo).

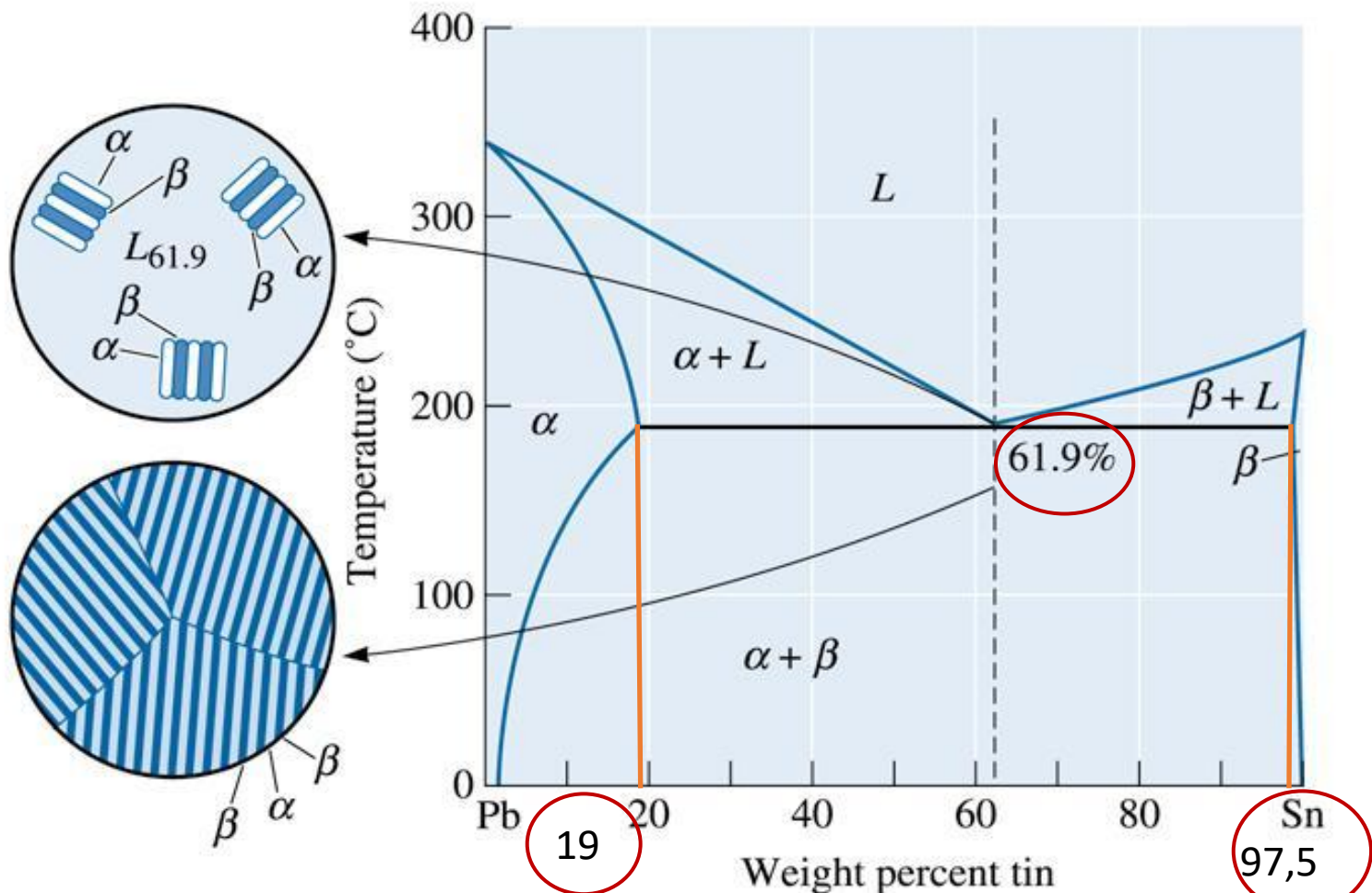
Exemplo



(a) Determine a **quantidade e composição** de cada fase na liga Pb – Sn na composição eutética, sendo que a **liga eutética contém 61,9% Sn**;

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

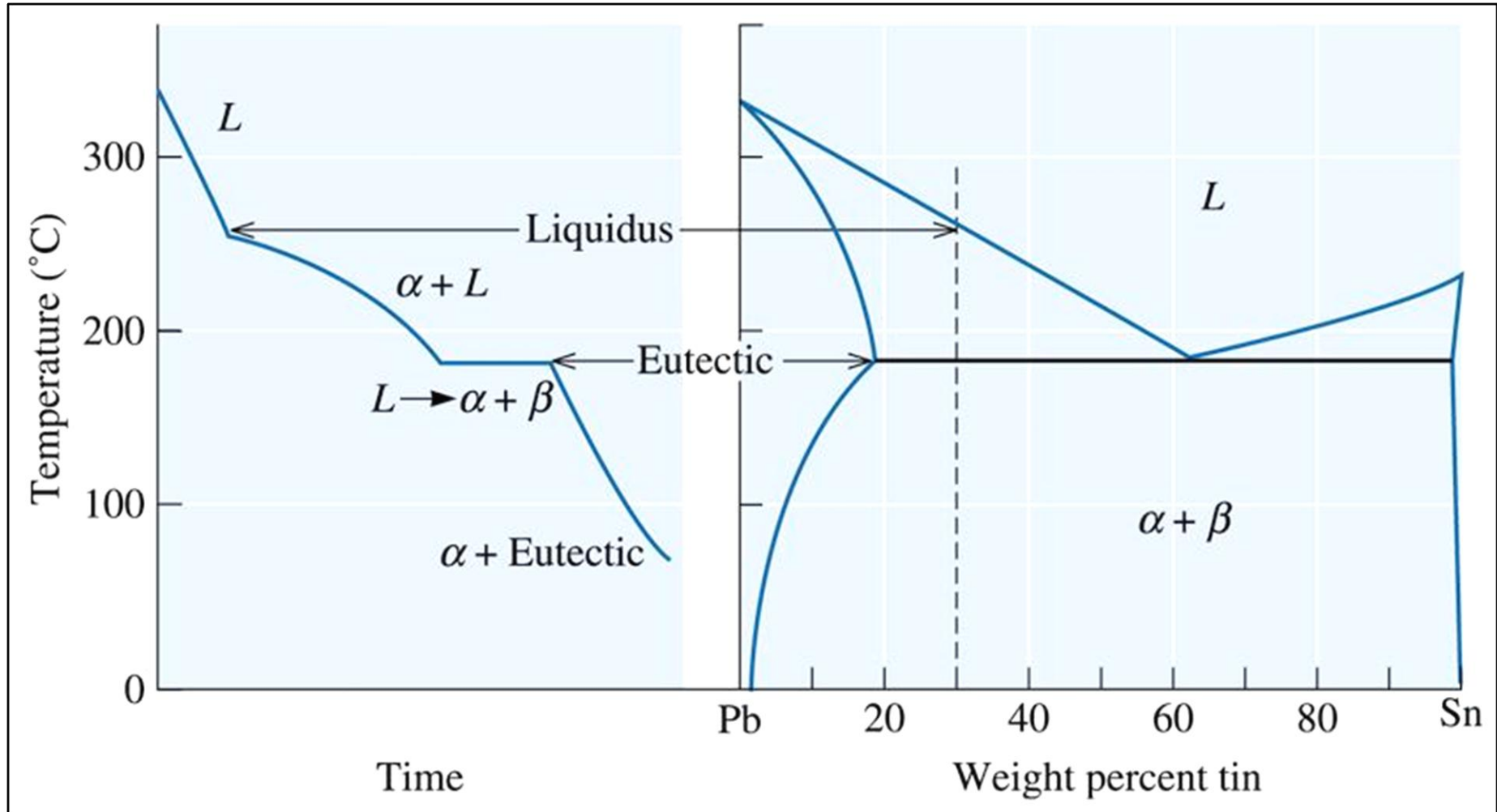
$$\beta : (Pb - 97.5\% Sn) \quad \% \beta = \frac{61.9 - 19.0}{97.5 - 19.0} \times 100 = 54.65\%$$



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

A solidificação e microestrutura da liga eutética Pb-61.9% Sn.

