



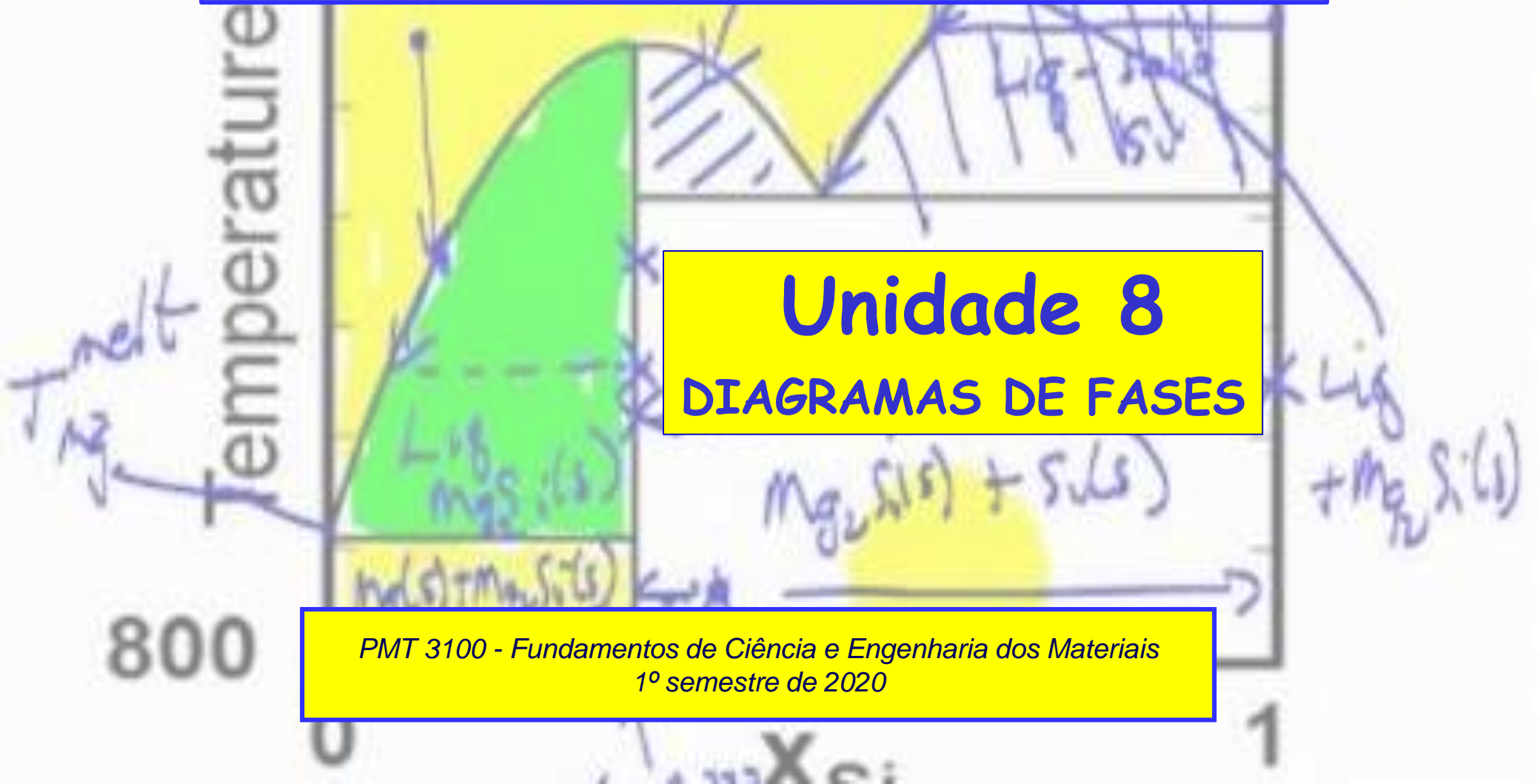
ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

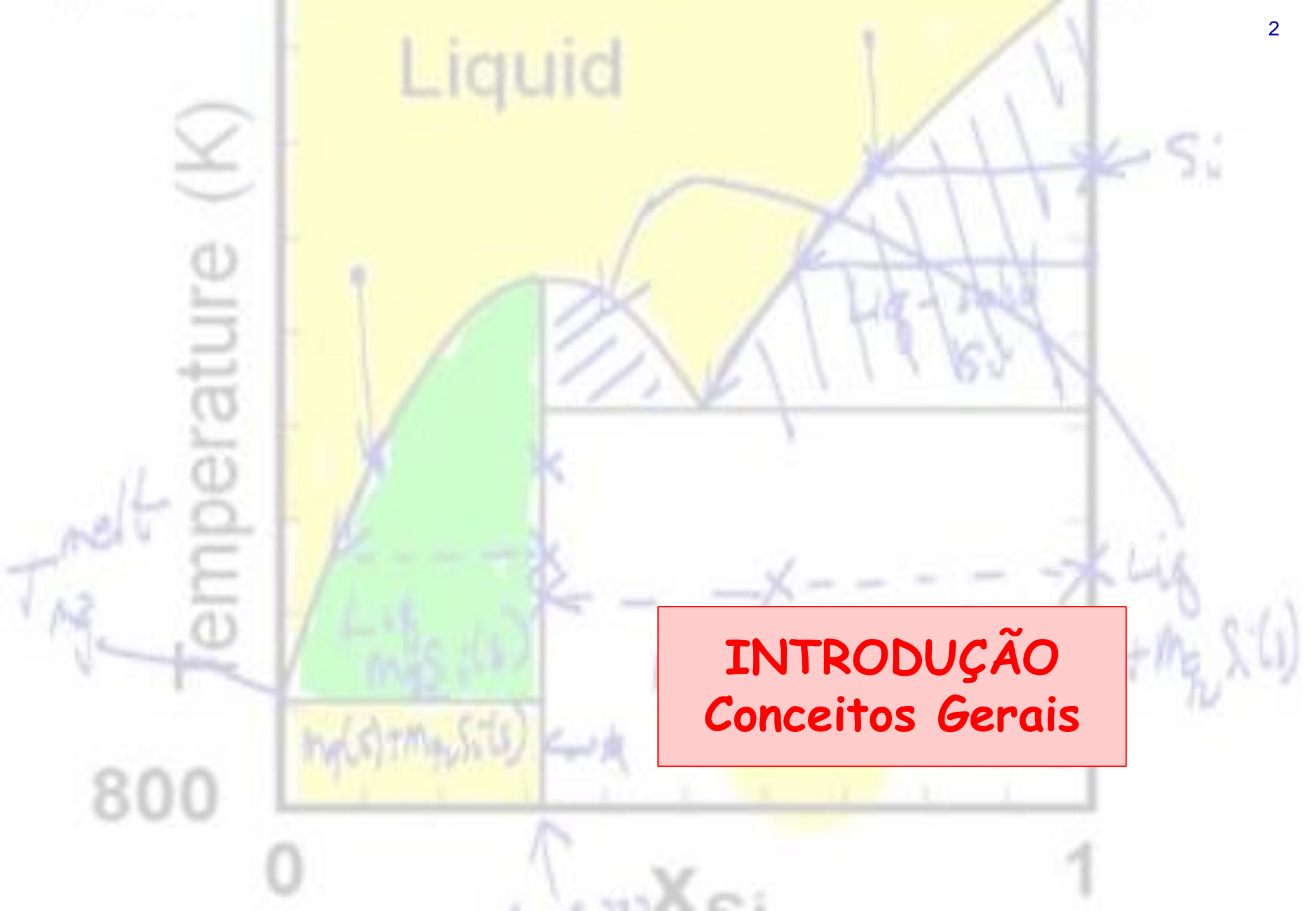
# Unidade 8

## DIAGRAMAS DE FASES

Temperature  
800

PMT 3100 - Fundamentos de Ciência e Engenharia dos Materiais  
1º semestre de 2020





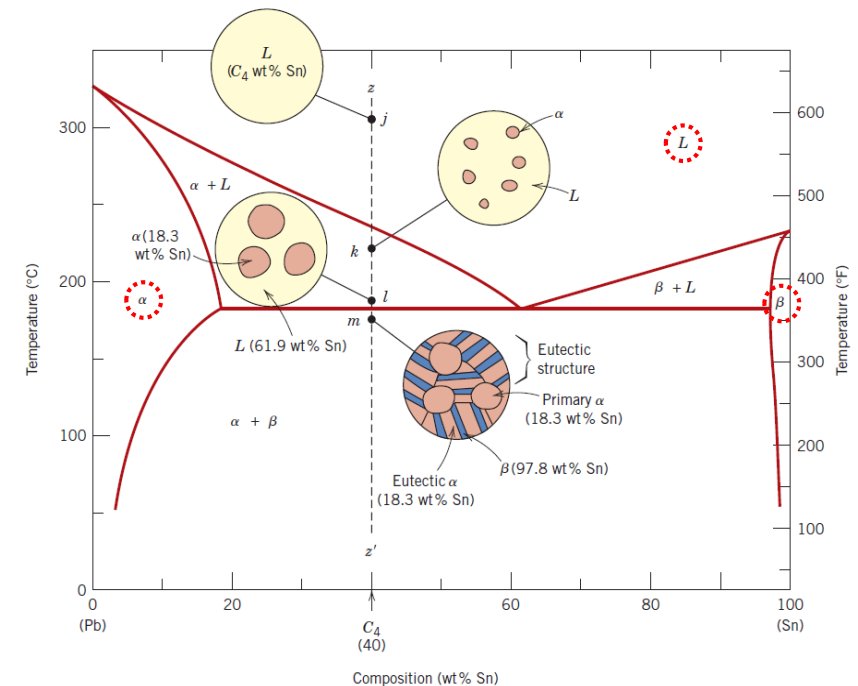
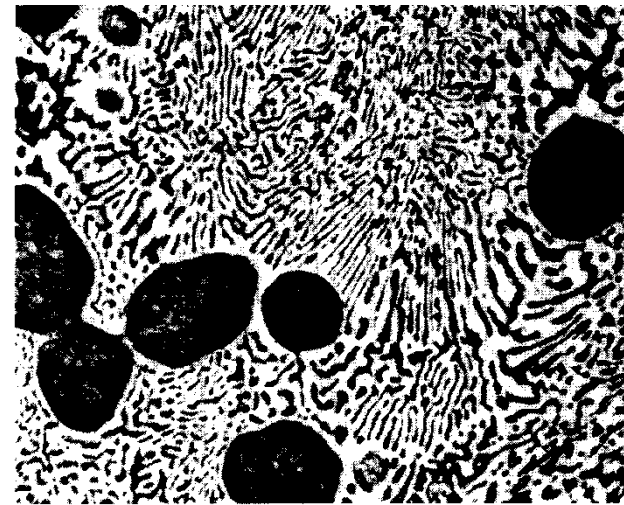
**INTRODUÇÃO**  
Conceitos Gerais

# Por que estudar Diagramas de Fases?

- Os diagramas de fases relacionam **temperatura**, **composição química** e **quantidade das fases em equilíbrio**.

– *Um diagrama de fases é uma espécie de “**mapa**” que mostra quais são as fases estáveis nas diferentes composições, temperaturas e pressões.*

- A **MICROESTRUTURA** dos materiais pode ser relacionada com o diagrama de fases.
- Existe uma relação direta entre as **propriedades** dos materiais e as suas **microestruturas**.



Exemplo : Diagrama de Fases do Sistema Pb-Sn

# Definições (1)

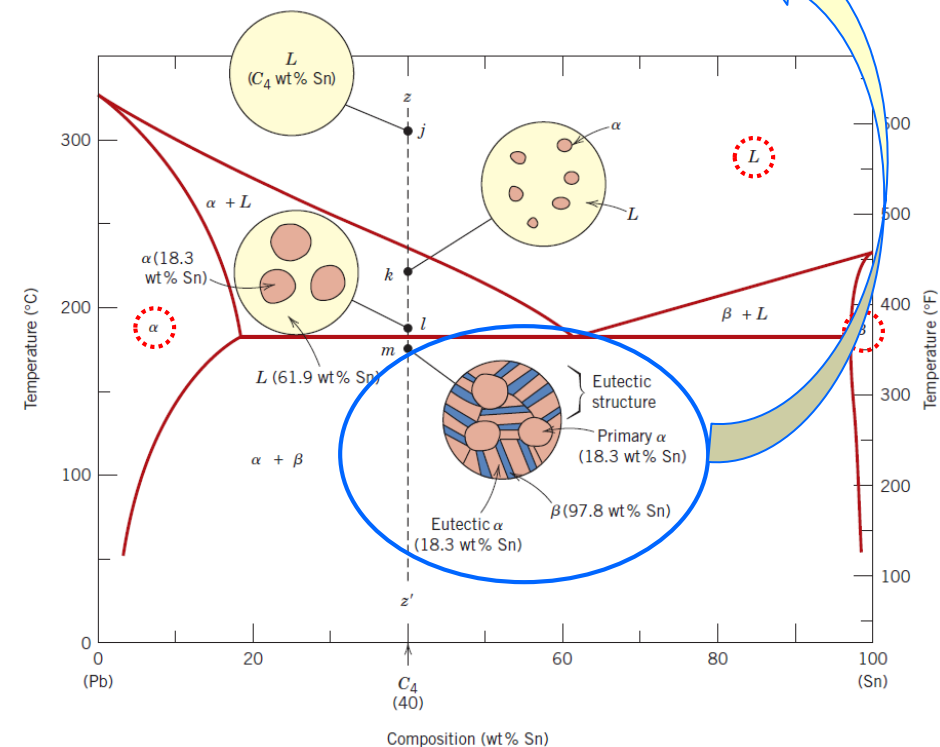
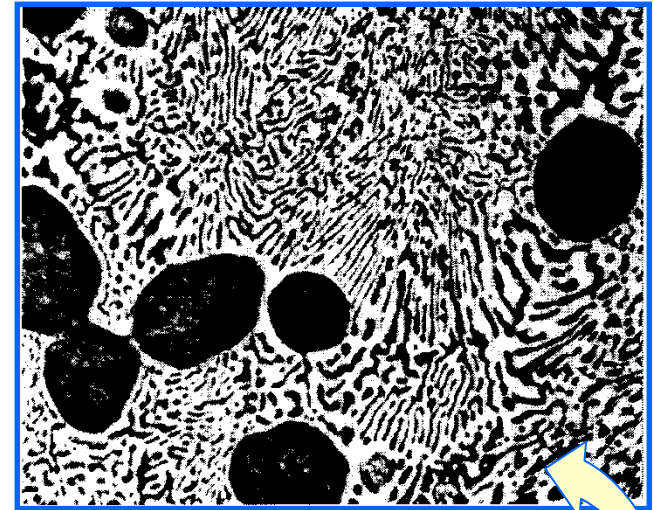


## • COMPONENTES

- São as espécies químicas (**elementos químicos** e/ou **compostos**) presentes em um sistema e que constituem uma fase.

## • SISTEMA

- **Definição 1:** quantidade de matéria com massa e identidade fixas sobre a qual dirigimos a nossa atenção. Todo o resto é chamado *vizinhança*. Exemplo: uma barra da liga ao lado, com 40% de Sn.
- **Definição 2:** série de *fases possíveis* formadas pelos mesmos componentes, independentemente da composição específica. Exemplo: o sistema Pb-Sn.

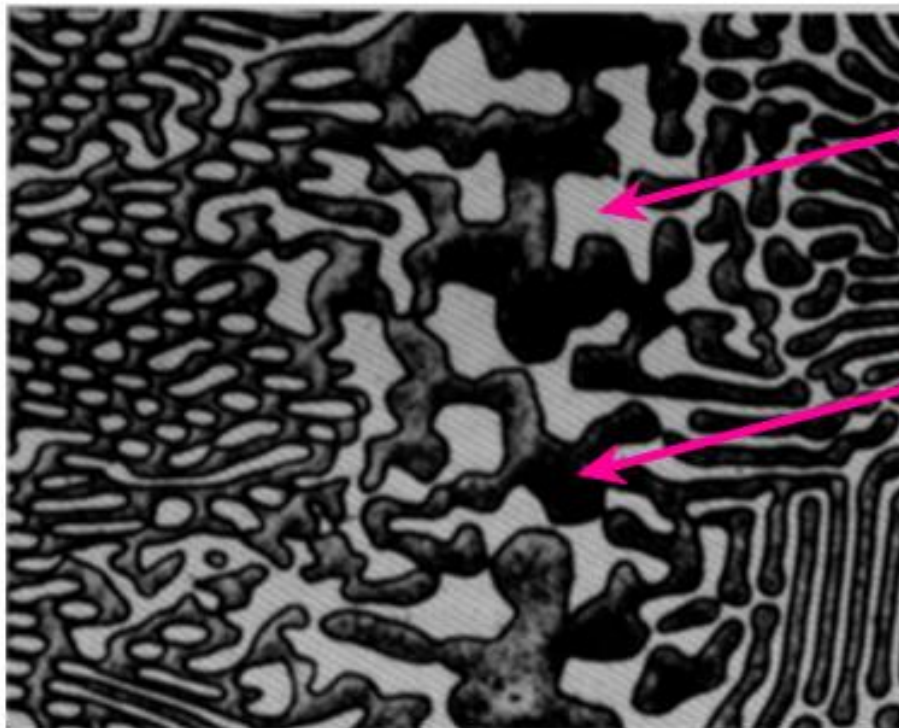


Exemplo : Diagrama de Fases do Sistema Pb-Sn

# Definições (2)

- **FASE**

- Uma parte **estruturalmente homogênea** do sistema, que possui *propriedades físicas e químicas características*. Exemplo: fases  $\alpha$  e  $\beta$  da liga abaixo, que contém, ambas, Al e Cu  $\rightarrow$  porém, com porcentagens diferentes de Al e Cu em cada uma !



Two phases

$\beta$  (lighter phase)  
Includes Al and Cu

$\alpha$  (darker phase)  
Includes Al and Cu

Two Components

**Al-Cu Alloy**



## Informações que podem ser obtidas a partir dos Diagramas de Fases

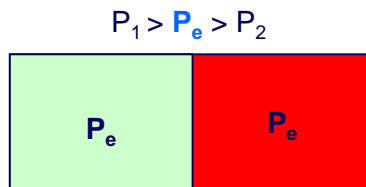
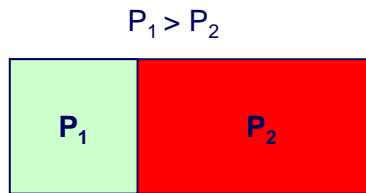
- ✓ **Temperaturas** de fusão/solidificação
- ✓ **Número de fases** presentes em função da temperatura
- ✓ **Composição** química das fases
- ✓ **Quantidade relativa** de cada uma das fases
- ✓ **Limites de solubilidade**
- ✓ *Permite que se faça uma previsão da **microestrutura***

O que um diagrama de fases não diz:  
*não fornece **nenhuma informação** a respeito **da cinética** das transformações (“tempo”) ...*

# Diagramas de Fases são *diagramas de equilíbrio* !

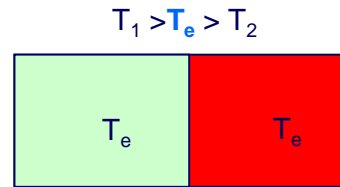
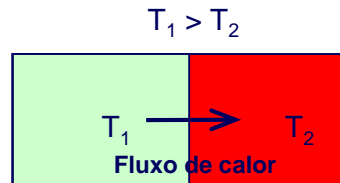
## Equilíbrio mecânico

- Parede não rígida: móvel
- Propriedade termodinâmica: **pressão**



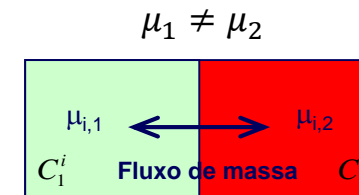
## Equilíbrio térmico

- Parede diatérmica: permite o fluxo de calor
- Propriedade termodinâmica: **temperatura**

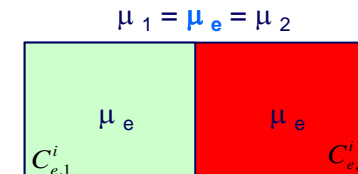


## Equilíbrio de fases

- Parede permeável
- Propriedade termodinâmica: **potencial químico ( $\mu$ )**



$$\mu_i = \left( \frac{\partial G}{\partial N_i} \right)_{p,T,N_j} \quad dG = dH - Tds$$



O conceito de potencial químico não será explorado neste curso...



## ...para saber mais : *Potencial Químico*

### (c) Thermodynamic criteria of phase stability

All the following considerations are based on the Gibbs energy of a substance, and in particular on its molar Gibbs energy,  $G_m$ . In fact, this quantity plays such an important role in this Focus and elsewhere in the text that it is given a special name and symbol, the **chemical potential**,  $\mu$  (mu). For a system that consists of a single substance, the ‘molar Gibbs energy’ and the ‘chemical potential’ are exactly the same:  $\mu = G_m$ . In Topic 5A the chemical potential is given a broader significance and a more general definition. The name ‘chemical potential’ is also instructive: as the concept is developed it will become clear that  $\mu$  is a measure of the potential that a substance has for undergoing change. In this Focus, and in Focus 5, it reflects the potential of a substance to undergo physical change. In Focus 6,  $\mu$  is the potential of a substance to undergo chemical change.

The discussion in this Topic is based on the following consequence of the Second Law (Fig. 4A.3):

At equilibrium, the chemical potential of a substance is the same in and throughout every phase present in the system.

Criterion  
for phase  
equilibrium

### (b) Partial molar Gibbs energies

The concept of a partial molar quantity can be broadened to any extensive state function. For a substance in a mixture, the chemical potential is *defined* as the partial molar Gibbs energy:

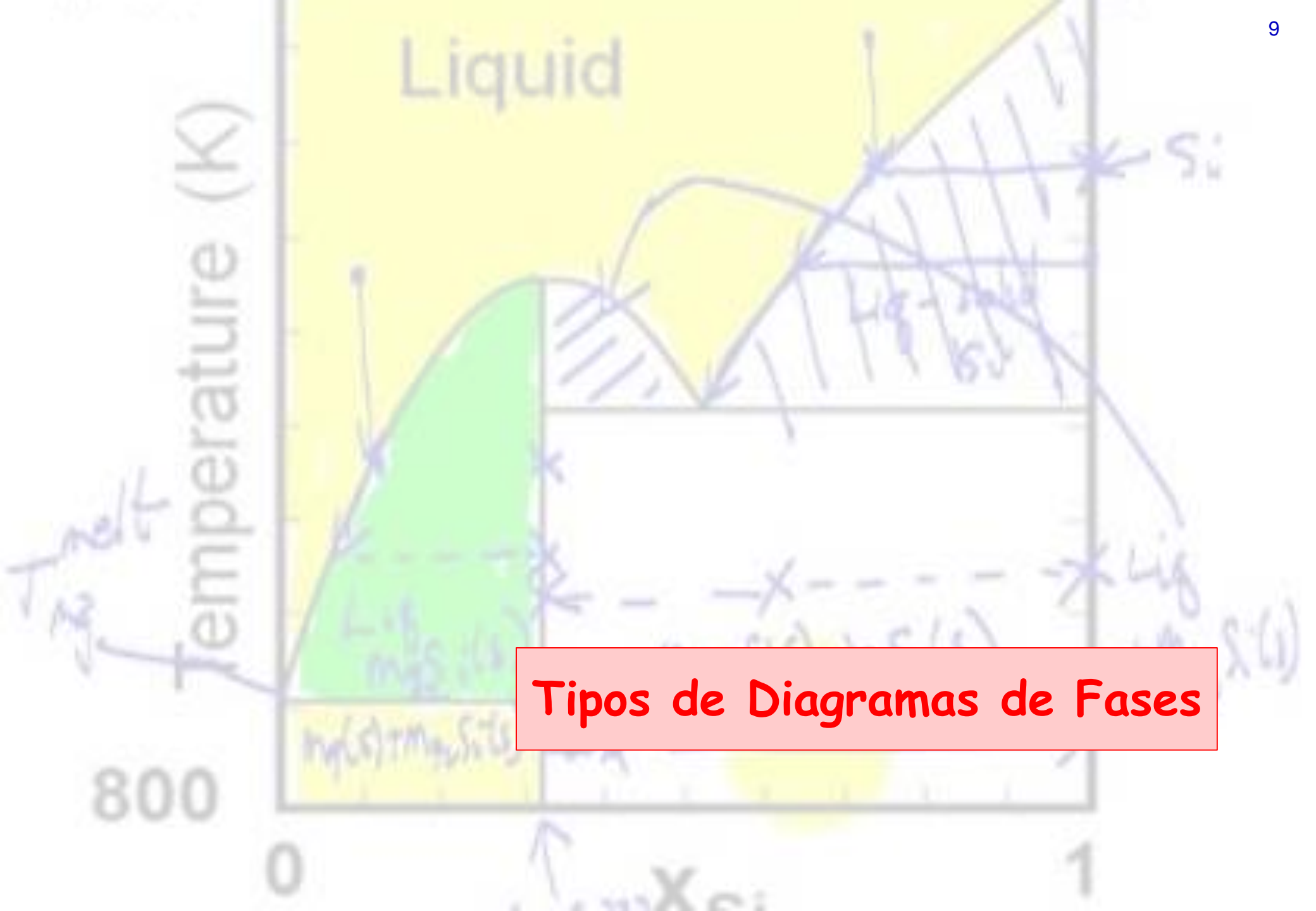
$$\mu_J = \left( \frac{\partial G}{\partial n_J} \right)_{p,T,n'} \quad \text{Chemical potential [definition]} \quad (5A.4)$$

where  $n'$  is used to denote that the amounts of all other components of the mixture are held constant. That is, the chemical potential is the slope of a plot of Gibbs energy against the amount of the component J, with the pressure, temperature, and the amounts of the other substances held constant (Fig. 5A.4). For a pure substance  $G = n_J G_{J,m}$ , and from eqn 5A.4 it follows that  $\mu_J = G_{J,m}$ : in this case, the chemical potential is simply the molar Gibbs energy of the substance, as is used in Topic 4A.

...para os que desejarem ir além e ter uma visão mais rigorosa a respeito da Físico-Química envolvida no tema “Diagramas de Fases”, a referência a seguir (da qual foram retirados os textos desta página) é recomendada:

Atkins, P.; de Paula, J.; Keeler, J. *Atkin's Physical Chemistry*. 11<sup>th</sup> Ed. Oxford. 2018. Caps. 4-5.





**Tipos de Diagramas de Fases**

## Tipos de Diagramas de Fases

### DIAGRAMAS DE FASES

**Unário:** 1 componente;

variáveis ( $P, T$ )

Ex:  $H_2O$ , Fe

**Binário:** 2 componentes;

variáveis ( $T, x$ )  $\rightarrow P = \text{constante}$

Ex: BaO/TiO<sub>2</sub>, Al-Si

**Ternário:** 3 componentes;

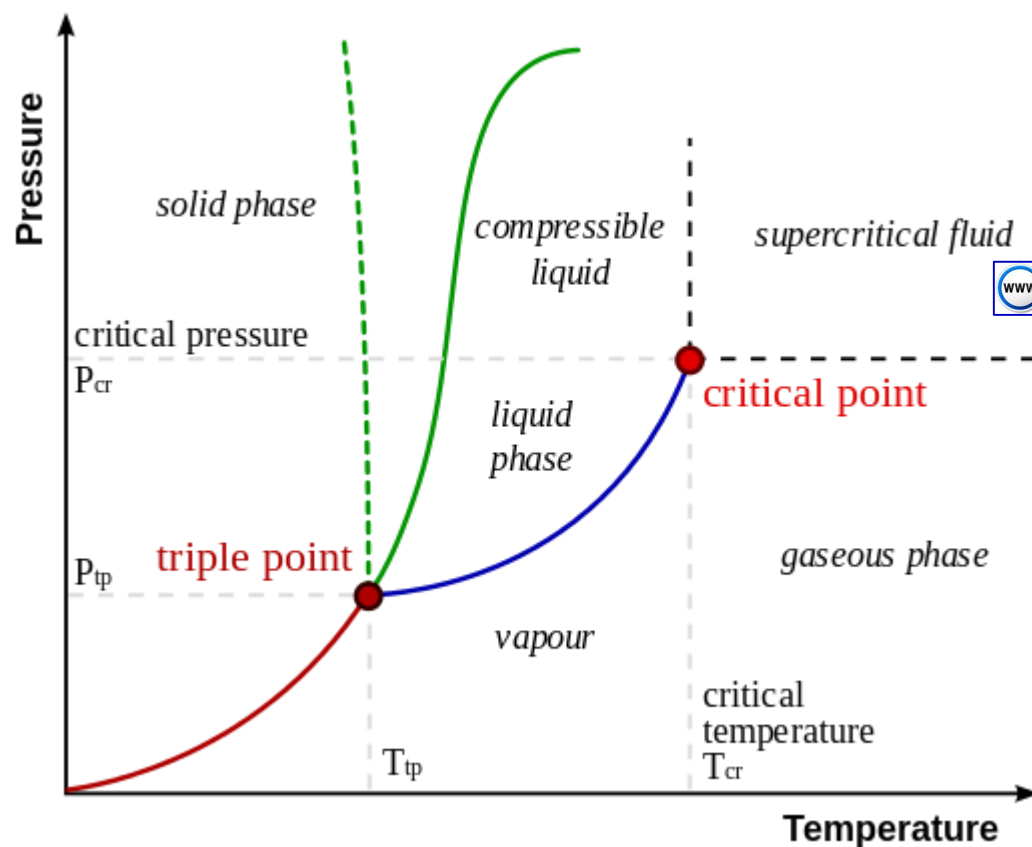
variáveis ( $x$ )  $\rightarrow P = 1 \text{ atm}$  e  $T = \text{constante}$

Ex: Fe-Cr-Ni, BaO + CaO + TiO<sub>2</sub>

# Tipos de Diagramas de Fases

## DIAGRAMAS DE FASES

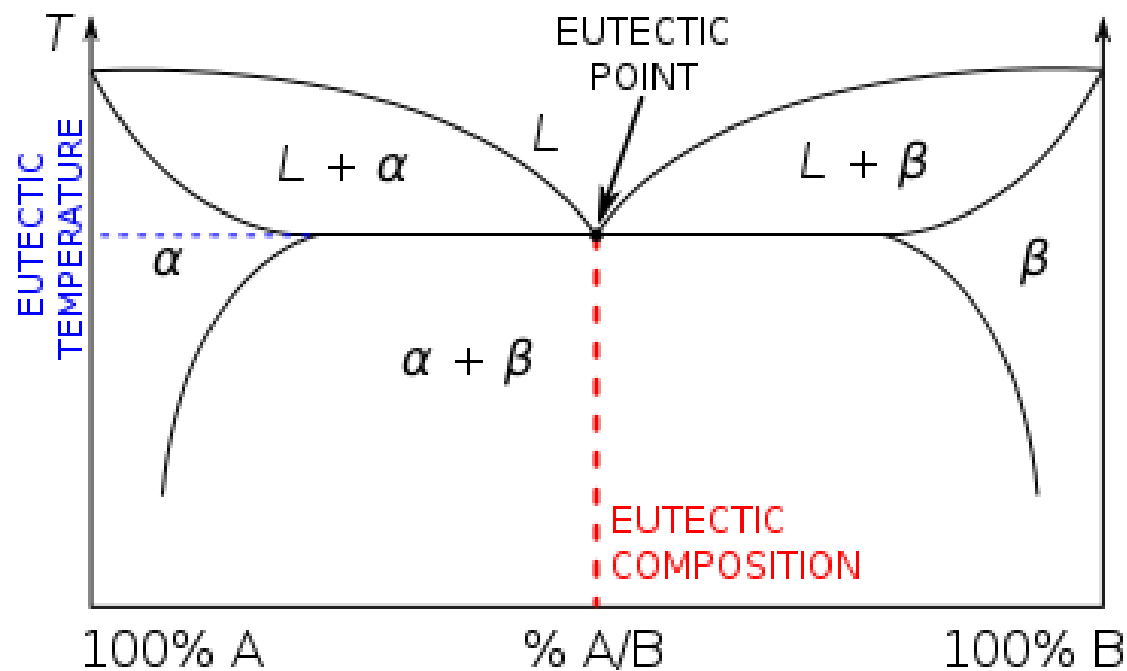
Unário: 1 componente;  
variáveis (P, T)  
Ex: H<sub>2</sub>O, Fe



