



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

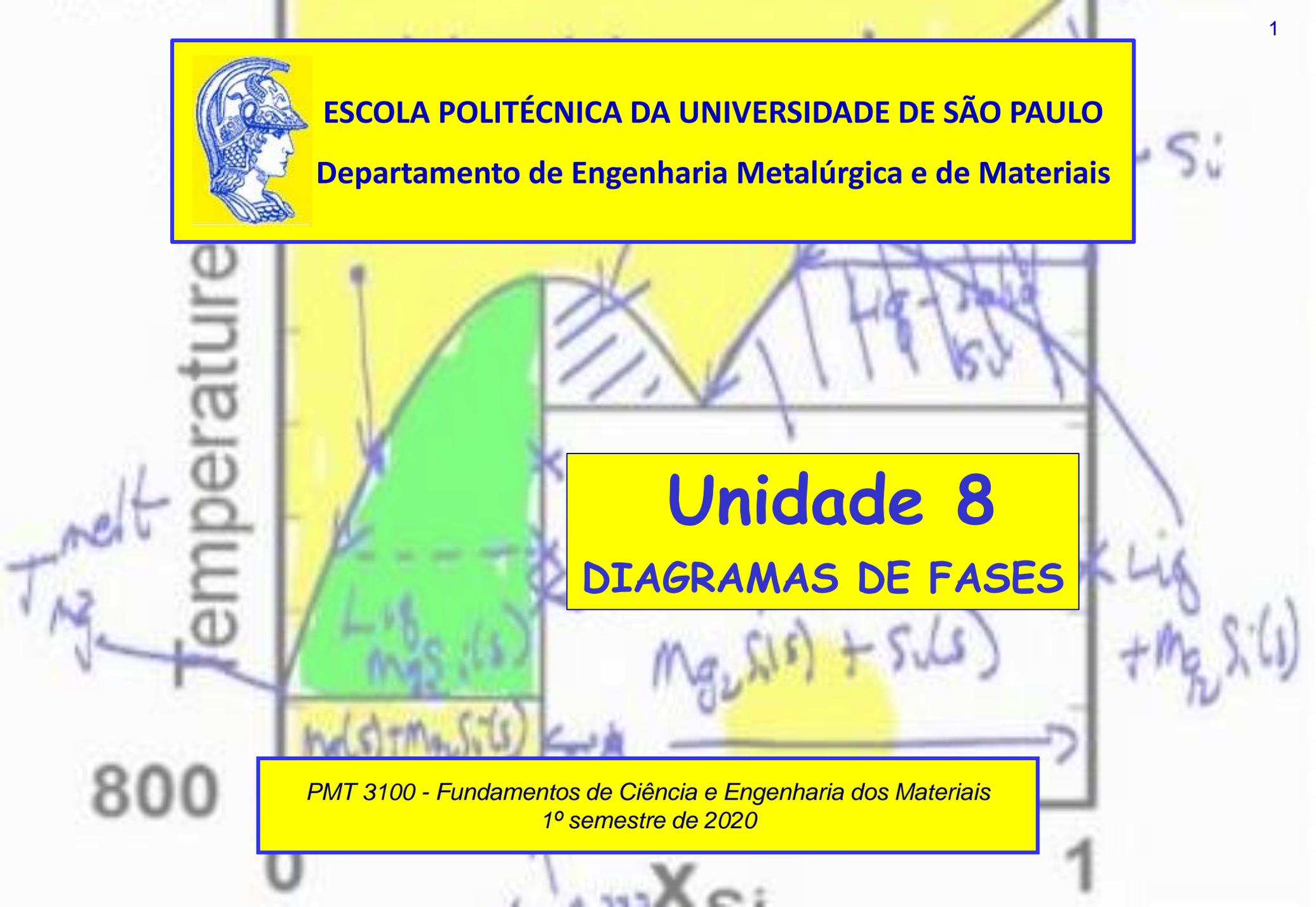
Unidade 8

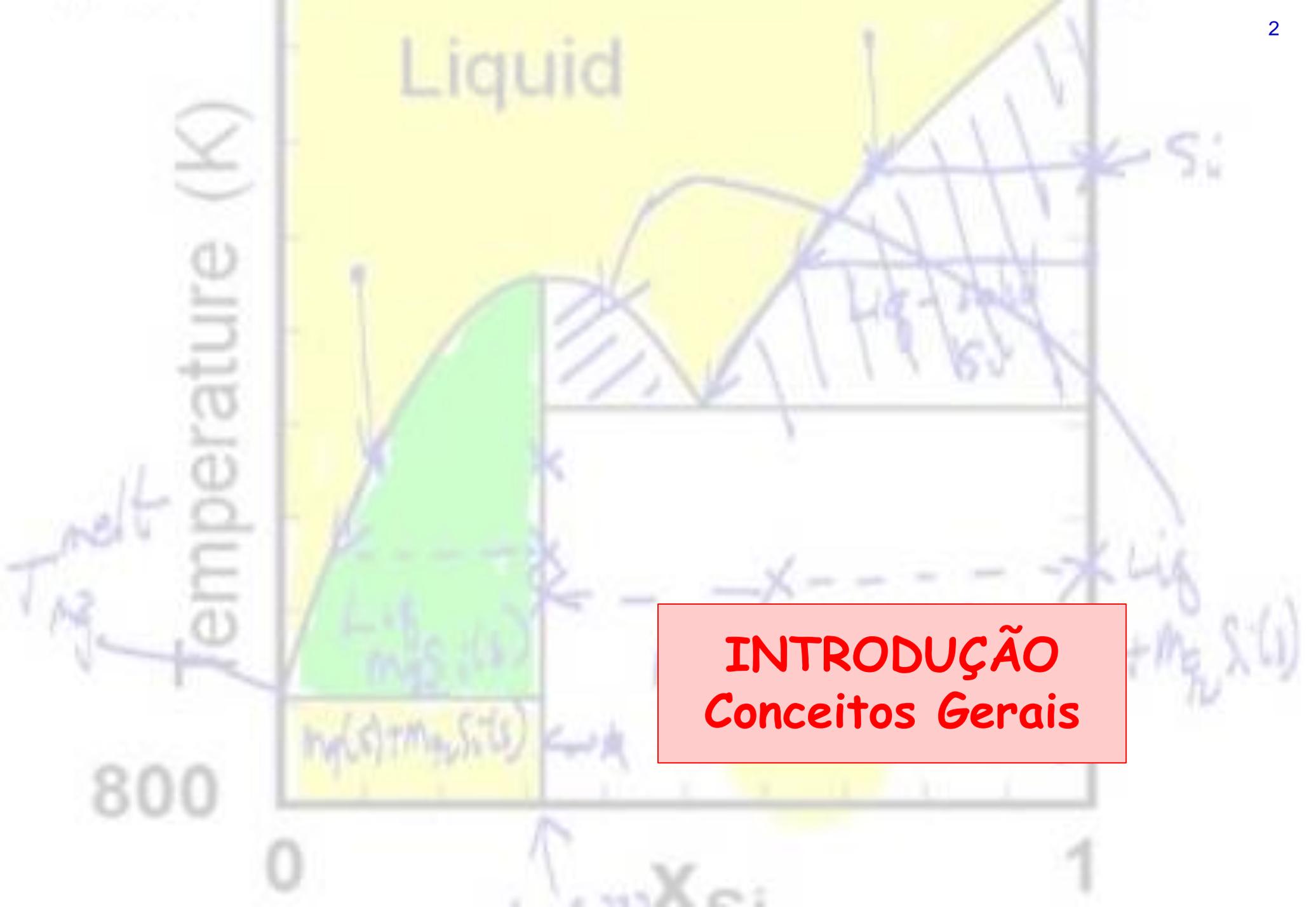
DIAGRAMAS DE FASES

Temperature

800

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





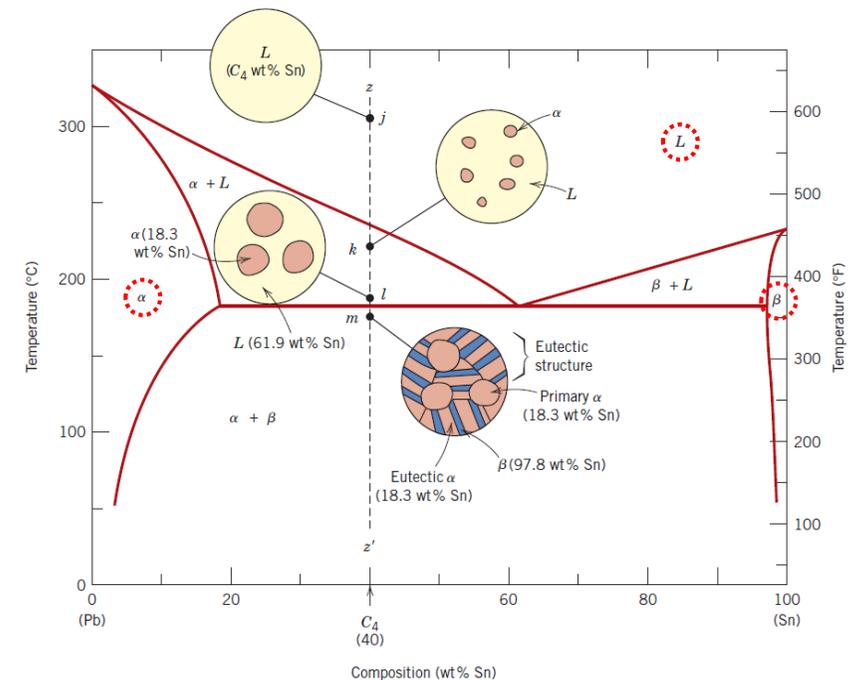
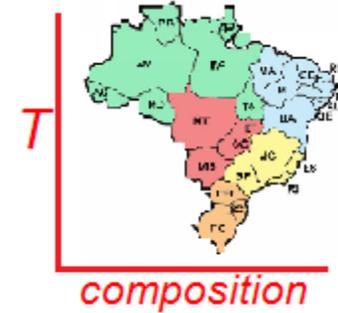
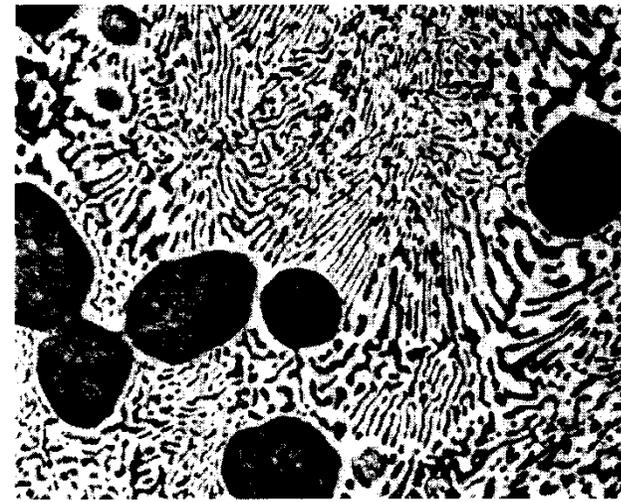
INTRODUÇÃO
Conceitos Gerais

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)