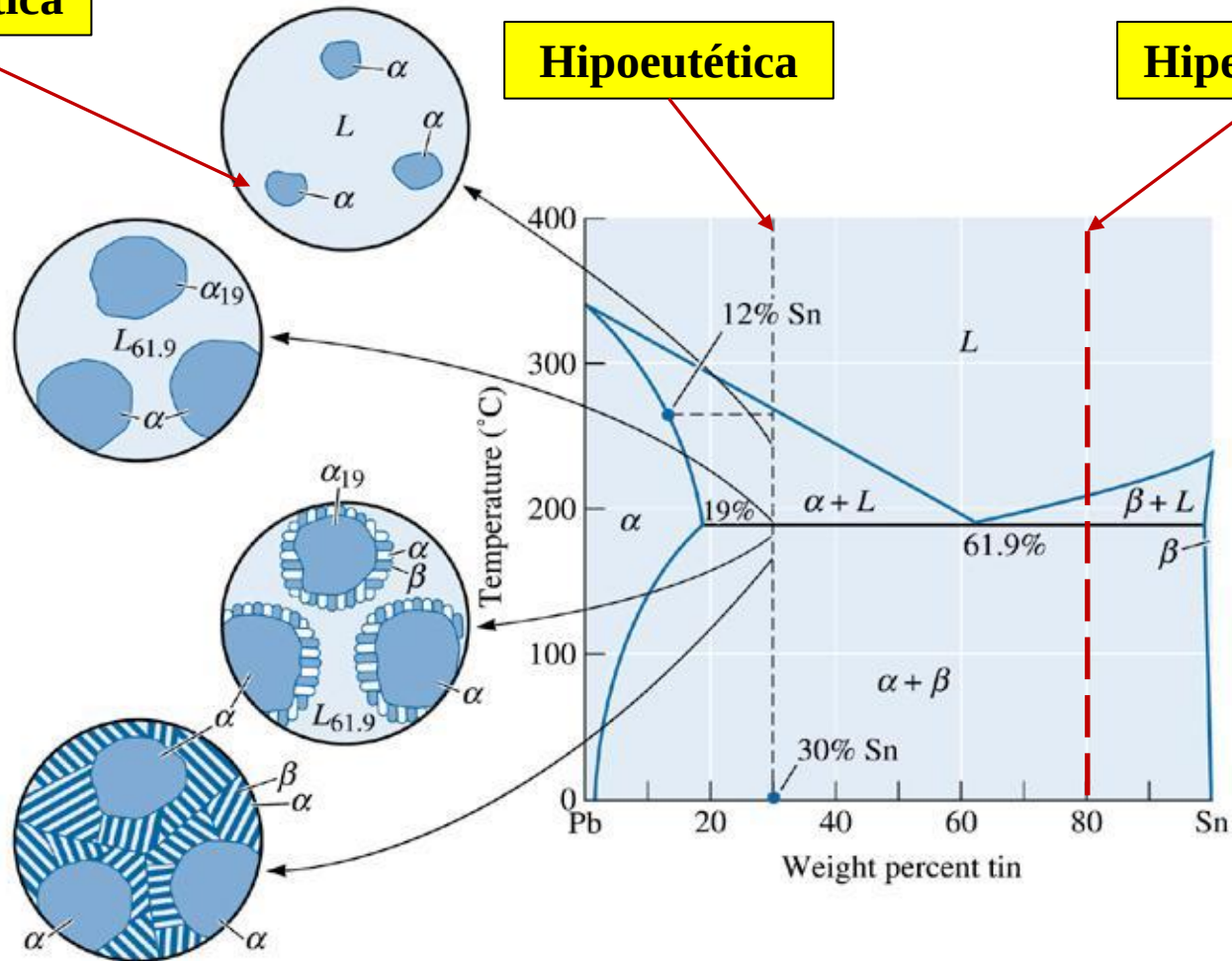
Ligas Hipoeutéticas



α -Proeutética

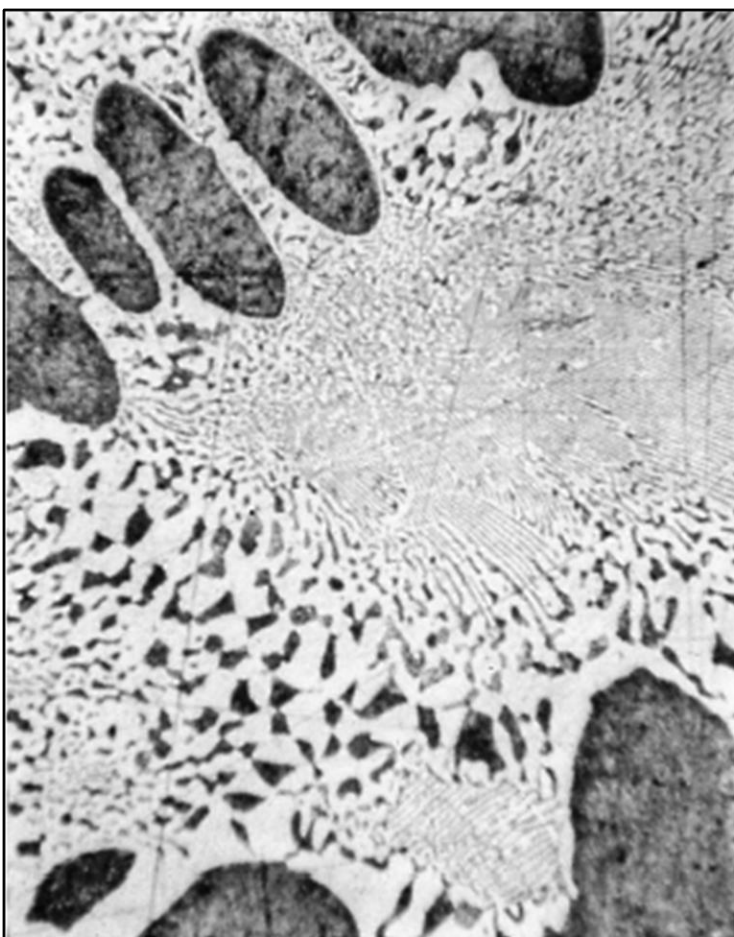
Hipoeutética

Hipereutética

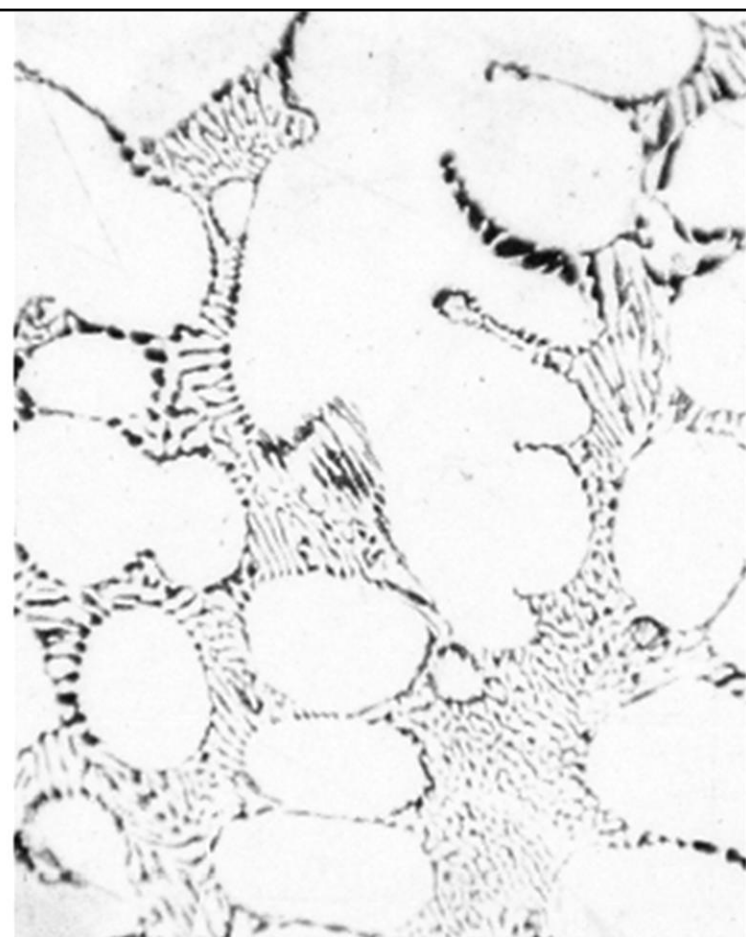


(c)2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning... is a trademark used herein under license.

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



(a)



(b)

(a) Microestrutura de uma liga Pb – Sn **hipoeutética**.

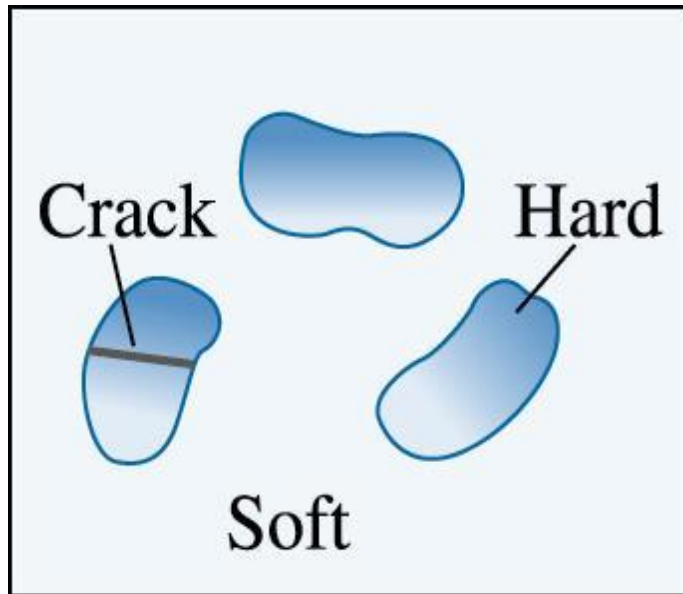
(b) Microestrutura de uma liga Pb – Sn **hipereutética**.

A fase **escura** é rica em **Pb**, fase α , a fase **clara** é rica em **Sn**, fase β , e a estrutura lamelar é o eutético .

Endurecimento por Dispersão e Diagramas de Fases Eutéticos

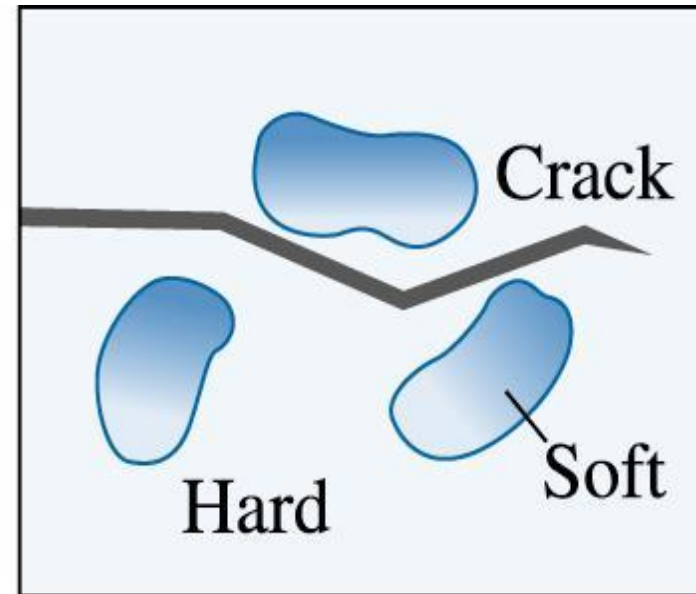
Endurecimento por dispersão/precipitação

- **Endurecimento por Dispersão**- aumento da resistência do material pela formação de mais que uma **fase finamente dispersa**;
- **Matriz** – Fase sólida continua em uma microestrutura complexa;
- **Precipitado** – Uma fase sólida que se forma a partir da fase matriz quando o limite solubilidade é excedido;
- **Eutético** – É uma reação tipo três-fases invariantes na qual um fase líquida se solidifica para produzir duas fases sólidas.



Good

vs.

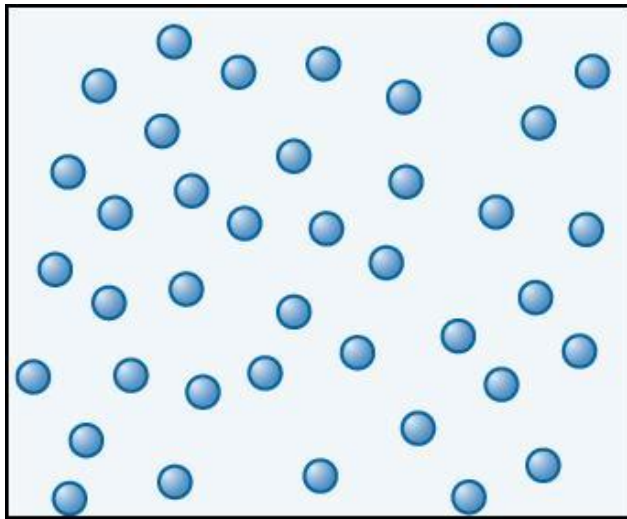


Poor

(a)

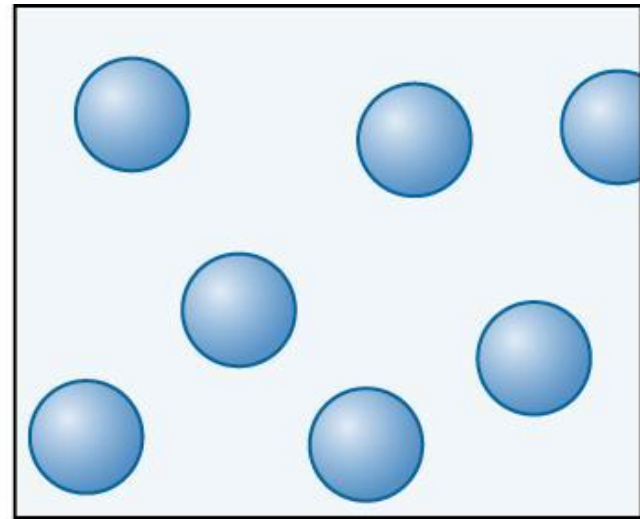
(c)2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning_{TM} is a trademark used herein under license.