## Tipos de Diagramas de Fases

### DIAGRAMAS DE FASES

**Binário:** 2 componentes;  
variáveis  $(T, x) \rightarrow P = \text{constante}$   
Ex: BaO/TiO<sub>2</sub>, Al-Si



# Tipos de Diagramas de Fases

**Ternário:** 3 componentes;  $P = 1 \text{ atm}$  e  $T = \text{constante}$

Ex: Fe-Cr-Ni, BaO + CaO + TiO<sub>2</sub>

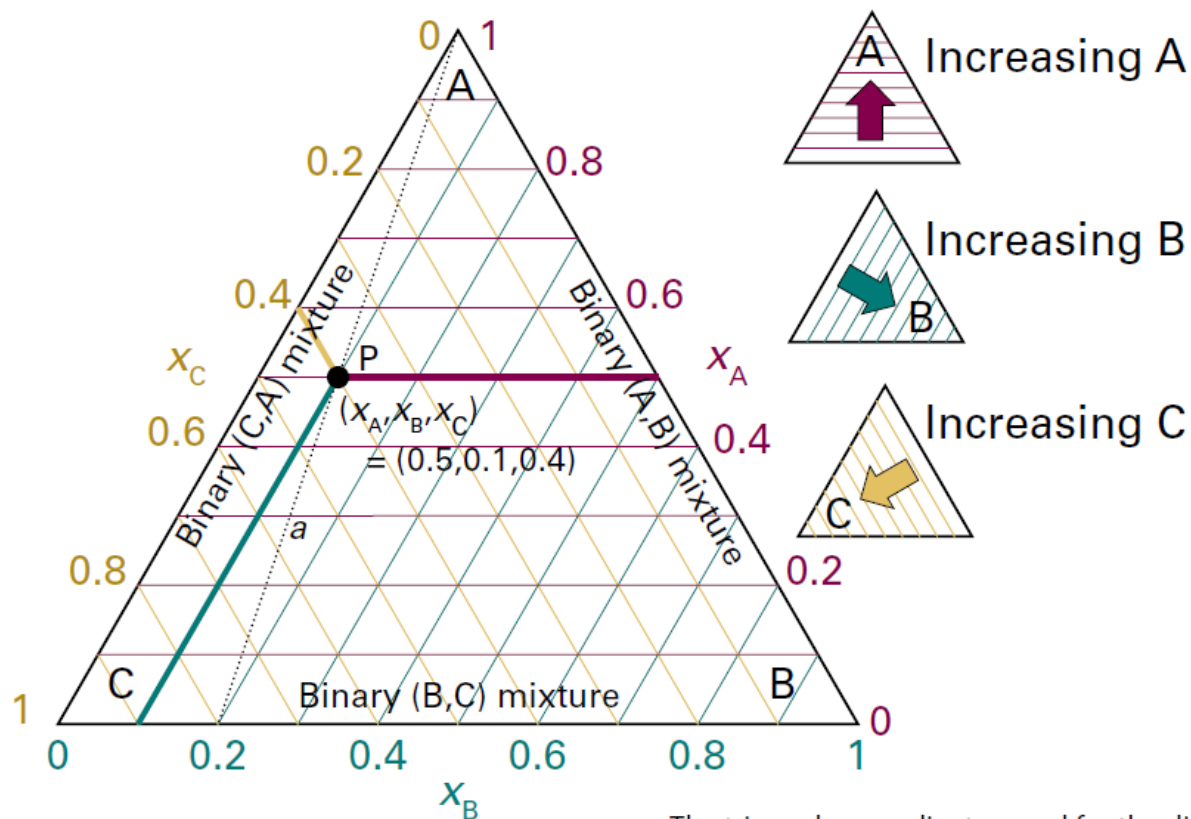
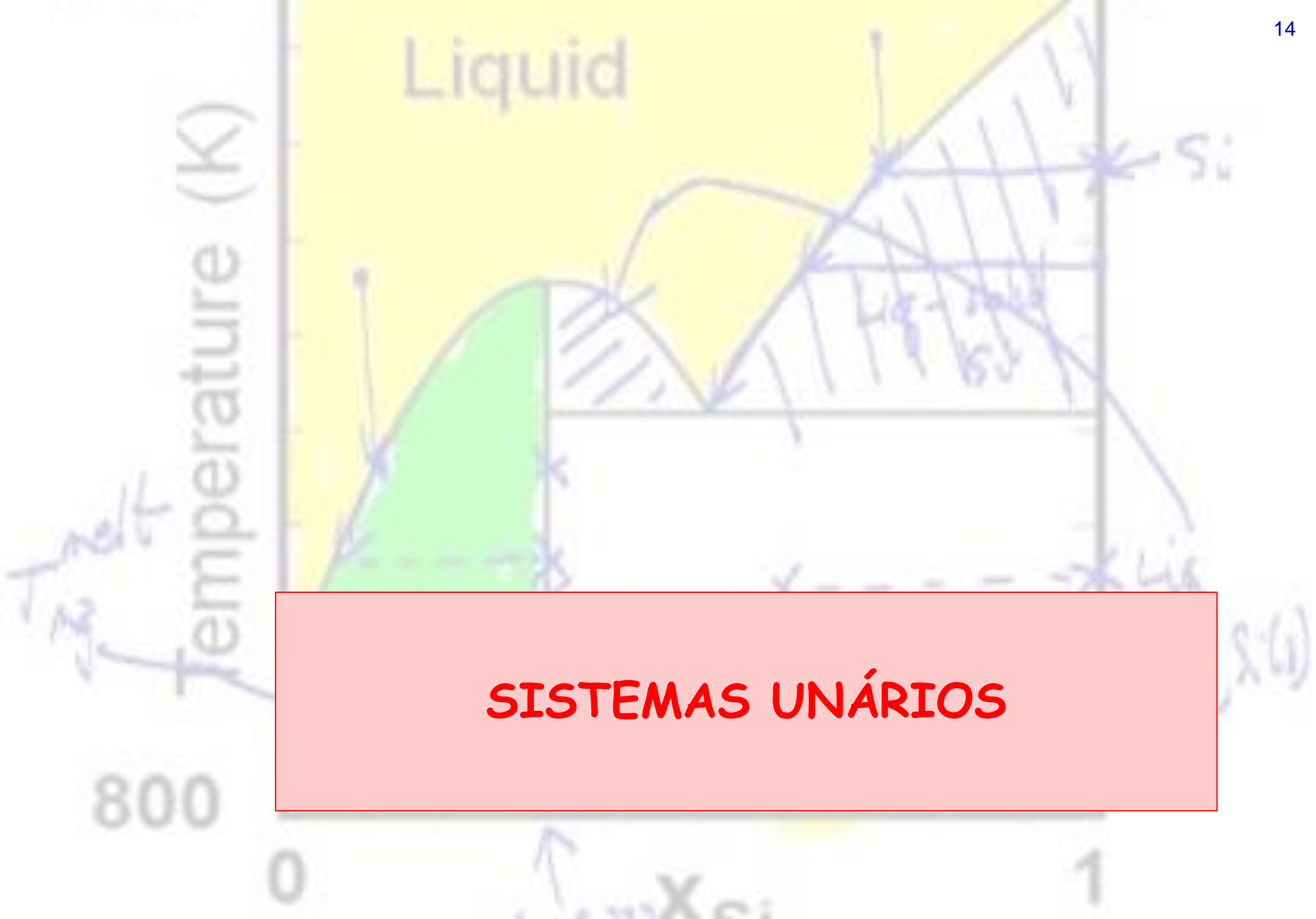


Figura: Atkins, P.; de Paula, J.; Keeler, J. *Atkin's Physical Chemistry*. 11<sup>th</sup> Ed. Oxford. 2018. Fig. 5E.1

The triangular coordinates used for the discussion of three-component systems. Each edge corresponds to a binary system. All points along the dotted line *a* correspond to mole fractions of C and B in the same ratio.

**DIAGRAMAS  
DE FASES**



# Sistemas com um único componente

- O equilíbrio entre duas fases num sistema monocomponente chama-se equilíbrio *univariante*.

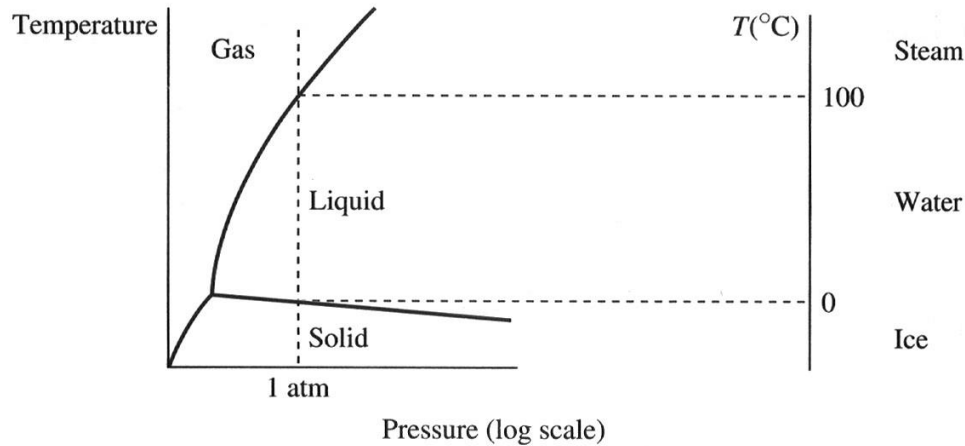


Diagrama de Fases da água

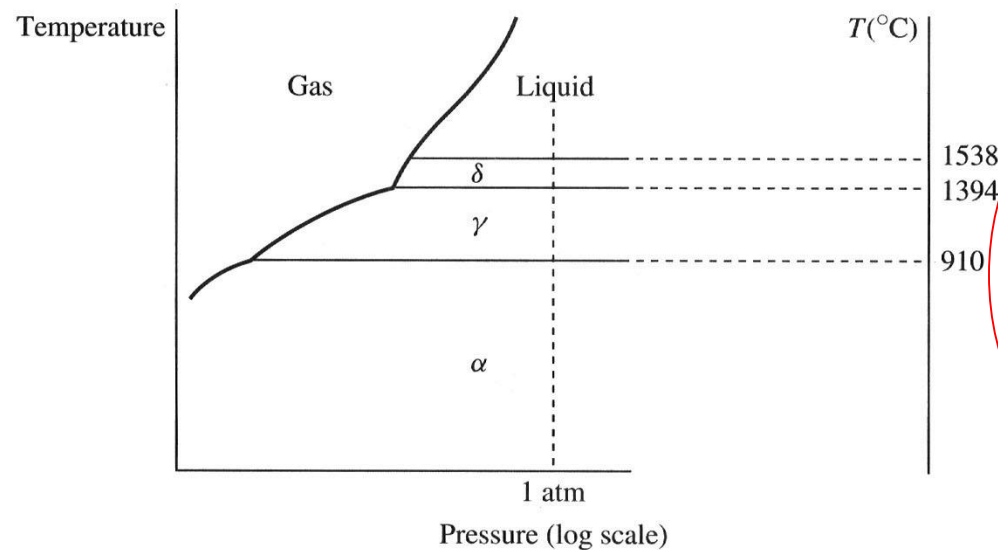


Diagrama de Fases do ferro

**ALOTROPIA**  
 $\alpha$ ,  $\gamma$  e  $\delta$  são fases sólidas !



**SISTEMAS BINÁRIOS**

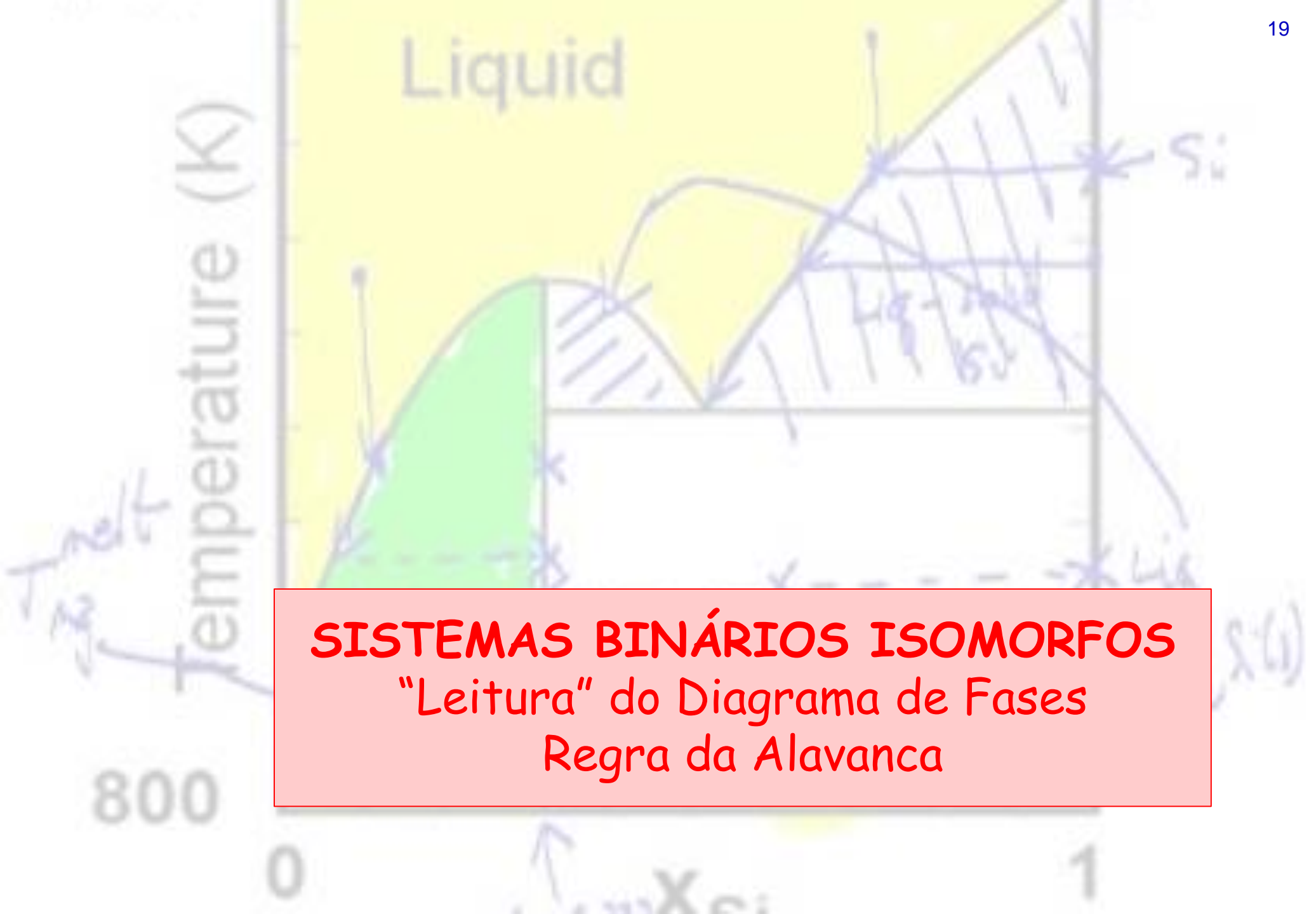


## TIPOS DE DIAGRAMAS DE FASES BINÁRIOS

- Aqueles que apresentam **solubilidade total** em todas as proporções nos estados líquido e sólido:
  - Sistemas **isomorfos**.
- Aqueles que apresentam **solubilidade total** em todas as proporções no **estado líquido**, mas cuja **solubilidade** é **restrita** (ou até mesmo nula) **no estado sólido**:
  - Sistemas **eutéticos**;
  - Sistemas **eutetóides**;
  - Sistemas *peritéticos*;
  - Sistemas *peritetóides*.
- Aqueles que apresentam **solubilidade limitada** nos estados líquido e sólido:
  - Sistemas *monotéticos*.

# TIPOS DE DIAGRAMAS DE FASES BINÁRIOS

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



**SISTEMAS BINÁRIOS ISOMORFOS**  
"Leitura" do Diagrama de Fases  
Regra da Alavanca

# Sistemas Binários : Diagramas de Equilíbrio de Fase *Isomorfos*

- Num sistema binário isomorfo, **os dois componentes são completamente solúveis** um no outro.

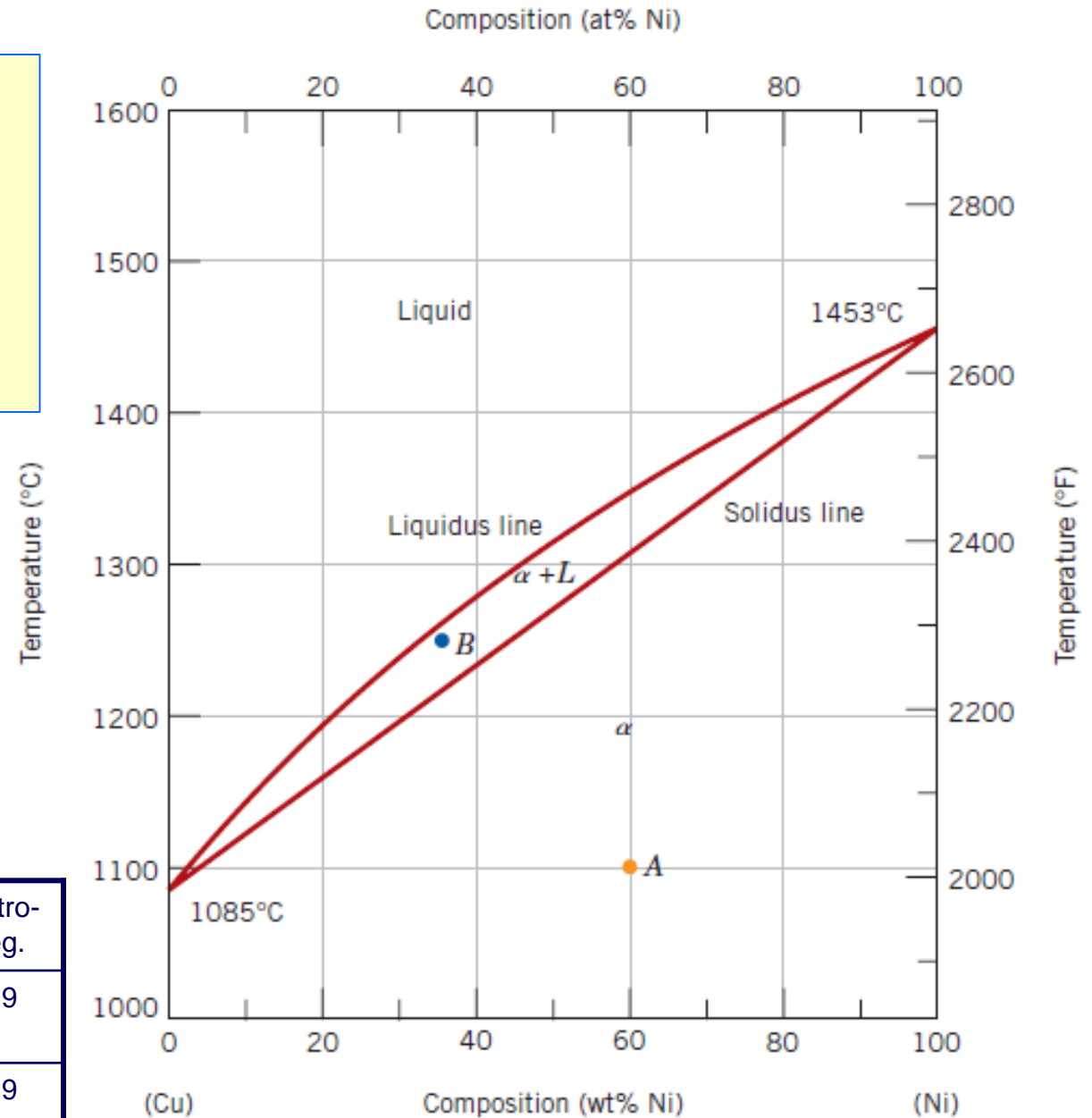
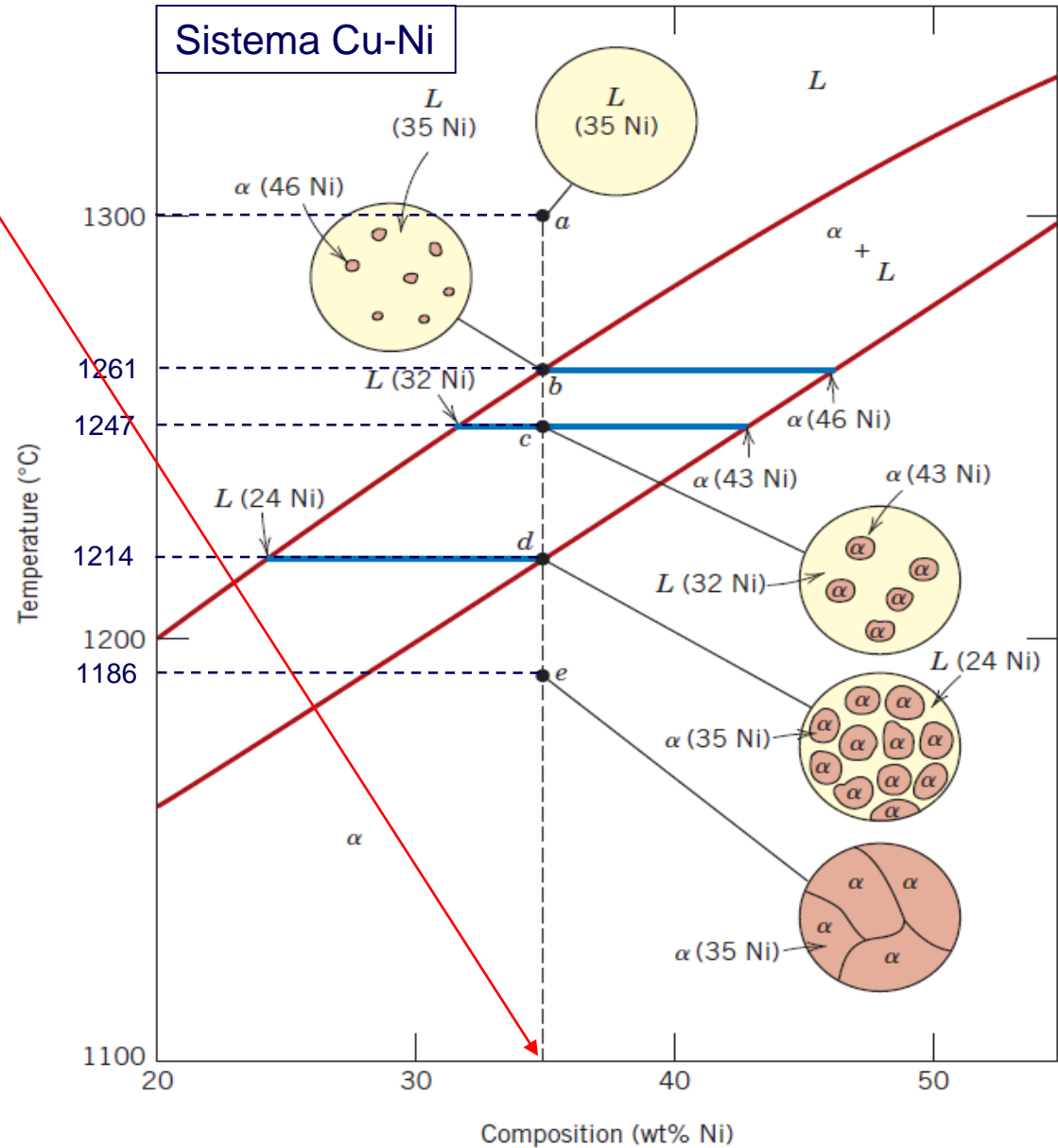


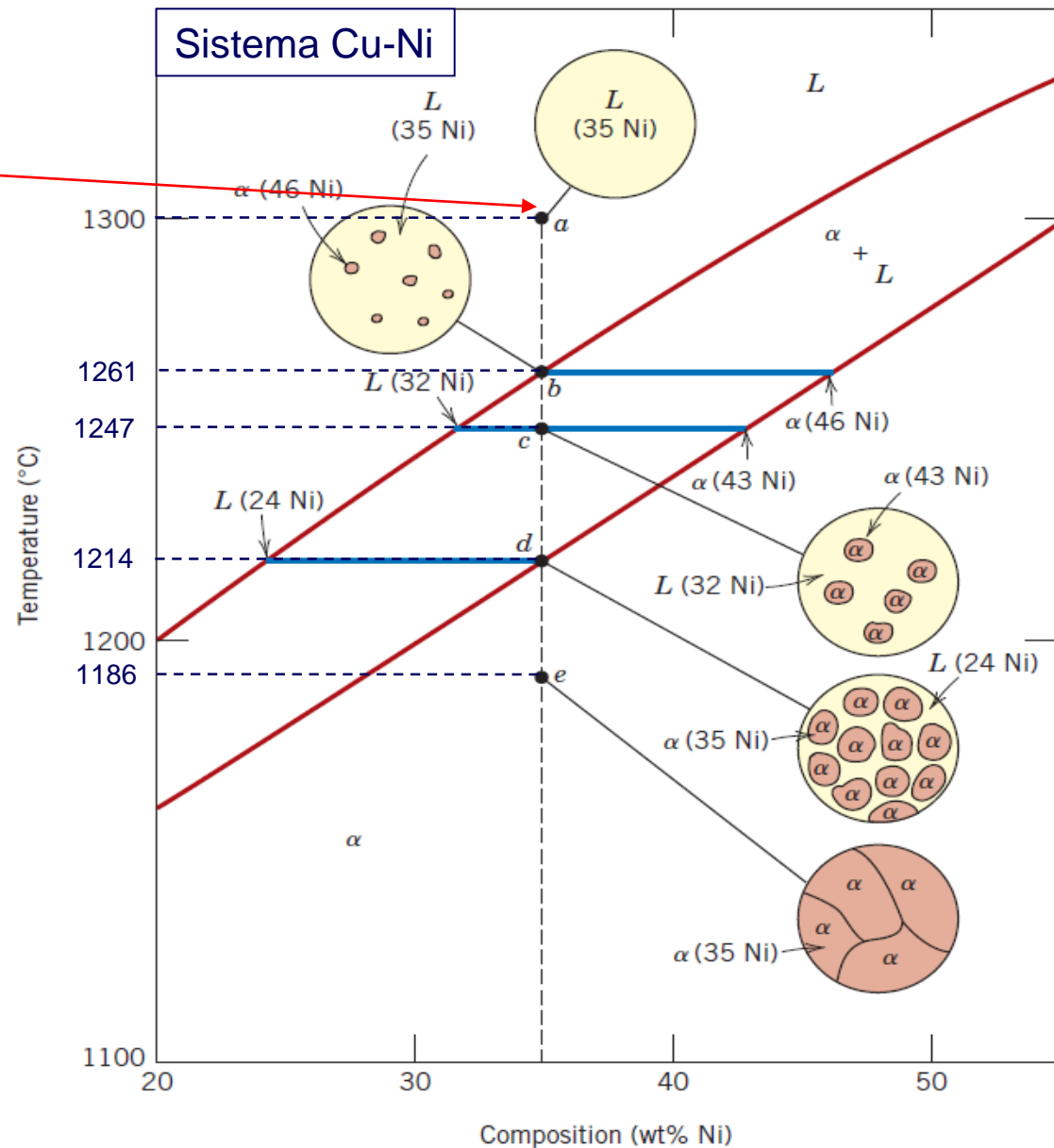
Diagrama de fases do Sistema Cu - Ni

Compon.	Raio atômico	Mis-match	Estrut. crist.	Valên-cia	Eleto-neg.
Ni (solvente)	0,125 nm	2,3%	CFC	2+	1,9
Cu (soluto)	0,128 nm	2,3%	CFC	1+	1,9

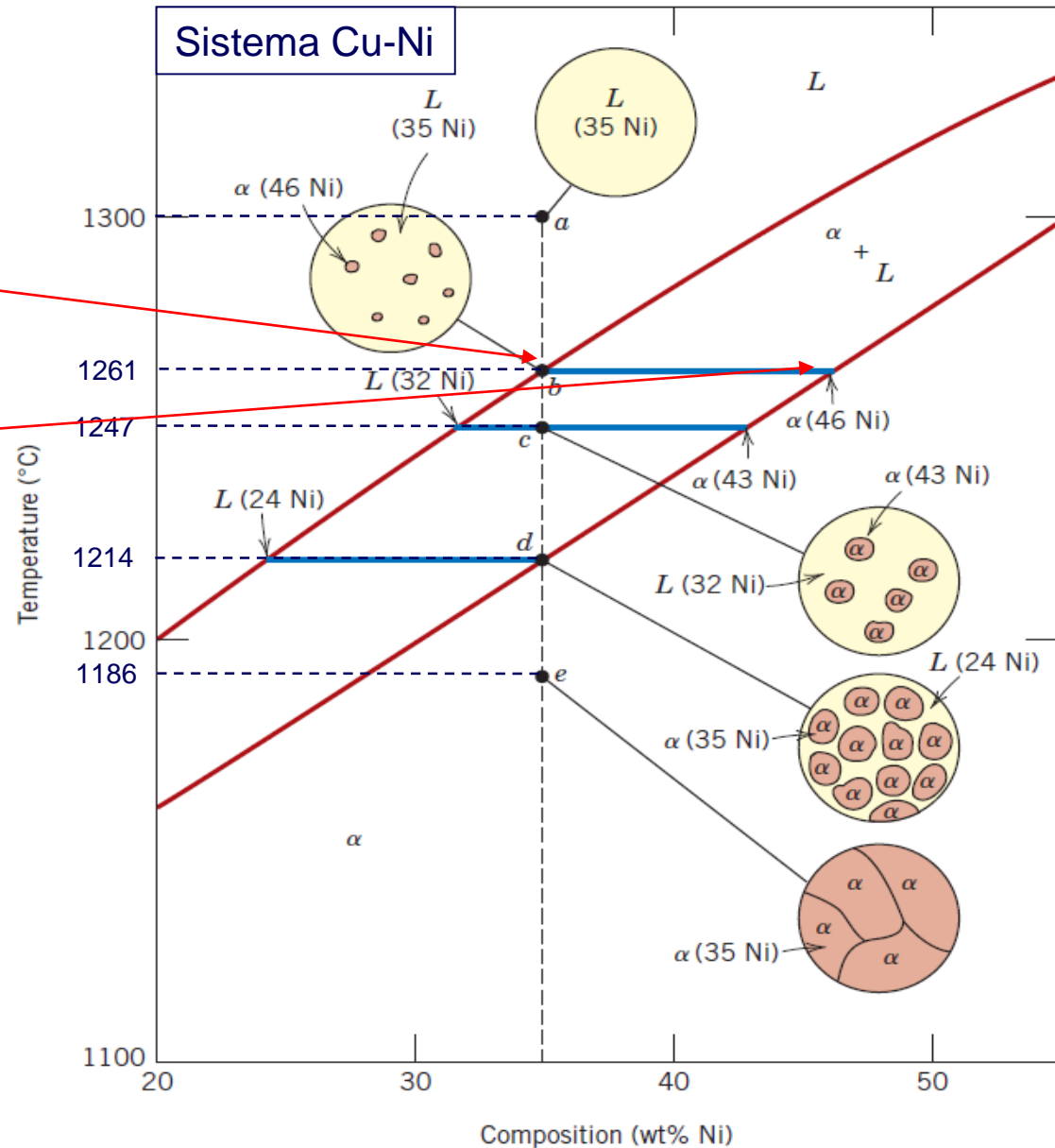
- A leitura de diagramas de fases é feita primeiramente definindo-se uma liga de interesse, como por exemplo 35% Ni.
- Na temperatura de 1300°C (ponto a) a fase em equilíbrio termodinâmico é a fase líquida com 35% de Ni.
- Na temperatura de 1261°C (ponto b), que é a **temperatura líquidus** desta liga, começa a solidificação. Nesta temperatura estão em equilíbrio termodinâmico o líquido com 35% de Ni e os primeiros núcleos de sólido com 46% de Ni.
- Na temperatura de 1247°C (ponto c) estão em equilíbrio termodinâmico o líquido com 32% de Ni e o sólido com 43% de Ni.
- Na temperatura de 1214°C (ponto d), que é a **temperatura solidus** desta liga estão em equilíbrio termodinâmico o último líquido com 24% de Ni e o sólido com 35% de Ni.
- Na temperatura de 1186°C (ponto e) a fase em equilíbrio termodinâmico é a fase sólida com 35% de Ni, que apresenta a **microestrutura da liga** de interesse.