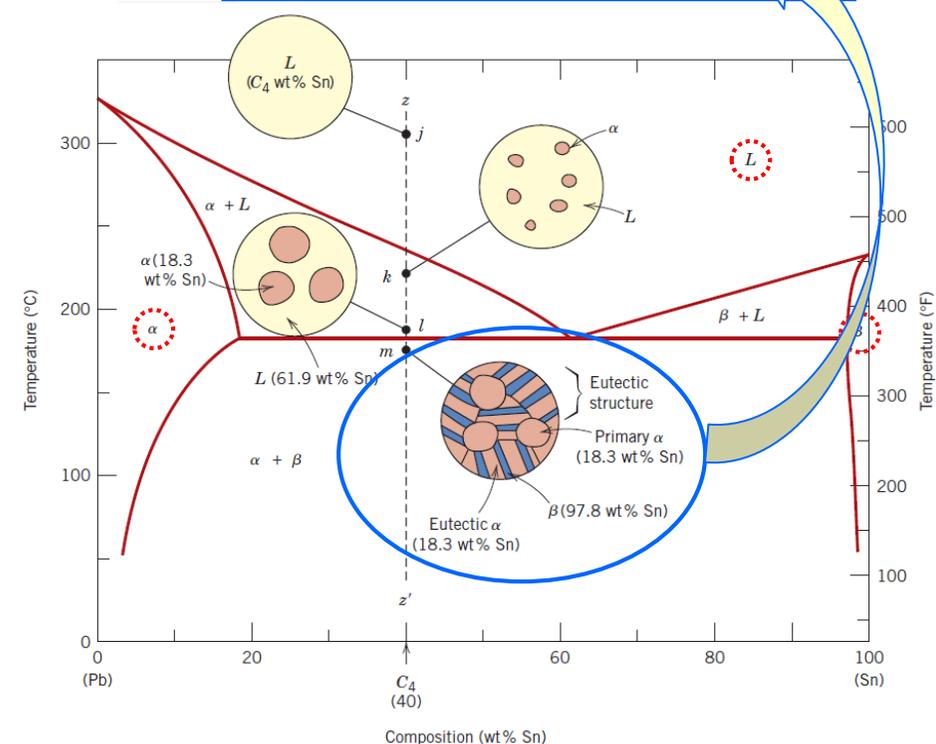
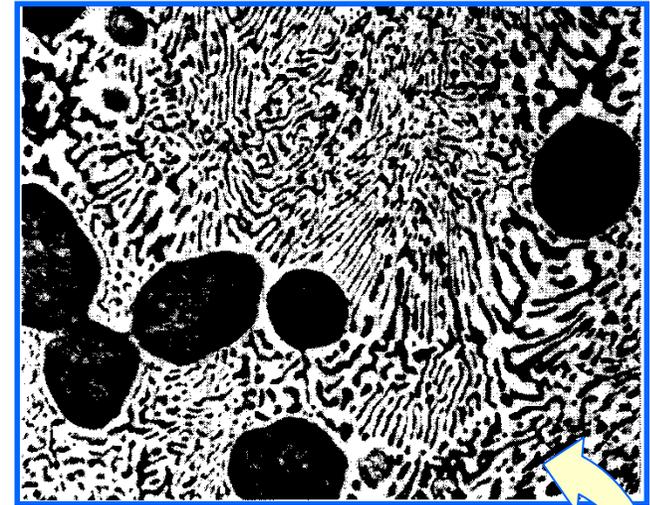


• COMPONENTES

- 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.

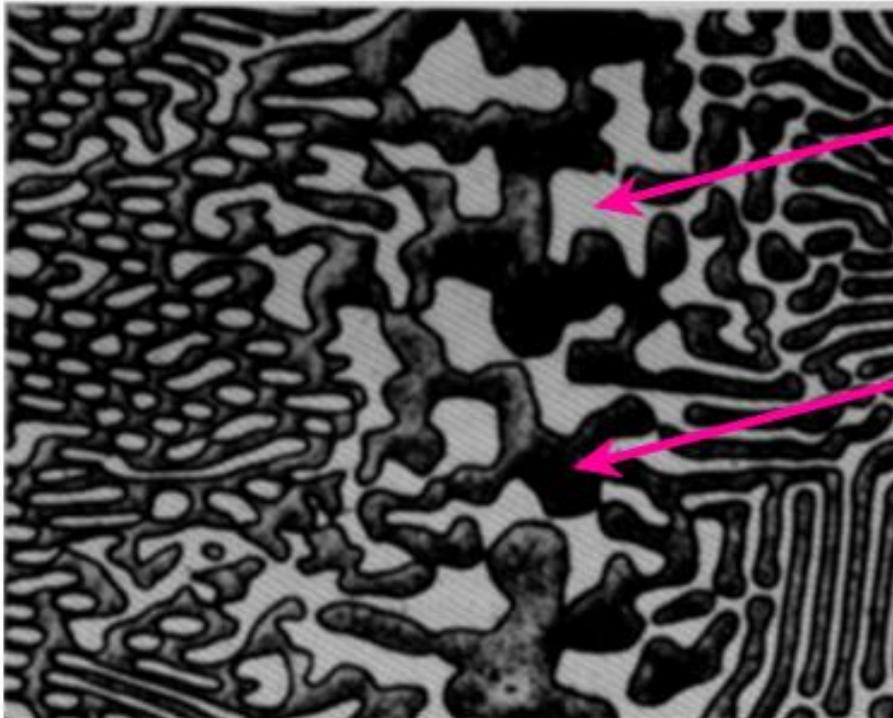


Exemplo : Diagrama de Fases do Sistema Pb-Sn

Definições (2)

- **FASE**

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



Two phases

β (lighter phase)
Includes Al and Cu

α (darker phase)
Includes Al and Cu

Two Components

Al-Cu Alloy



Informações que podem ser obtidas a partir dos Diagramas de Fases

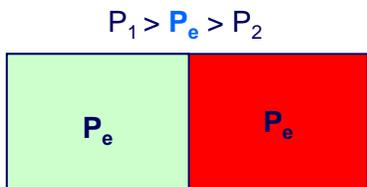
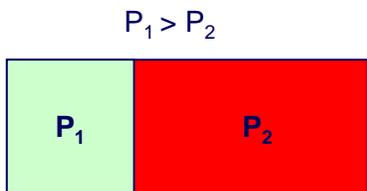
- ✓ **Temperaturas** de fusão/solidificação
- ✓ **Número de fases** presentes em função da temperatura
- ✓ **Composição** química das fases
- ✓ **Quantidade relativa** de cada uma das fases
- ✓ **Limites de solubilidade**
- ✓ *Permite que se faça uma previsão da **microestrutura***

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* !

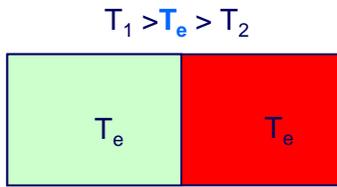
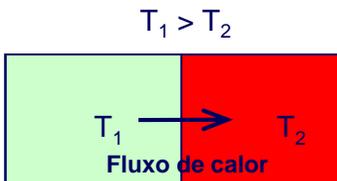
Equilíbrio mecânico

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



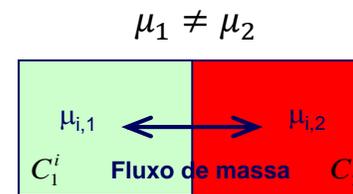
Equilíbrio térmico

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

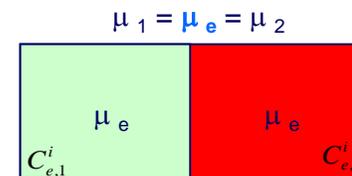


Equilíbrio de fases

- Parede permeável
- Propriedade termodinâmica: **potencial químico (μ)**

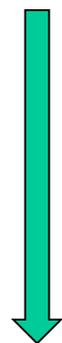


$$\mu_i = \left(\frac{\partial G}{\partial N_i} \right)_{p,T,N_j} \quad dG = dH - TdS$$



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

Inicial
Fora do equilíbrio



Final
Equilíbrio

...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**, μ (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 μ 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, μ 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

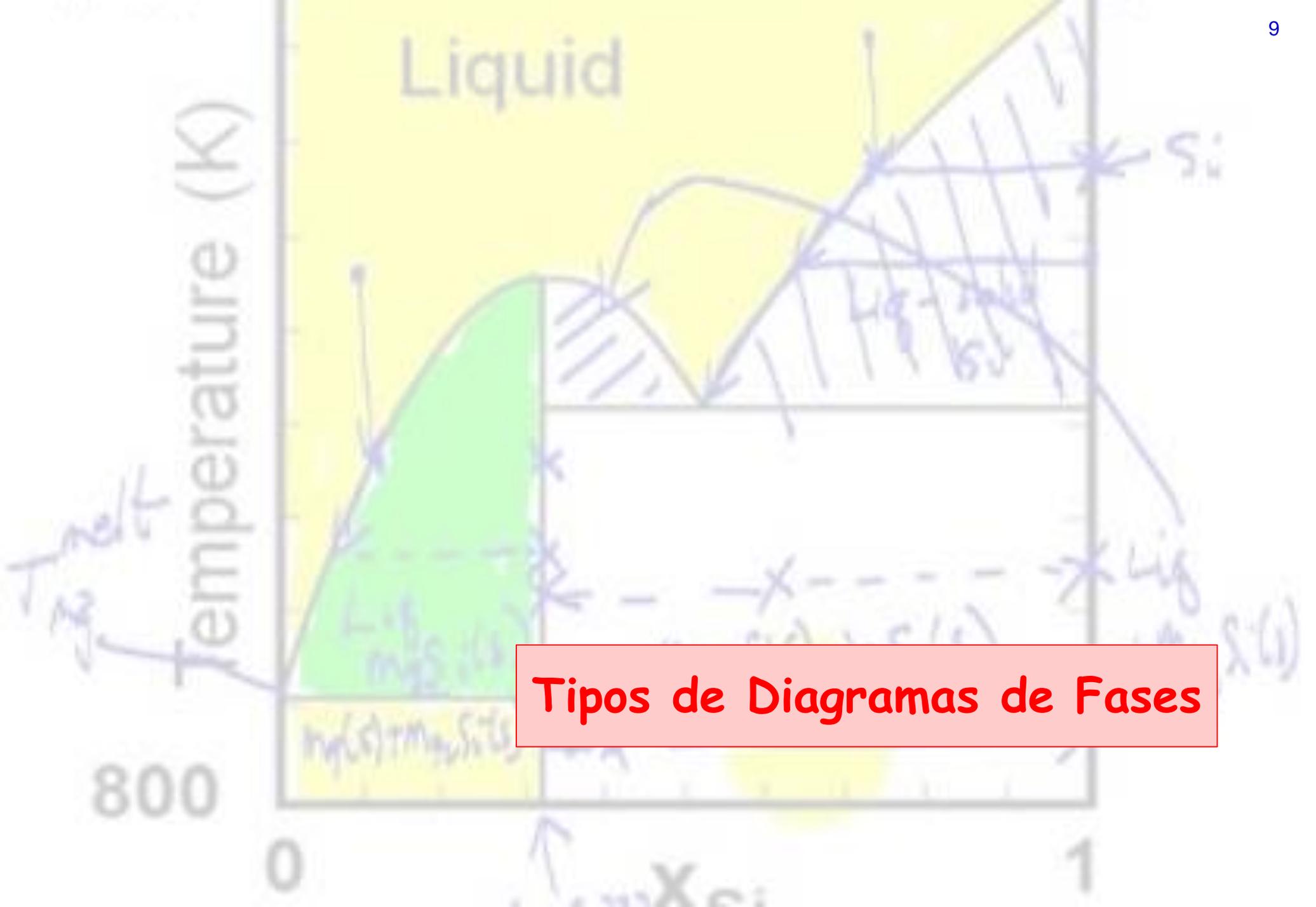
The concept of a partial molar quantity can be broadened to any extensive state function. For a substance in a mixture, the chemical potential is *defined* as the partial molar Gibbs energy:

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

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*. 11th 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/TiO₂, Al-Si

Ternário: 3 componentes;

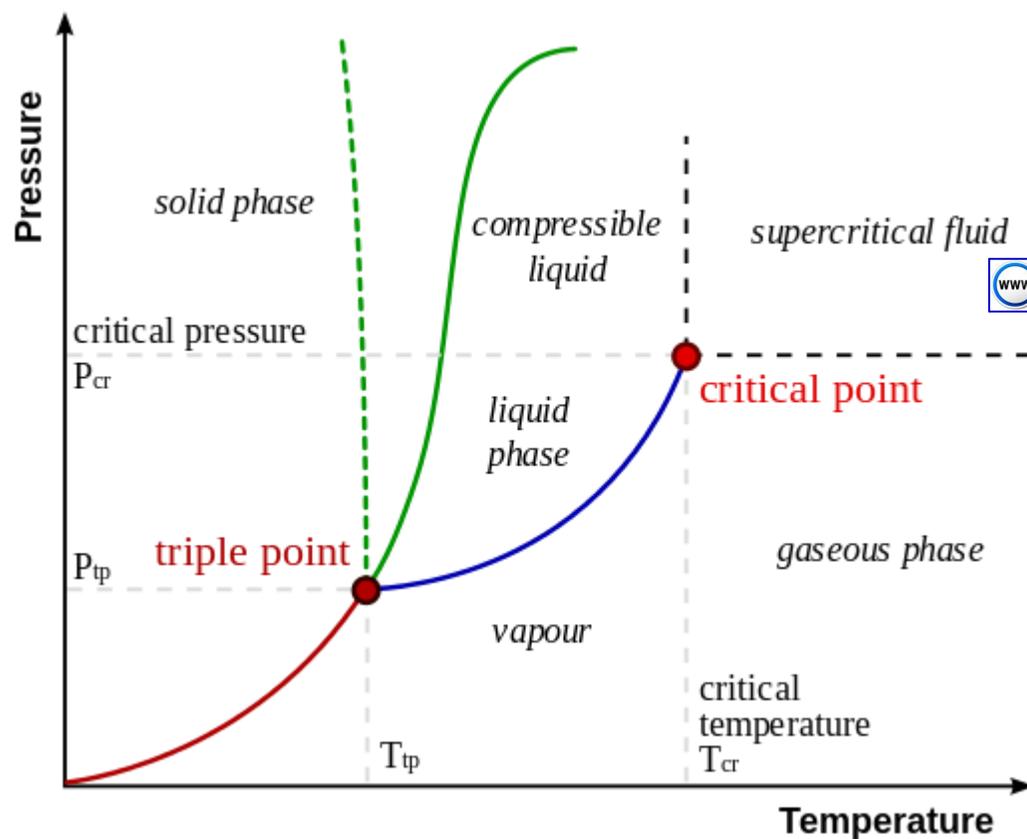
variáveis (x) $\rightarrow P = 1 \text{ atm}$ e $T = \text{constante}$