**Considerações para um endurecimento efetivo por dispersão:
(a) a fase precipitada deve ser dura e descontínua.**



Good

vs.

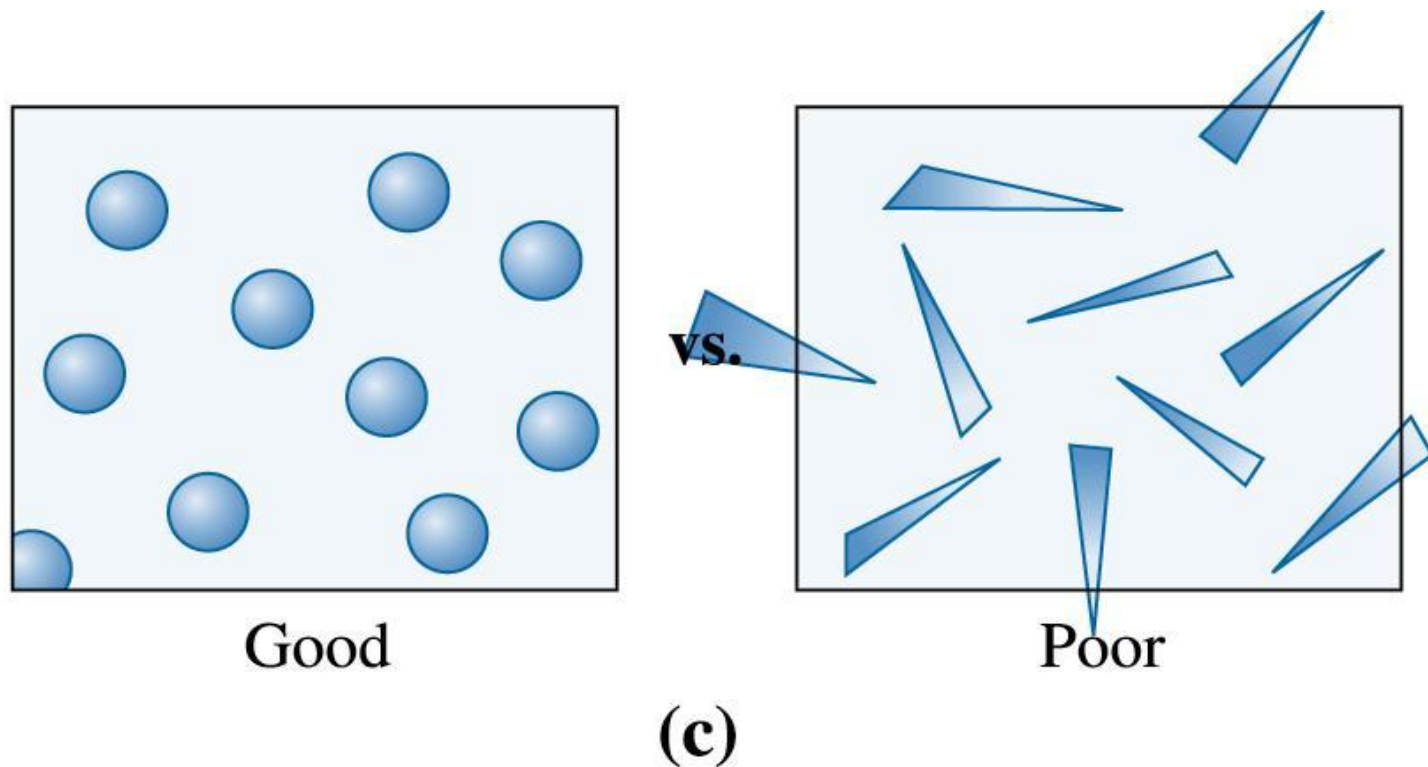


Poor

(b)

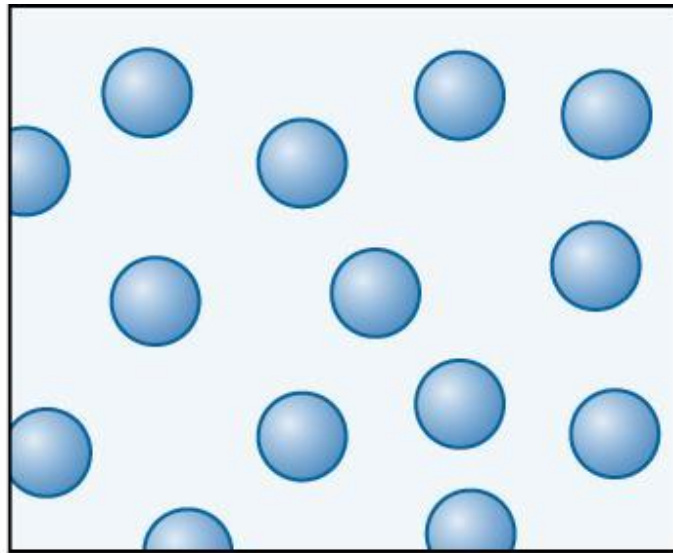
(b) A fase particulada dispersa deve ser pequena e numerosa.

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



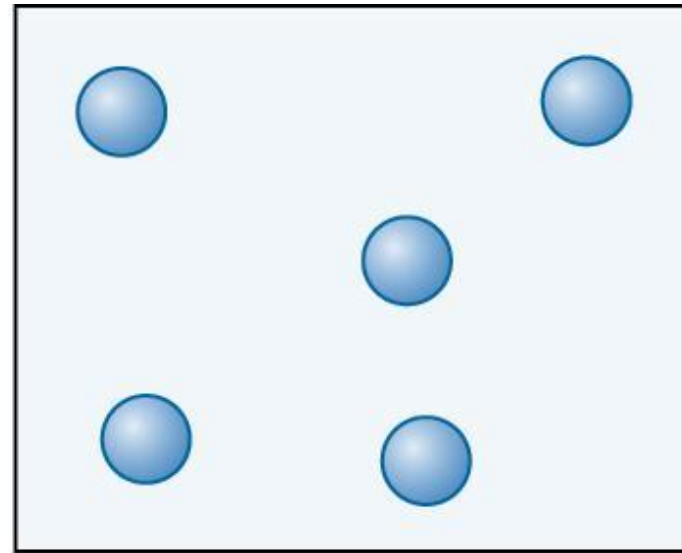
(c)2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

(c) A fase particulada dispersa dever ser esférica e não agulhada.



Good

vs.



Poor

(d)

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

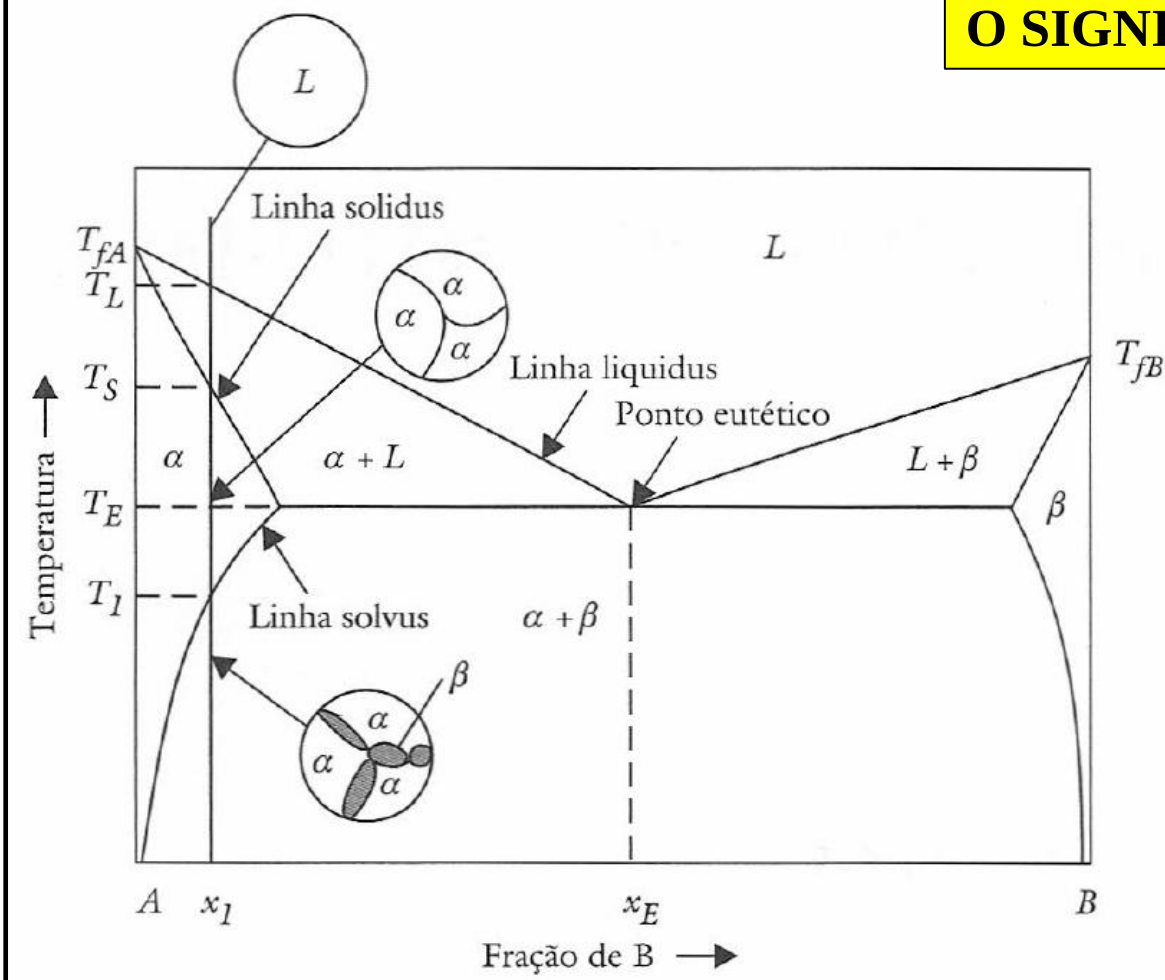
(d) Uma grande quantidade da fase dispersa aumenta o endurecimento.

ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO

DIAGRAMA DE FASES DE UMA LIGA NÃO FERROSA

O SIGNIFICADO DA LINHA SOLVUS

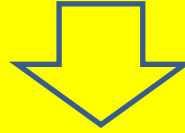
A linha solvus representa a variação da solubilidade dos átomos de B na rede cristalina de A em função da temperatura.