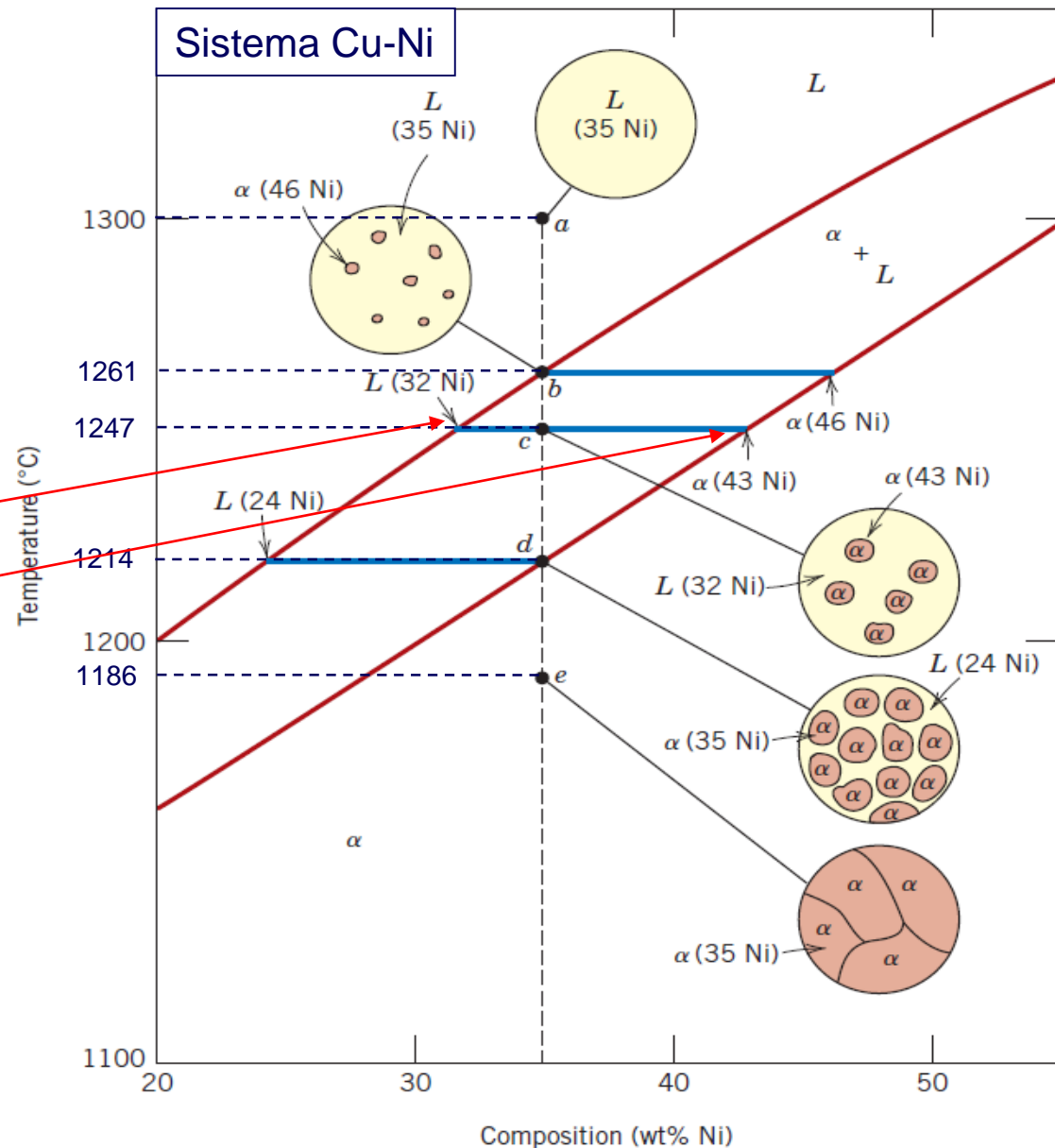
- A leitura de diagramas de fases é feita primeiramente definindo-se uma liga de interesse, como por exemplo 35% Ni.
- Na temperatura de 1300°C (ponto a) a fase em equilíbrio termodinâmico é a **fase líquida com 35% de Ni**.
- Na temperatura de 1261°C (ponto b), que é a **temperatura líquidus** desta liga, começa a solidificação. Nesta temperatura estão em equilíbrio termodinâmico o líquido com 35% de Ni e os primeiros núcleos de sólido com 46% de Ni.
- Na temperatura de 1247°C (ponto c) estão em equilíbrio termodinâmico o líquido com 32% de Ni e o sólido com 43% de Ni.
- Na temperatura de 1214°C (ponto d), que é a **temperatura solidus** desta liga estão em equilíbrio termodinâmico o último líquido com 24% de Ni e o sólido com 35% de Ni.
- Na temperatura de 1186°C (ponto e) a fase em equilíbrio termodinâmico é a fase sólida com 35% de Ni, que apresenta a **microestrutura da liga** de interesse.



- A leitura de diagramas de fases é feita primeiramente definindo-se uma liga de interesse, como por exemplo 35% Ni.
- Na temperatura de 1300°C (ponto a) a fase em equilíbrio termodinâmico é a fase líquida com 35% de Ni.
- Na temperatura de 1261°C (ponto b), que é a **temperatura líquidus** desta liga, começa a solidificação. Nesta temperatura estão em equilíbrio termodinâmico o líquido com 35% de Ni e os primeiros núcleos de sólido com 46% de Ni.
- Na temperatura de 1247°C (ponto c) estão em equilíbrio termodinâmico o líquido com 32% de Ni e o sólido com 43% de Ni.
- Na temperatura de 1214°C (ponto d), que é a **temperatura solidus** desta liga estão em equilíbrio termodinâmico o último líquido com 24% de Ni e o sólido com 35% de Ni.
- Na temperatura de 1186°C (ponto e) a fase em equilíbrio termodinâmico é a fase sólida com 35% de Ni, que apresenta a **microestrutura da liga** de interesse.

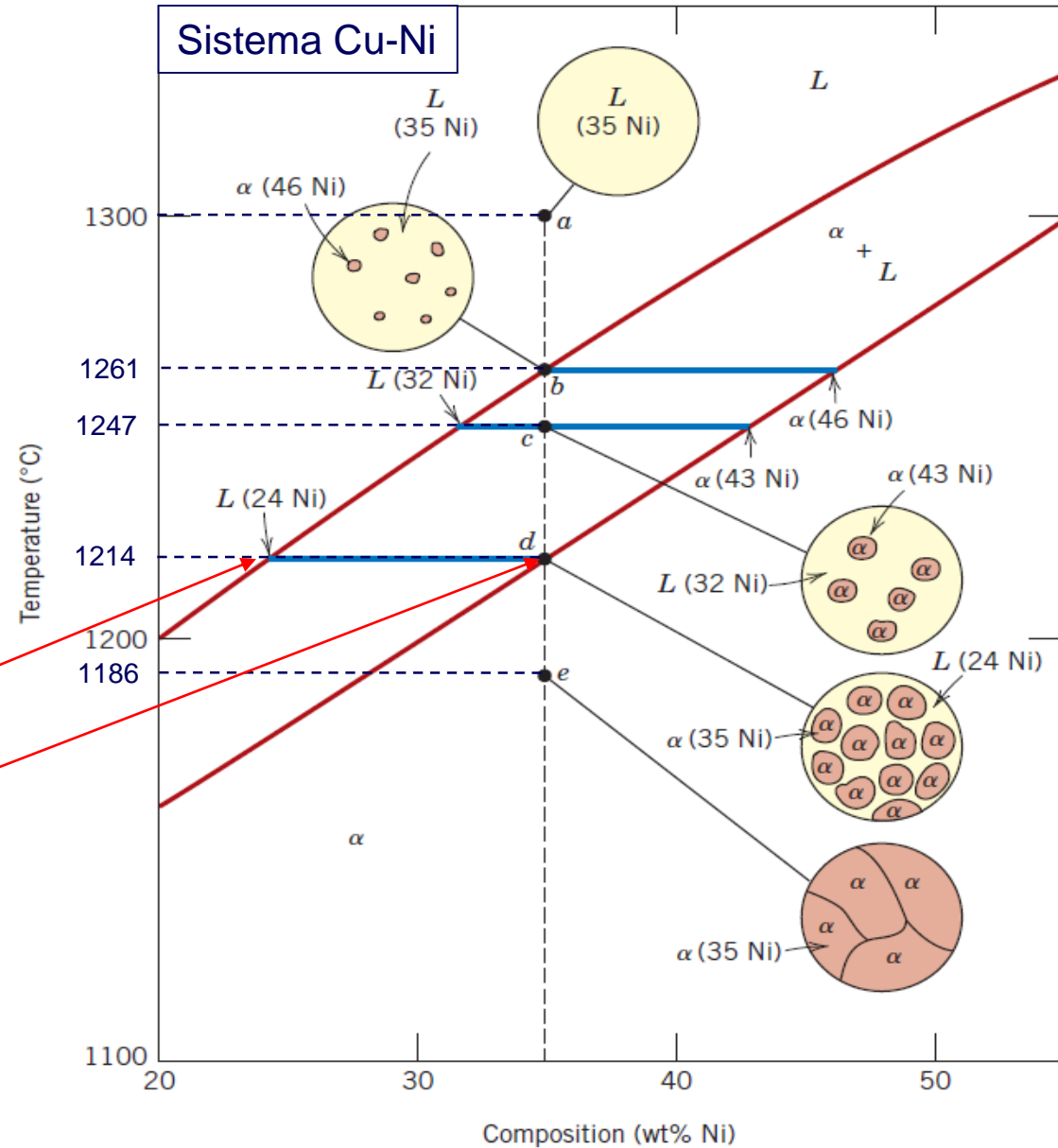


- A leitura de diagramas de fases é feita primeiramente definindo-se uma liga de interesse, como por exemplo 35% Ni.
- Na temperatura de 1300°C (ponto a) a fase em equilíbrio termodinâmico é a fase líquida com 35% de Ni.
- Na temperatura de 1261°C (ponto b), que é a **temperatura líquidus** desta liga, começa a solidificação. Nesta temperatura estão em equilíbrio termodinâmico o líquido com 35% de Ni e os primeiros núcleos de sólido com 46% de Ni.
- Na temperatura de 1247°C (ponto c) estão em equilíbrio termodinâmico o líquido com 32% de Ni e o sólido com 43% de Ni.
- Na temperatura de 1214°C (ponto d), que é a **temperatura solidus** desta liga estão em equilíbrio termodinâmico o último líquido com 24% de Ni e o sólido com 35% de Ni.
- Na temperatura de 1186°C (ponto e) a fase em equilíbrio termodinâmico é a fase sólida com 35% de Ni, que apresenta a **microestrutura da liga** de interesse.

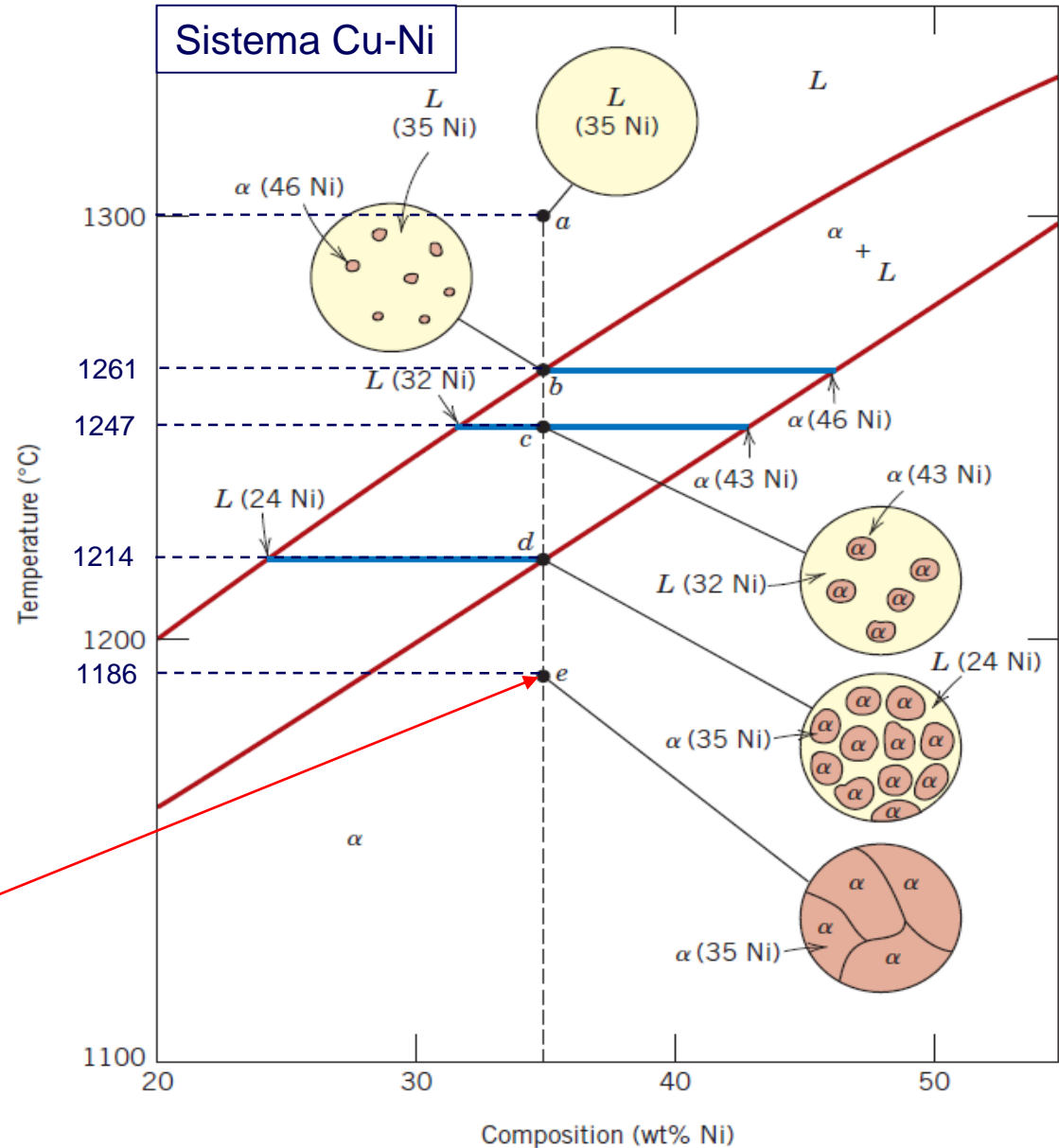




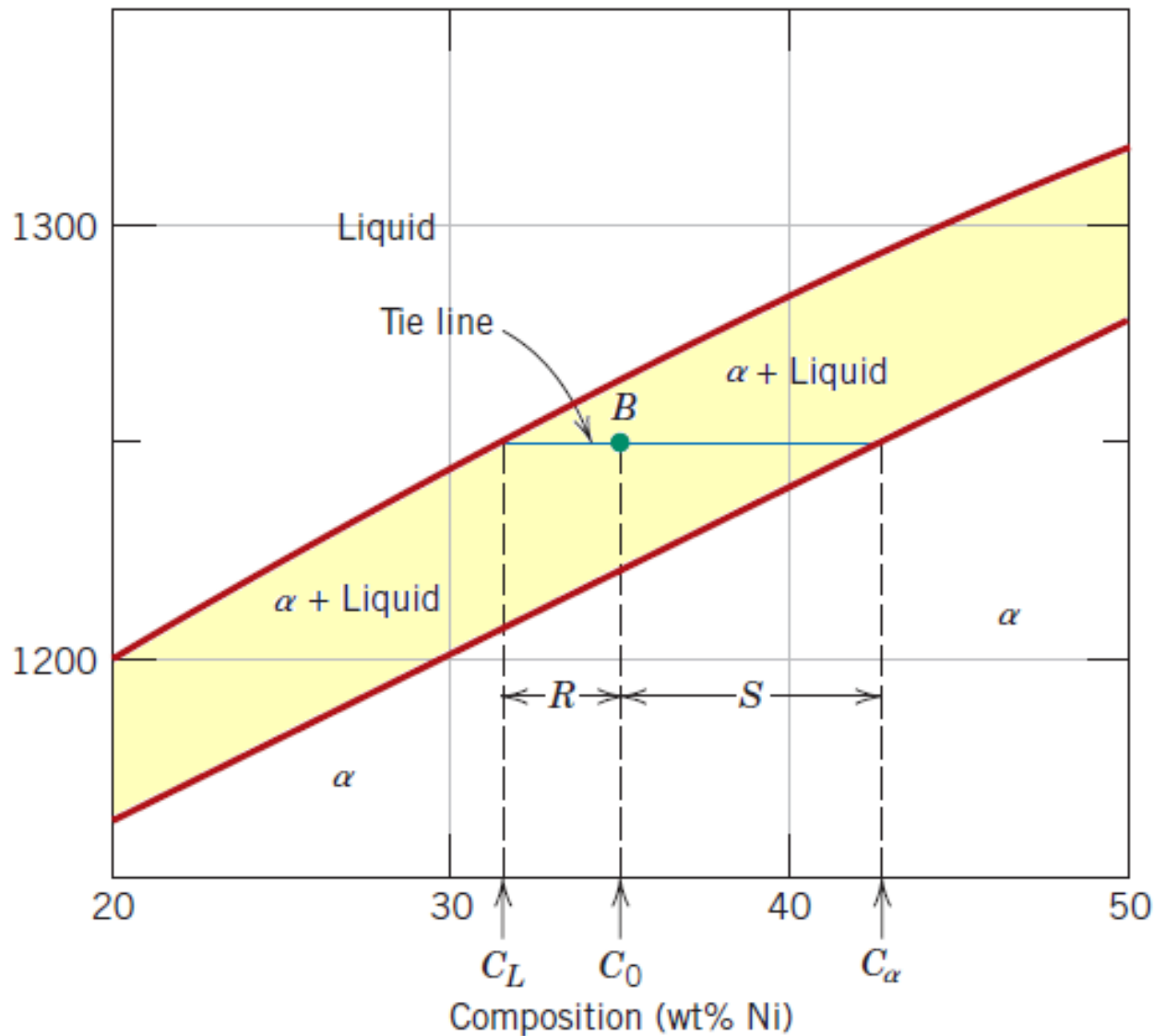
- A leitura de diagramas de fases é feita primeiramente definindo-se uma liga de interesse, como por exemplo 35% Ni.
- Na temperatura de 1300°C (ponto a) a fase em equilíbrio termodinâmico é a fase líquida com 35% de Ni.
- Na temperatura de 1261°C (ponto b), que é a **temperatura líquidus** desta liga, começa a solidificação. Nesta temperatura estão em equilíbrio termodinâmico o líquido com 35% de Ni e os primeiros núcleos de sólido com 46% de Ni.
- Na temperatura de 1247°C (ponto c) estão em equilíbrio termodinâmico o líquido com 32% de Ni e o sólido com 43% de Ni.
- Na temperatura de 1214°C (ponto d), que é a **temperatura solidus** desta liga estão em equilíbrio termodinâmico o último líquido com 24% de Ni e o sólido com 35% de Ni.
- Na temperatura de 1186°C (ponto e) a fase em equilíbrio termodinâmico é a fase sólida com 35% de Ni, que apresenta a **microestrutura da liga** de interesse.



- A leitura de diagramas de fases é feita primeiramente definindo-se uma liga de interesse, como por exemplo 35% Ni.
- Na temperatura de 1300°C (ponto a) a fase em equilíbrio termodinâmico é a fase líquida com 35% de Ni.
- Na temperatura de 1261°C (ponto b), que é a **temperatura líquidus** desta liga, começa a solidificação. Nesta temperatura estão em equilíbrio termodinâmico o líquido com 35% de Ni e os primeiros núcleos de sólido com 46% de Ni.
- Na temperatura de 1247°C (ponto c) estão em equilíbrio termodinâmico o líquido com 32% de Ni e o sólido com 43% de Ni.
- Na temperatura de 1214°C (ponto d), que é a **temperatura solidus** desta liga, estão em equilíbrio termodinâmico o último líquido com 24% de Ni e o sólido com 35% de Ni.
- Na temperatura de 1186°C (ponto e) a fase em equilíbrio termodinâmico é a fase sólida com 35% de Ni, que apresenta a **microestrutura da liga** de interesse.



# Regra da Alavanca



É usada para se determinar as quantidades das fases em equilíbrio em um campo de duas fases.

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

# Regra da Alavanca

## Dedução

- Chega-se à regra da alavanca simplesmente através de um *balanço de massa*.
- Consideremos  $W_L$  e  $W_\alpha$  as frações mássicas, respectivamente, da fase líquida, L, e da fase sólida,  $\alpha$ .
- O níquel está em cada uma das fases, em concentração  $C_L$  (no líquido) e  $C_\alpha$  (no sólido)
- As duas equações abaixo podem ser escritas:

$$W_L + W_\alpha = 1 \rightarrow W_L = 1 - W_\alpha \quad (eq.I)$$

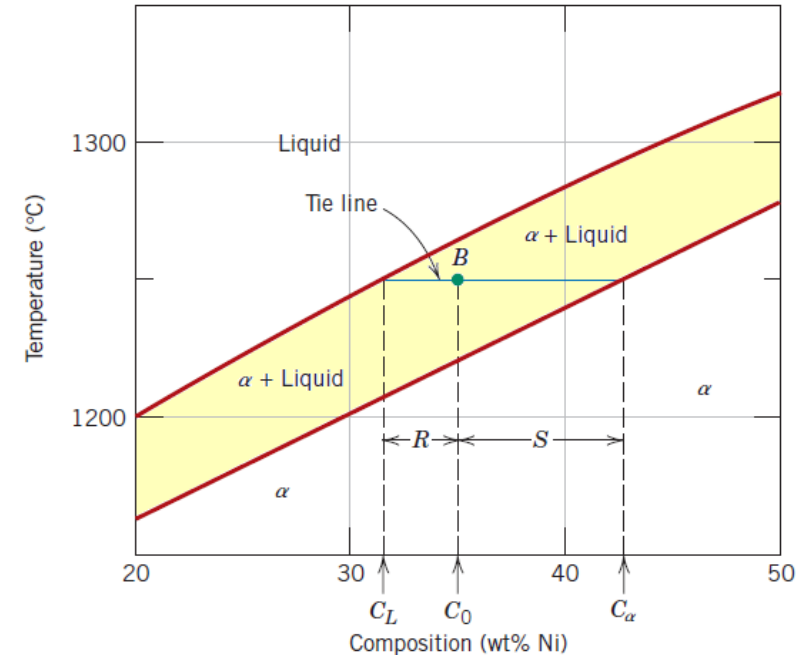
$$W_L C_L + W_\alpha C_\alpha = C_0 \quad (eq. II)$$

$$(1 - W_\alpha) C_L + W_\alpha C_\alpha = C_0$$

$$C_L - W_\alpha C_L + W_\alpha C_\alpha = C_0$$

$$W_\alpha (C_\alpha - C_L) = C_0 - C_L$$

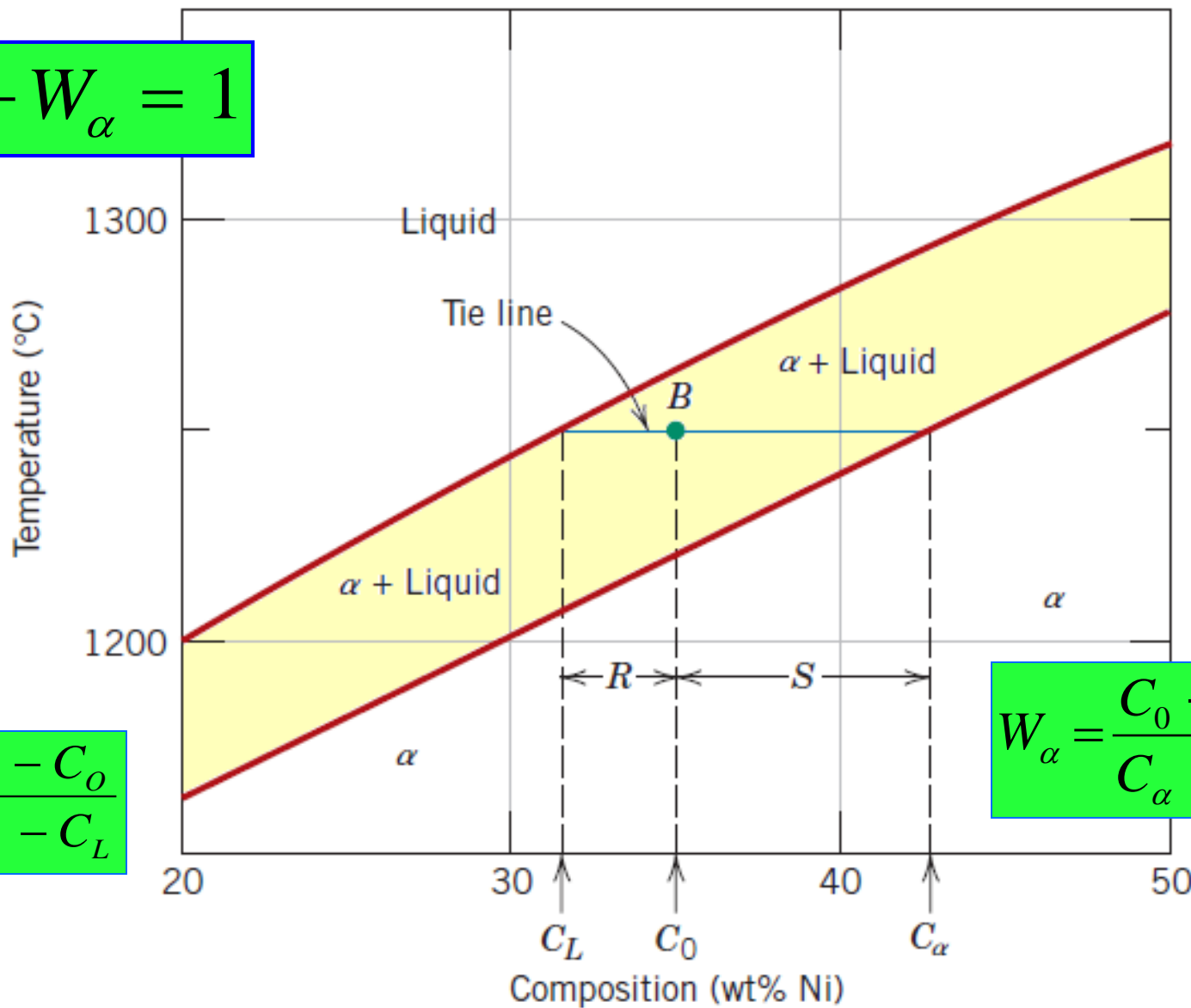
Se, ao invés de isolar  $W_L$  na (eq.I) isolarmos  $W_\alpha$ , chega-se à equação da fração de fase líquida.