Ex: Fe-Cr-Ni, BaO + CaO + TiO₂

Tipos de Diagramas de Fases

DIAGRAMAS DE FASES

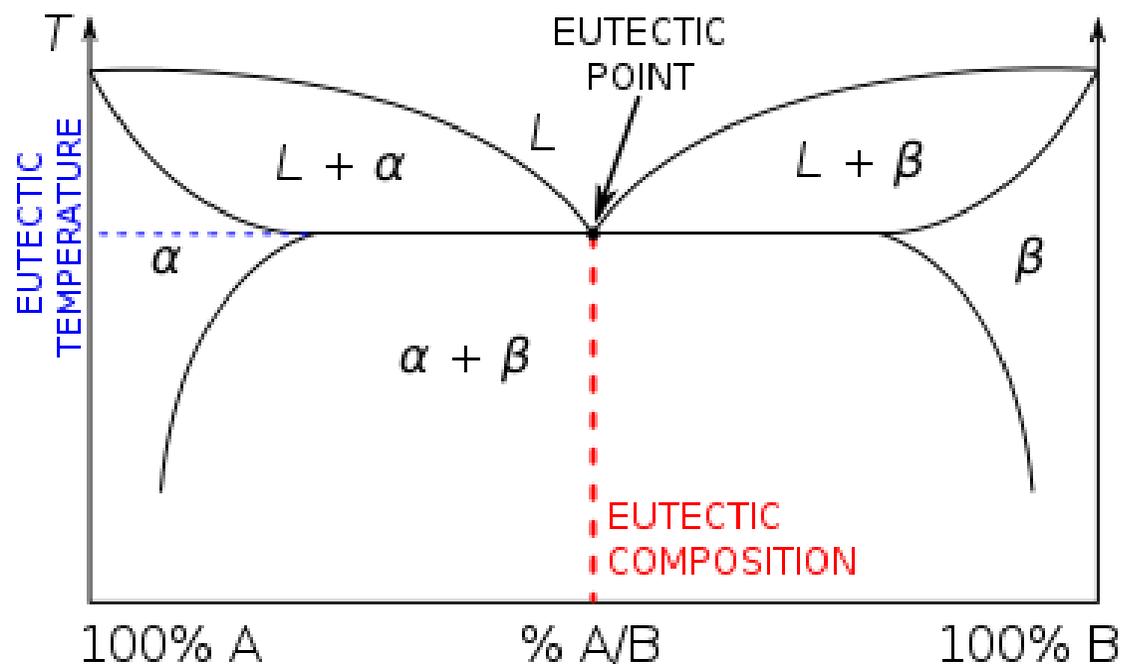
Unário: 1 componente;
variáveis (P, T)
Ex: H₂O, Fe



Tipos de Diagramas de Fases

DIAGRAMAS DE FASES

Binário: 2 componentes;
variáveis $(T, x) \rightarrow P = \text{constante}$
Ex: BaO/TiO₂, Al-Si



Tipos de Diagramas de Fases

DIAGRAMAS DE FASES

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

Ex: Fe-Cr-Ni, BaO + CaO + TiO₂

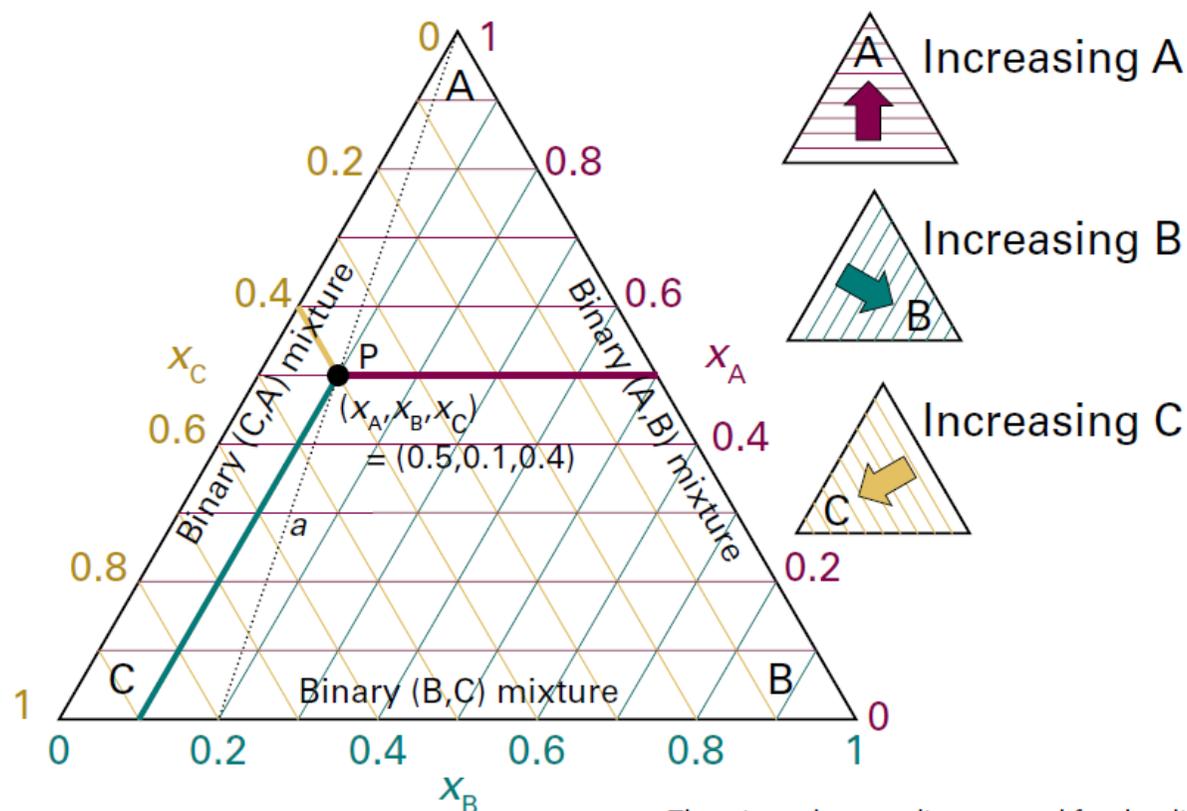
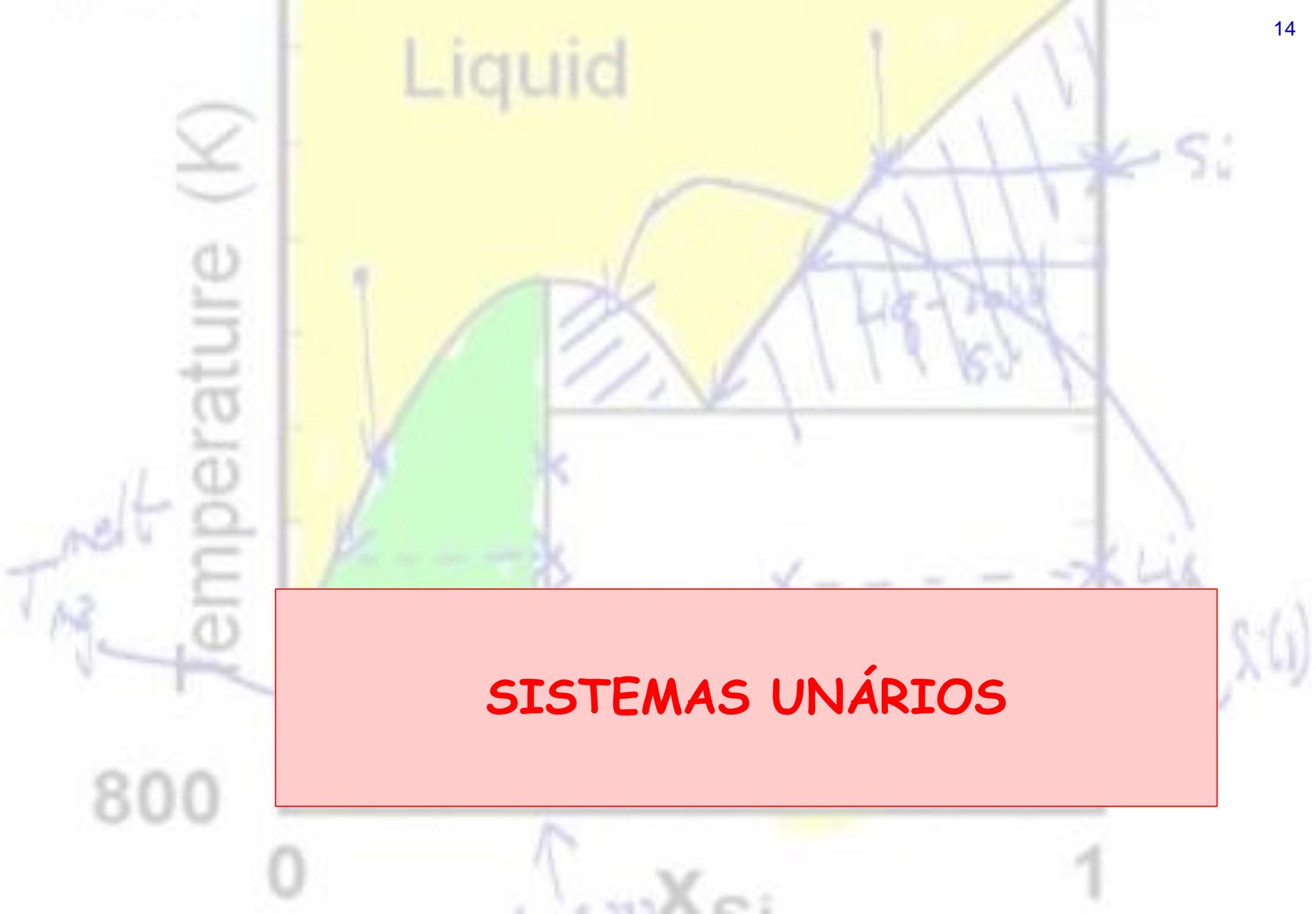


Figura: Atkins, P.; de Paula, J.; Keeler, J. *Atkin's Physical Chemistry*. 11th Ed. Oxford. 2018. Fig. 5E.1

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.