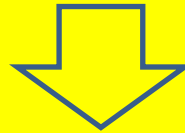
SOLIDIFICAÇÃO COM RESFRIAMENTO LENTO DE UMA LIGA COM COMPOSIÇÃO x_1

(Fonte: Rezende)

CONTORNOS DE GRÃO $\Rightarrow$ ALTA ENERGIA



**SÍTIOS PREFERENCIAIS PARA A NUCLEAÇÃO
HETEROGÊNEA**

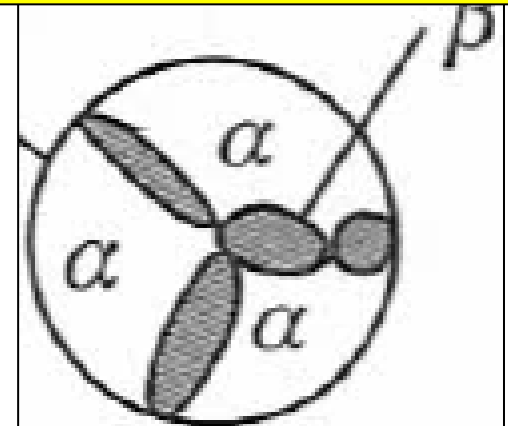


**ENERGIA DISPONÍVEL CONTRIBUI COM PARTE DA
ENERGIA DE ATIVAÇÃO**

**Estrutura típica de peças fundidas:
baixa resistência/alta fragilidade**

T_1 é relativamente alta

DIFUSÃO



(Fonte: Rezende)

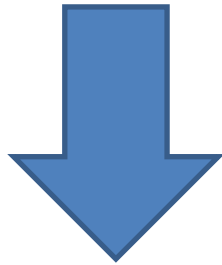
No início do **século XX** descobriu-se que a **resistência mecânica** de uma peça com esse tipo de estrutura poderia ser **aumentada sensivelmente** por meio de **um tratamento térmico conveniente**, que levasse a uma **redistribuição da segunda fase (β)** na forma de **partículas finas distribuídas homogeneamente no interior dos grãos**. Esse processo é denominado **endurecimento por precipitação**

(Fonte:Rezende)

O TRATAMENTO TÉRMICO ENVELHECIMENTO (“AGING”)

**1ª. ETAPA -
SOLUBILIZAÇÃO**

Átomos de B se dissolvem novamente na fase α . A fase β desaparece.



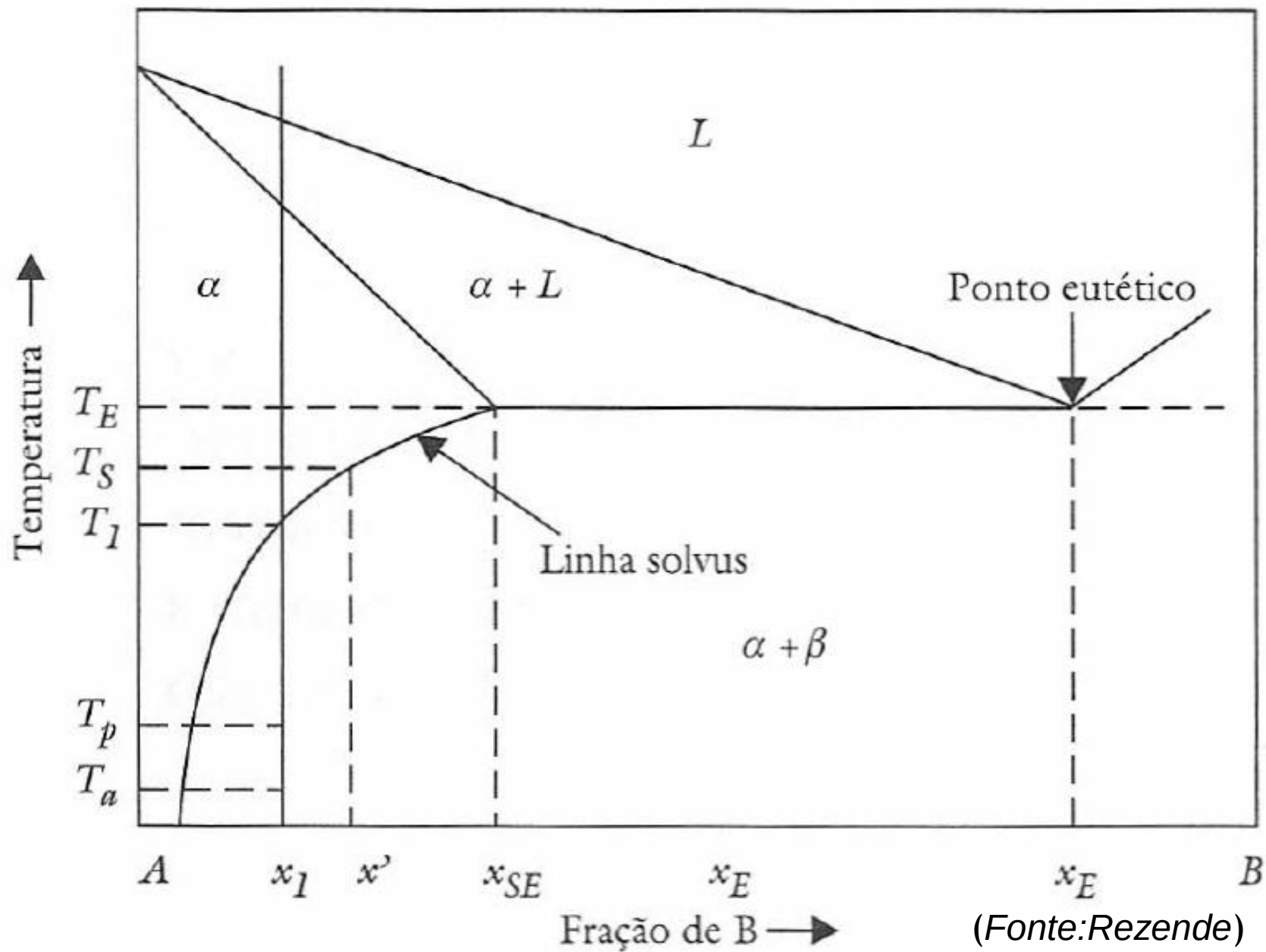
**2ª. ETAPA –
PRECIPITAÇÃO
EM TEMPERATURA
ADEQUADA**

Precipitação controlada de β a partir da fase α supersaturada de B.

SOLUBILIZAÇÃO

Para se promover a **completa solubilização de B** na fase α , deve-se aquecer a liga de modo a passar da região de estabilidade da mistura $\alpha + \beta$ do diagrama para uma região de estabilidade da fase α apenas, elevando-se a temperatura até um valor T_s **acima de T_1** e **deixar um tempo suficiente**.