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

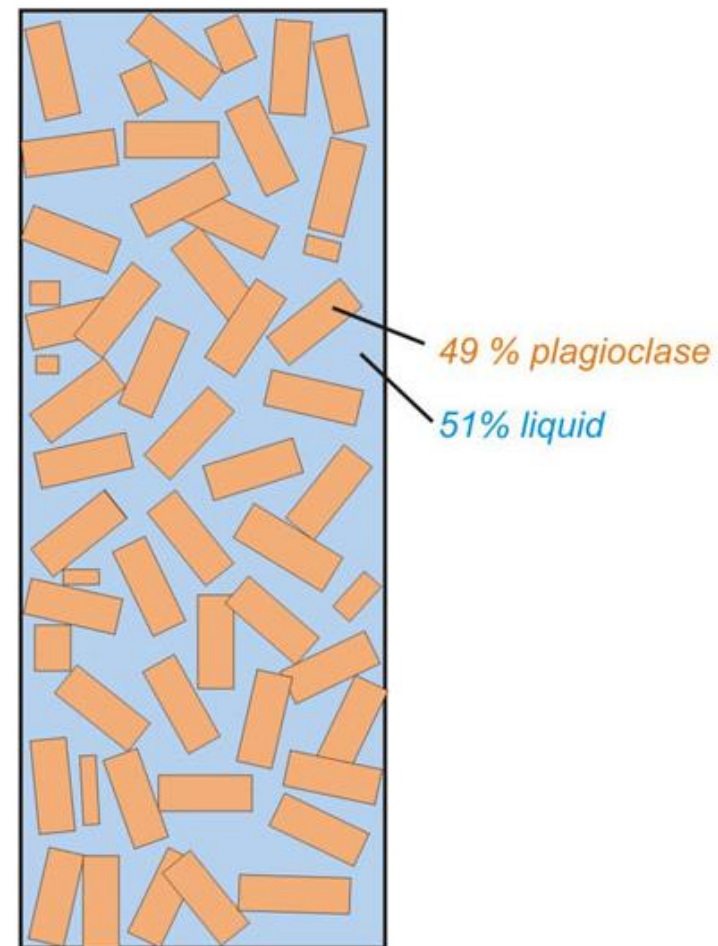
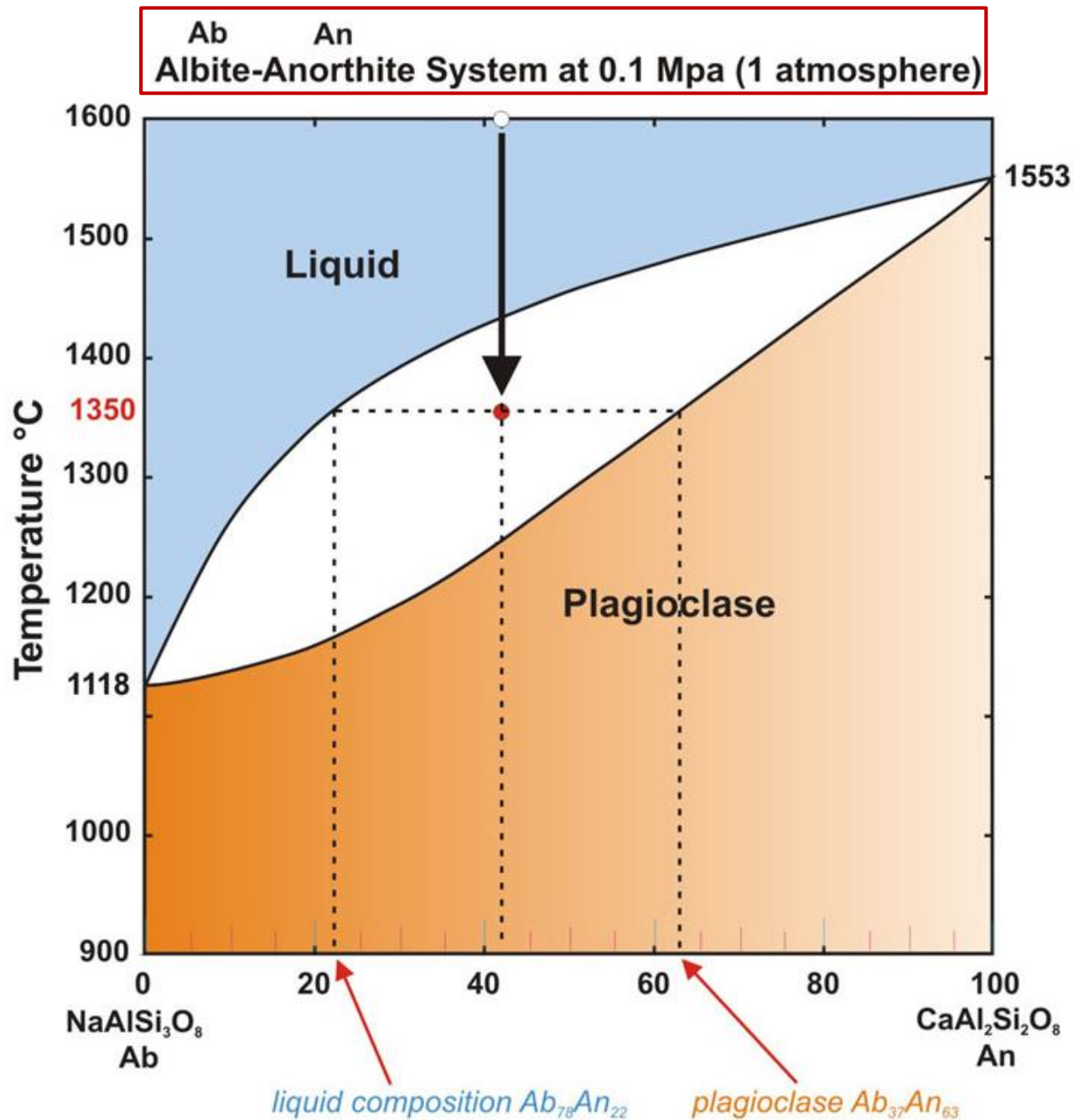
# Regra da Alavanca

$$W_L + W_\alpha = 1$$



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

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



...um outro exemplo de sistema binário isomorfo...



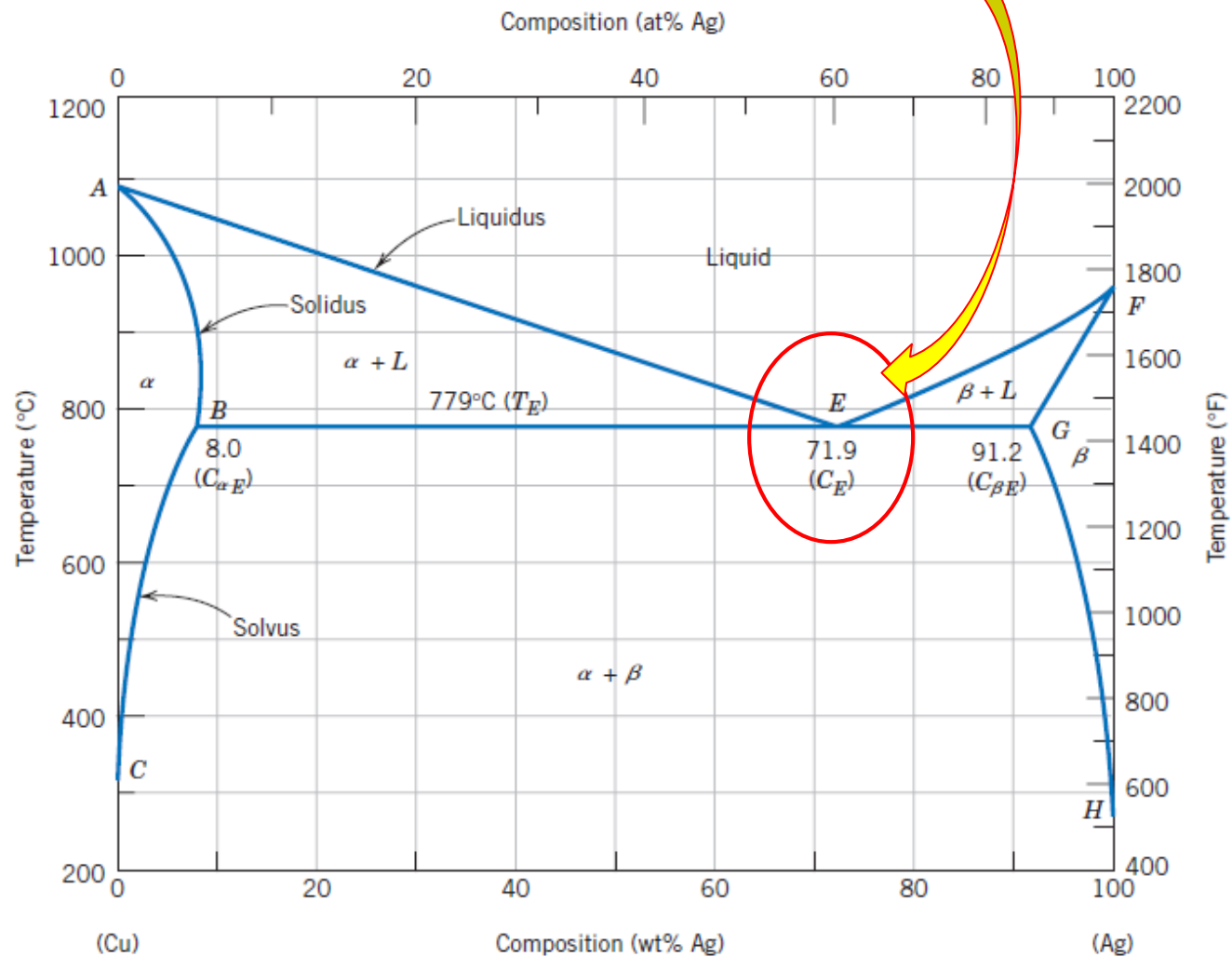
## SISTEMAS BINÁRIOS NÃO-ISOMORFOS

Equilíbrio de 3 fases : Eutético

Análise das Microestruturas

# Diagramas de Fases Eutéticos

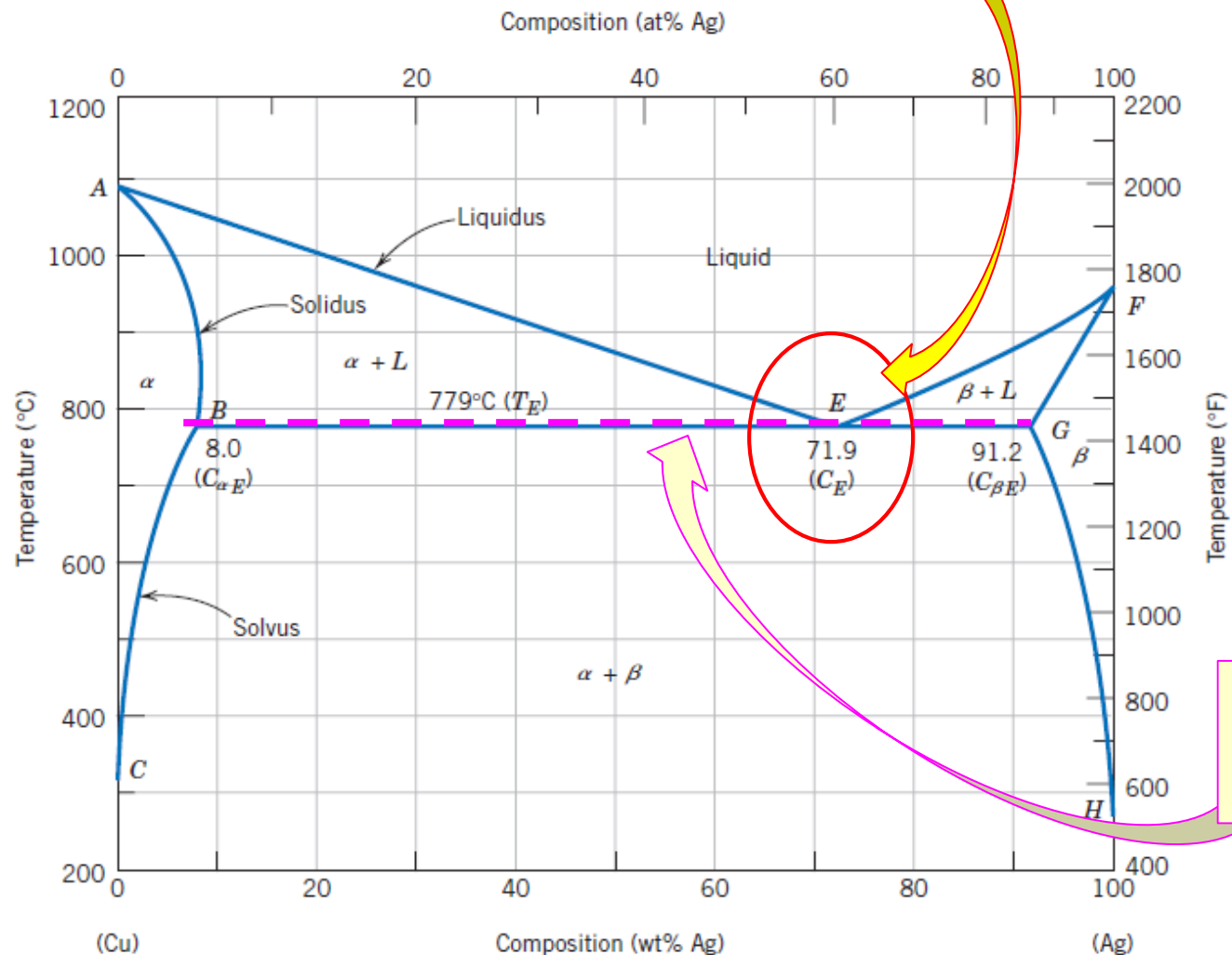
O equilíbrio entre **três** fases ocorre a uma determinada temperatura ( $T_E$ ) e a uma determinada composição ( $C_E$ ), formando **dois sólidos** a partir de **um líquido**, todos com composições fixas.





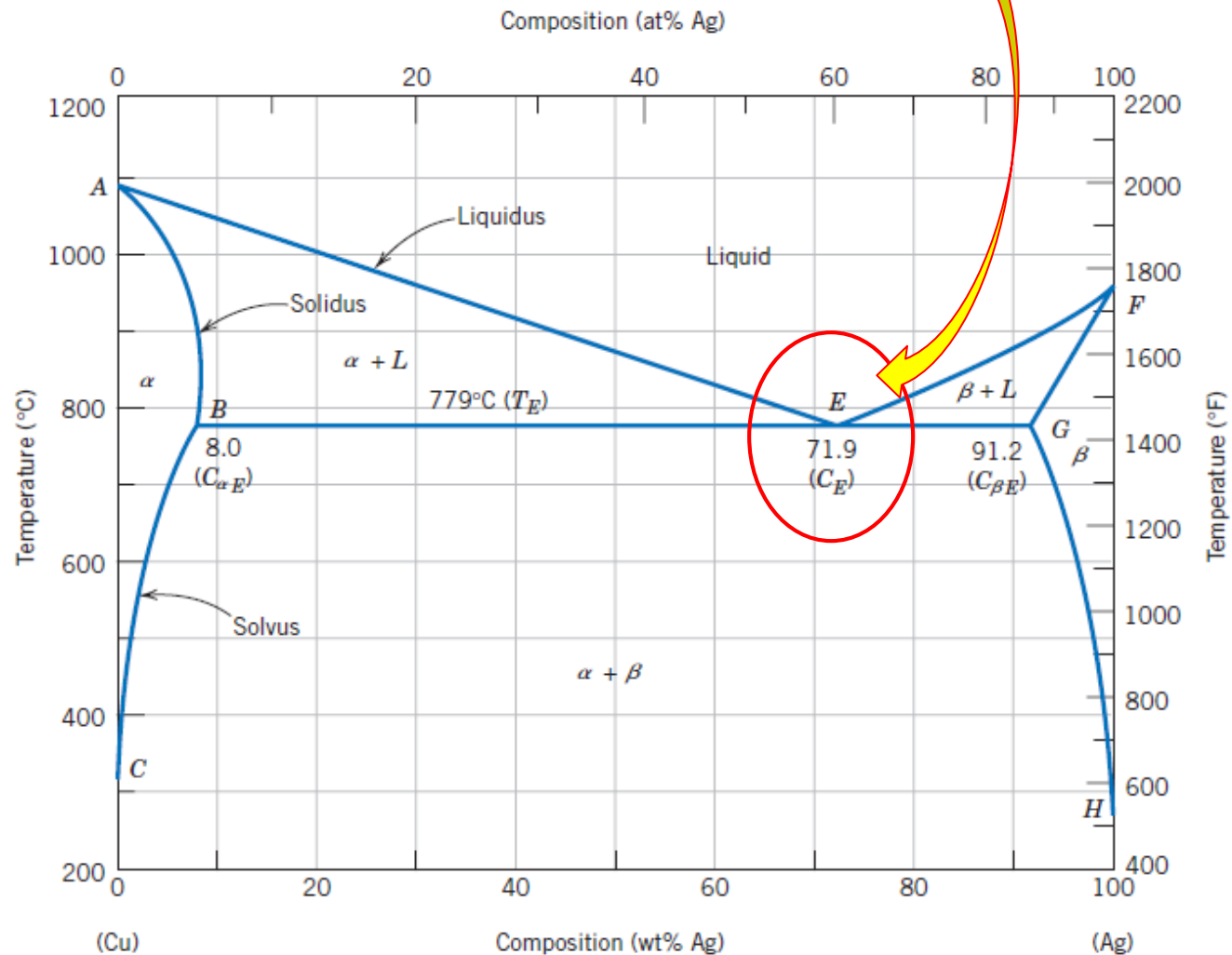
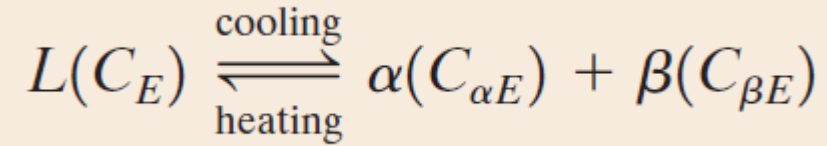
# Diagramas de Fases Eutéticos

O equilíbrio entre **três** fases ocorre a uma determinada temperatura ( $T_E$ ) e a uma determinada composição ( $C_E$ ), formando **dois sólidos** a partir de **um líquido**, todos com composições fixas.



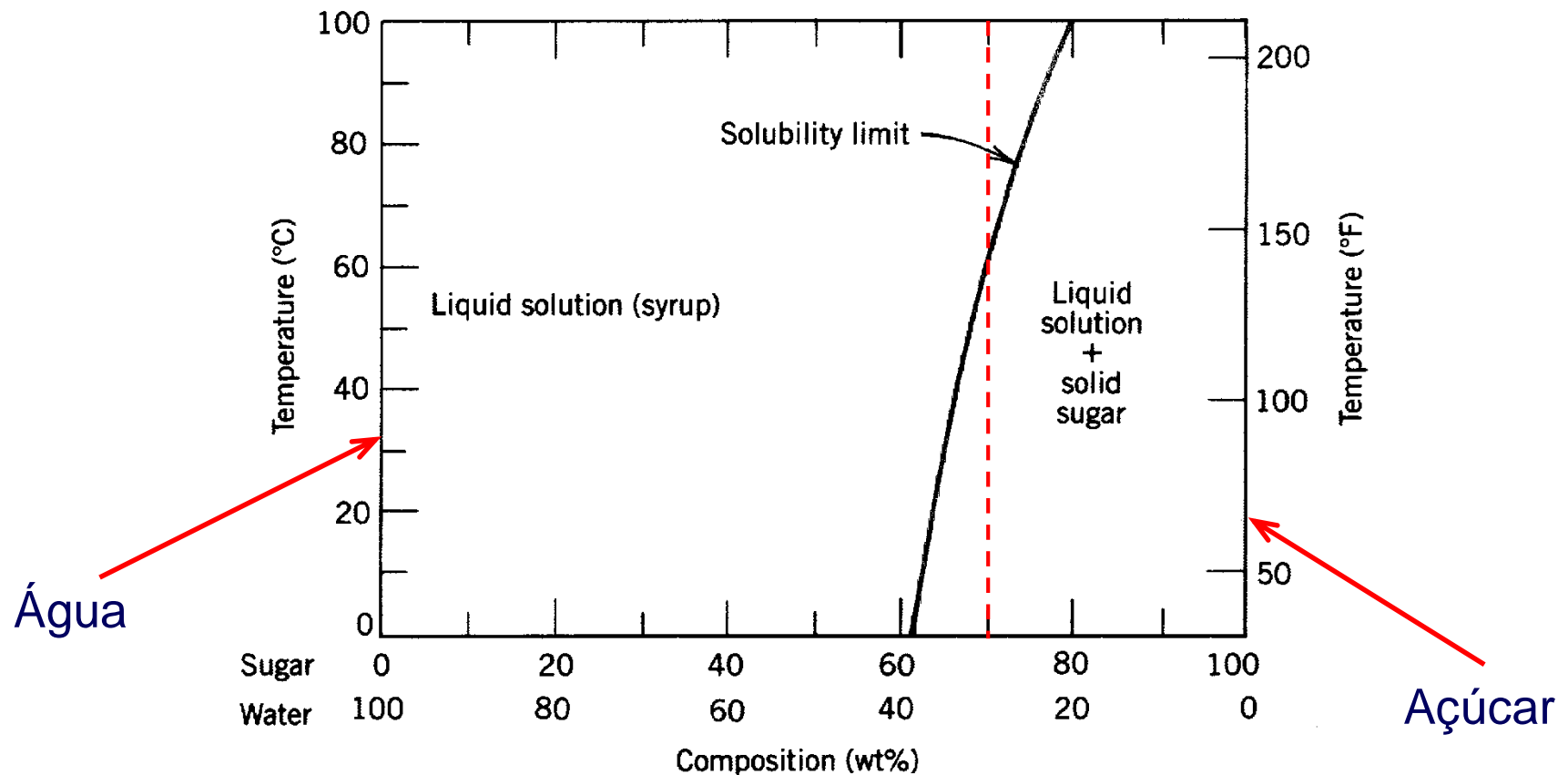
*Patamar eutético:  
onde ocorre  
a reação eutética*

# Diagramas de Fases Eutéticos

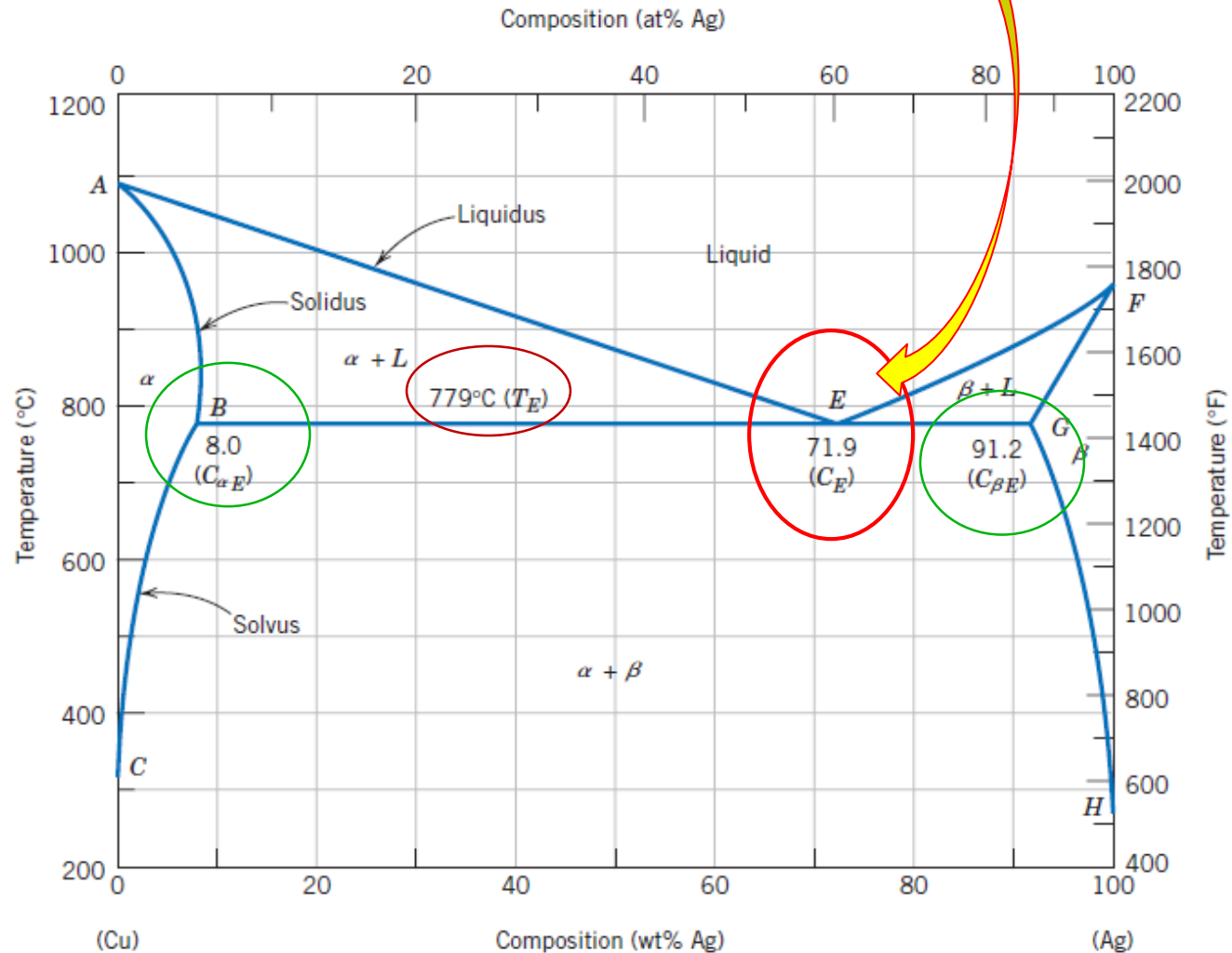
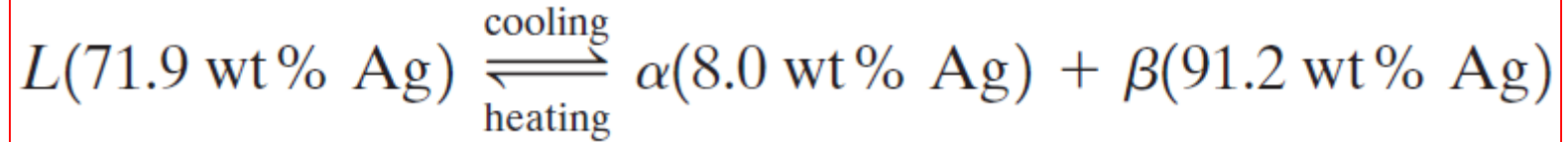


# Limite de solubilidade

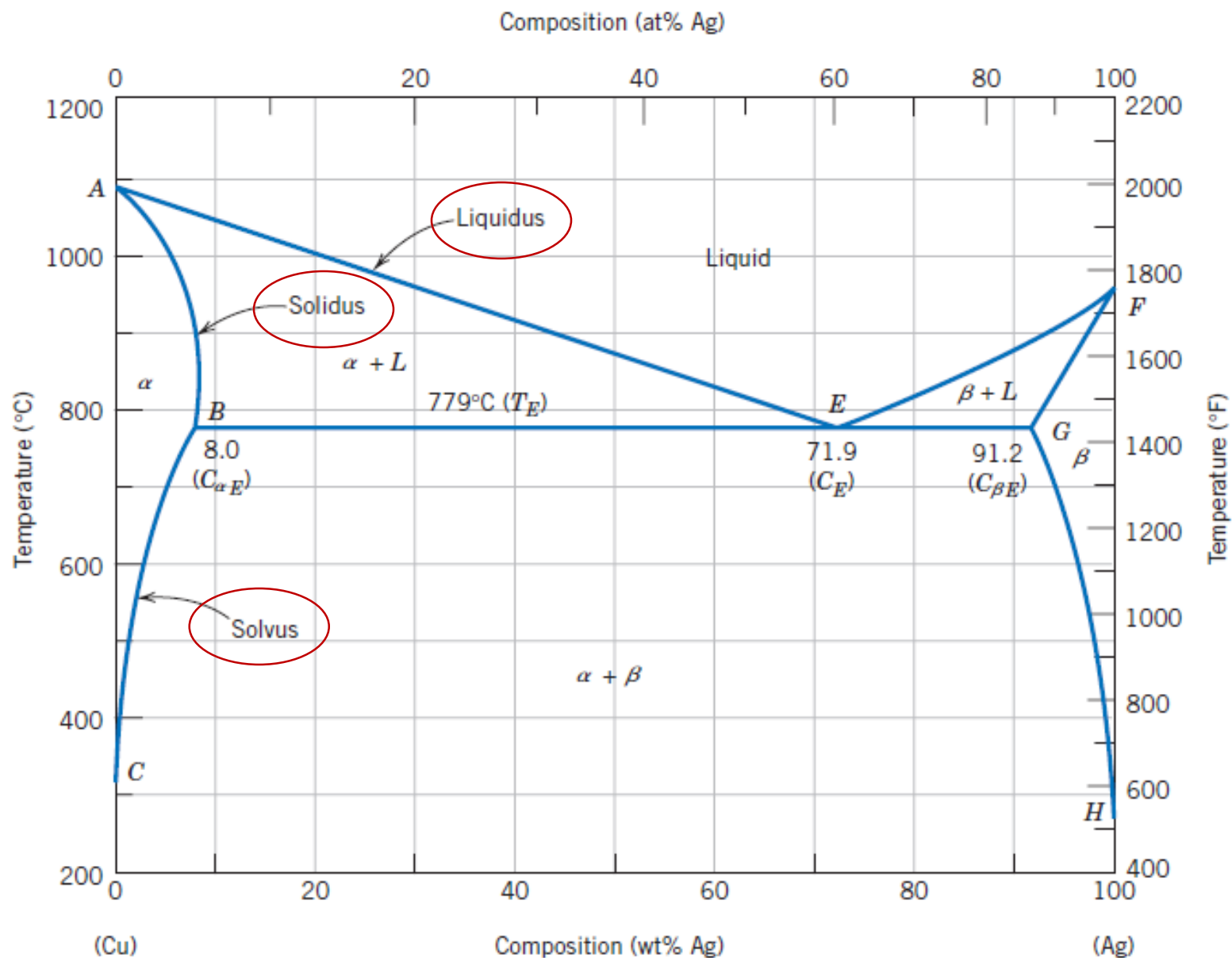
- Para uma determinada temperatura, existe uma concentração máxima de átomos de soluto que pode ser dissolvida no solvente formando uma solução sólida.
- Essa concentração máxima é chamada **LIMITE DE SOLUBILIDADE**.