Sistemas com um único componente

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

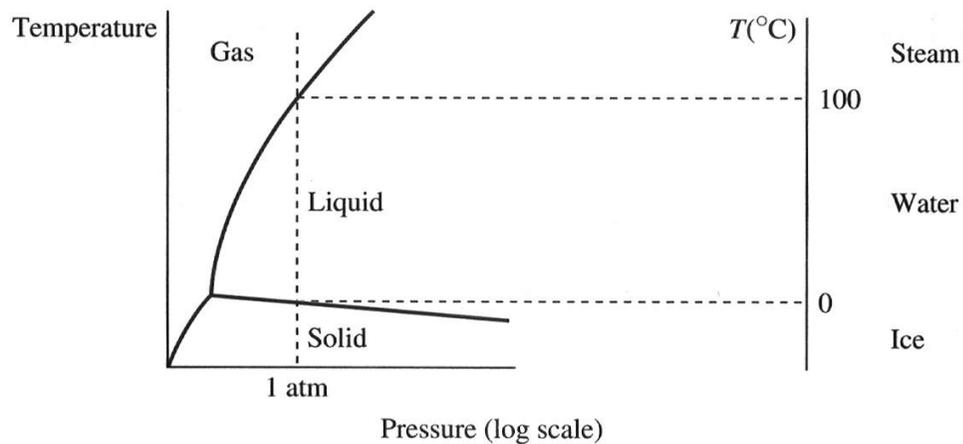


Diagrama de Fases da água

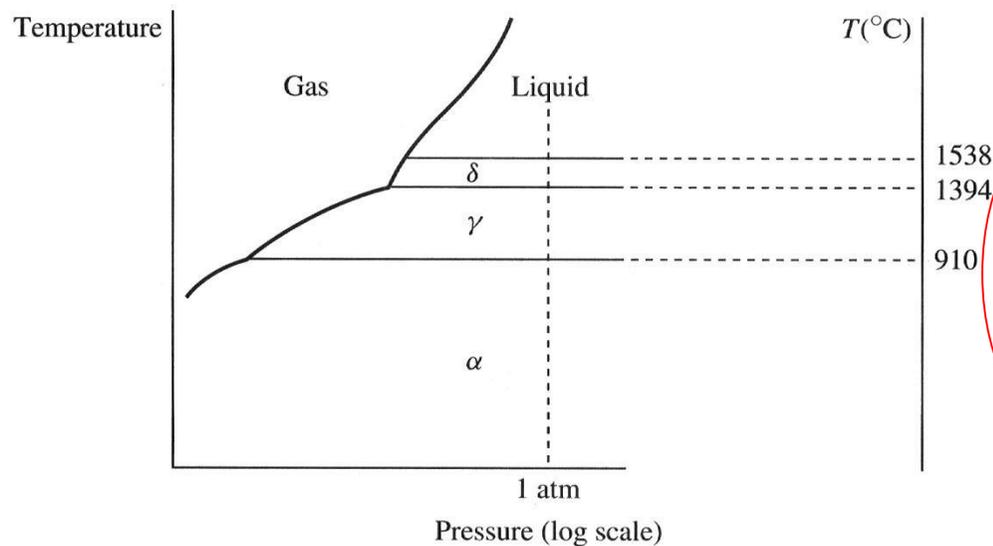


Diagrama de Fases do ferro

ALOTROPIA

α , γ e δ são fases sólidas !



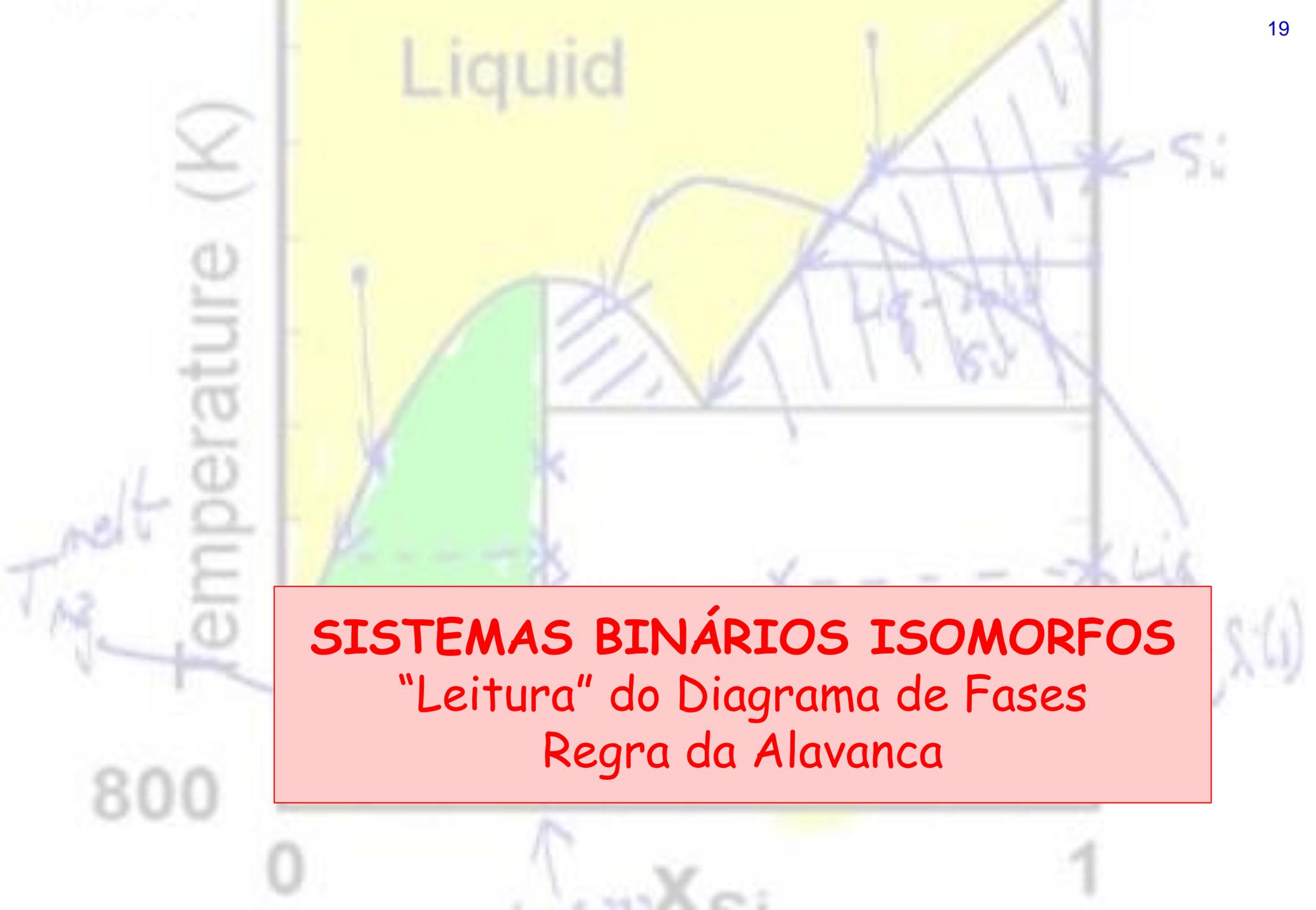
SISTEMAS BINÁRIOS

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 : Diagramas de Equilíbrio de Fase *Isomorfos*

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

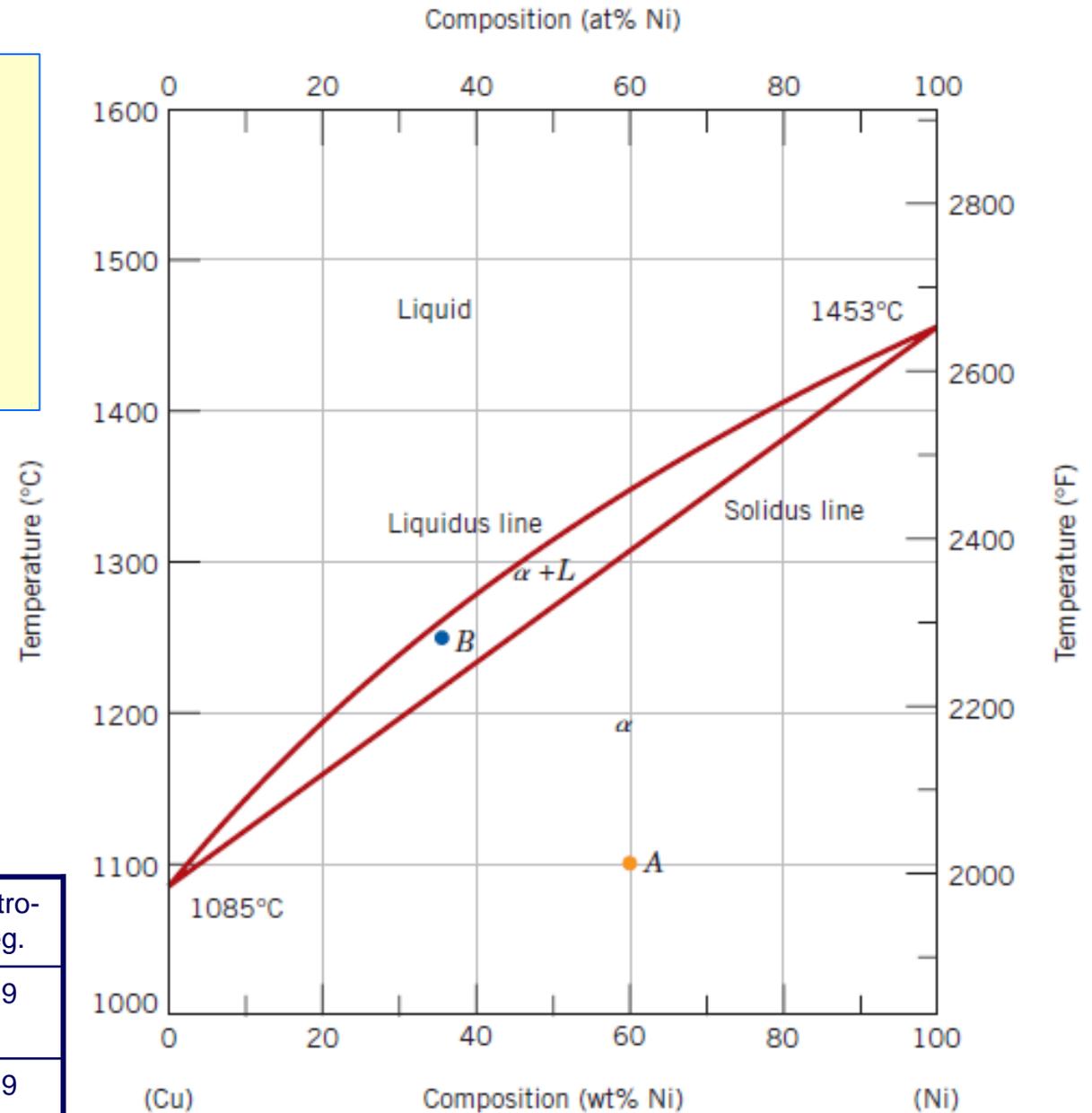
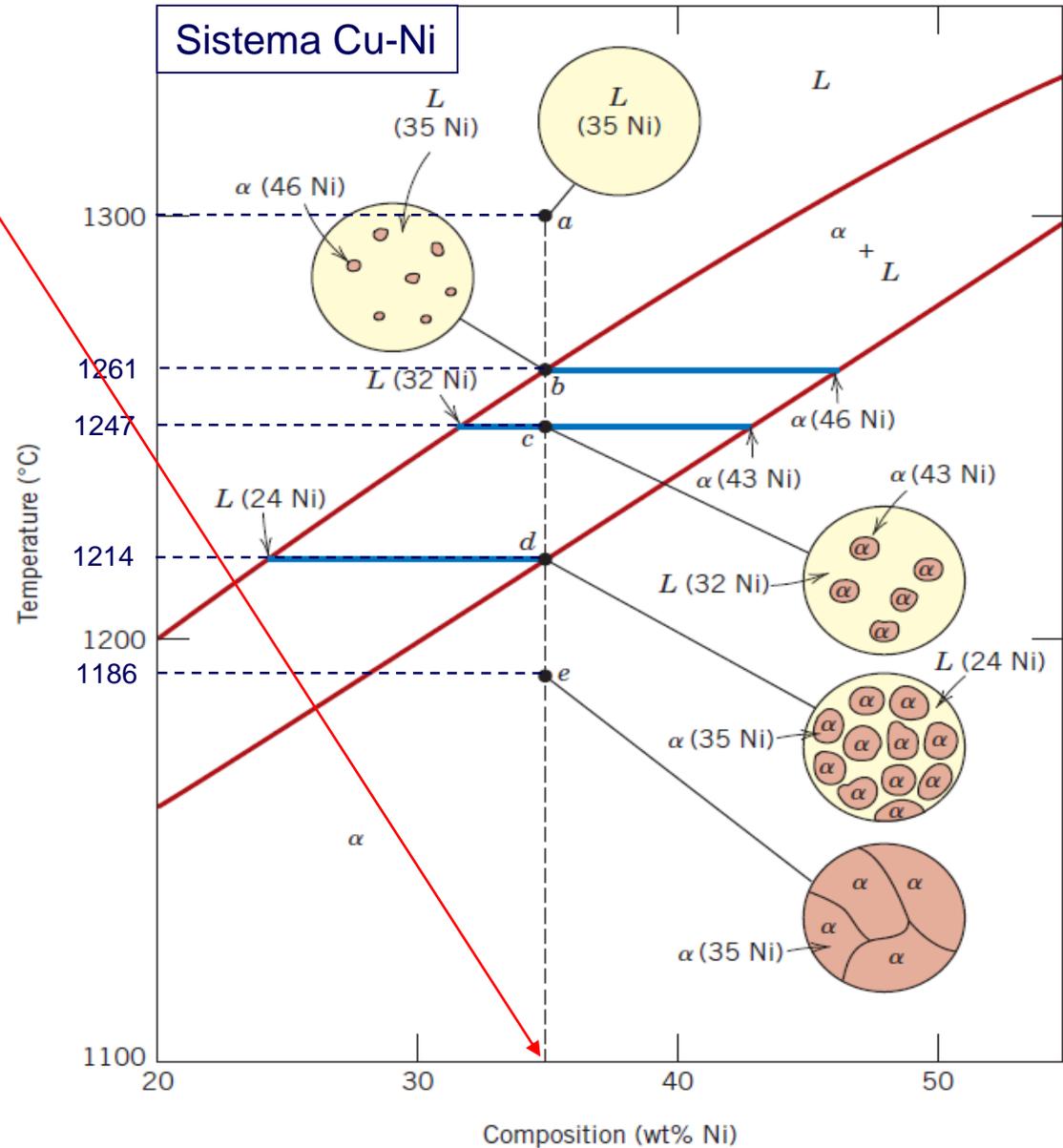