SOLUBILIZAÇÃO



**APÓS SOLUBILIZAÇÃO EM
TEMPO SUFICIENTE DE
PATAMAR**

TEMPERATURA DE SOLUBILIZAÇÃO

**RESFRIAMENTO
BRUSCO**

**TEMPERATURA DE
DIFUSÃO DESPREZÍVEL
- T_{AMBIENTE}**

**PROMOVER A FORMAÇÃO DE
SOLUÇÃO SÓLIDA SATURADA DE
ÁTOMOS DE B**

PRECIPITAÇÃO

**SOLUÇÃO
SUPERSATURADA**

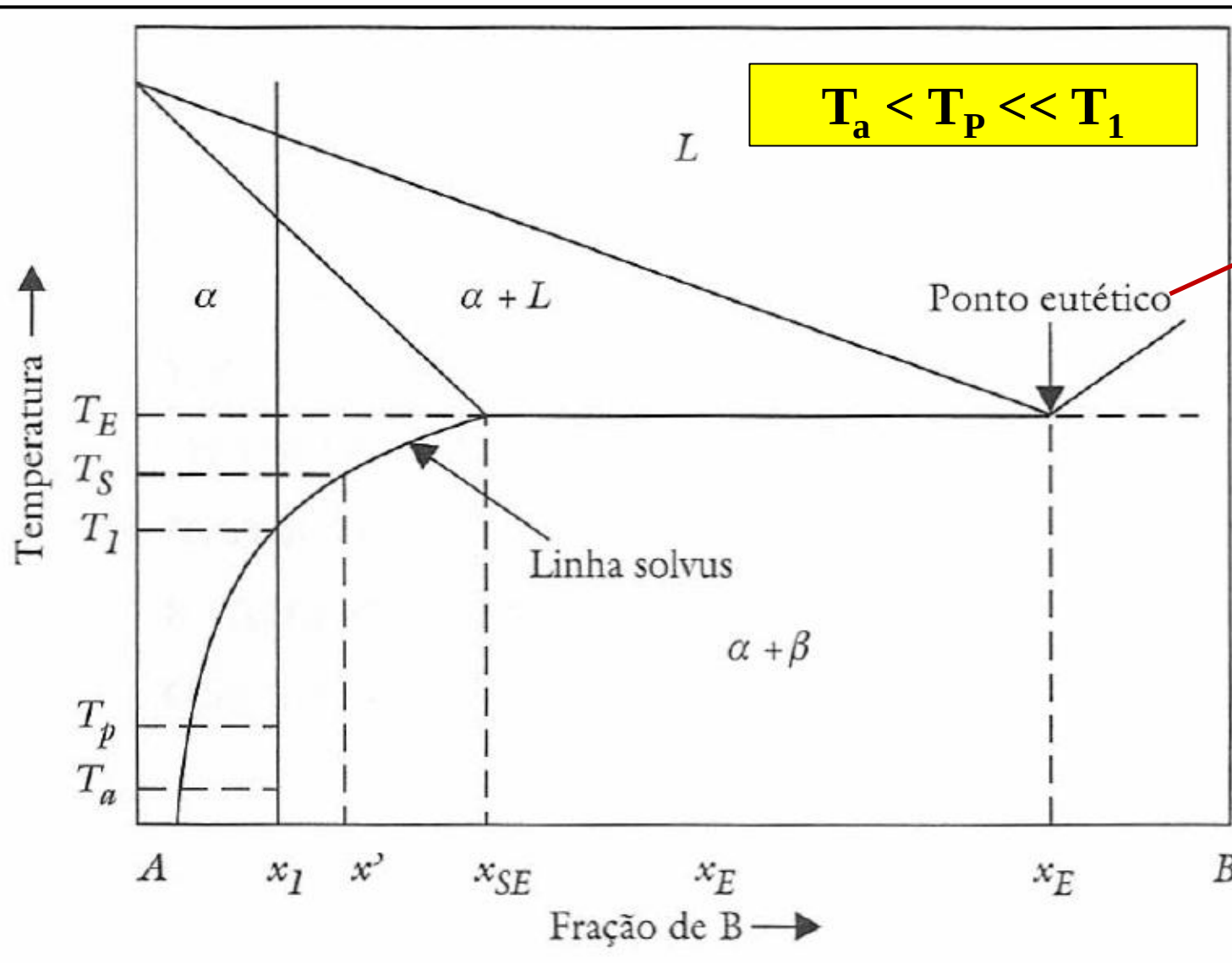
**TRATAMENTO ISOTÉRMICO
EM T_p - LONGOS PERÍODOS
(ENVELHECIMENTO)**

Formação da segunda fase

**partículas finas dispersas homogeneamente no
interior dos grãos**

**RESFRIAMENTO BRUSCO
EVITAR O CRESCIMENTO
EXCESSIVO DOS PRECIPITADOS**

PRECIPITAÇÃO



$$T_a < T_p \ll T_1$$

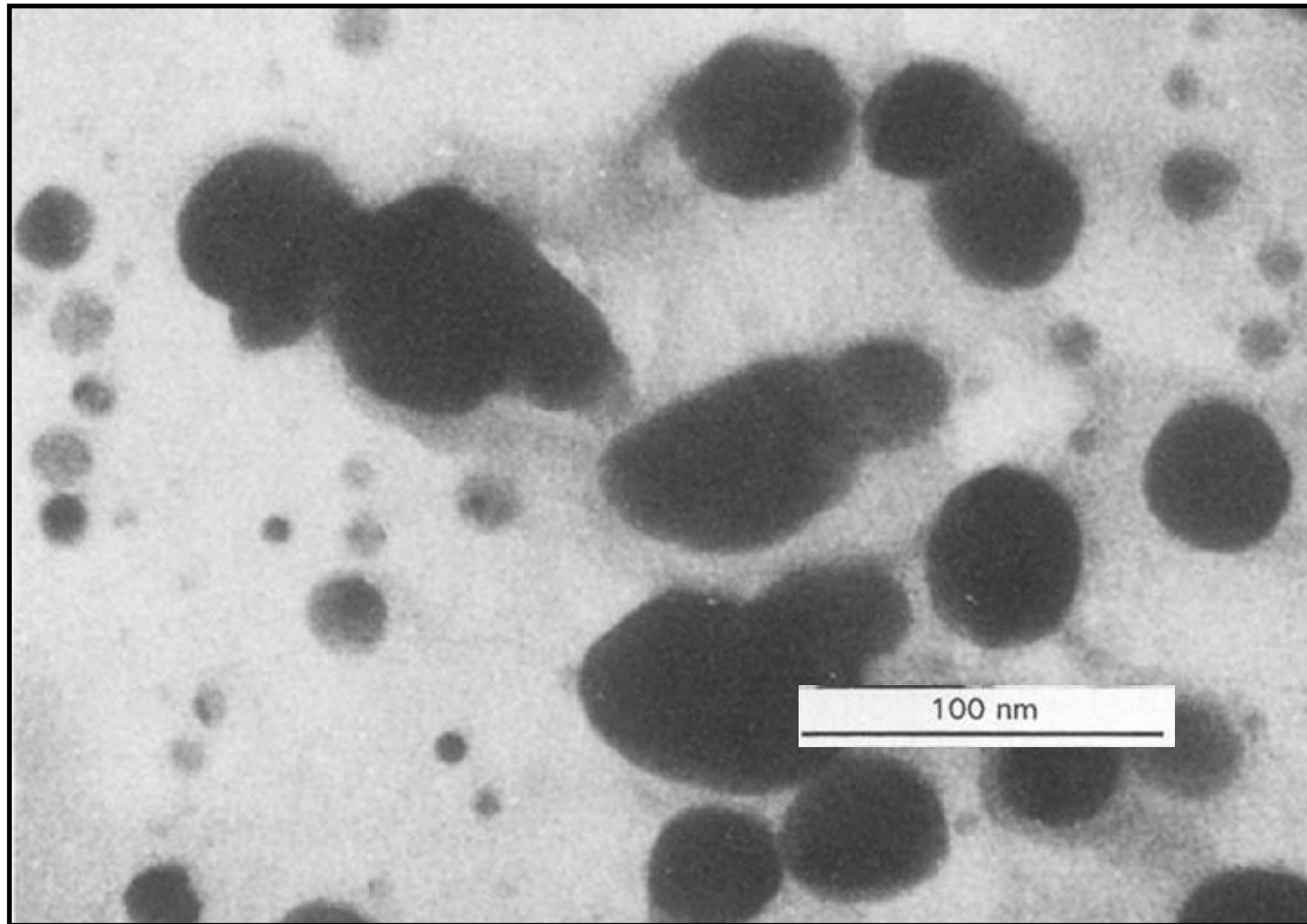
$$T_S < T_E$$

Evitar fusão.

(Fonte: Rezende)

PRECIPITADOS – MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE TRANSMISSÃO (MET)

JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE 31 (1996) 4333–4346



ESQUEMA DO TRATAMENTO TÉRMICO

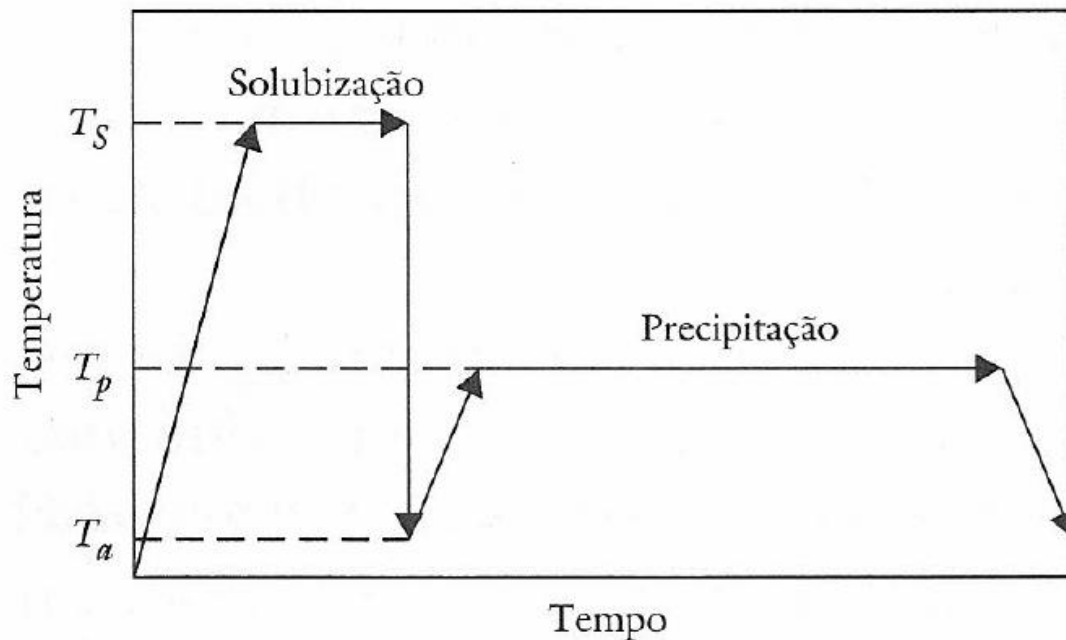
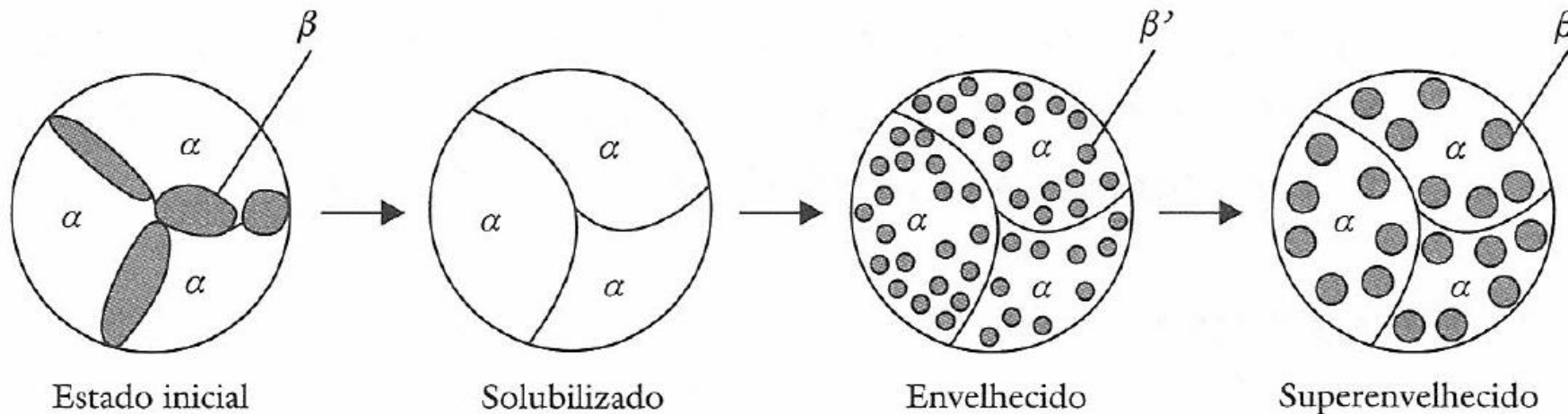
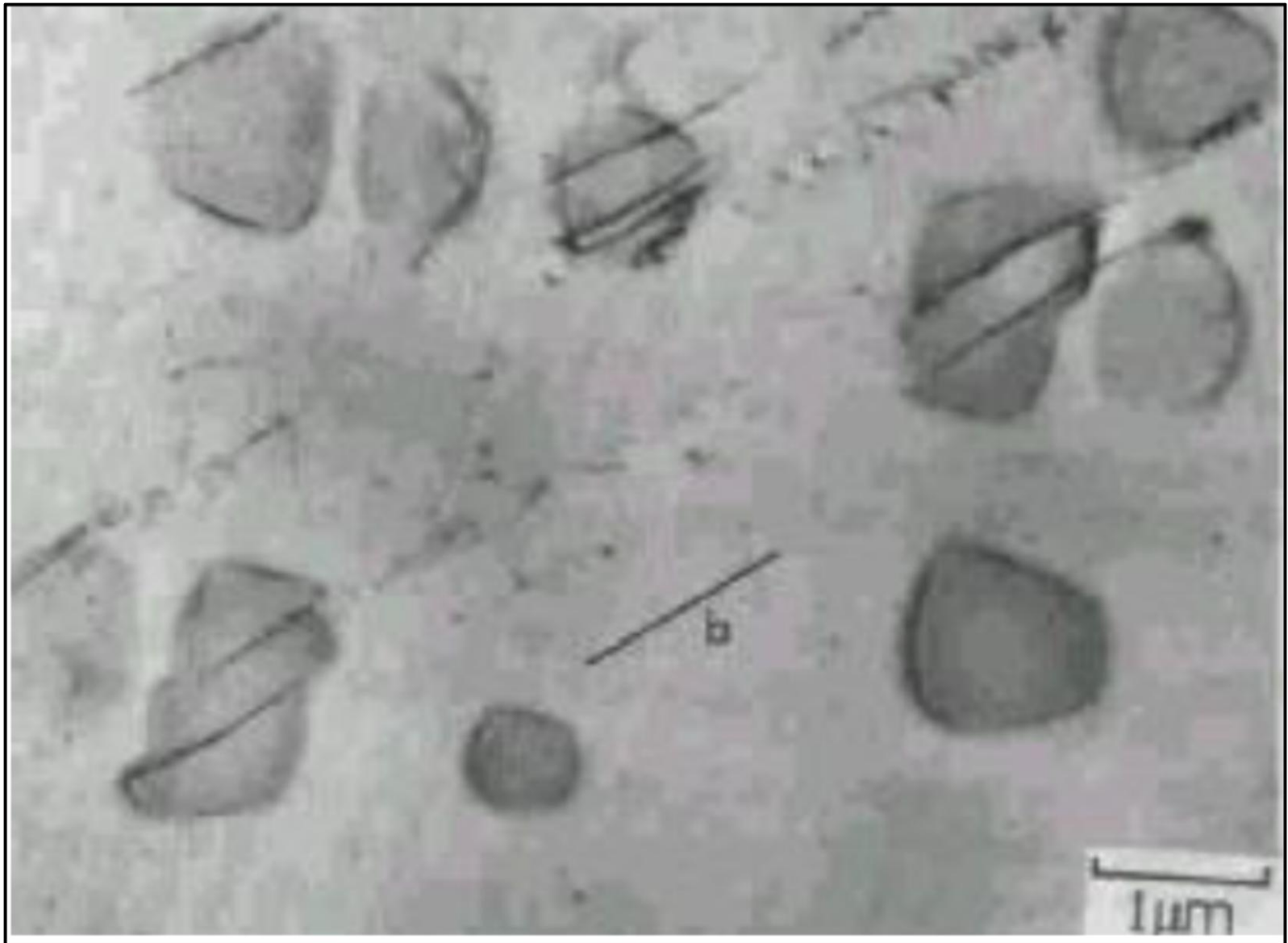