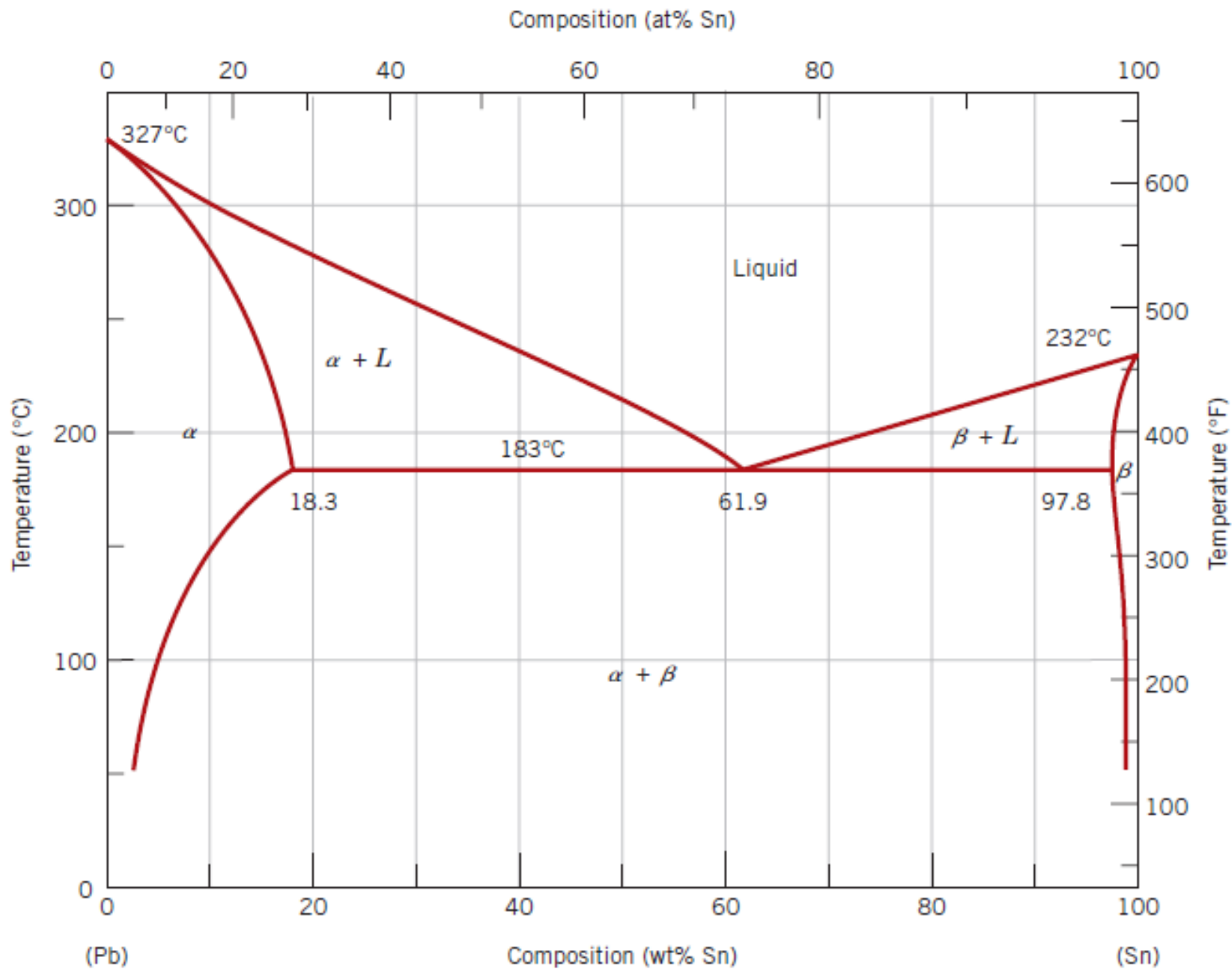
# Diagramas de Fases Eutéticos



# Diagramas de Fases Eutéticos

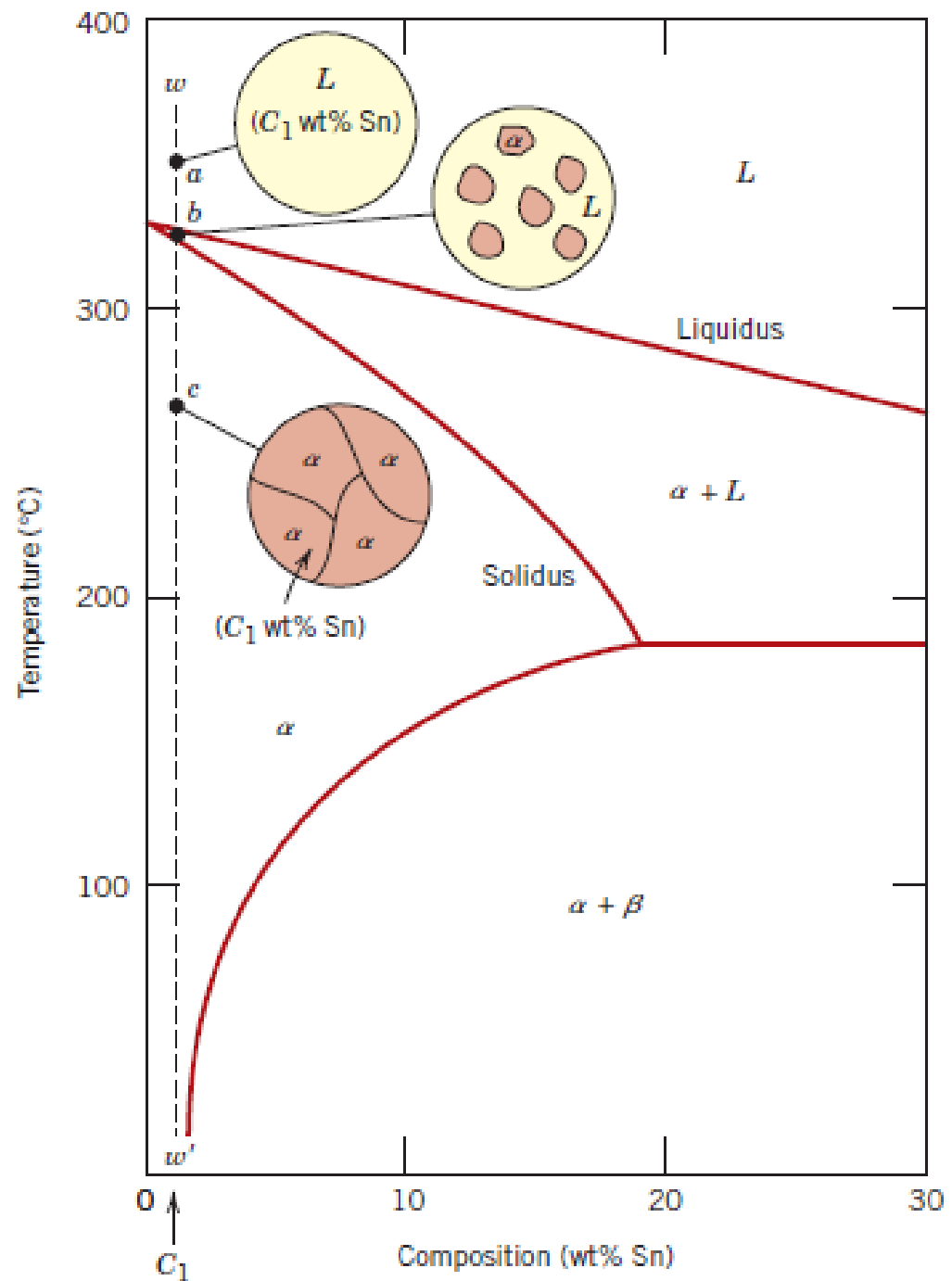


# Microestructuras – Sistemas Eutéticos



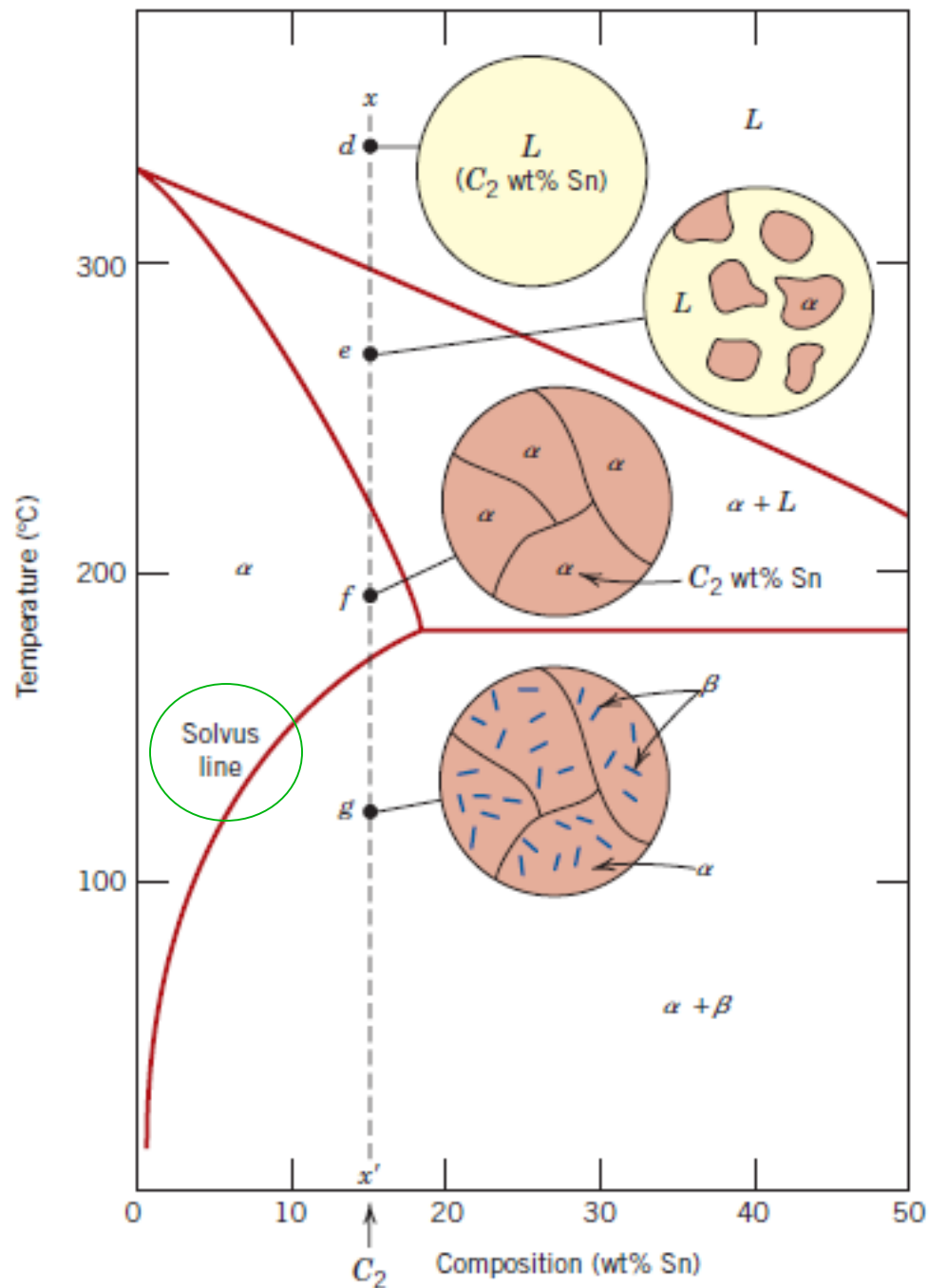
## Microestrutura Monofásica

É comum ser muito pequena a faixa de composições químicas em que pode se formar uma estrutura **monofásica** (por exemplo,  $\alpha$ ).



## Precipitação

Se a temperatura desce abaixo da temperatura da *linha solvus*, o limite de solubilidade de Sn no Pb é atingido. Ocorre a **precipitação da fase  $\beta$** , de reticulado cristalino distinto do reticulado da fase  $\alpha$  e com distintas propriedades físico-químicas, no interior da fase  $\alpha$ .



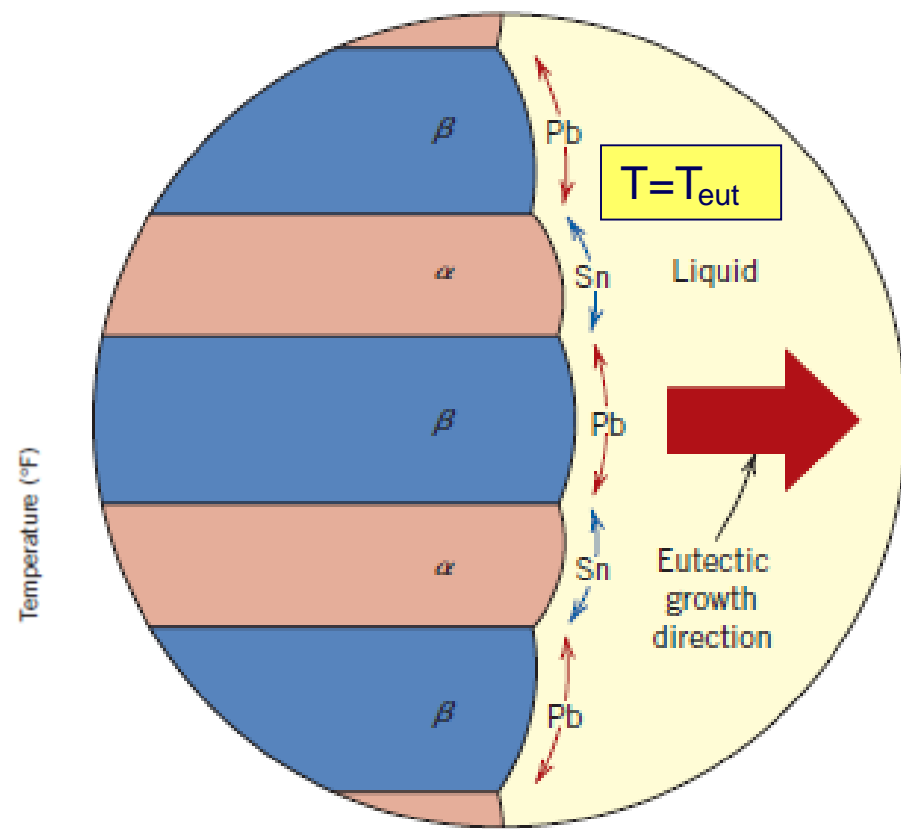
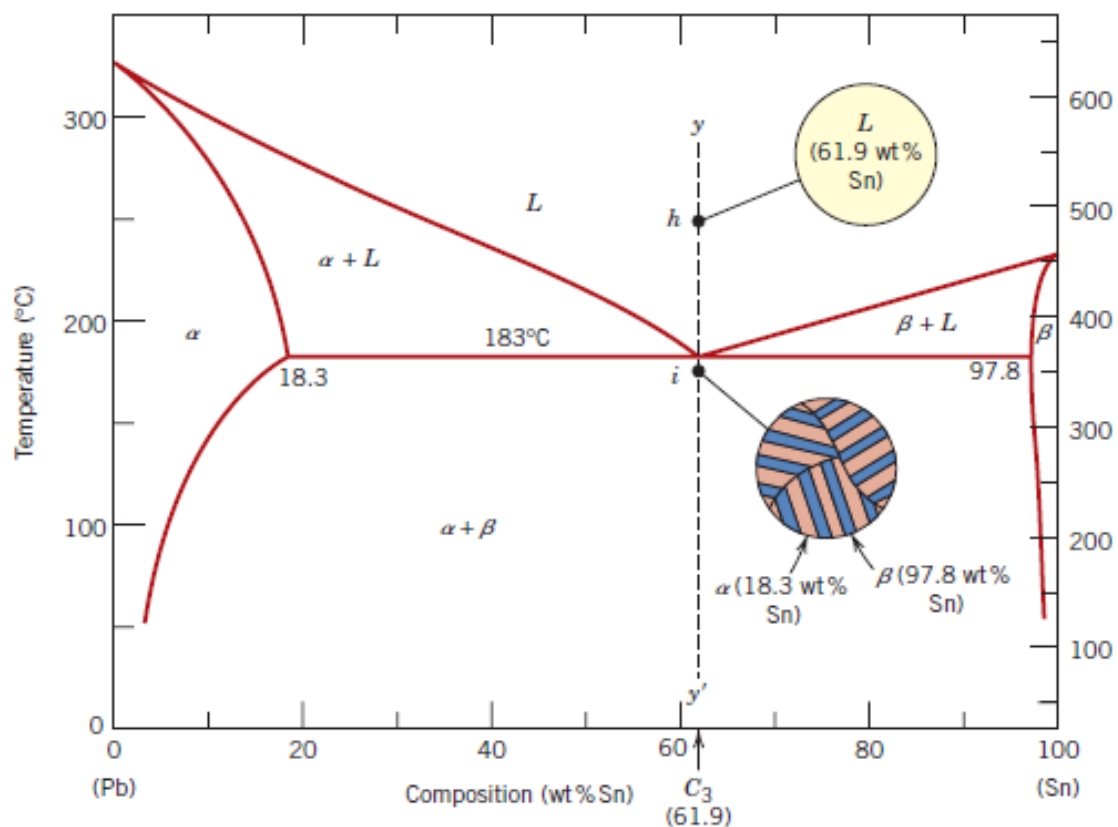


# Transformação Eutética

A transformação eutética corresponde à formação de **uma mistura de duas fases ( $\alpha + \beta$ ) a partir do líquido**, formando um arranjo interpenetrado



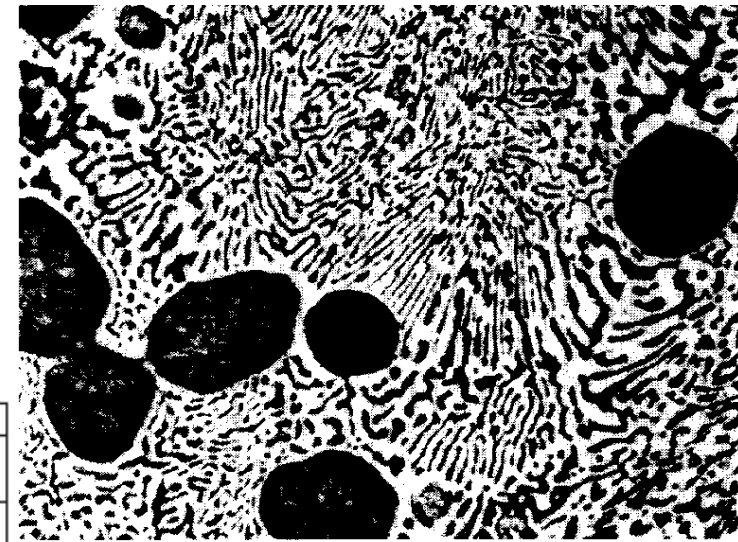
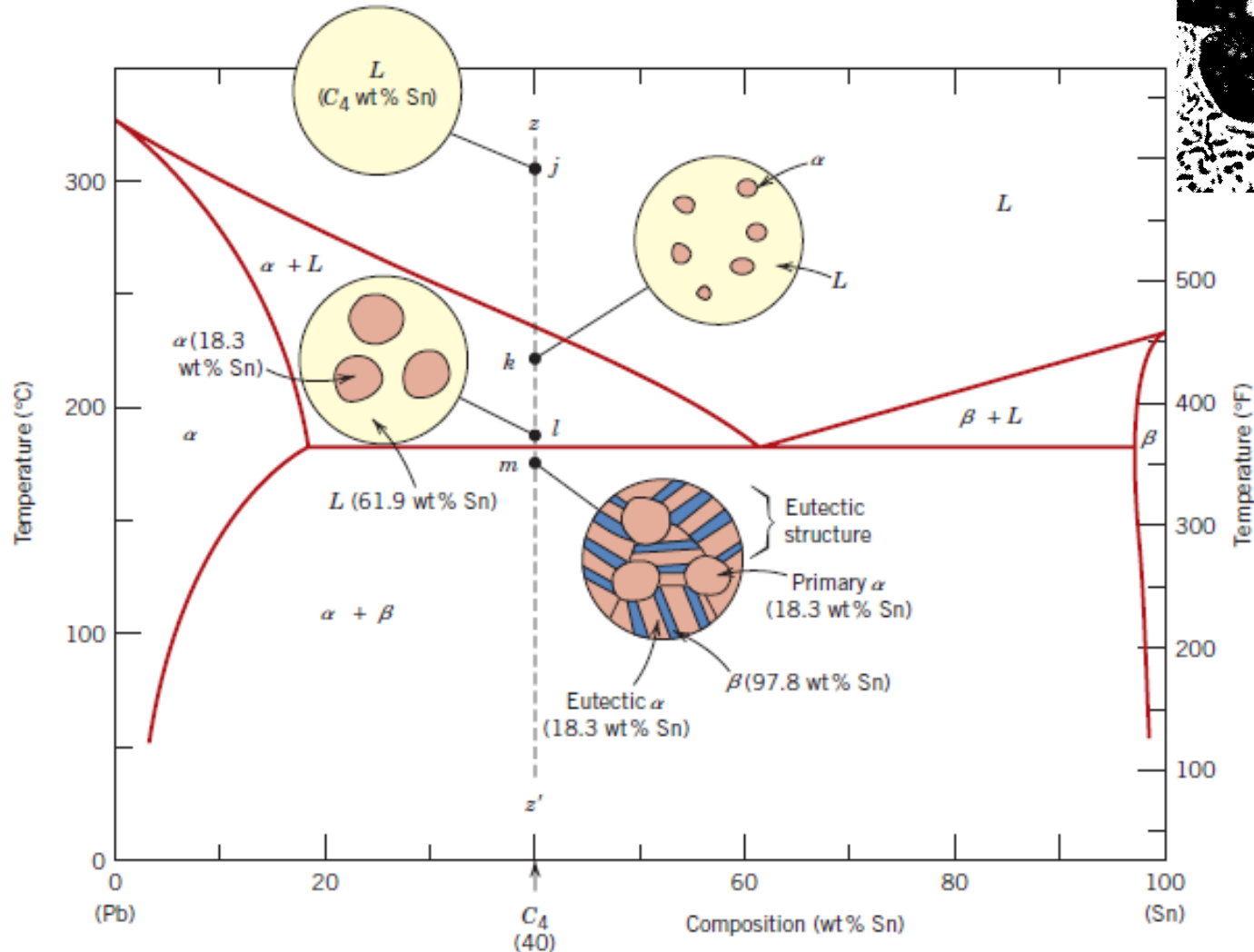
A fase escura é a fase  $\alpha$ , rica em Pb;  
a fase clara é a fase  $\beta$  rica em Sn



*Crescimento cooperativo*

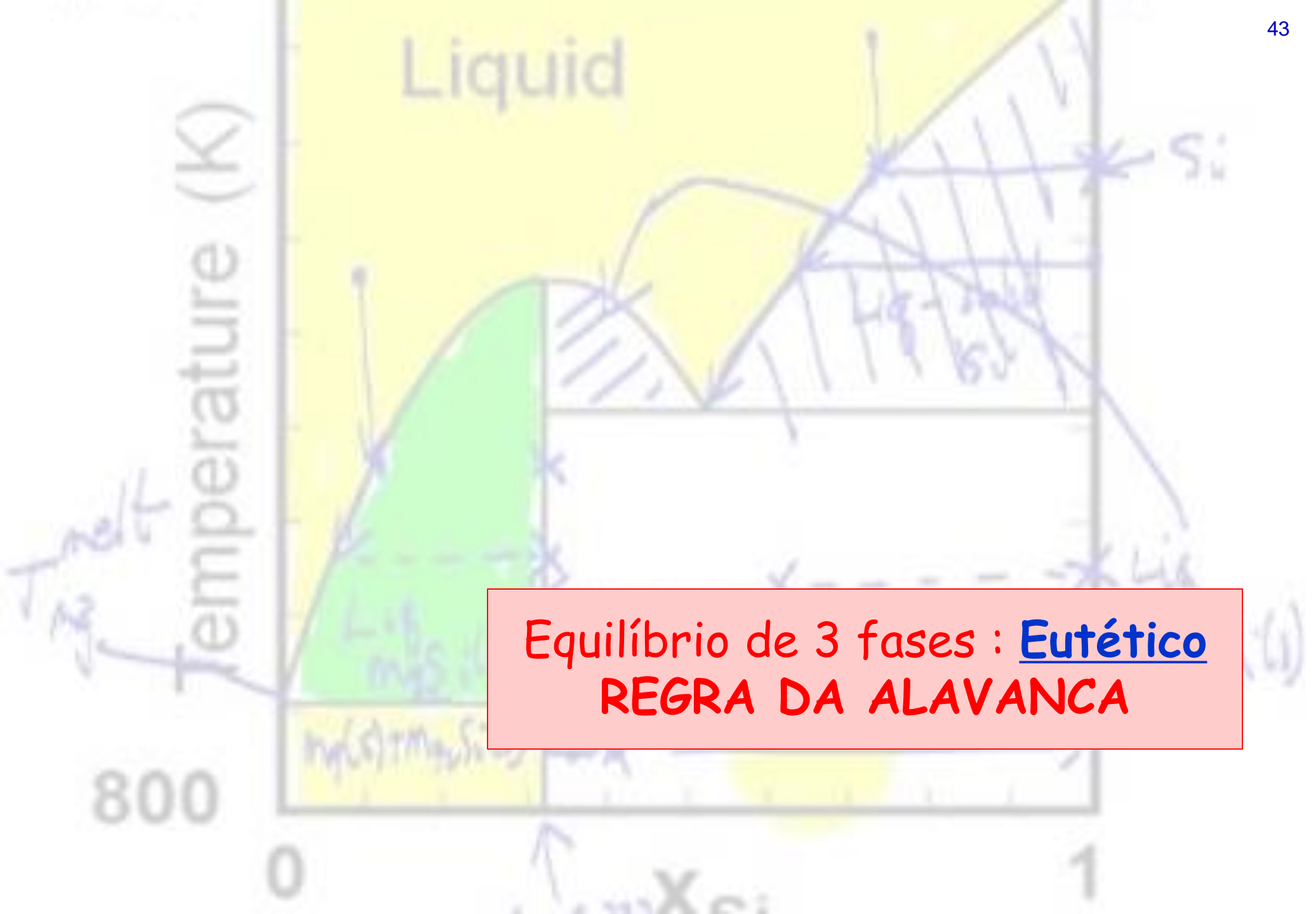
# Microestrutura Hipoeutética

Em ligas hipo-eutéticas ocorre inicialmente precipitação de fase primária  $\rightarrow$  fase  $\alpha$  pró-eutética.



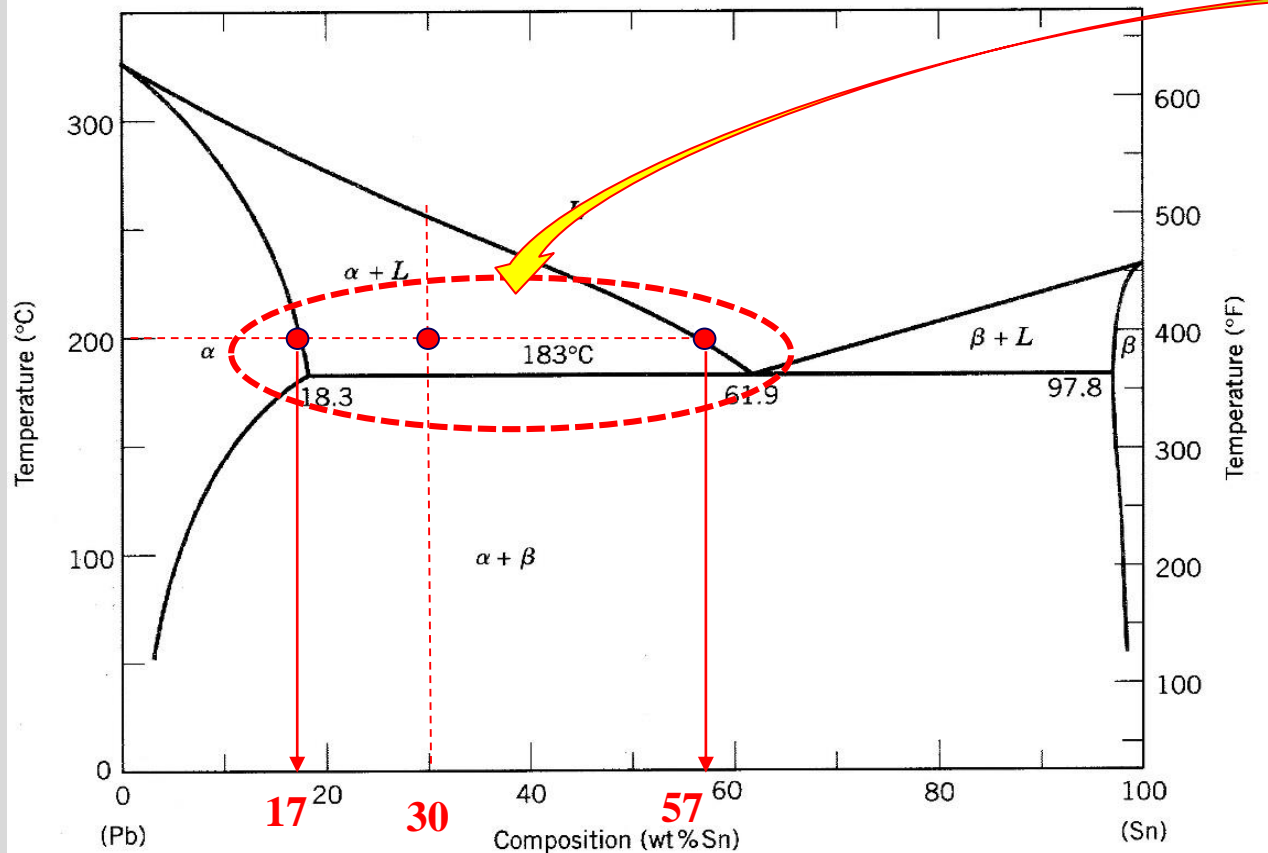
O líquido eutético residual  $L$  (de composição 61,9% Sn) sofre a transformação eutética.

Essa quantidade de líquido se transforma em *microestrutura eutética* [ $\alpha_{(18,3\% \text{ Sn})} + \beta_{(97,8\% \text{ Sn})}$ ].