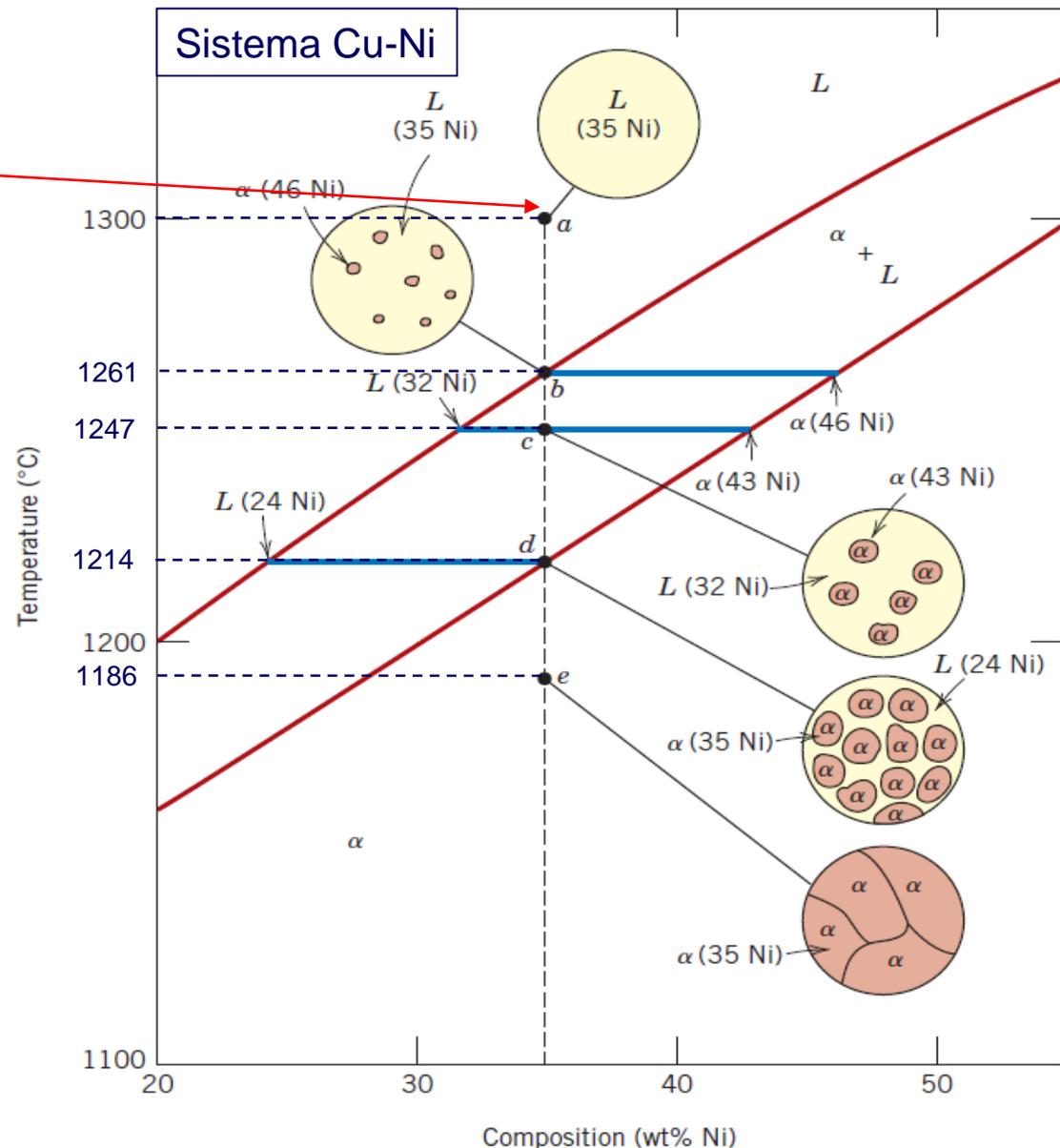
Diagrama de fases do Sistema Cu - Ni

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

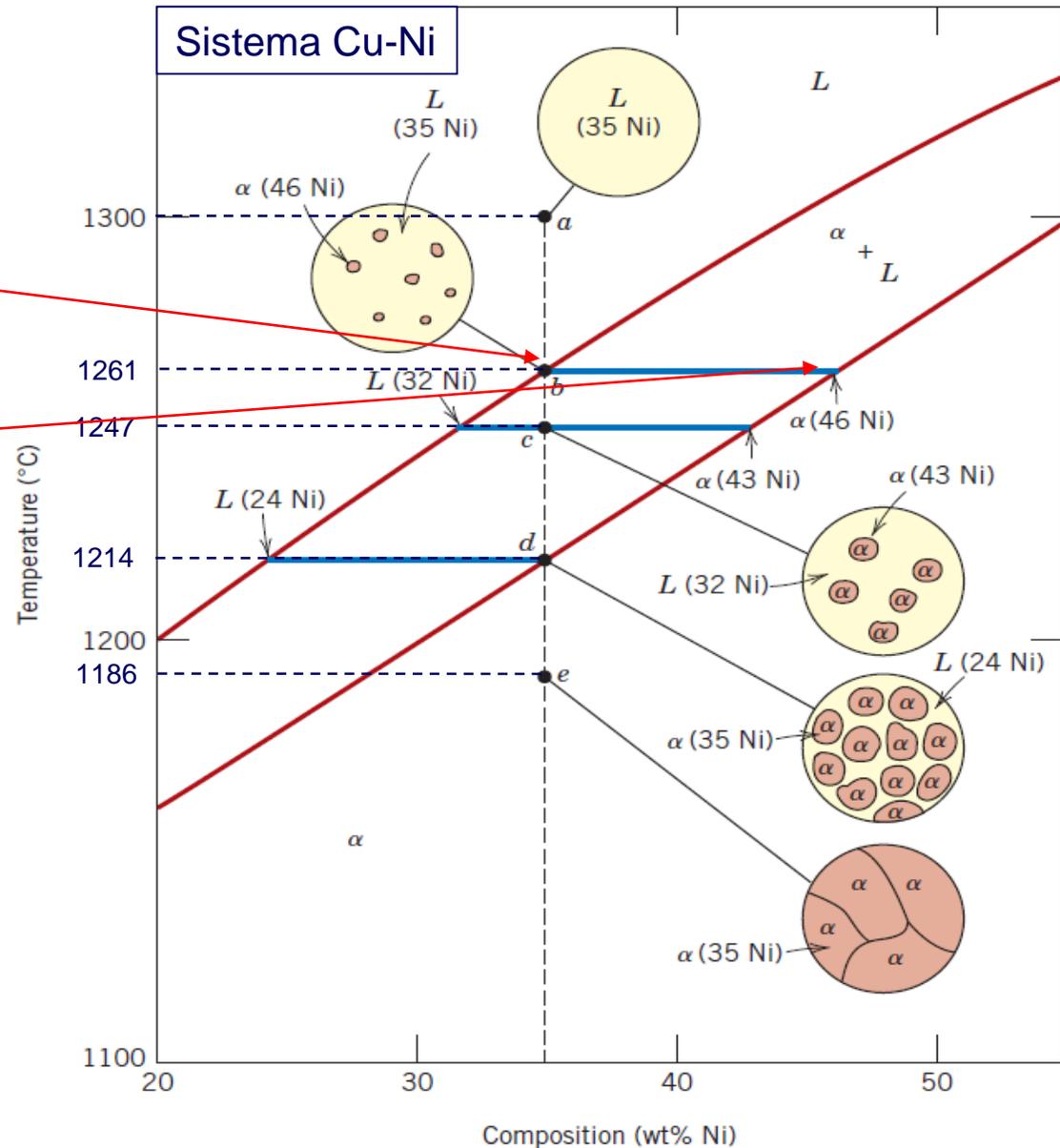
- A leitura de diagramas de fases é feita primeiramente definindo-se uma liga de interesse, como por exemplo 35% Ni.
- Na temperatura de 1300°C (ponto a) a fase em equilíbrio termodinâmico é a fase líquida com 35% de Ni.
- Na temperatura de 1261°C (ponto b), que é a **temperatura líquidus** desta liga, 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.



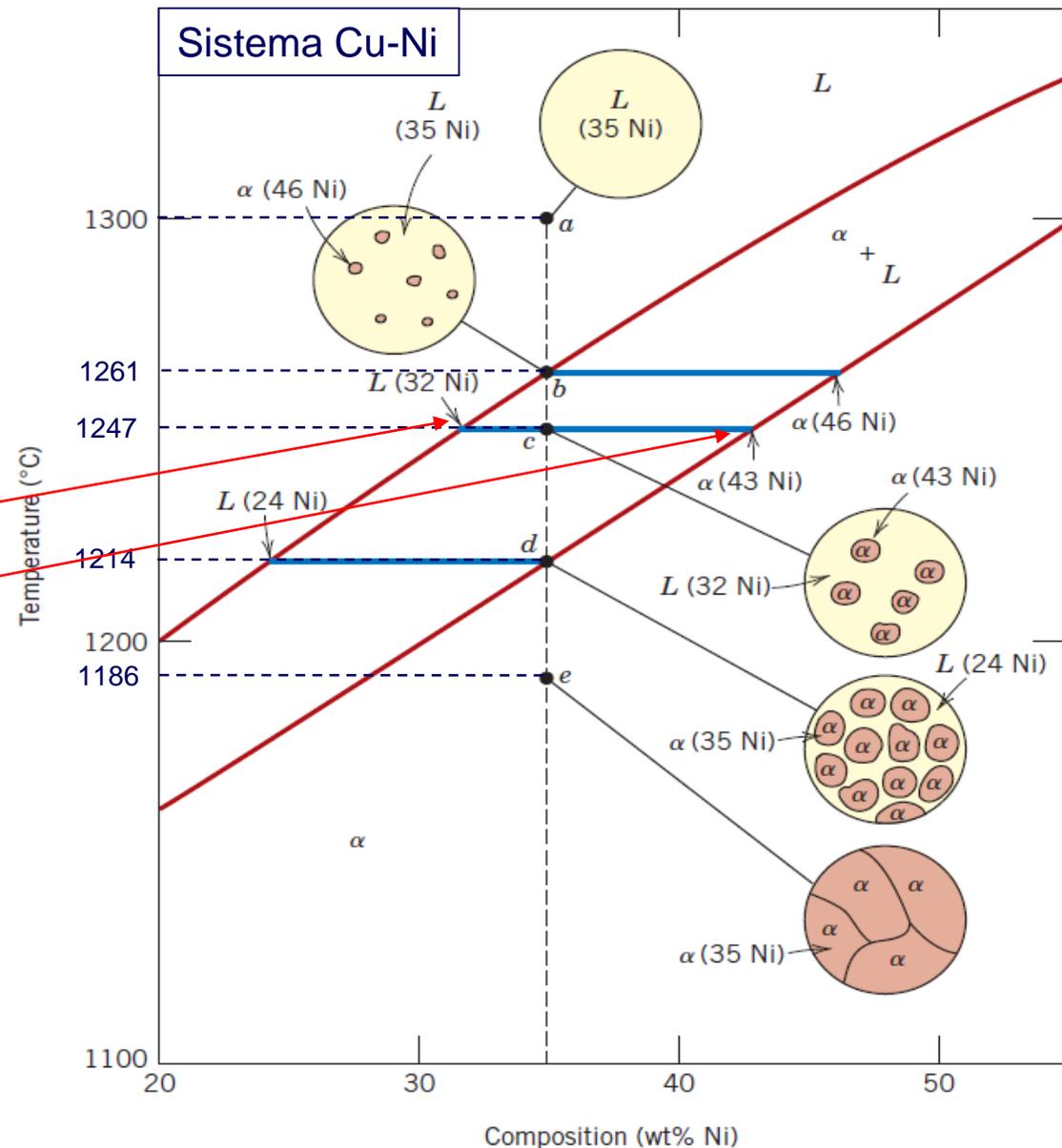
- A leitura de diagramas de fases é feita primeiramente definindo-se uma liga de interesse, como por exemplo 35% Ni.
- Na temperatura de 1300°C (ponto a) a fase em equilíbrio termodinâmico é a **fase líquida com 35% de Ni**.
- Na temperatura de 1261°C (ponto b), que é a **temperatura líquidus** desta 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.