Figura 9.3 — Representação esquemática das etapas de solubilização e precipitação apresentando as temperaturas e os intervalos de tempo relativos a cada etapa

(Fonte: Rezende)



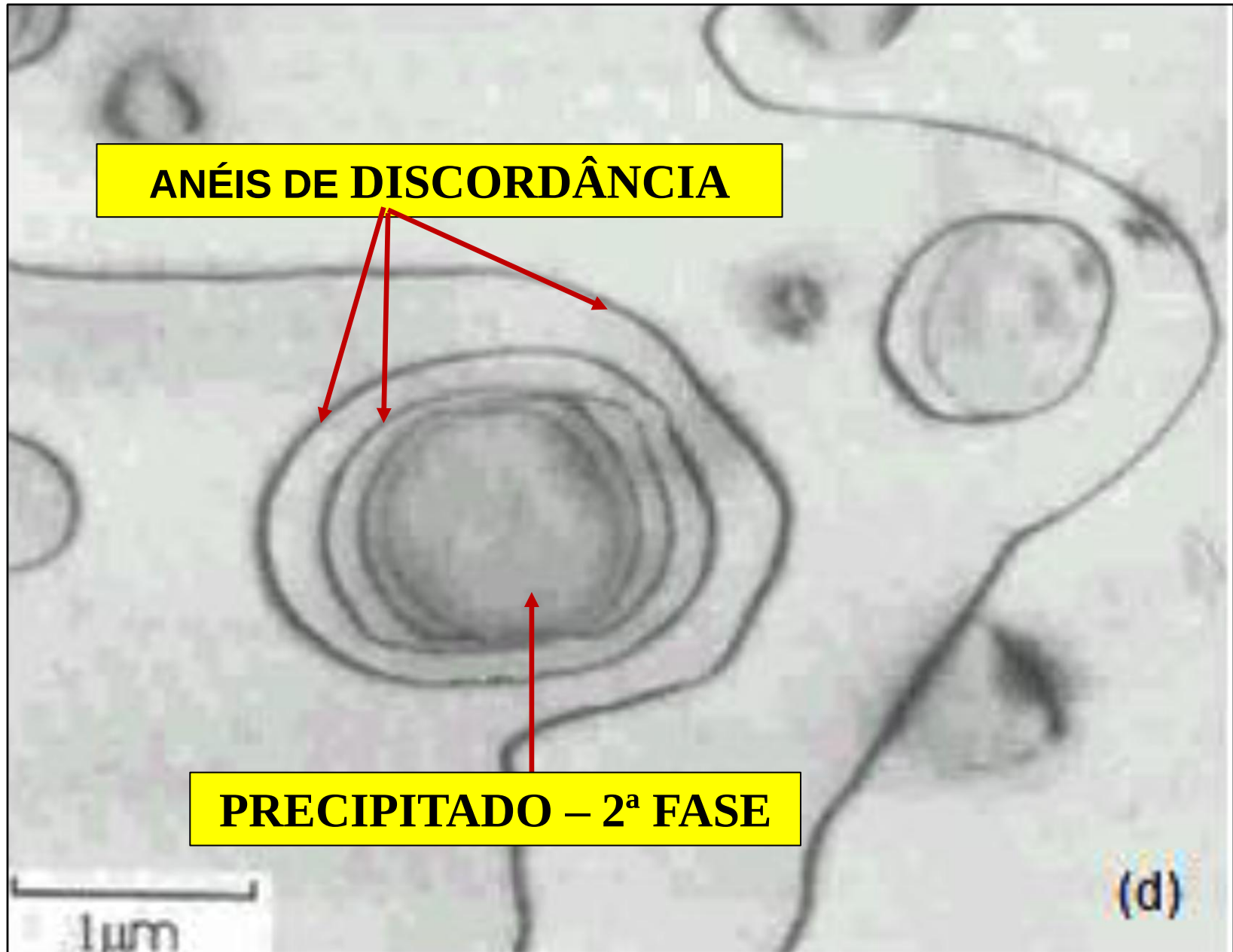
PRECIPITADOS DE 2ª FASE CORTADOS- MET



MECANISMO DE OROWAN-MET

ANÉIS DE DISCORDÂNCIA

PRECIPITADO – 2ª FASE



Zonas de Guinier- Preston (GP)

FORMAÇÃO DOS PRECIPITADOS DE 2ª.FASE

Aglomerados de solutos (coerentes):

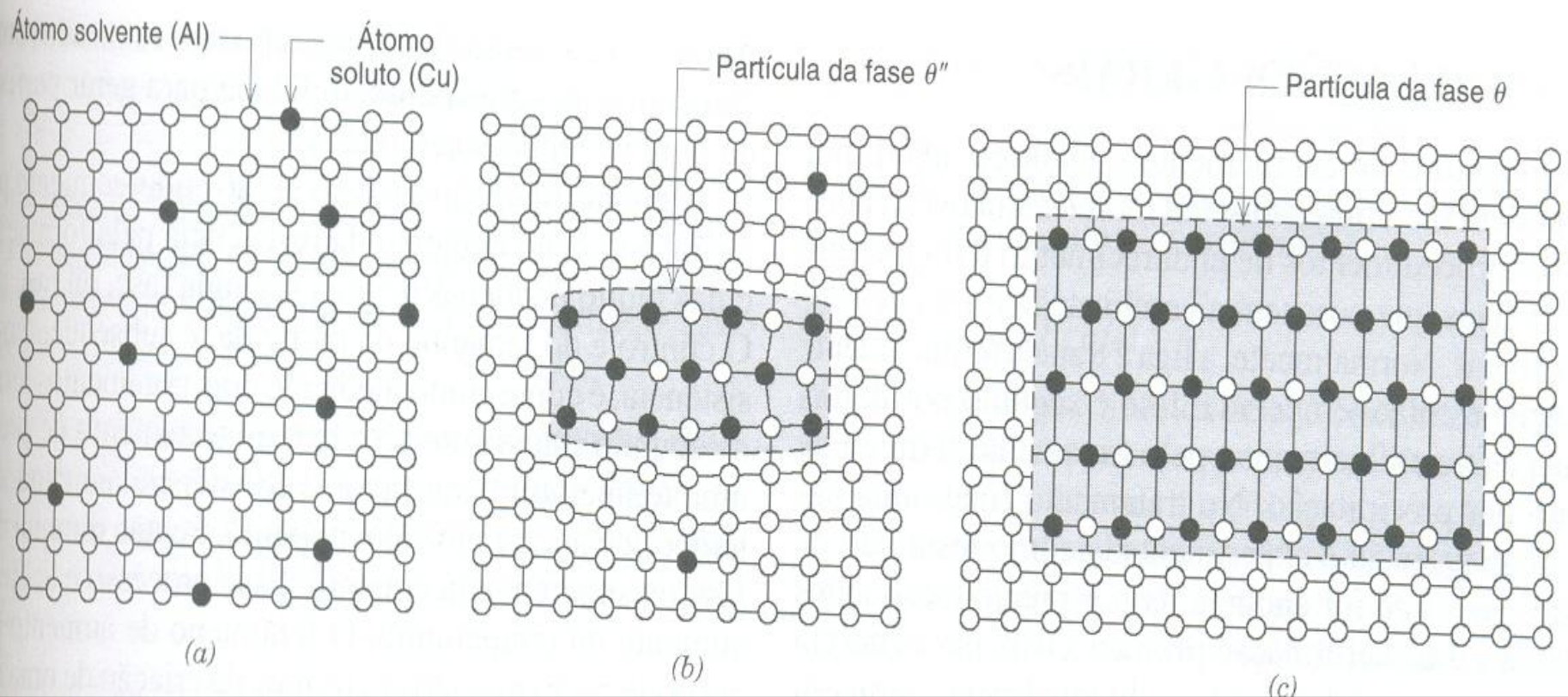
- **Apresentam dimensões da ordem de 20 a 40 angstroms e não podem ser observadas por microscopia óptica;**
- **São denominadas zonas de Guinier- Preston (GP) por terem sido detectadas pela primeira vez pelas técnicas de difração de raio X, por A. Guinier, na França, e G. D. Preston, na Inglaterra, realizando trabalhos independentes na década de 30 do século XX;**

Zonas GP responsável pelo endurecimento

- Zonas Guinier-Preston (GP): homenagem aos cientistas que revelaram a estrutura dessas zonas através de estudos de difração de raios-x
- Guinier A: *Nature*, **142**, 569 (1938)
Preston G P: *Nature*, **142**, 570 (1938).
- As fases precipitadas são altamente coerentes com a matriz, ou seja, é muito difícil determinar a sua estrutura mesmo com microscopia eletrônica de alta resolução (HRTEM).
- Por exemplo: no sistema Al-Cu, os átomos de Cu precipitam paralelos aos planos {100} da matriz de alumínio, então o contraste entre as fases depende muito da espessura da amostra