Equilíbrio de 3 fases : Eutético  
**REGRA DA ALAVANCA**

# Regra da Alavanca – Sistemas Eutéticos



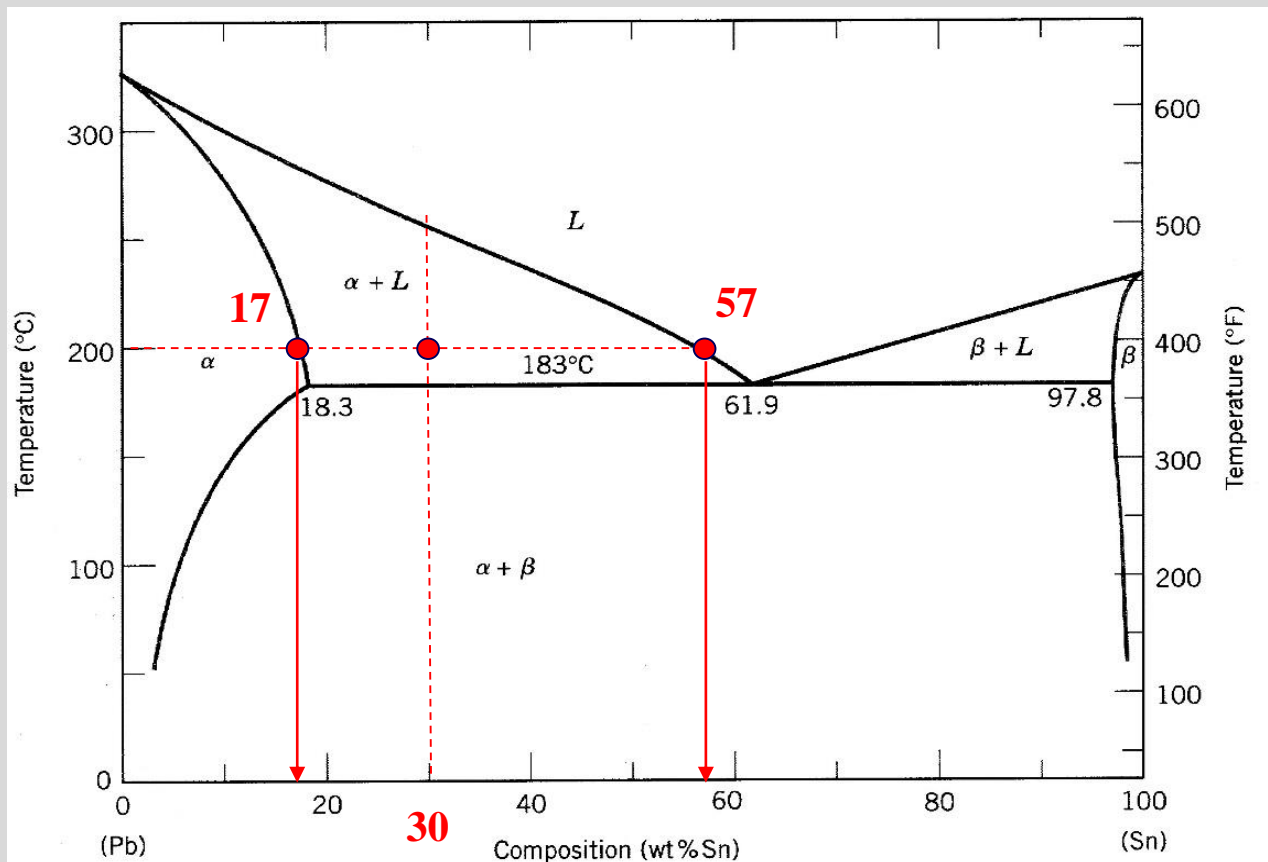
**Liga Pb 30%Sn**

**200°C**

2 fases:  $\alpha$  e L  
 Fase  $\alpha$ : 17%Sn  
 Fase L: 57%Sn

**100°C**

# Regra da Alavanca – Sistemas Eutéticos



## Liga Pb 30%Sn

**200°C**

2 fases:  $\alpha$  e L

Fase  $\alpha$ : 17%Sn

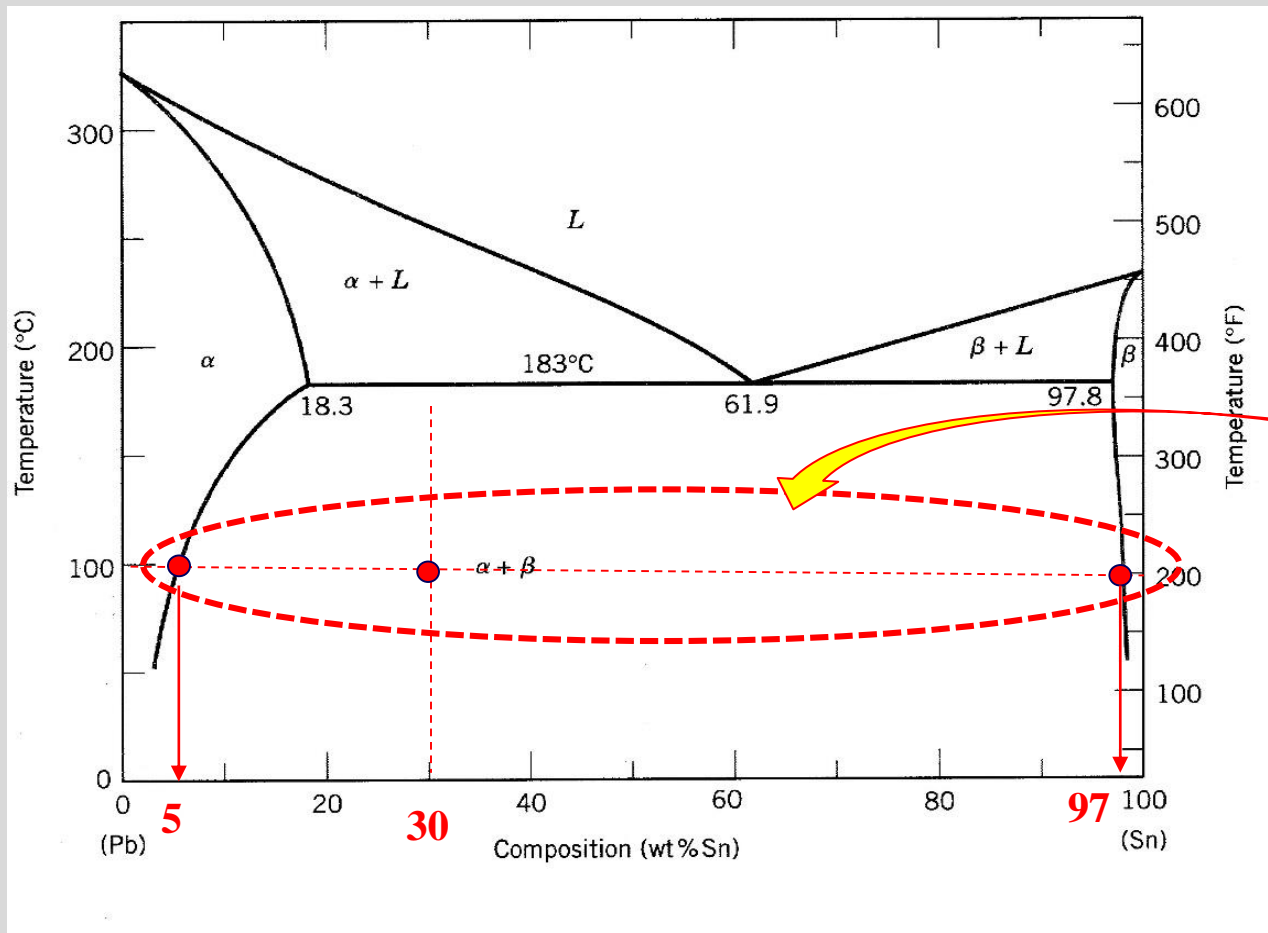
Fase L: 57%Sn

$$\% \alpha = \frac{(57 - 30)}{(57 - 17)} \times 100 = 67,5\%$$

$$\% L = \frac{(30 - 17)}{(57 - 17)} \times 100 = 32,5\%$$

**100°C**

# Regra da Alavanca – Sistemas Eutéticos



## Liga Pb 30%Sn

**200°C**

2 fases:  $\alpha$  e L  
 Fase  $\alpha$ : 17%Sn  
 Fase L: 57%Sn

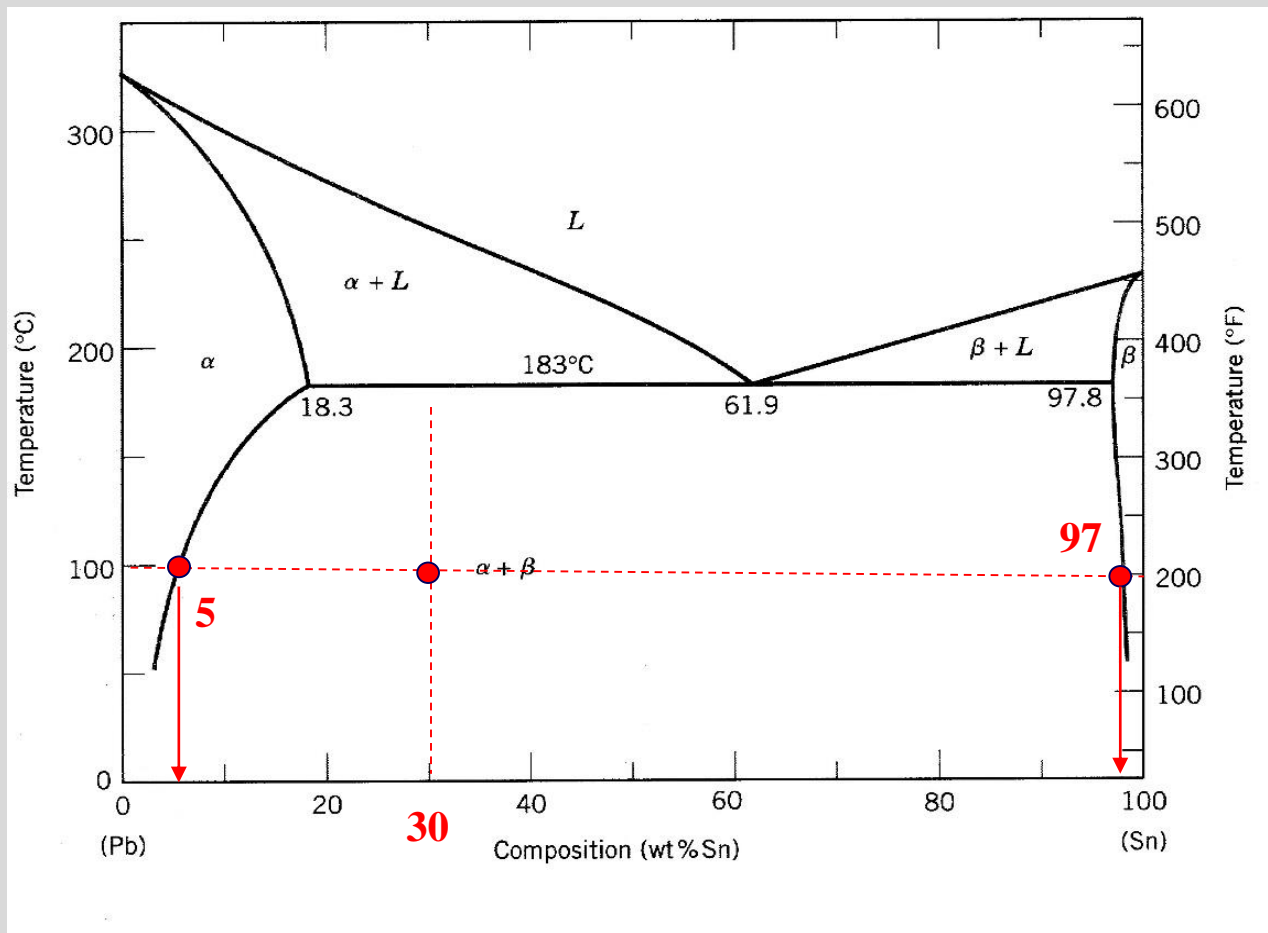
$$\% \alpha = \frac{(57 - 30)}{(57 - 17)} \times 100 = 67,5\%$$

$$\% L = \frac{(30 - 17)}{(57 - 17)} \times 100 = 32,5\%$$

**100°C**

2 fases:  $\alpha$  e  $\beta$   
 Fase  $\alpha$ : 5%Sn  
 Fase  $\beta$ : 97%Sn

# Regra da Alavanca – Sistemas Eutéticos



## Liga Pb 30%Sn

**200°C**

2 fases:  $\alpha$  e L

Fase  $\alpha$ : 17%Sn

Fase L: 57%Sn

$$\% \alpha = \frac{(57 - 30)}{(57 - 17)} \times 100 = 67,5\%$$

$$\% L = \frac{(30 - 17)}{(57 - 17)} \times 100 = 32,5\%$$

**100°C**

2 fases:  $\alpha$  e  $\beta$

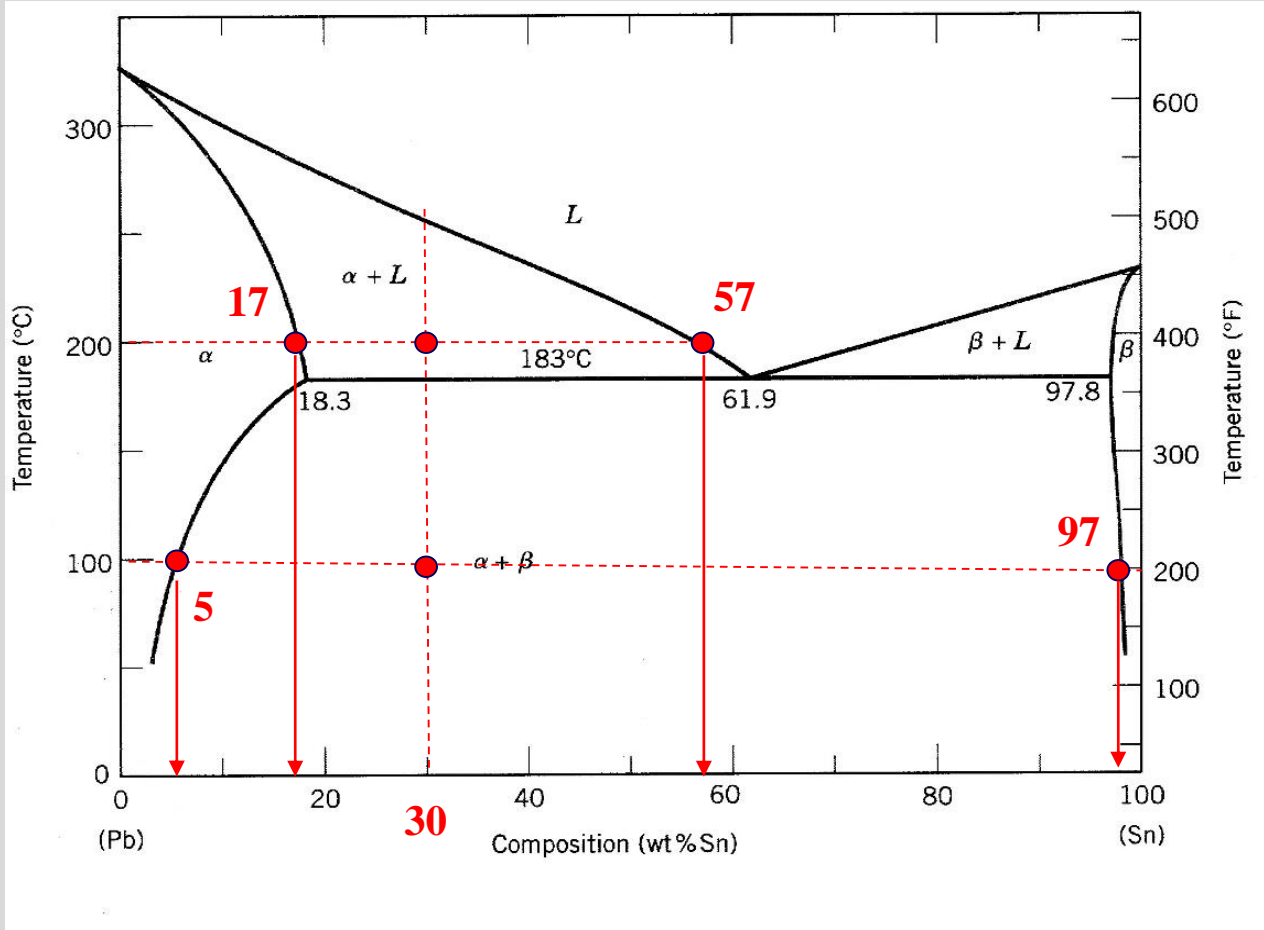
Fase  $\alpha$ : 5%Sn

Fase  $\beta$ : 97%Sn

$$\% \alpha = \frac{(97 - 30)}{(97 - 5)} \times 100 = 72,8\%$$

$$\% \beta = \frac{(30 - 5)}{(97 - 5)} \times 100 = 27,2\%$$

# Regra da Alavanca – Sistemas Eutéticos



## Liga Pb 30%Sn

**200°C**

2 fases: α e L

Fase α: 17%Sn

Fase L: 57%Sn

$$\% \alpha = \frac{(57 - 30)}{(57 - 17)} \times 100 = 67,5\%$$

$$\% L = \frac{(30 - 17)}{(57 - 17)} \times 100 = 32,5\%$$

**100°C**

2 fases: α e β

Fase α: 5%Sn

Fase β: 97%Sn

$$\% \alpha = \frac{(97 - 30)}{(97 - 5)} \times 100 = 72,8\%$$

$$\% \beta = \frac{(30 - 5)}{(97 - 5)} \times 100 = 27,2\%$$



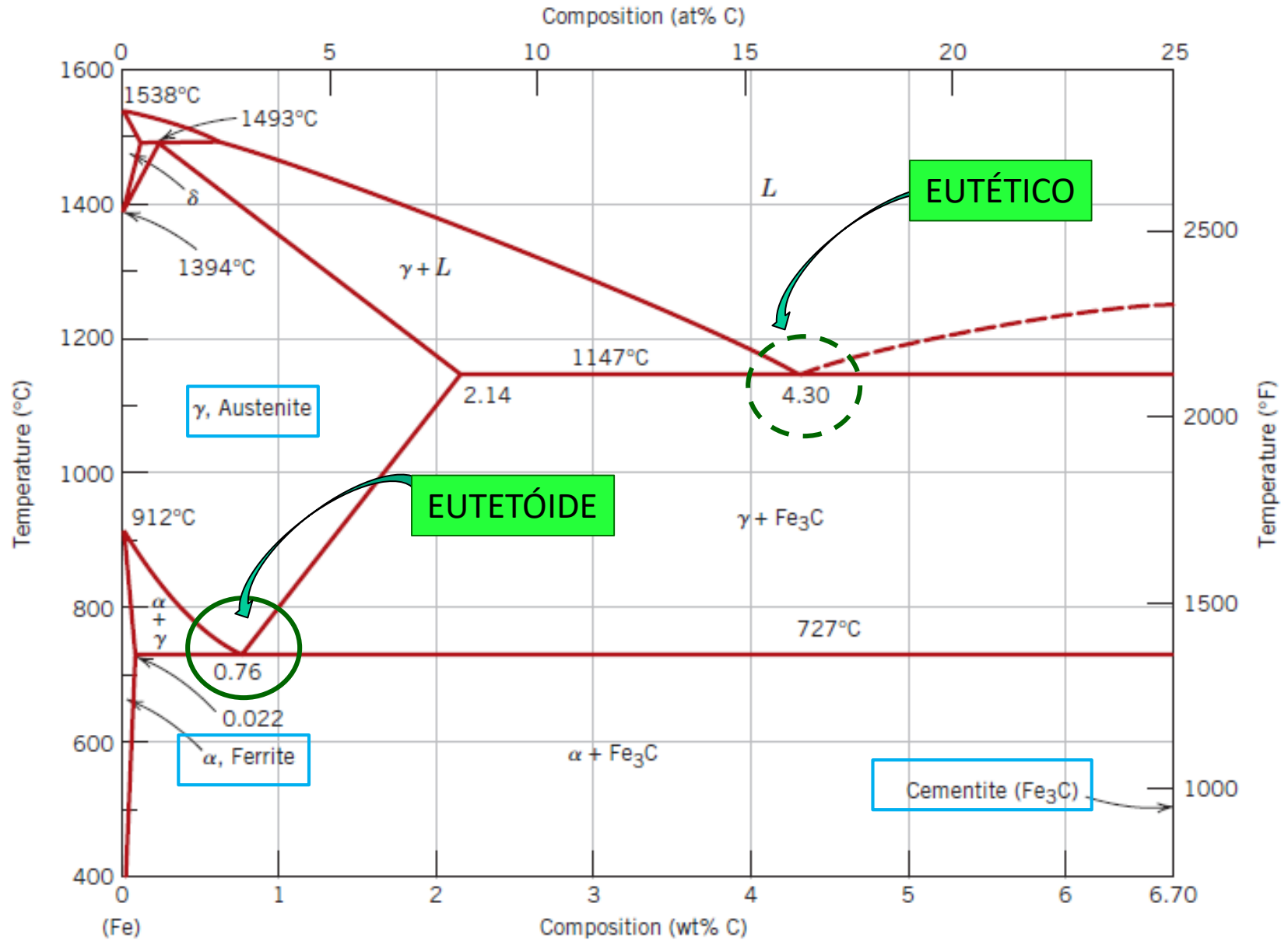


## SISTEMAS BINÁRIOS NÃO-ISOMORFOS

Equilíbrio de 3 fases : Eutetóide

Análise das Microestruturas

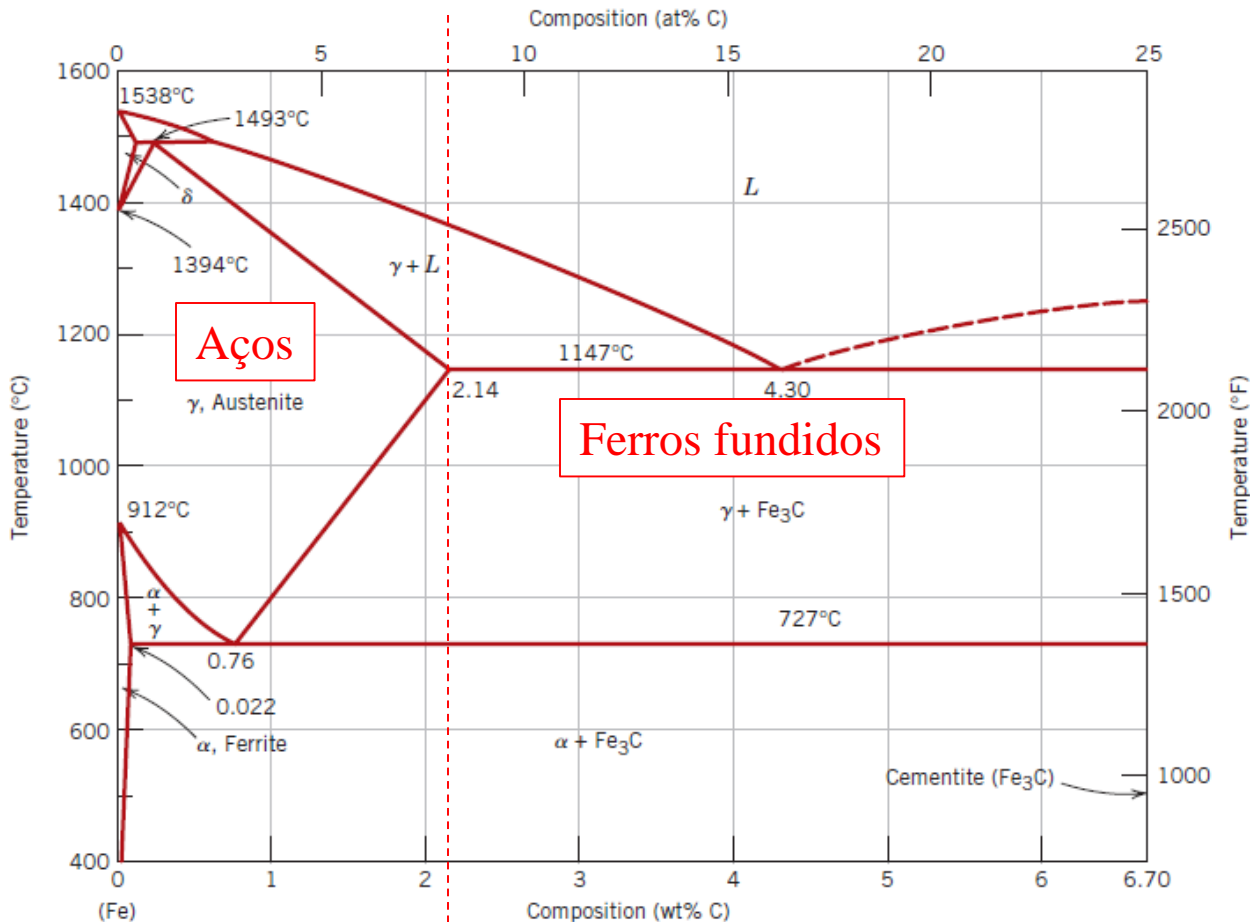
# Diagramas de Fases Eutetóide



# Diagramas de Fases Eutetóide

51

## Sistema Fe-C



A metalurgia do ferro é uma das bases da civilização há pelo menos 2.500 anos e é um dos pilares da sociedade industrial.

A liga Fe-C que sofre reação eutética é chamada de **ferro-fundido**

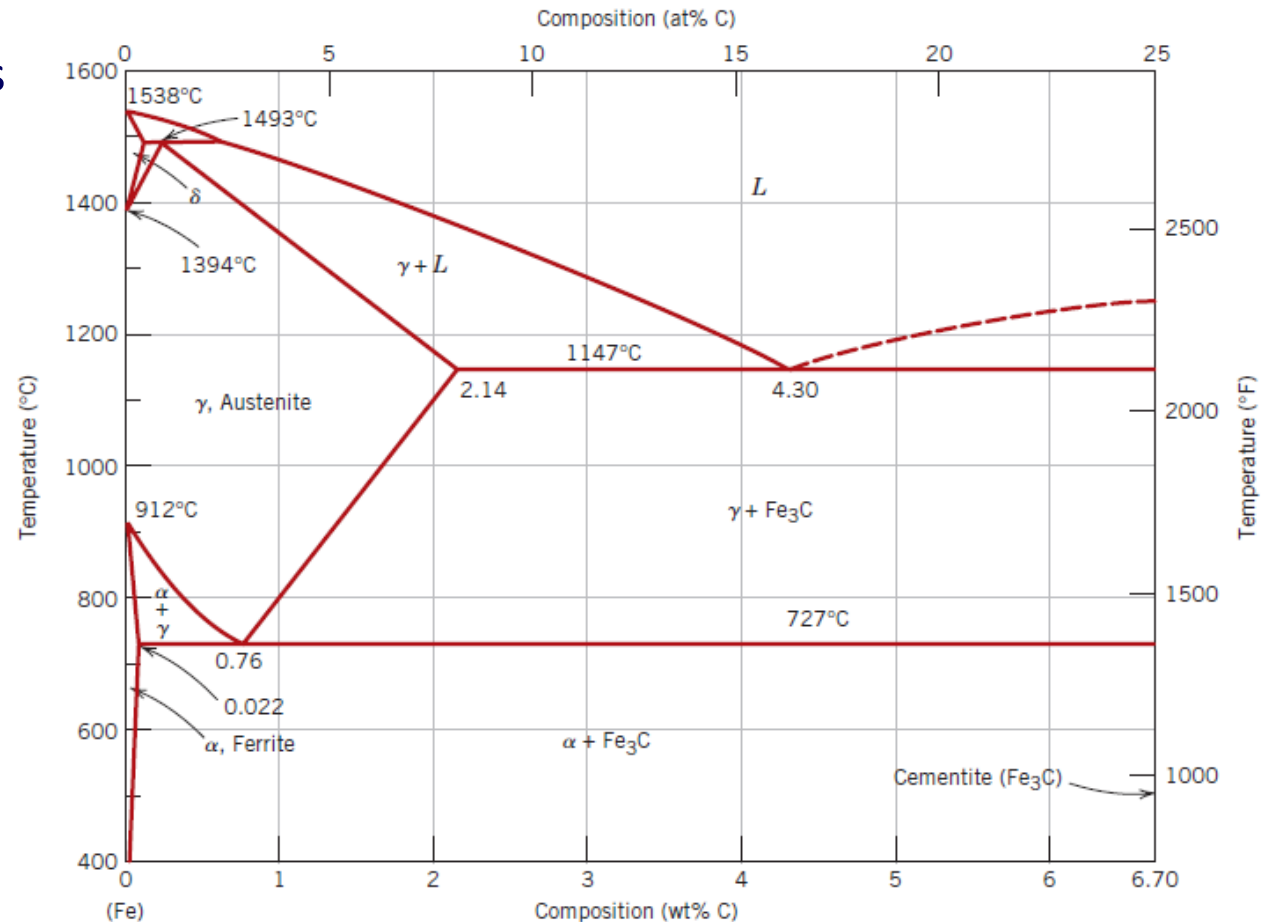
Dependendo da velocidade de resfriamento o carbono pode precipitar de duas formas

- Grafite (estável)
- $\text{Fe}_3\text{C}$  (metaestável): cementita

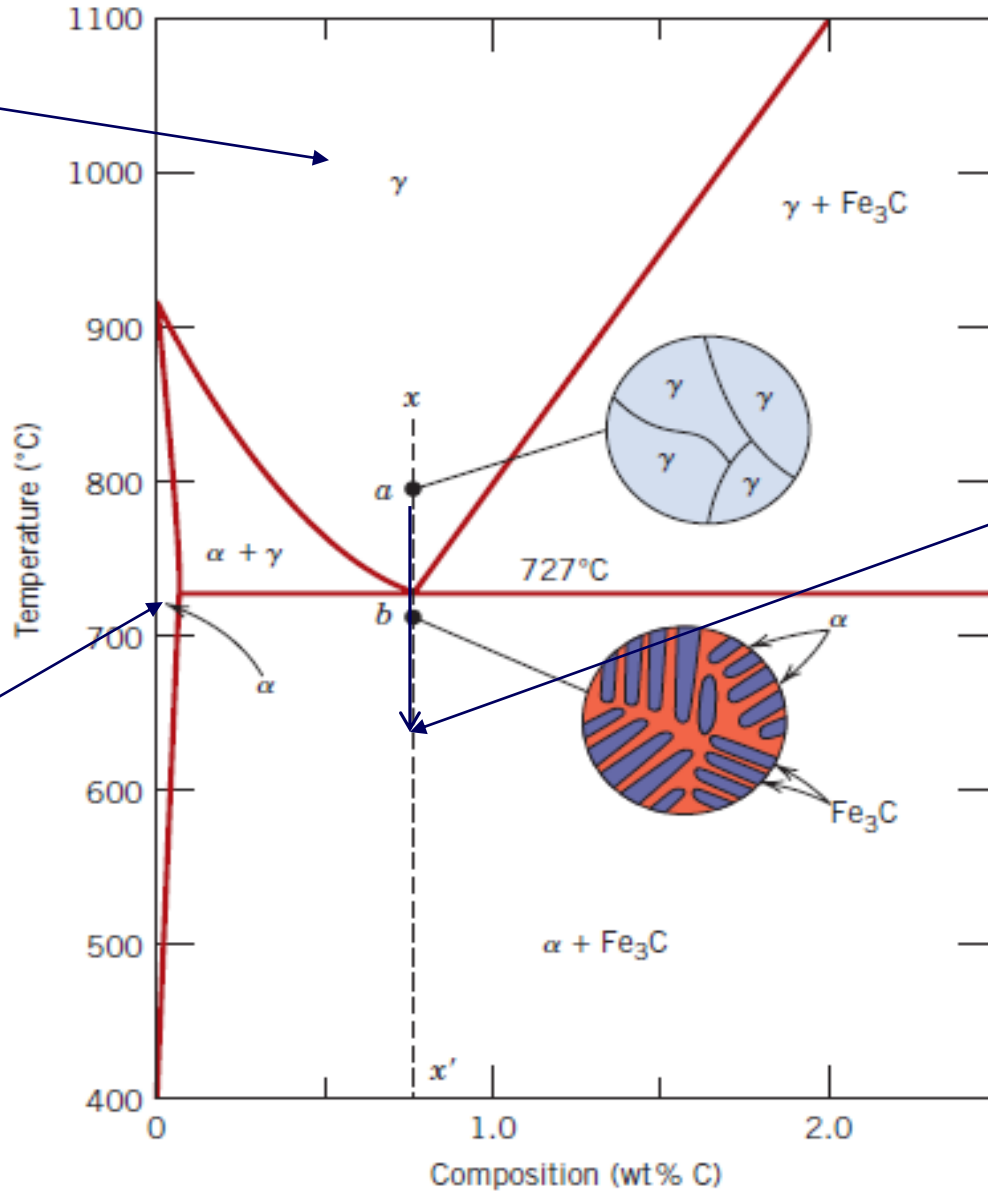
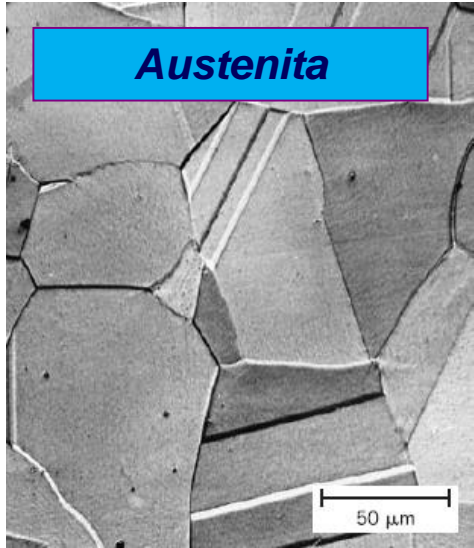
# Diagrama de Fases Fe-Fe<sub>3</sub>C

52

- O **carbono** forma uma solução sólida intersticial com o **Fe**, mas com solubilidade limitada.
- Atendido o limite de solubilidade, precipita grafite ou Fe<sub>3</sub>C.
- A solubilidade do C na ferrita ( $\alpha$ ) é muito baixa (0,022 %) comparada com a solubilidade na austenita ( $\gamma$ ) (2,14 %).
- **PERLITA** (*não é fase, é microestrutura!*)
- Microestrutura formada por lamelas alternadas Fe<sub>3</sub>C e ferrita.