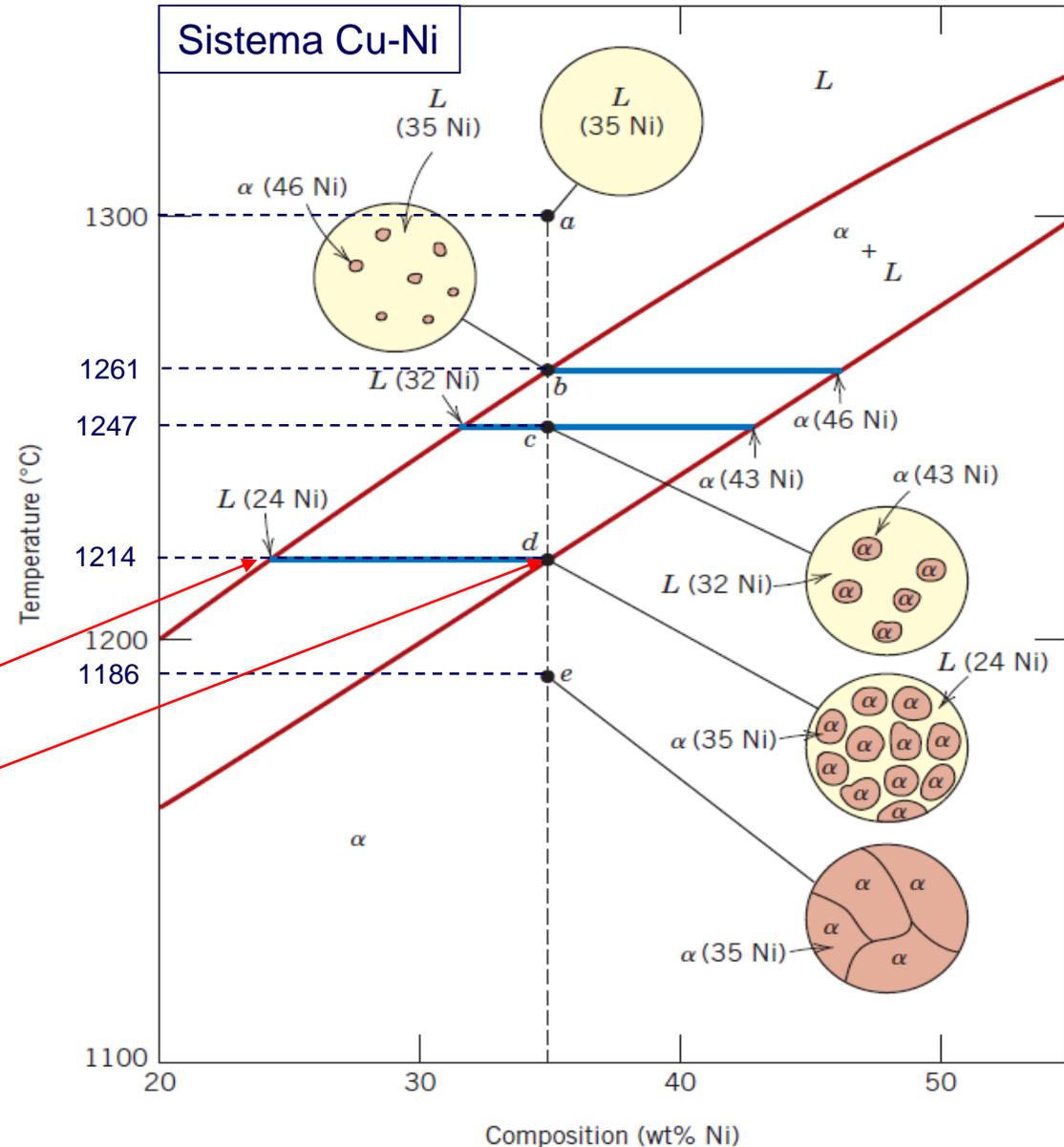
- A leitura de diagramas de fases é feita primeiramente definindo-se uma liga de interesse, como por exemplo 35% Ni.
- Na temperatura de 1300°C (ponto a) a fase em equilíbrio termodinâmico é a fase líquida com 35% de Ni.
- Na temperatura de 1261°C (ponto b), que é a **temperatura líquidus** desta liga, 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.



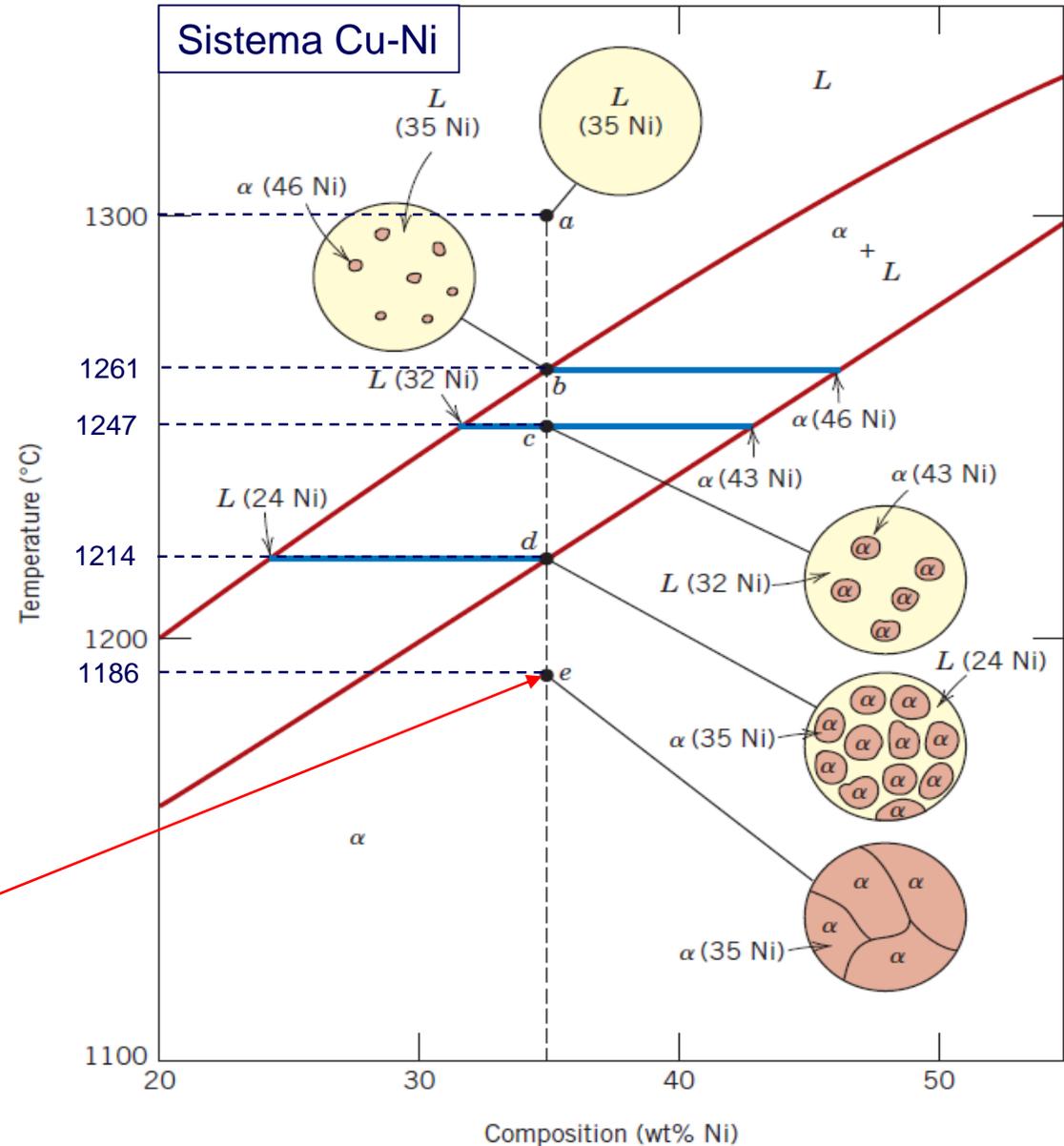
- A leitura de diagramas de fases é feita primeiramente definindo-se uma liga de interesse, como por exemplo 35% Ni.
- Na temperatura de 1300°C (ponto a) a fase em equilíbrio termodinâmico é a fase líquida com 35% de Ni.
- Na temperatura de 1261°C (ponto b), que é a **temperatura líquidus** desta liga, 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.



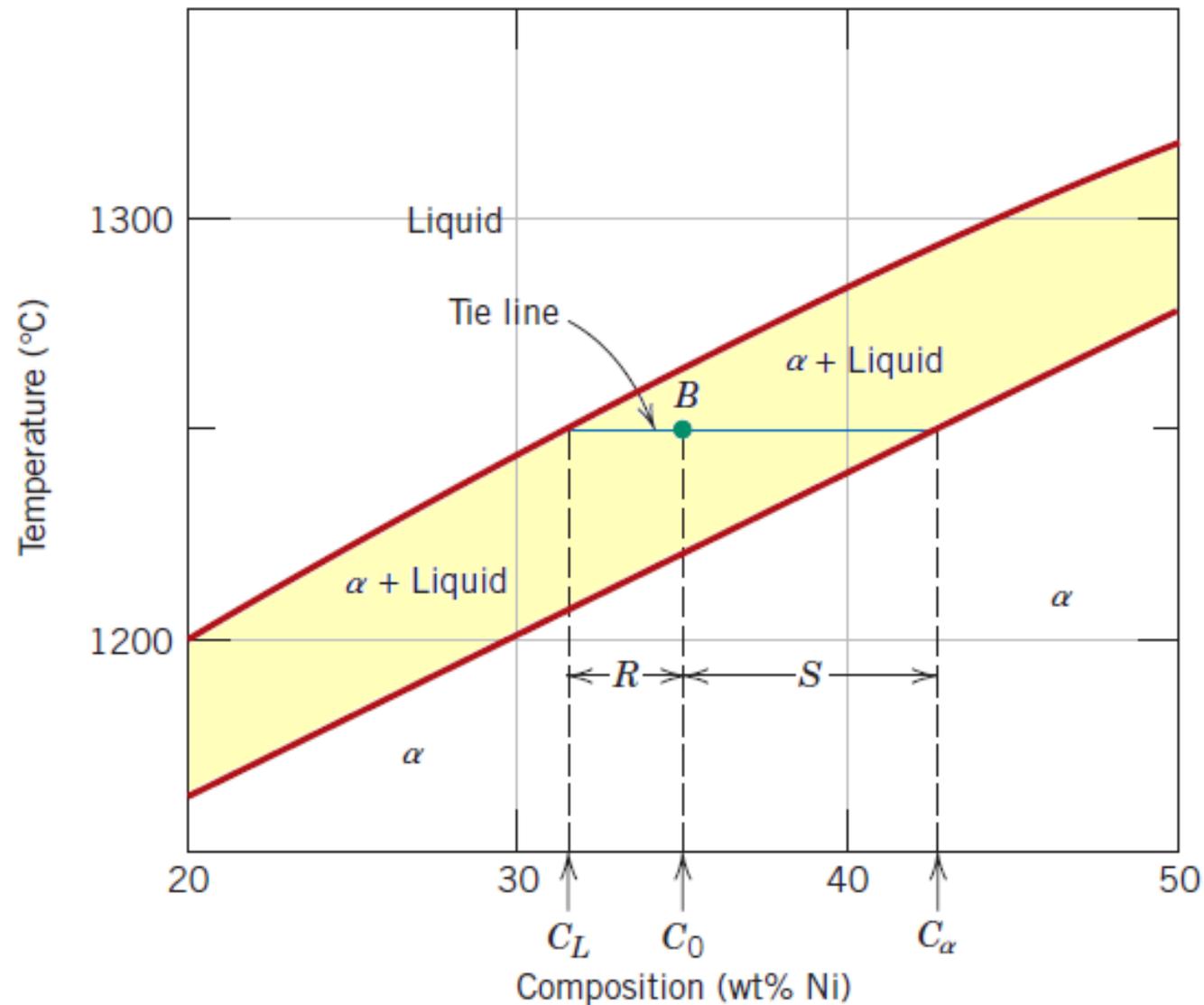
- A leitura de diagramas de fases é feita primeiramente definindo-se uma liga de interesse, como por exemplo 35% Ni.
- Na temperatura de 1300°C (ponto a) a fase em equilíbrio termodinâmico é a fase líquida com 35% de Ni.
- Na temperatura de 1261°C (ponto b), que é a **temperatura líquidus** desta liga, 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_α as frações mássicas, respectivamente, da fase líquida, L, e da fase sólida, α .
- O níquel está em cada uma das fases, em concentração C_L (no líquido) e C_α (no sólido)
- As duas equações abaixo podem ser escritas:

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

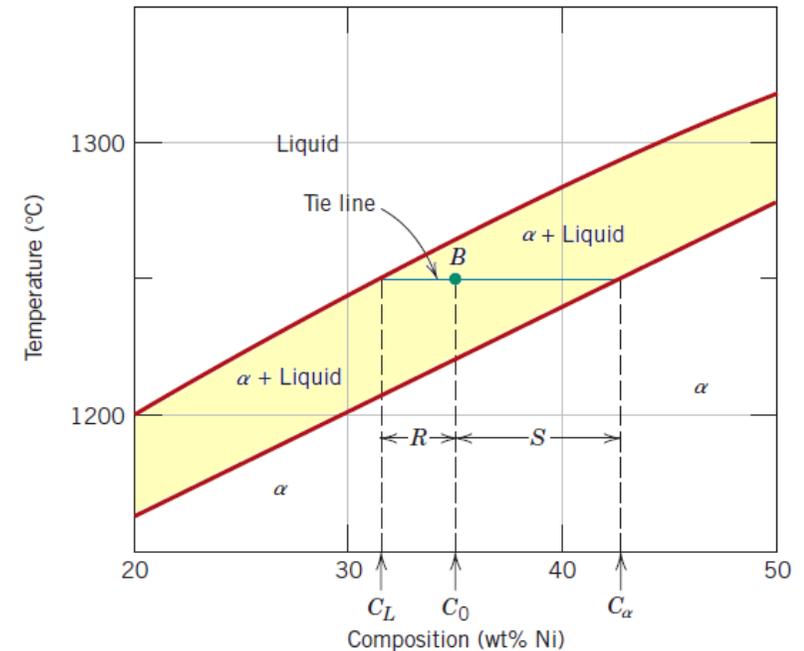
$$W_L C_L + W_\alpha C_\alpha = C_0 \quad (eq. II)$$

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

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

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

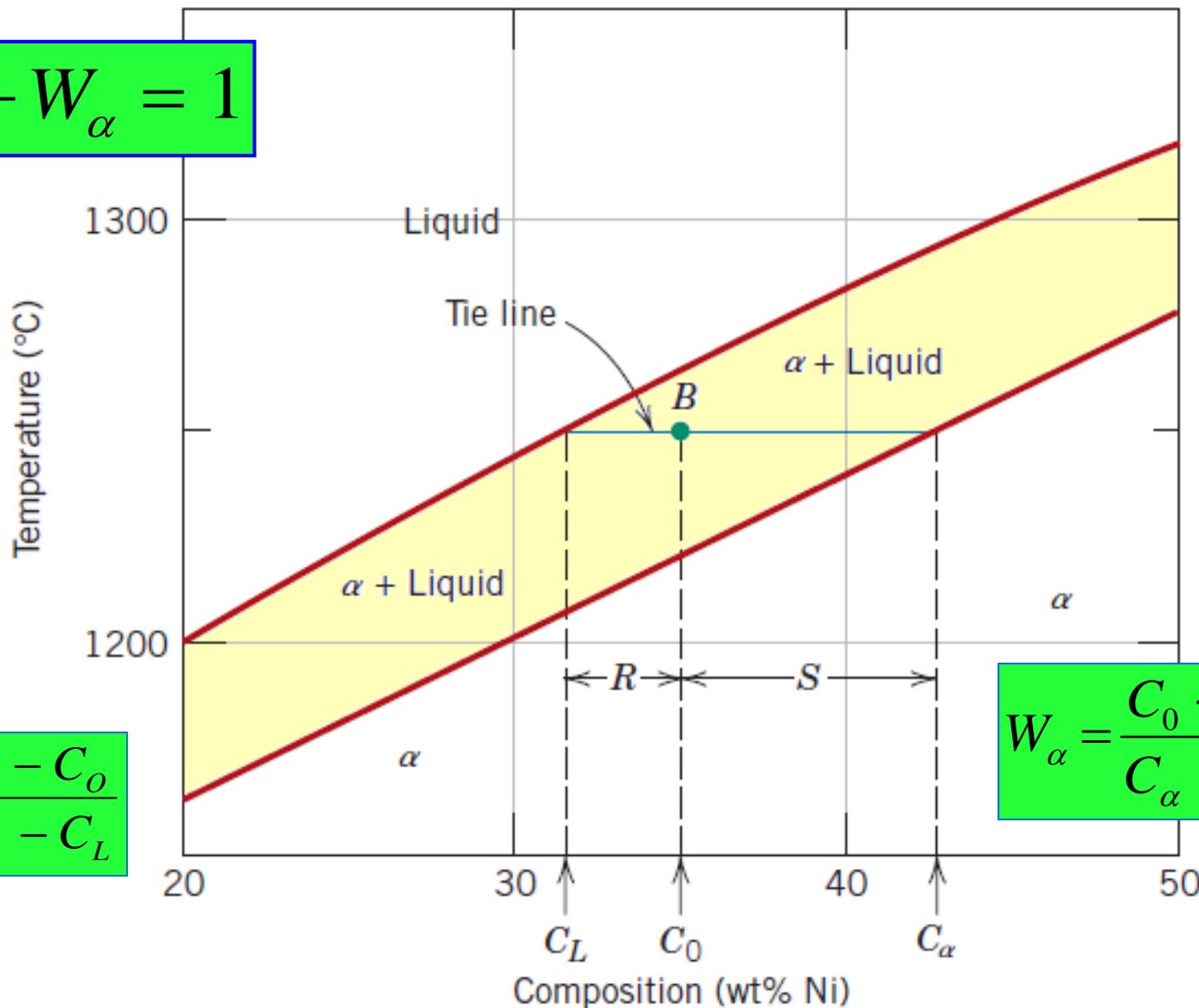
Se, ao invés de isolar W_L na (eq.I) isolarmos W_α , chega-se à equação da fração de fase líquida.



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

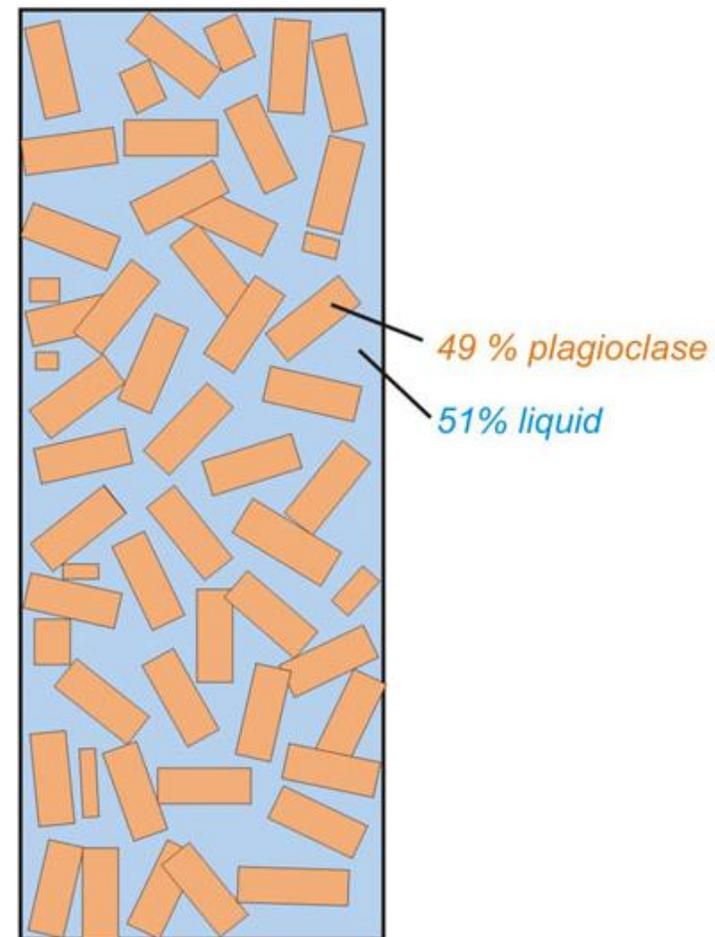
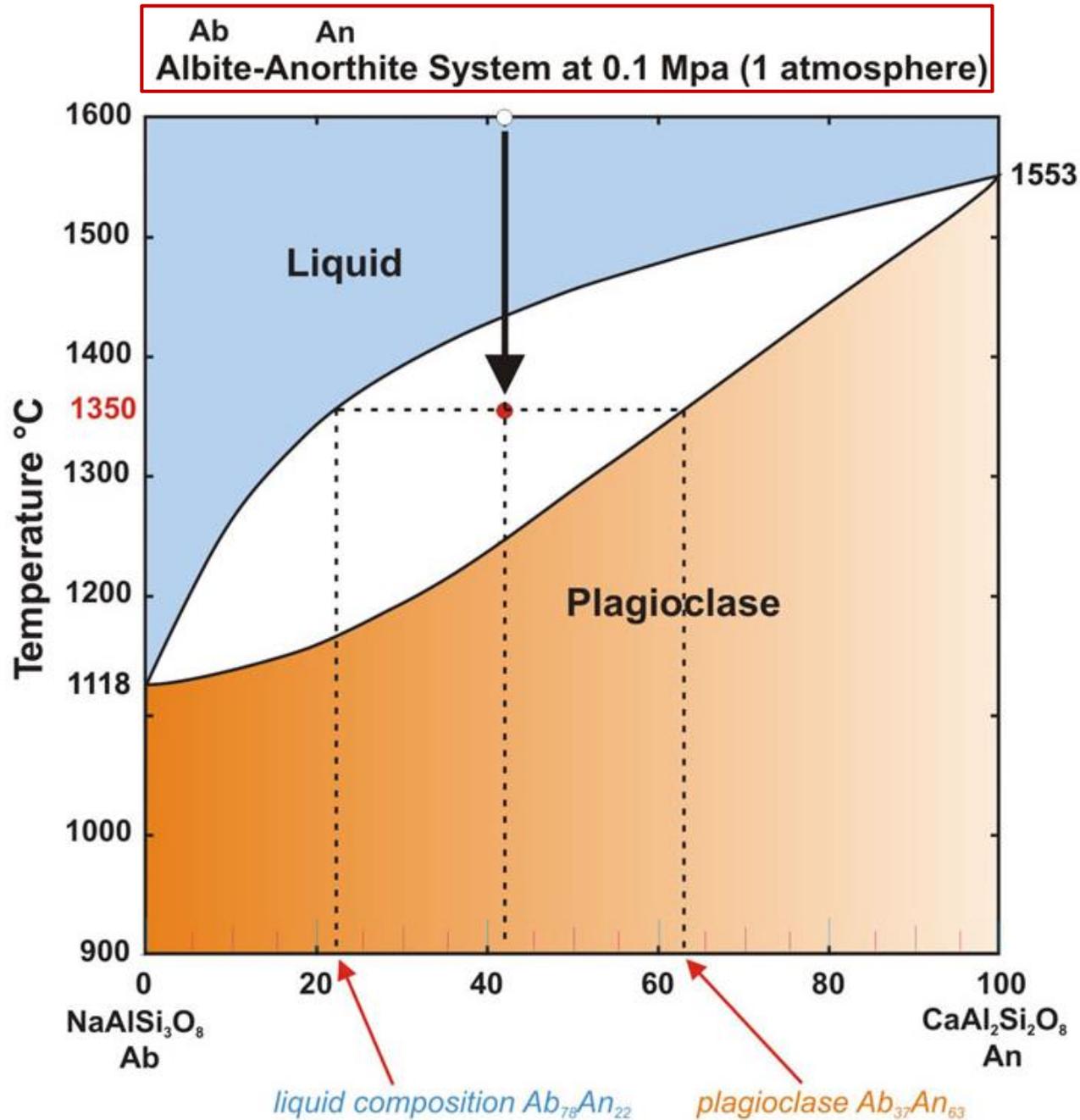
Regra da Alavanca