LIGAS DE Al - Cu

COERÊNCIA DAS PARTÍCULAS



EVOLUÇÃO DOS PRECIPITADOS DE 2ª.FASE

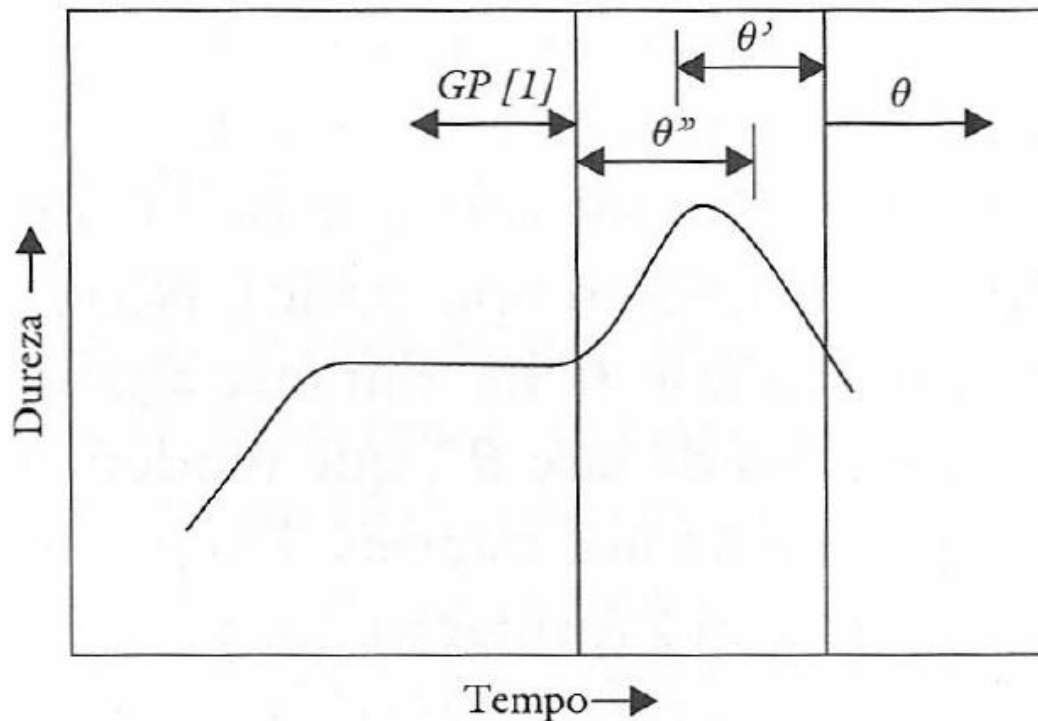
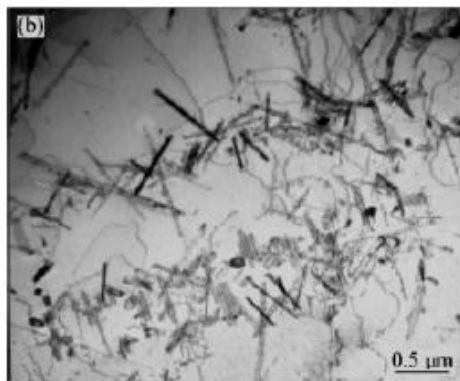
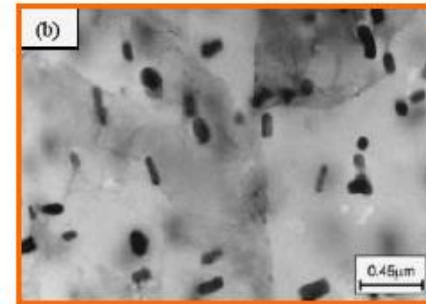
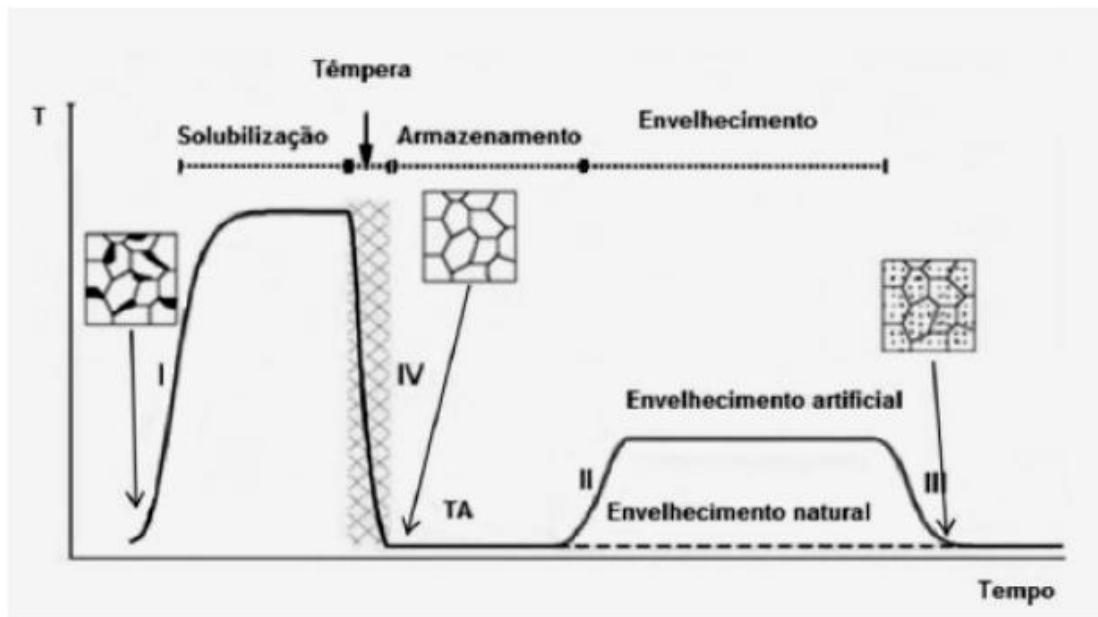
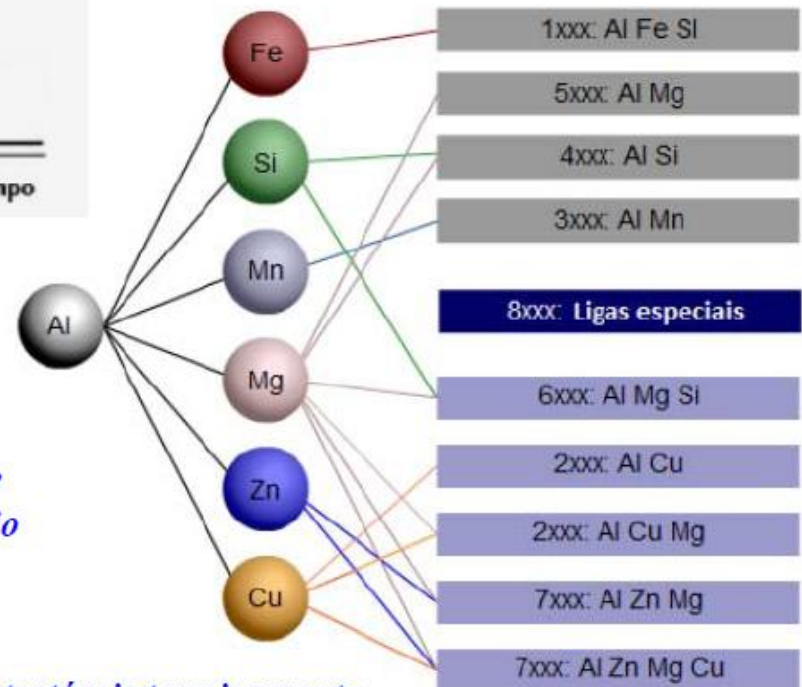


Figura 9.8 — Representação esquemática da seqüência de precipitados formados ao longo do tempo para uma liga *Al-Cu* e sua influência na dureza

TRATAMENTOS DE SOLUBILIZAÇÃO E ENVELHECIMENTO



Interação entre discordâncias e precipitados em liga de alumínio



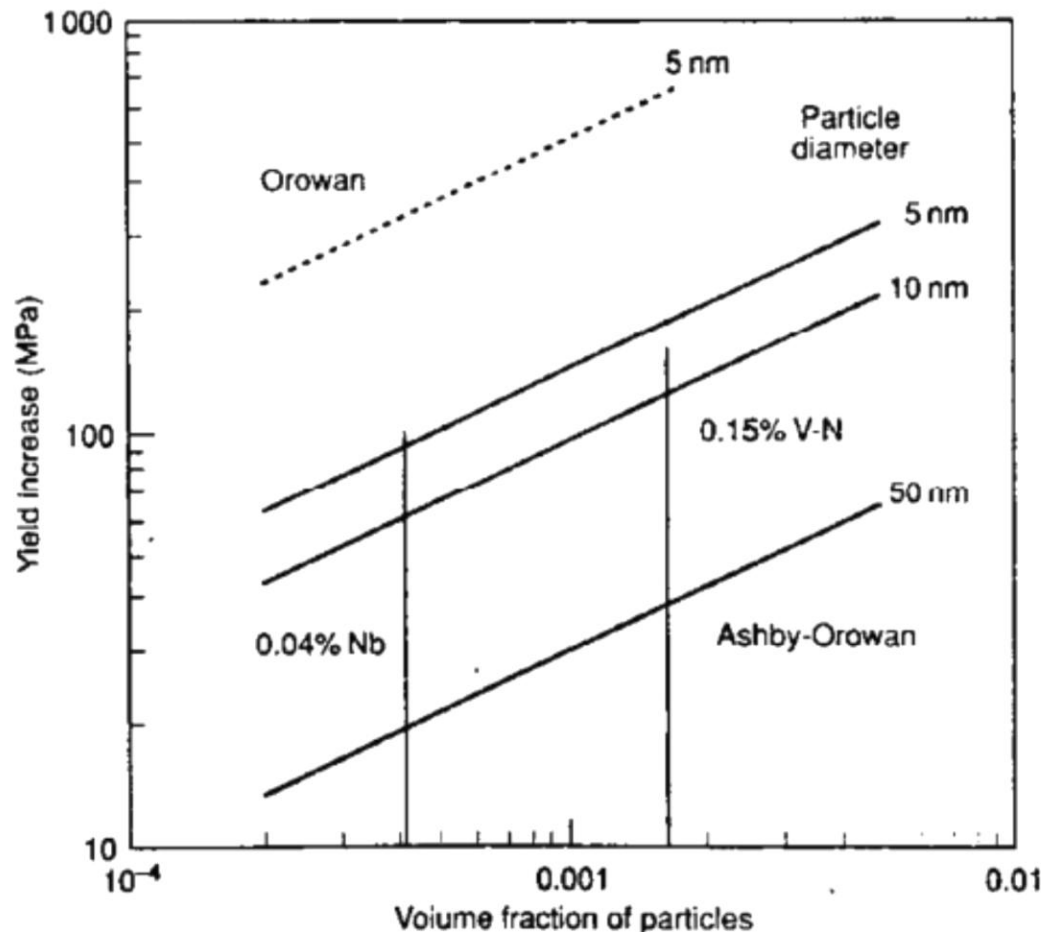
Ligas de alumínio tratáveis termicamente

(Prof.Dr. Carlos Baptista – EEL-USP)

Aços Microligados

TMCP- Thermomechanical Controlled Process

➤ Endurecimento por precipitação:



Processo industrial



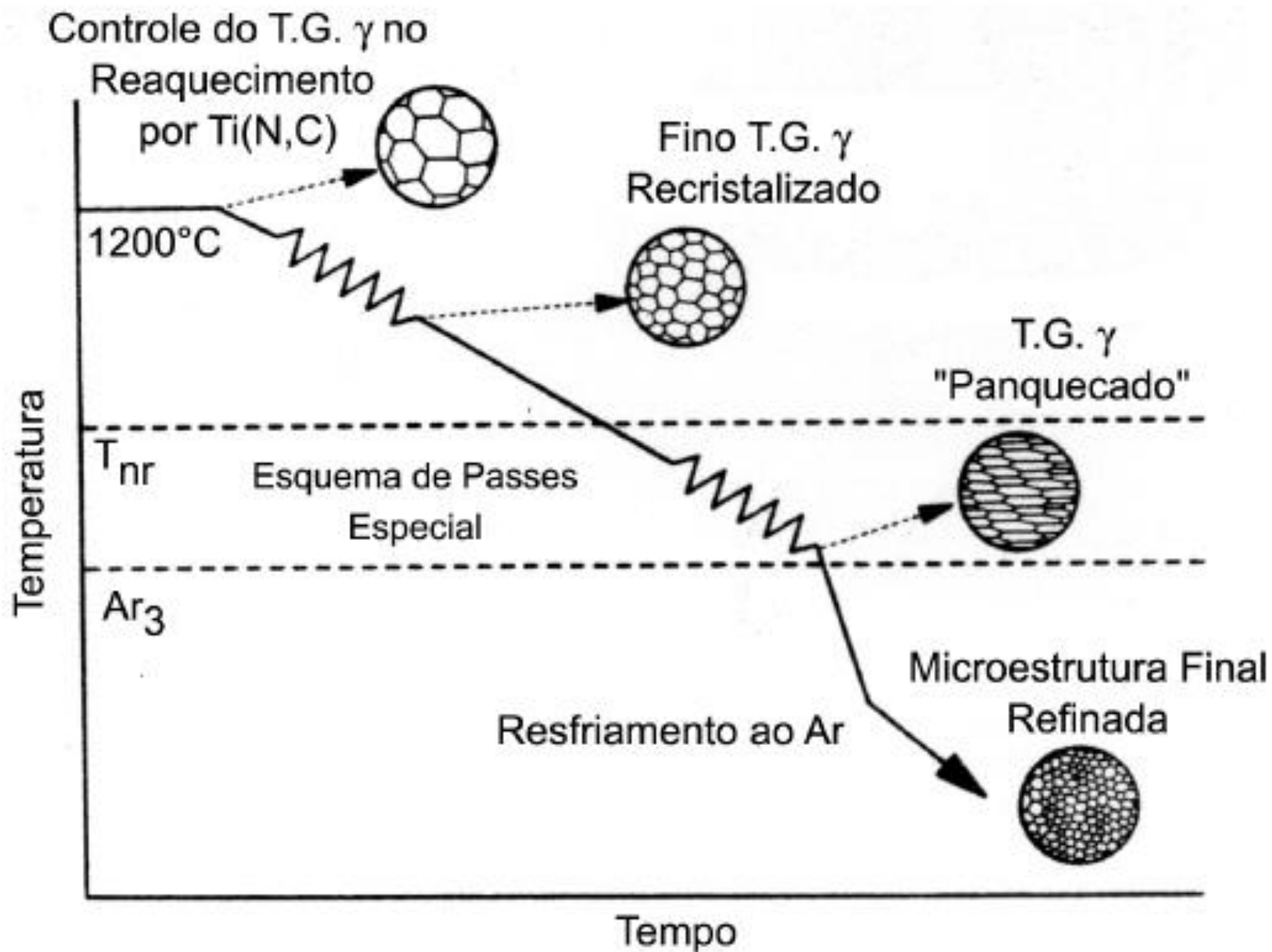
adição de microligantes (Nb, Ti, V)

■ modelo de Orowan-Ashby:

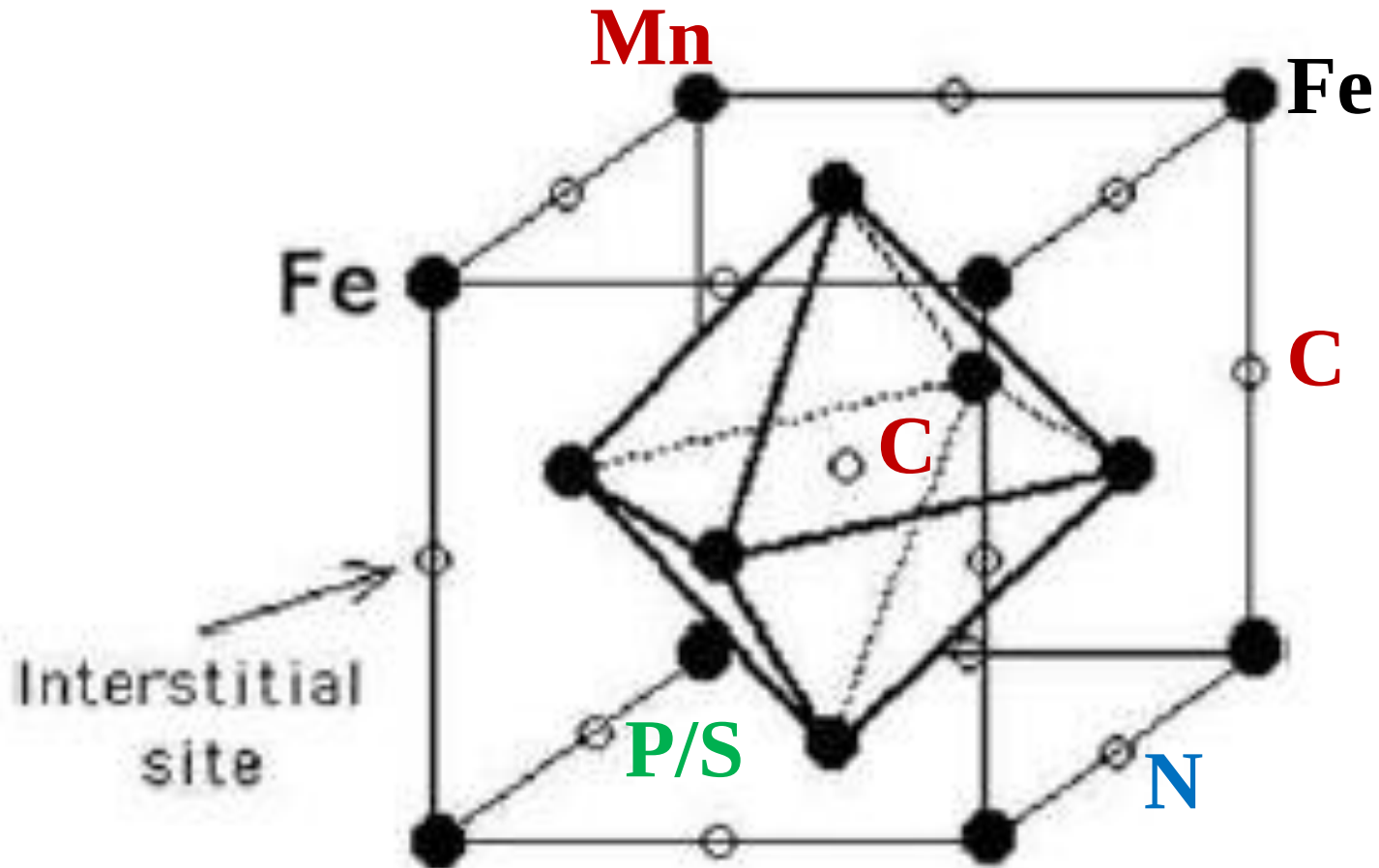
f – fração volumétrica
 d – tamanho partícula [nm]

$$\Delta\sigma_p = 10800 \cdot \frac{\sqrt{f}}{d} \cdot \ln(1,63 \cdot d)$$

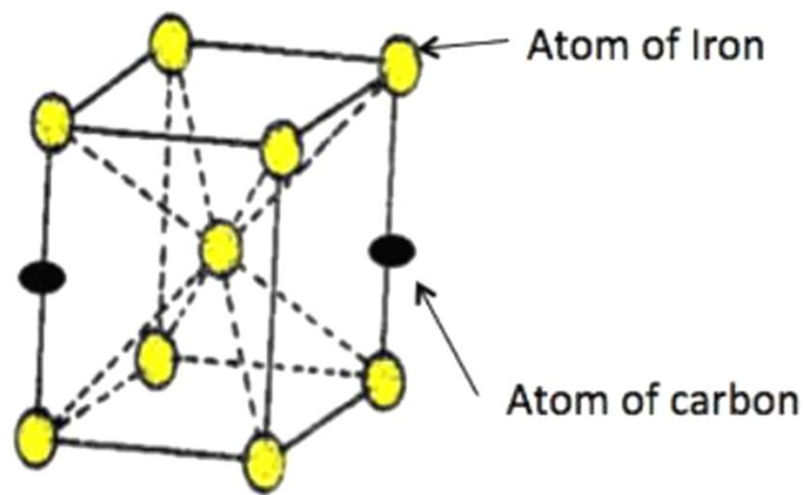
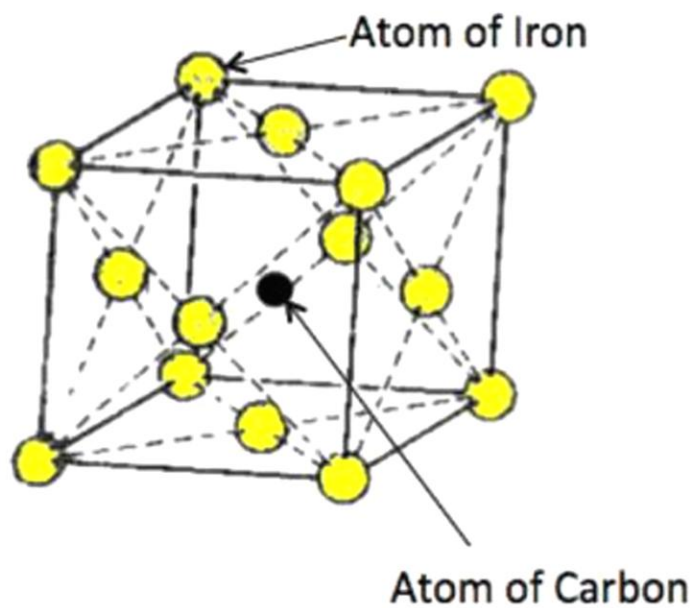
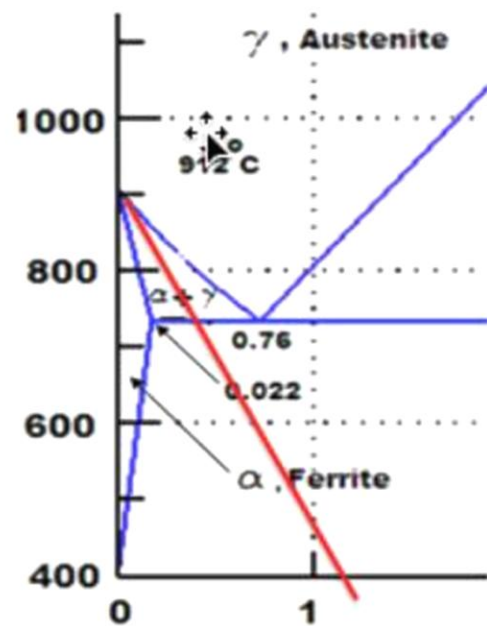
11>



O QUE É AÇO?



Fe~ 80/90%p, C: 0,008-2,00%p, Mn: 0,30-0,90%p, Pmáx: 0,05%p e Smáx: 0,05%p



FIM