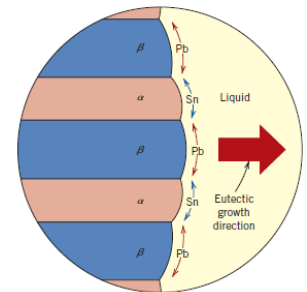
# Diagrama de Fases Fe-Fe<sub>3</sub>C



**TRANSFORMAÇÃO EUTETÓIDE:**



**Microestrutura PERLÍTICA**



*Crescimento cooperativo*

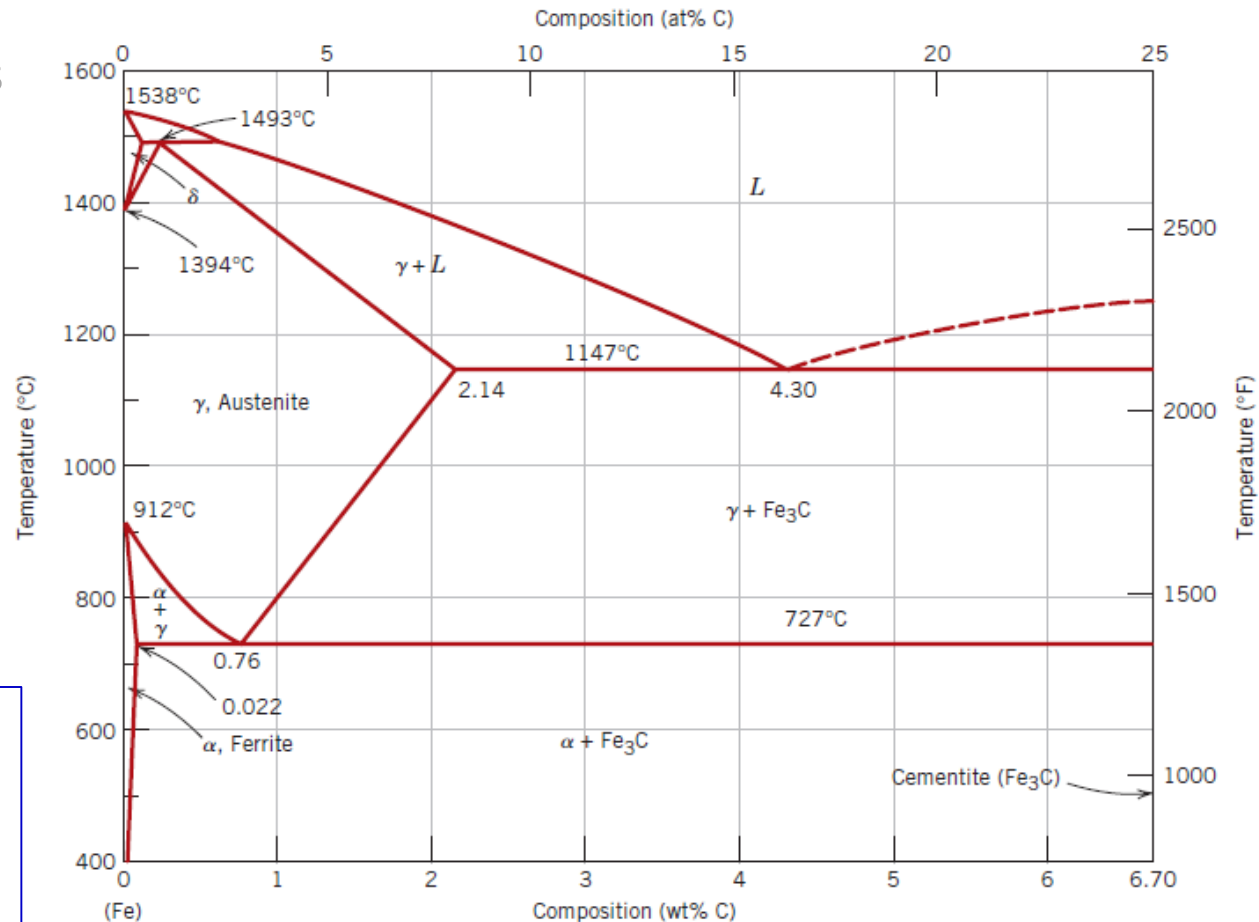
# Diagrama de Fases Fe-Fe<sub>3</sub>C

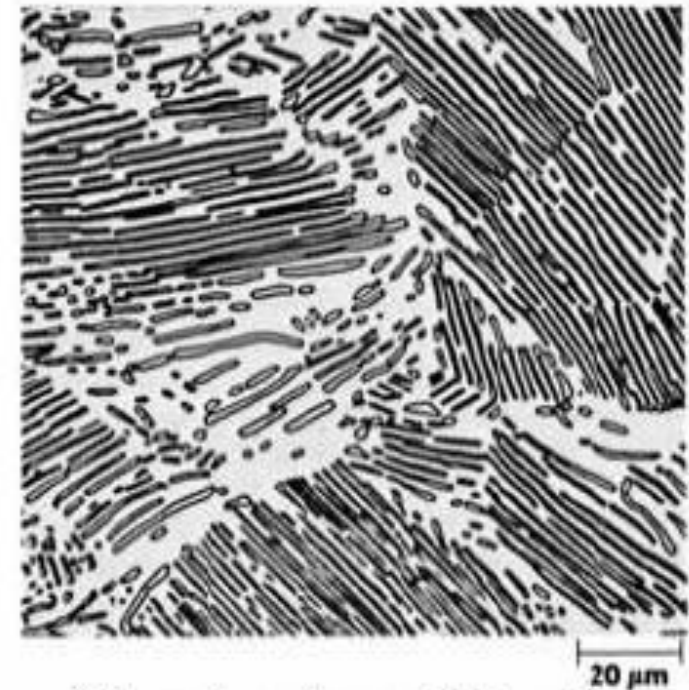
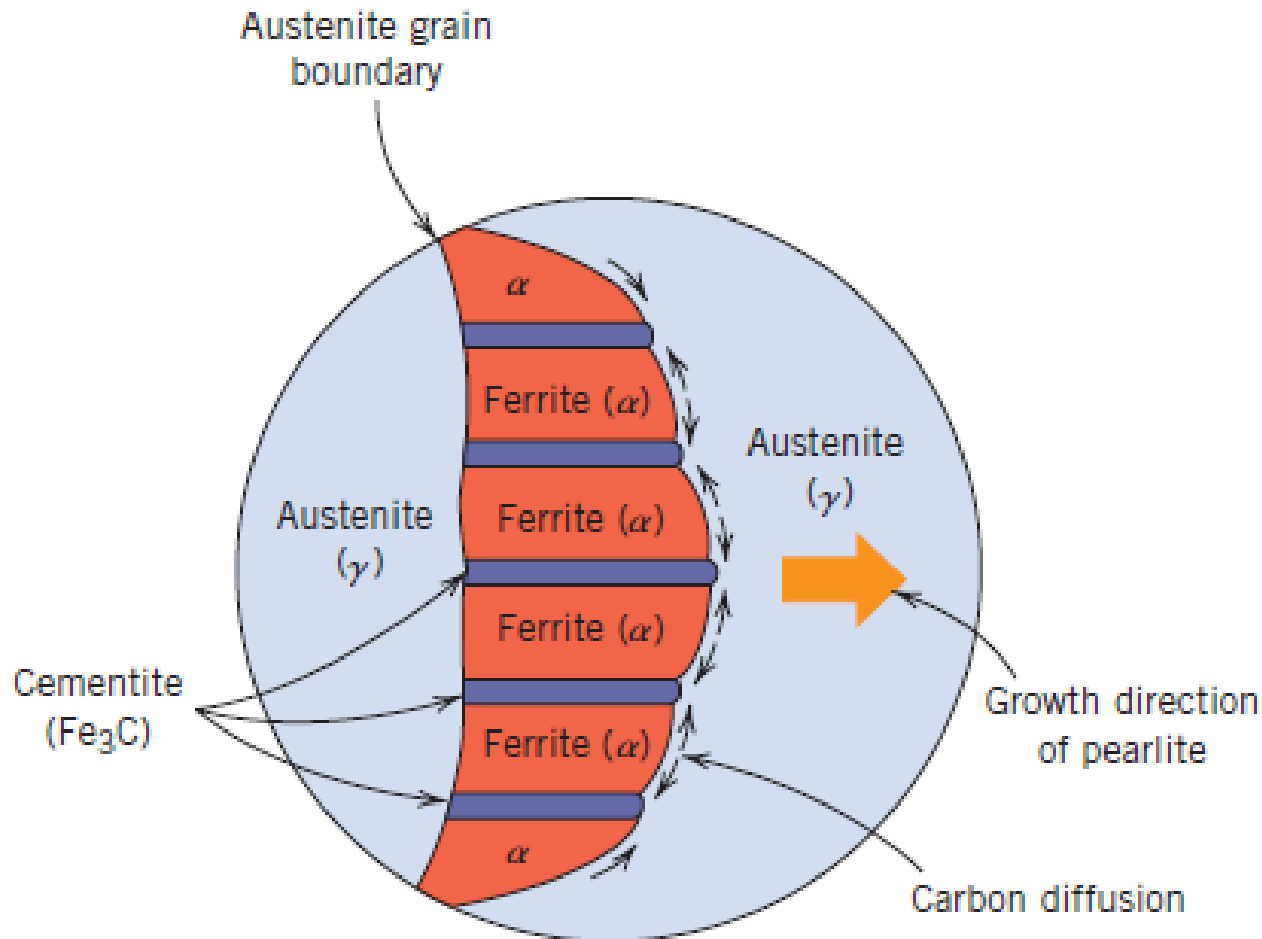
54

- O **carbono** forma uma solução sólida intersticial com o **Fe**, mas com solubilidade limitada.
- Atingido o limite de solubilidade, precipita grafite ou Fe<sub>3</sub>C.
- A solubilidade do C na ferrita ( $\alpha$ ) é muito baixa (0,022 %) comparada com a solubilidade na austenita ( $\gamma$ ) (2,14 %).

**PERLITA** (*não é fase, é microestrutura!*)

- Microestrutura formada por lamelas alternadas Fe<sub>3</sub>C e ferrita.





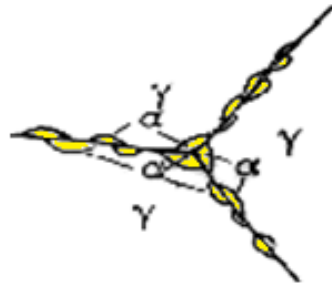
**Microstructure of Pearlite**

**Figure 9.28** Schematic representation of the formation of pearlite from austenite; direction of carbon diffusion indicated by arrows.

# Microestrutura Hipoeutetóide

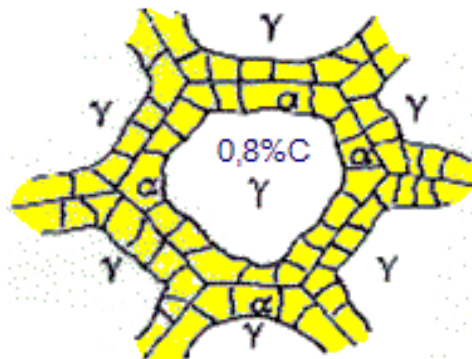
**Ponto c:** Grãos de Austenita ( $\gamma$ ) – estrutura CFC

**Ponto d:** Nucleação e crescimento da ferrita ( $\alpha$  – CCC) nos contornos de grão da austenita ( $\gamma$  – CFC).

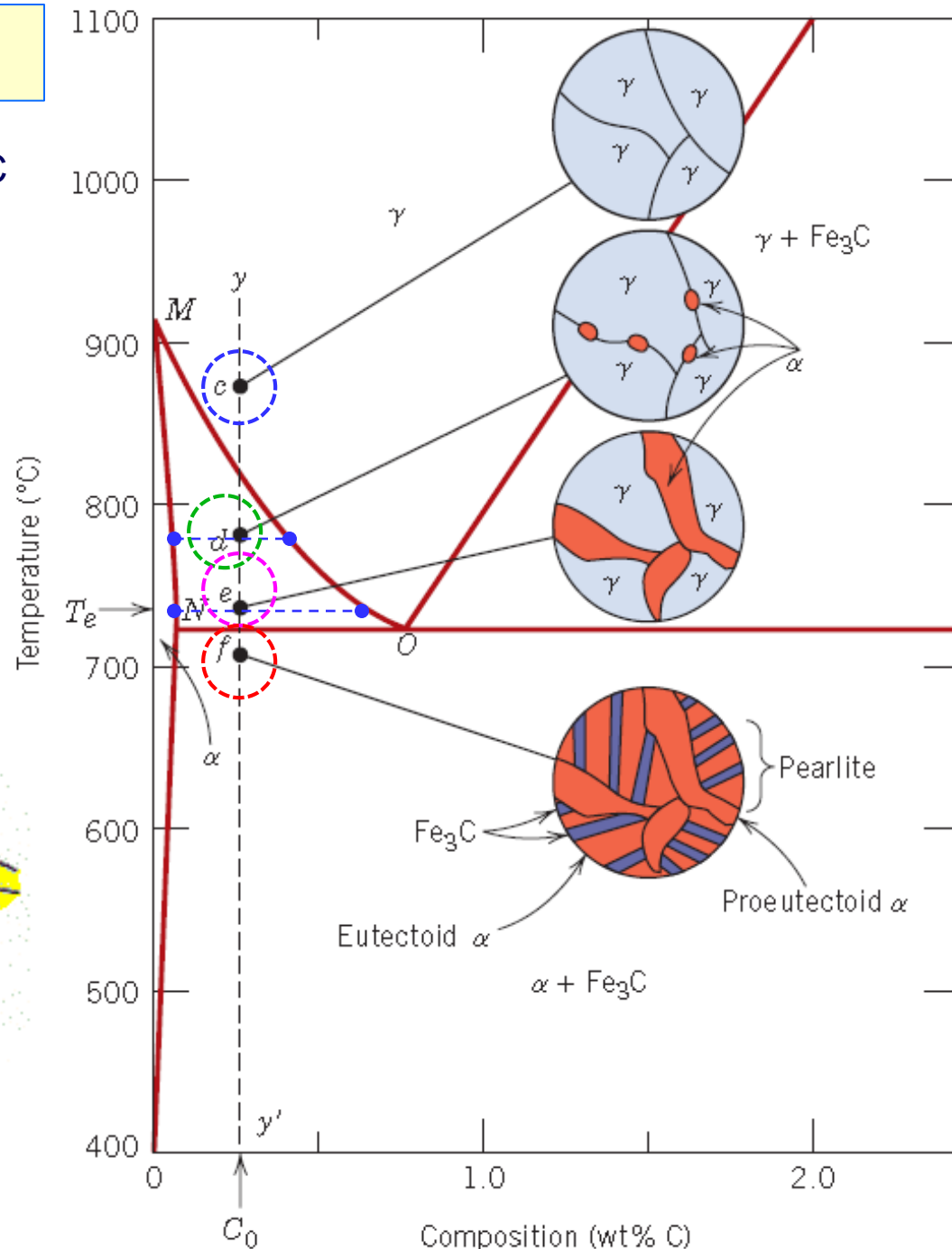


Os contornos de grão apresentam elevada energia interfacial que é aproveitada facilitando a nucleação da nova fase.

**Ponto e:** Aumento da proporção de ferrita na austenita.

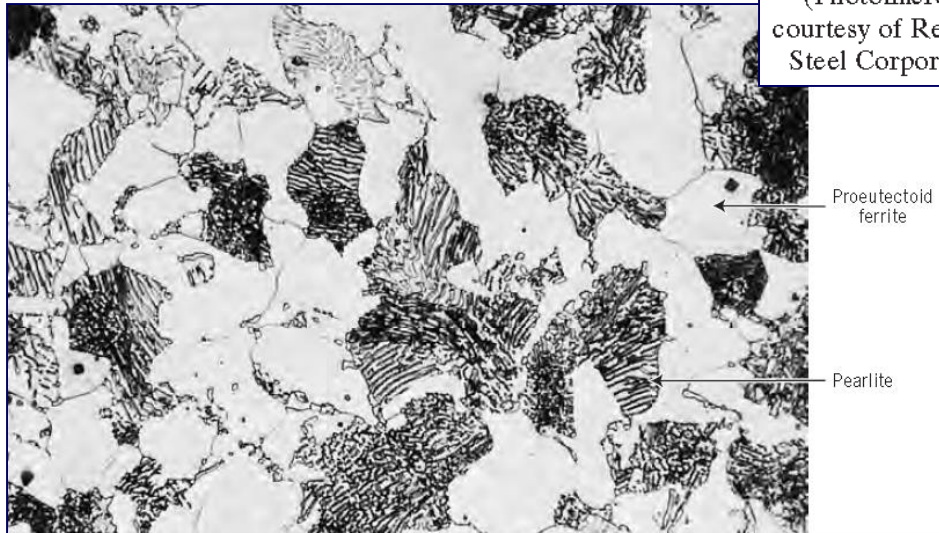


**Ponto f:** Fase  $\alpha$  proeutetóide + perlita [=microestrutura ( $\alpha + Fe_3C$ )].

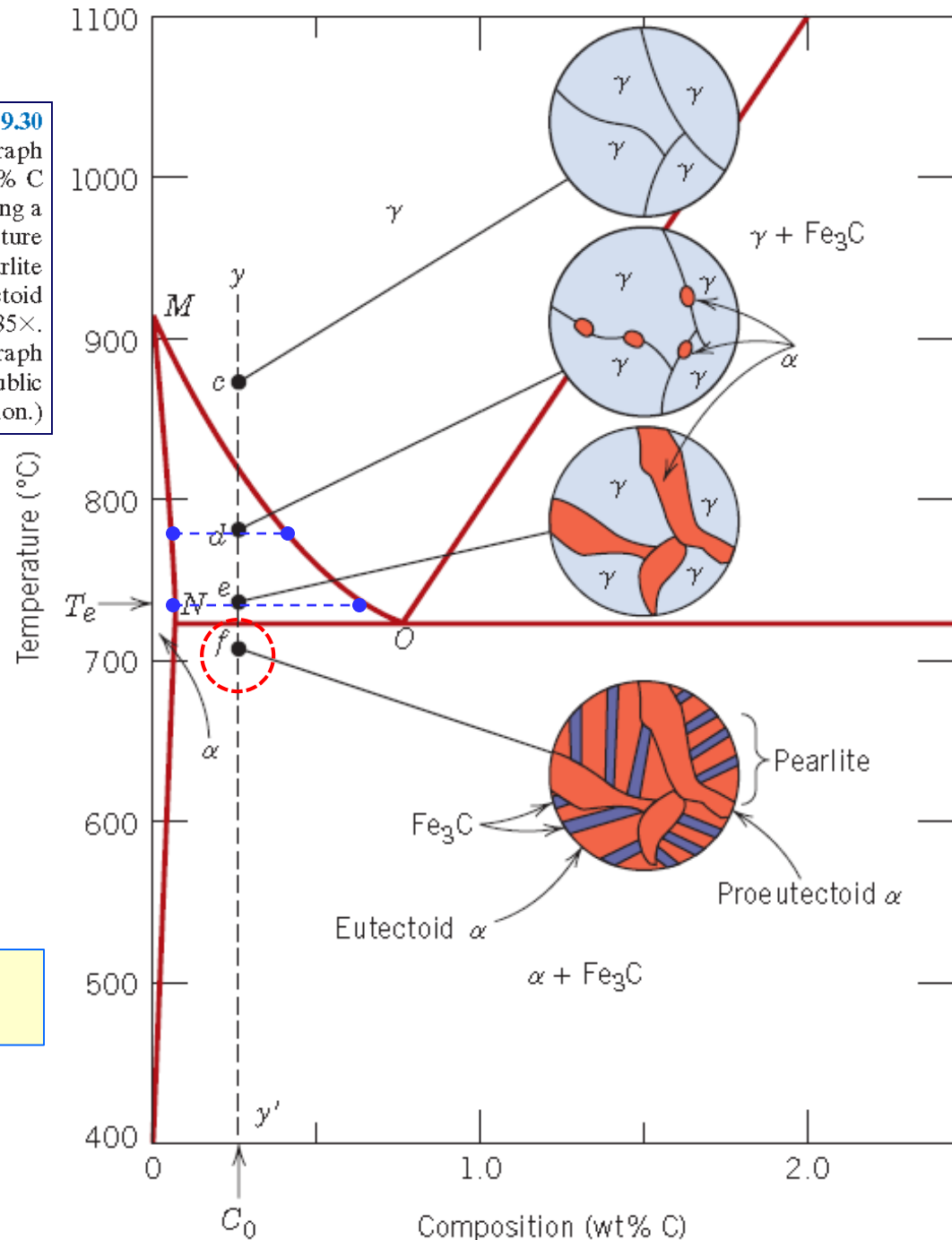




**Ponto f:** como a temperatura está abaixo da temperatura eutetóide, há o crescimento de perlita [=microestrutura ( $\alpha + Fe_3C$ )] a partir da austenita de composição eutetóide .

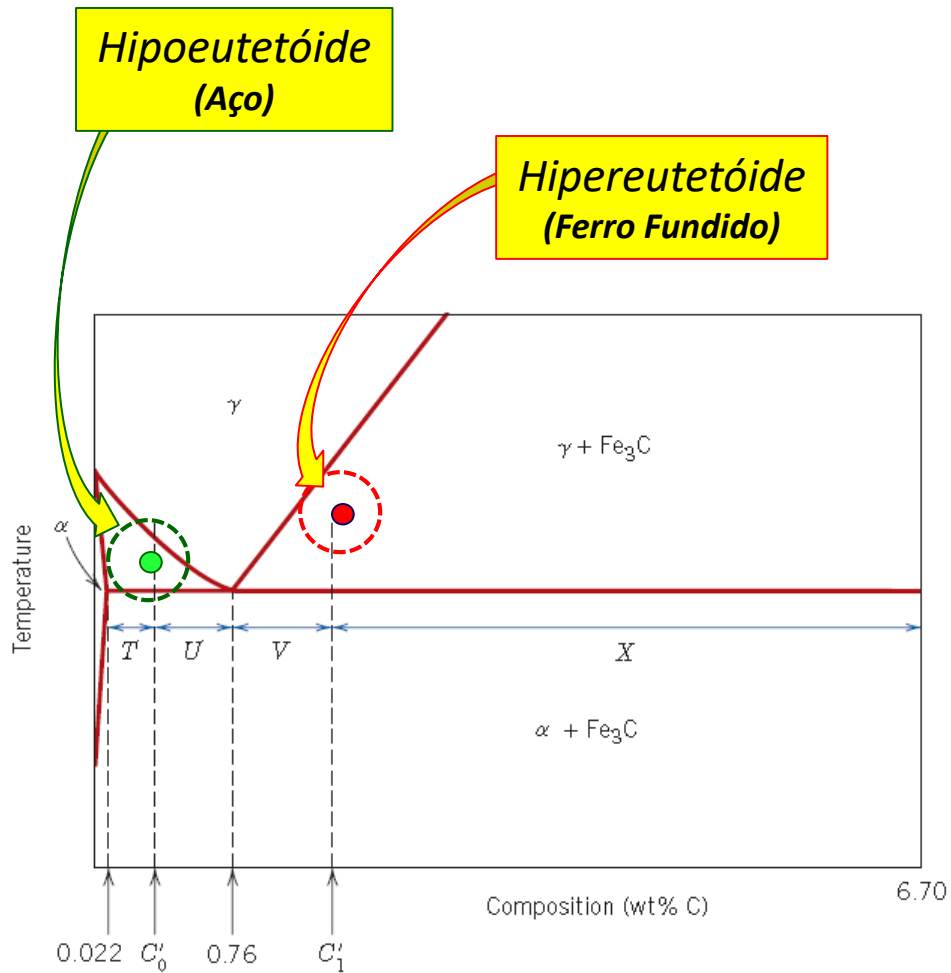


**Figure 9.30**  
Photomicrograph of a 0.38 wt% C steel having a microstructure consisting of pearlite and proeutectoid ferrite. 635 $\times$ . (Photomicrograph courtesy of Republic Steel Corporation.)



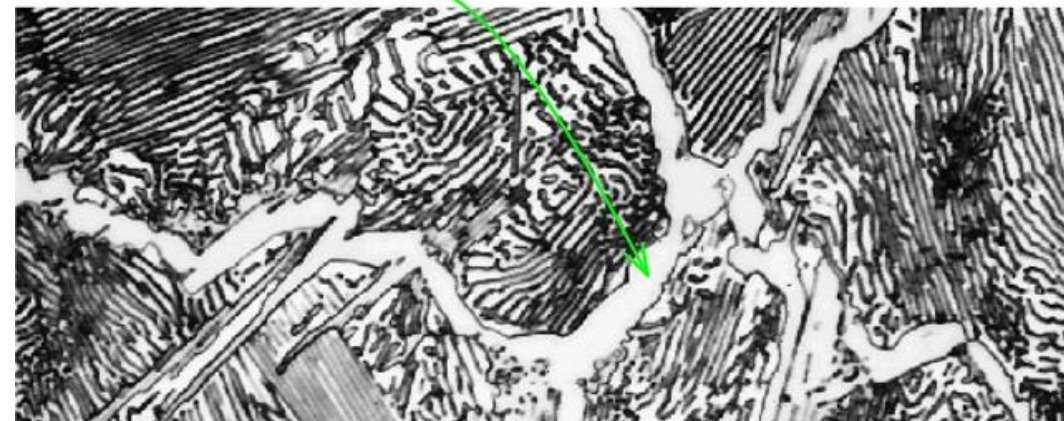
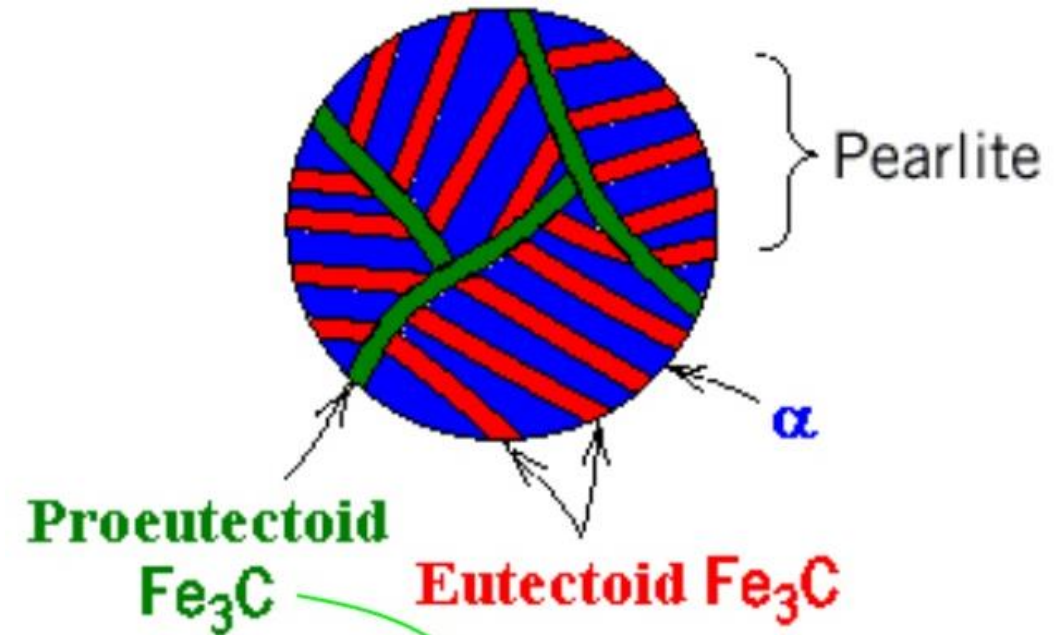
**Microestrutura Hipoeutetóide**

# Microestrutura Hipereutetóide



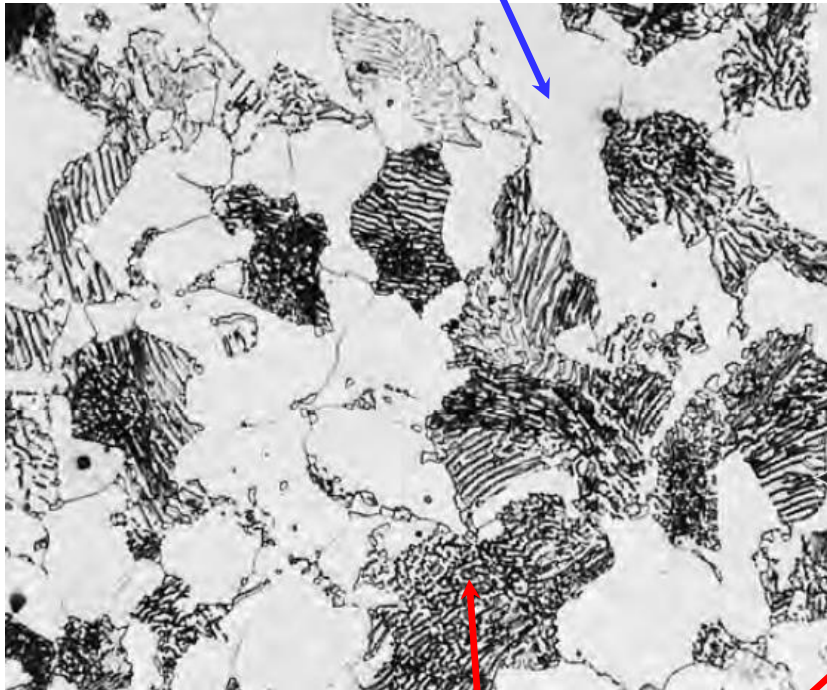
## Microstructure of hypereutectoid steel

Hypereutectoid alloys contain proeutectoid cementite (formed above the eutectoid temperature) plus pearlite that contain eutectoid ferrite and cementite.

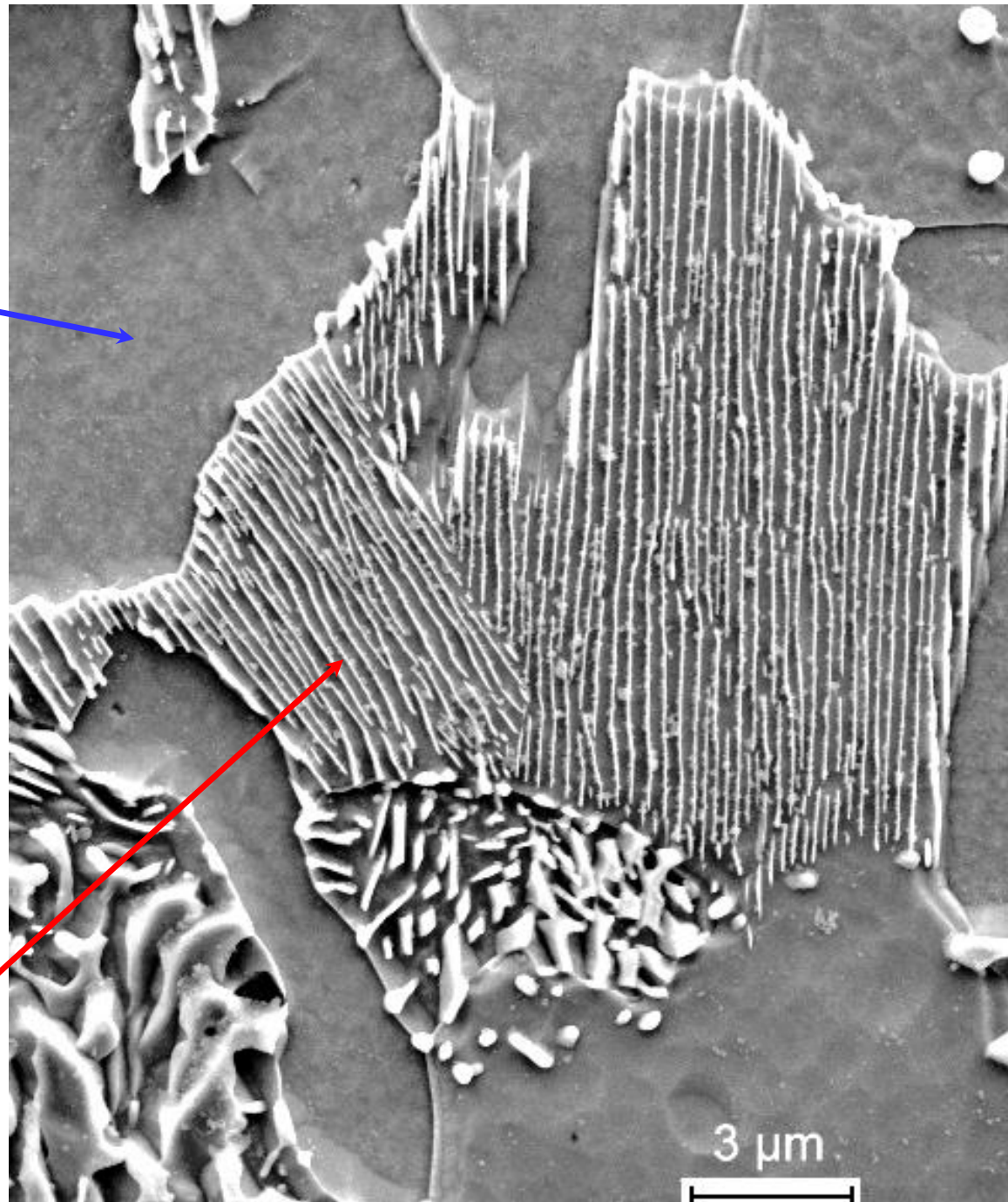


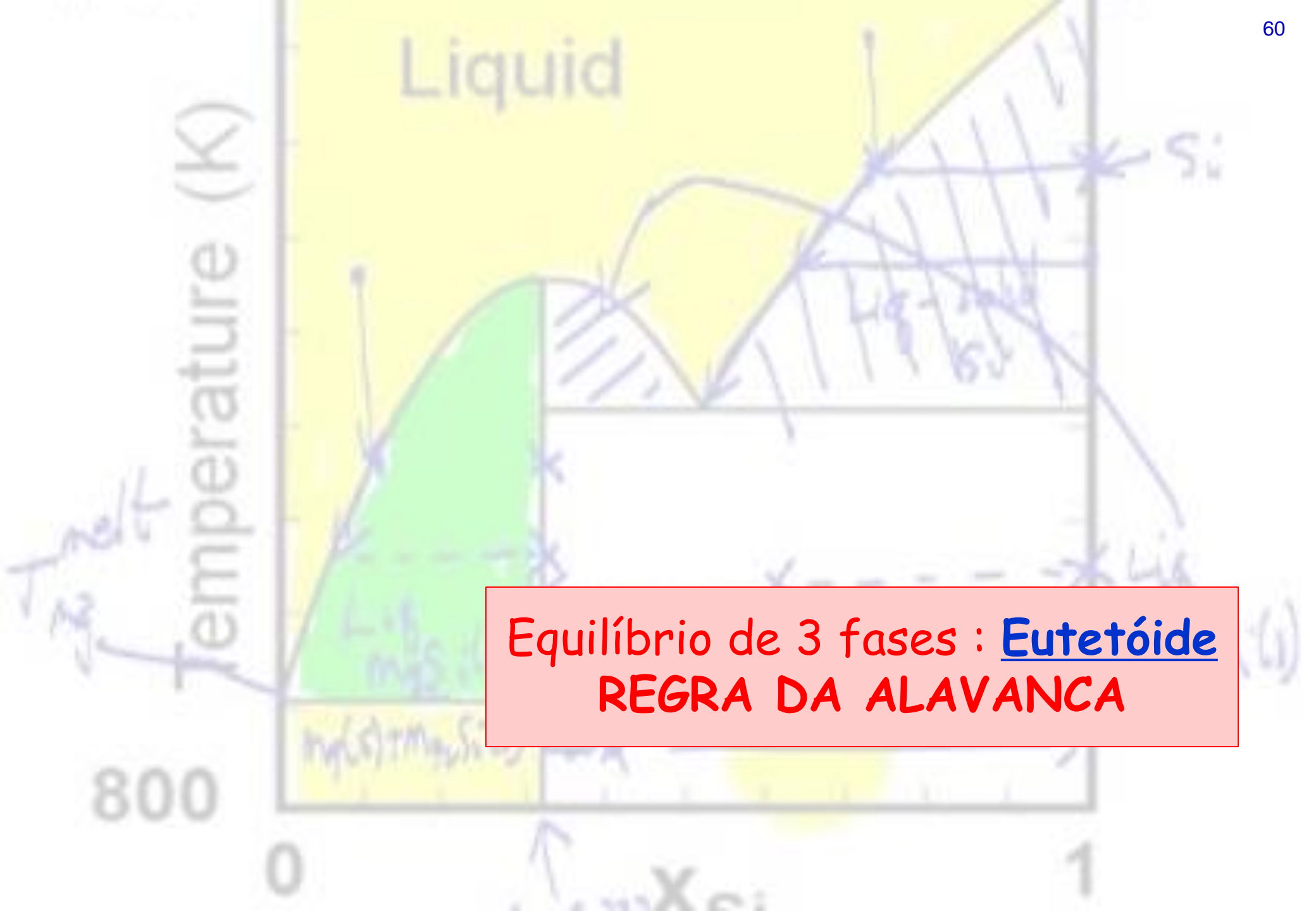
# Microestrutura Hipoeutetóide

Ferrita ( $\alpha$ ) Proeutetóide



Perlita ( $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ )





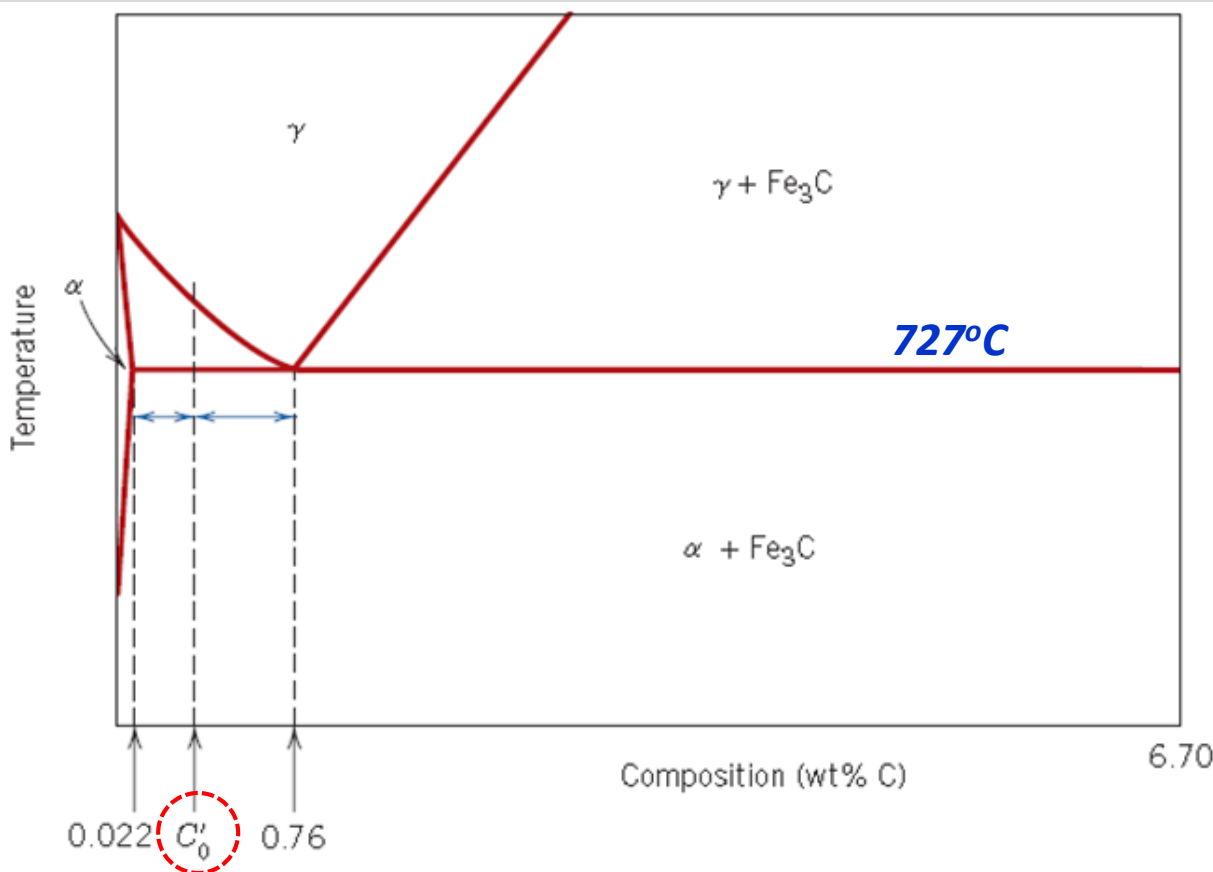
Equilíbrio de 3 fases : Eutetóide  
**REGRA DA ALAVANCA**

# Regra da Alavanca – Composição Hipoeutetóide

## O QUE É POSSÍVEL CALCULAR ?

- *...aplicando a regra da alavanca a 728°C*
  - % relativa de ferrita ( $\alpha$ ) proeutetóide
  - % relativa de austenita ( $\gamma$ )  $\rightarrow \equiv$  % relativa de perlita abaixo de 727°C
- *...aplicando a regra da alavanca a 725°C*
  - % relativa de ferrita ( $\alpha$ ) TOTAL (*proeutetóide + presente na perlita*)
  - % relativa de cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) TOTAL (*somente presente na perlita*)
- *...combinando resultados (regra da alavanca a 728°C e 725°C)*
  - % relativa de ferrita ( $\alpha$ ) presente na perlita

# Regra da Alavanca – Composição Hipoeutetóide



## ...Regra da Alavanca a 728°C

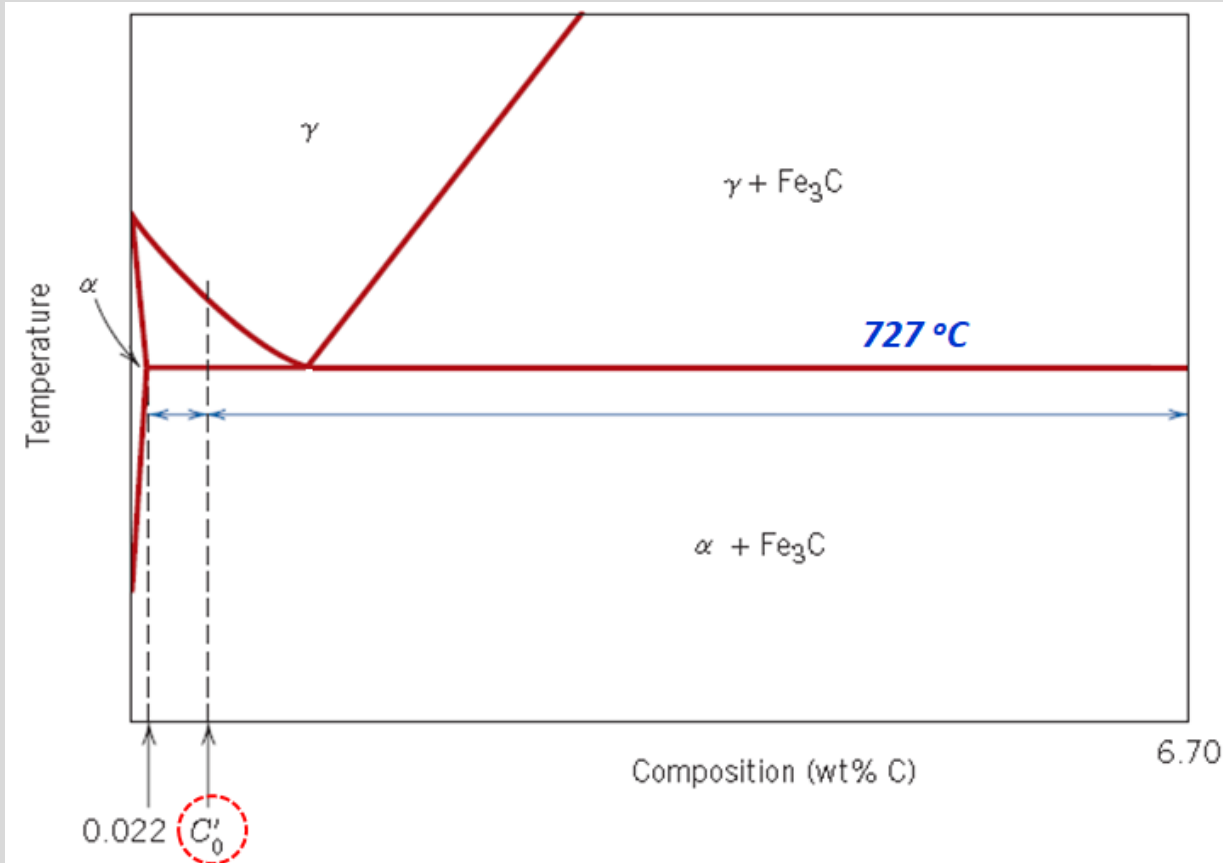
$$\% \alpha_{\text{proeutetóide}} = \frac{0,76 - 0,50}{0,76 - 0,022} \times 100$$

$$\% \gamma = \frac{0,50 - 0,022}{0,76 - 0,022} \times 100 \quad (\equiv \text{"\% perlita"})$$

a % $\gamma$  (austenita) determinada a 728°C é equivalente à %perlita observada abaixo de 727°C, pois a austenita se transforma em perlita (transformação eutetóide) abaixo de 727°C.

Por exemplo,  $C'_0 = 0,50$

# Regra da Alavanca – Composição Hipoeutetóide



## ...Regra da Alavanca a $725^\circ\text{C}$

$$\alpha_{TOTAL} = \frac{6,70 - 0,50}{6,70 - 0,022} \times 100$$

$$\%Fe_3C_{(cementita)} = \frac{0,50 - 0,022}{6,70 - 0,022} \times 100$$

## ...combinando Regra da Alavanca a $728^\circ\text{C}$ e a $725^\circ\text{C}$

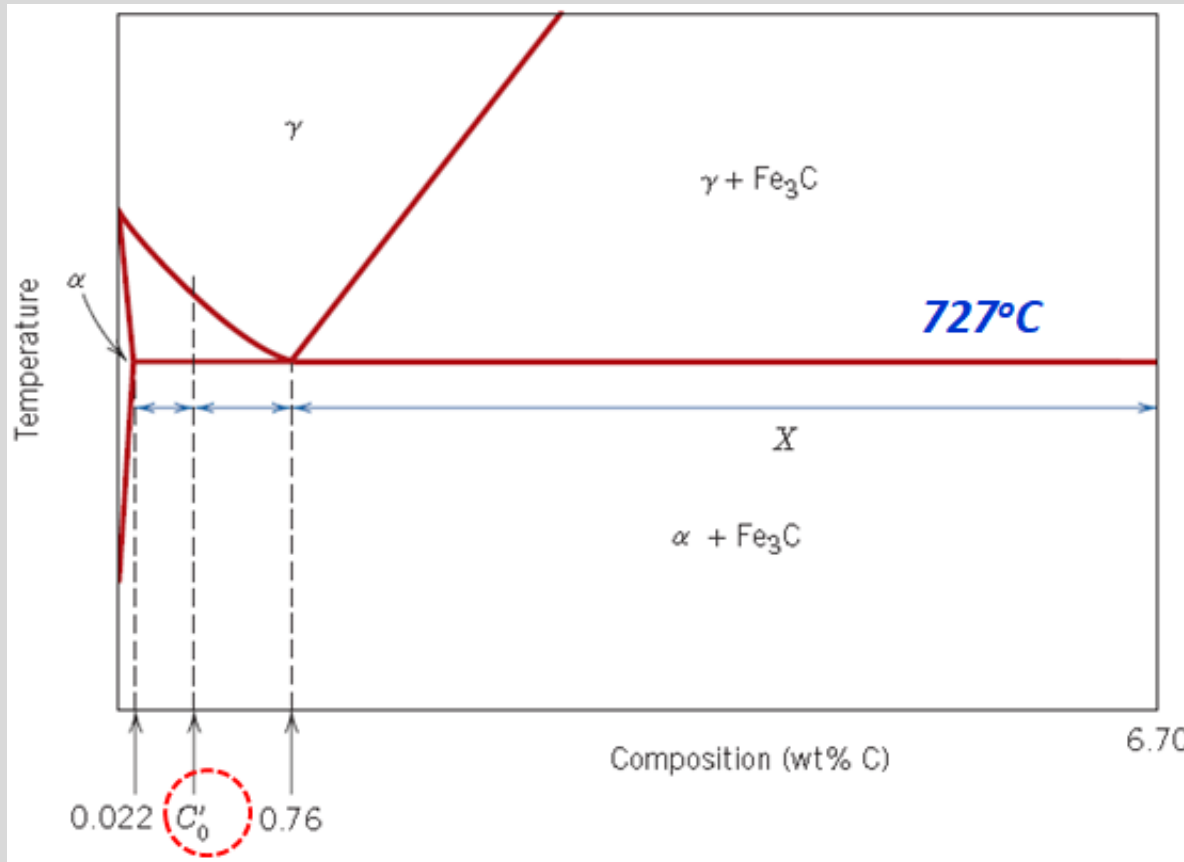
$$\% \alpha_{perlita} = \% \alpha_{TOTAL} - \% \alpha_{proeutetóide}$$

ou

$$\% \alpha_{perlita} = \% \gamma - \% Fe_3C_{(cementita)}$$

Por exemplo,  $C'_0 = 0,50$

# Regra da Alavanca – Composição Hipoeutetóide



## ...Regra da Alavanca a 728°C

$$\% \alpha_{proeutetóide} = \frac{0,76 - 0,50}{0,76 - 0,022} \times 100$$

$$\% \gamma = \frac{0,50 - 0,022}{0,76 - 0,022} \times 100 \quad (\equiv \text{"\% perlita"})$$

## ...Regra da Alavanca a 725°C

$$\alpha_{TOTAL} = \frac{6,70 - 0,50}{6,70 - 0,022} \times 100$$

$$\% Fe_3C_{(cementita)} = \frac{0,50 - 0,022}{6,70 - 0,022} \times 100$$

...resumindo, para  $C'_0 = 0,5$  :

$$\% \alpha_{proeutetóide} = 35,2\% \quad \% Fe_3C = 7,2\%$$

$$\% perlita = 64,8\% \quad \% \alpha_{perlita} = 57,6\%$$

$$\% \alpha_{TOTAL} = 92,8\%$$

## ...combinando Regra da Alavanca a 728°C e a 725°C

$$\% \alpha_{perlita} = \% \alpha_{TOTAL} - \% \alpha_{proeutetóide}$$

ou

$$\% \alpha_{perlita} = \% \gamma - \% Fe_3C_{(cementita)}$$

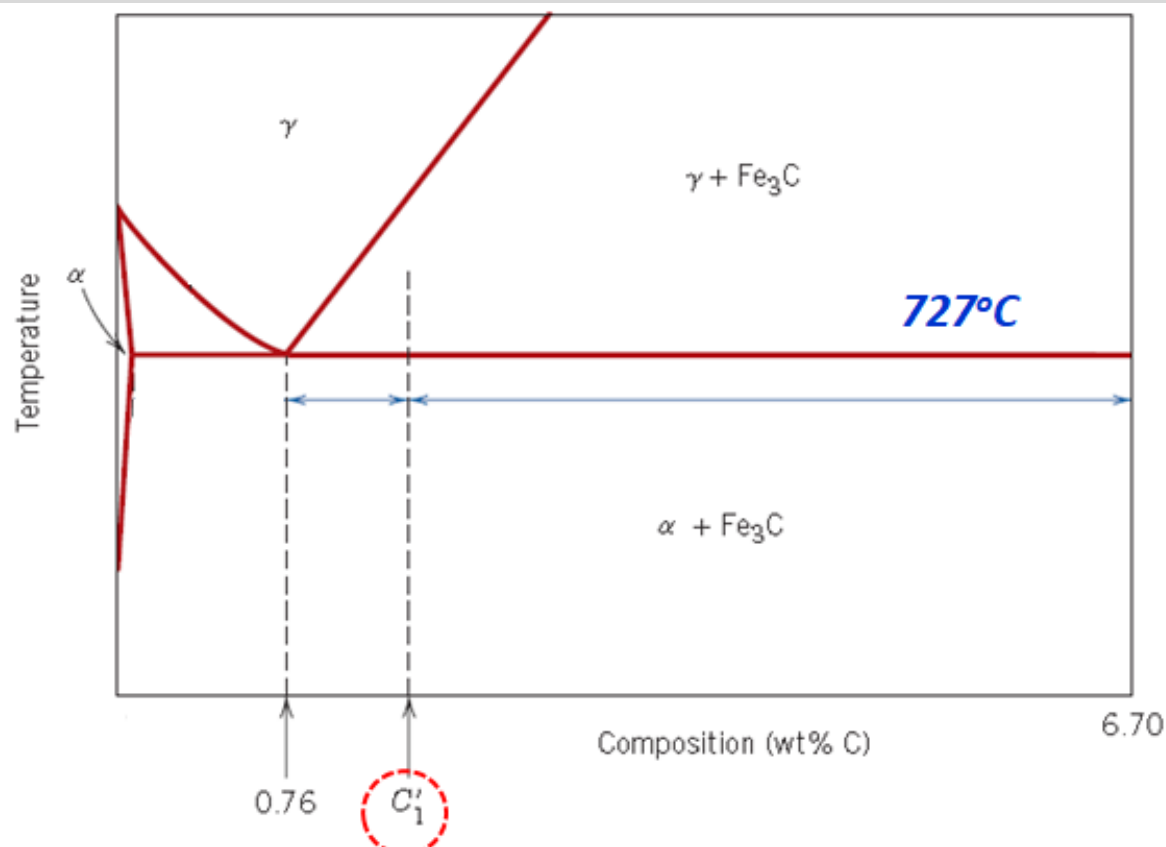


# Regra da Alavanca – Composição Hipereutetóide

## O QUE É POSSÍVEL CALCULAR ?

- *...aplicando a regra da alavanca a 728°C*
  - % relativa de cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) proeutetóide
  - % relativa de austenita ( $\gamma$ )  $\rightarrow \equiv$  % relativa de perlita abaixo de 727°C
- *...aplicando a regra da alavanca a 725°C*
  - % relativa de cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) TOTAL (*proeutetóide + presente na perlita*)
  - % relativa de ferrita ( $\alpha$ ) TOTAL (*somente presente na perlita*)
- *...combinando resultados (regra da alavanca a 728°C e 725°C)*
  - % relativa de cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) presente na perlita

# Regra da Alavanca – Composição Hipereutetóide



## ...Regra da Alavanca a 728°C

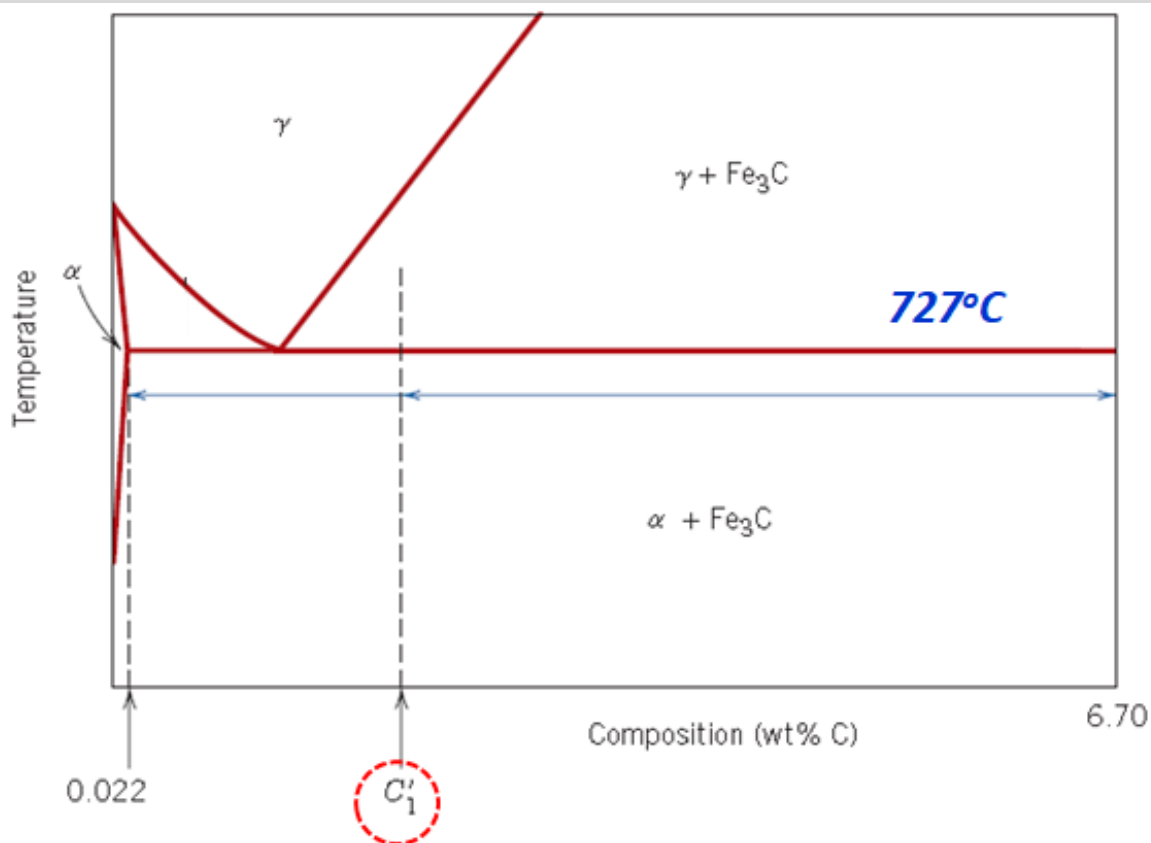
$$\%Fe_3C_{,proeutetóide} = \frac{1,00 - 0,76}{6,70 - 0,76} \times 100$$

$$\%\gamma = \frac{6,70 - 1,00}{6,70 - 0,76} \times 100 \quad (\equiv \text{"\% perlita"})$$

*a % $\gamma$  (austenita) determinada a 728°C é equivalente à %perlita observada abaixo de 727°C, pois a austenita se transforma em perlita (transformação eutetóide) abaixo de 727°C.*

Por exemplo,  $C'_1 = 1,00$

## Regra da Alavanca – Composição Hipereutetóide



### ...Regra da Alavanca a $725^\circ\text{C}$

$$\%Fe_3C_{TOTAL} = \frac{1,00 - 0,022}{6,70 - 0,022} \times 100$$

$$\%\alpha = \frac{6,70 - 1,00}{6,70 - 0,022} \times 100$$

### ...combinando Regra da Alavanca a $728^\circ\text{C}$ e a $725^\circ\text{C}$

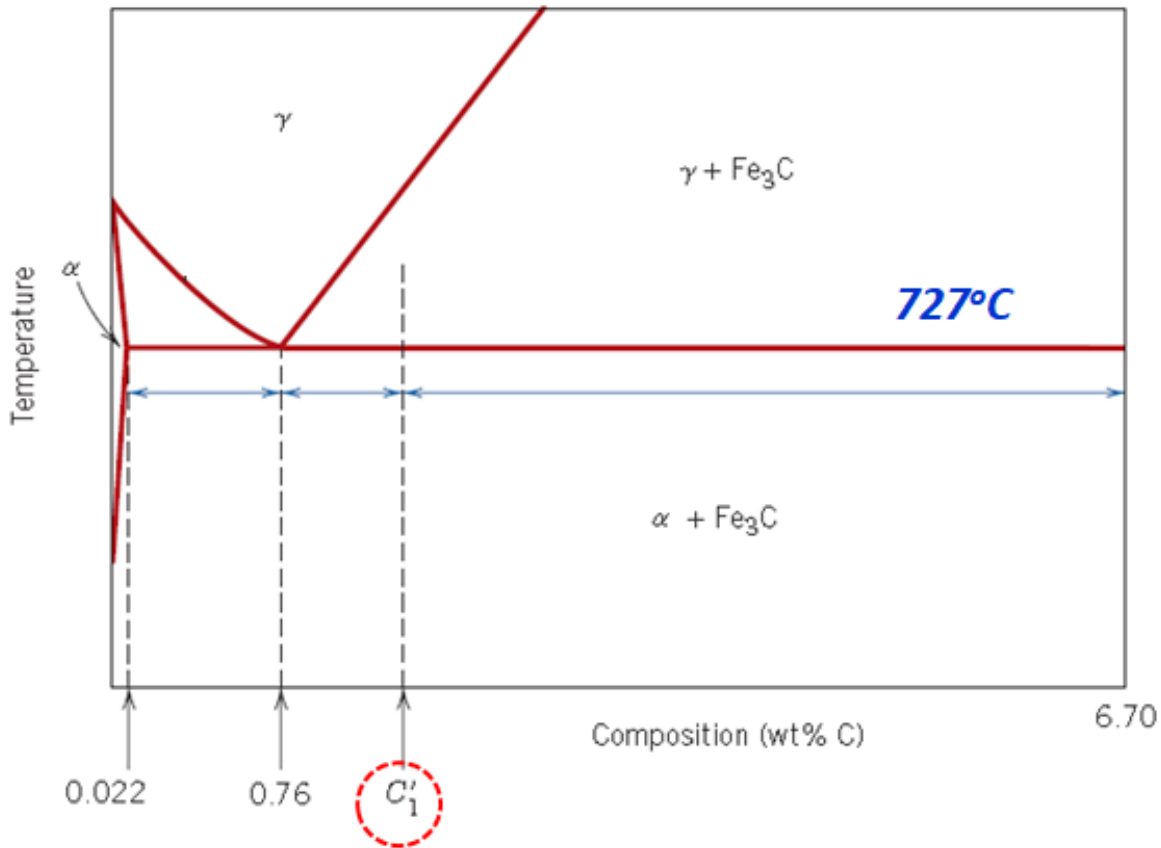
$$\%Fe_3C_{perlita} = \%Fe_3C_{TOTAL} - \%Fe_3C_{proeutetóide}$$

ou

$$\%Fe_3C_{perlita} = \%\gamma - \%\alpha$$

Por exemplo,  $c'_1 = 1,00$

# Regra da Alavanca – Composição Hipereutetóide



## ...Regra da Alavanca a 728°C

$$\%Fe_3C_{proeutetóide} = \frac{1,00 - 0,76}{6,70 - 0,76} \times 100$$

$$\% \gamma = \frac{6,70 - 1,00}{6,70 - 0,76} \times 100 \quad (\equiv \text{"\% perlita"})$$

## ...Regra da Alavanca a 725°C

$$\%Fe_3C_{TOTAL} = \frac{1,00 - 0,022}{6,70 - 0,022} \times 100$$

$$\% \alpha = \frac{6,70 - 1,00}{6,70 - 0,022} \times 100$$

## ...combinando Regra da Alavanca a 728°C e a 725°C

$$\begin{aligned} \%Fe_3C_{perlita} \\ = \%Fe_3C_{TOTAL} - \%Fe_3C_{proeutetóide} \end{aligned}$$

ou

$$\%Fe_3C_{perlita} = \% \gamma - \% \alpha$$

...resumindo, para  $C'_1 = 1,0$  :

$\% Fe_3C_{proeutetóide} = 4,0\%$	$\% \alpha = 85,4\%$
$\% perlita = 96,0\%$	$\% Fe_3C_{perlita} = 10,6\%$
$\% Fe_3C_{TOTAL} = 14,6\%$	

## *...finalizando* : Diagramas de Fases

- Ao final do estudo dos conteúdos desta Unidade você deve ser capaz de:
  - definir o que se entende por componente, fase, sistema e equilíbrio de fases.
  - definir quais são as informações que podem ser obtidas e quais as que não podem ser obtidas a partir de um diagrama de fases.
  - esquematizar diagramas de fase unários, binários e ternários.
  - “ler” as informações contidas em diagramas de fases binários: quantas e quais são as fases presentes; composições da(s) fase(s) presente(s); temperaturas de transição de fases.
  - calcular as quantidades relativas das fases presentes em diagramas de fases binários, por meio da regra da alavanca.
  - esquematizar as microestruturas que podem ser obtidas por meio de aquecimento ou resfriamento de composições definidas de sistemas binários (isomórficos, eutéticos e eutetóides).

## Referências

- Callister, W.D. ; Rethwisch, D.G. Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Introdução. Tradução da 9ª Ed. Americana. LCT. 2016. Cap.9 .
  - Obs.: outras edições do livro do Callister existentes nas bibliotecas da EP, em inglês ou português, também cobrem o conteúdo apresentado nesta Unidade.
- Askeland, D.R.; Wright, W.J. Ciência e Engenharia dos Materiais. Cengage Learning. Tradução da 4ª Ed. Americana. 2019. Cap. 10-11.
- Shackelford, J.F. Ciência dos Materiais. 6ª Ed. Pearson. 2008. Cap. 9 .