$$W_L + W_\alpha = 1$$

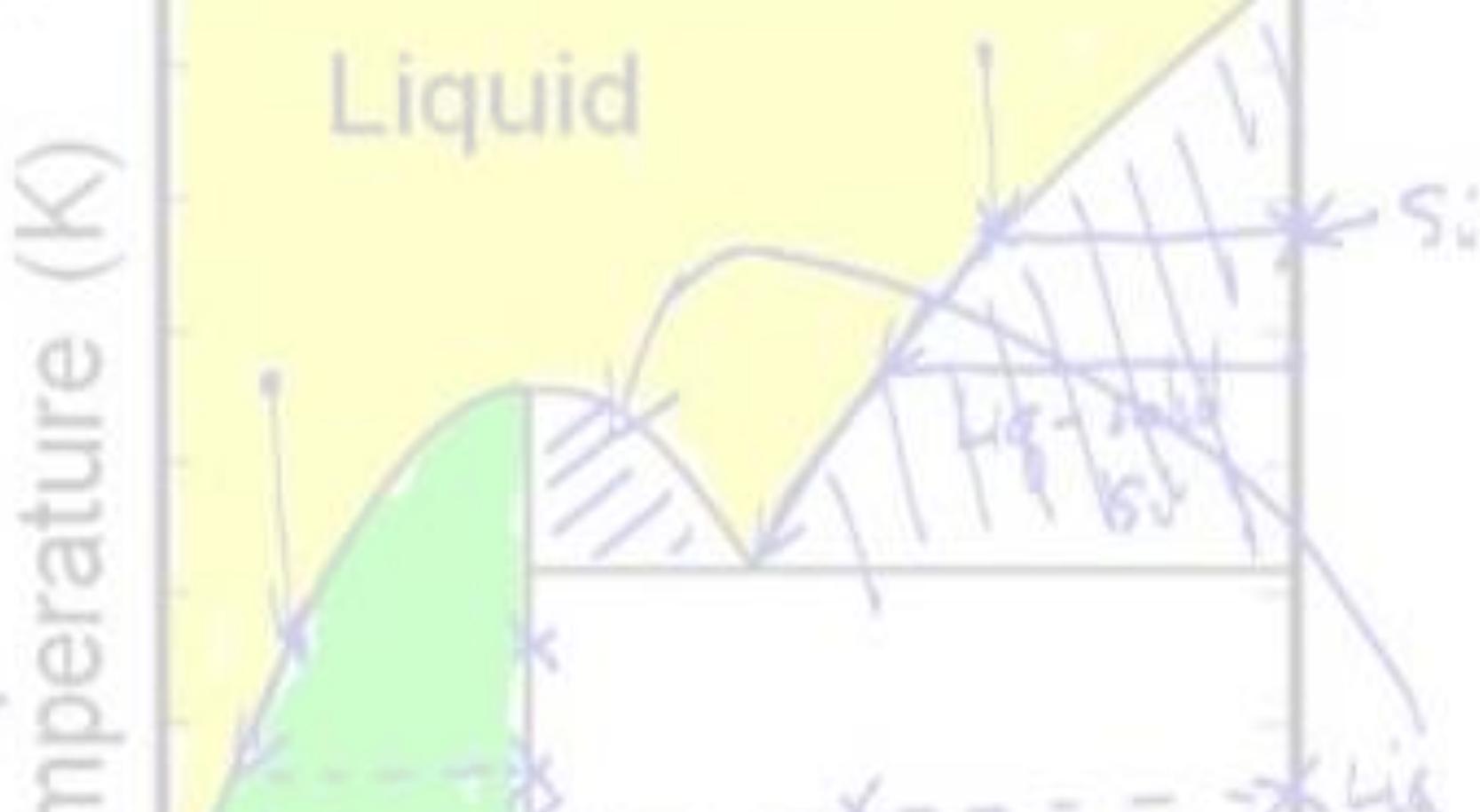


$$W_L = \frac{C_\alpha - C_0}{C_\alpha - C_L}$$

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



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



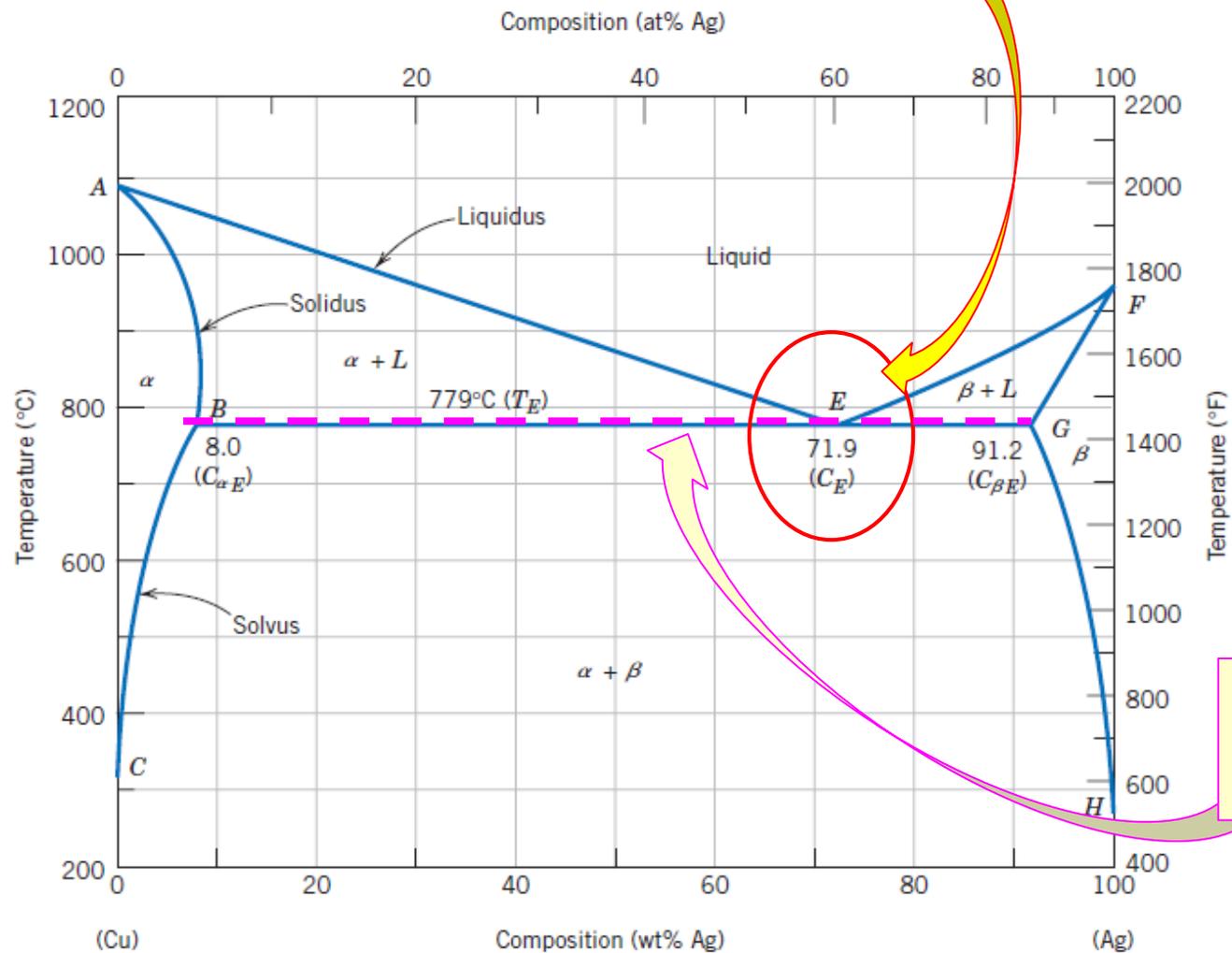
SISTEMAS BINÁRIOS NÃO-ISOMORFOS

Equilíbrio de 3 fases : Eutético

Análise das Microestruturas

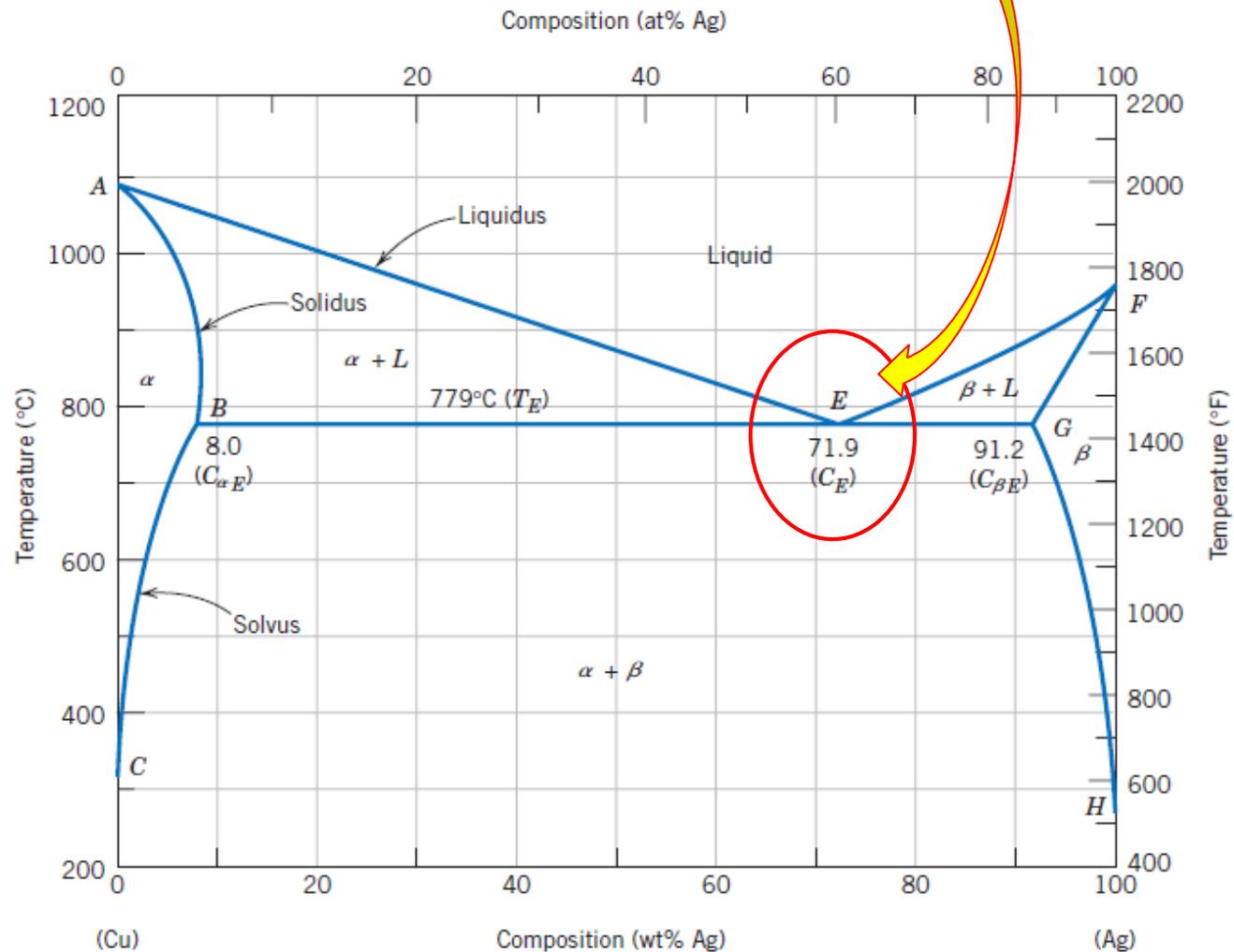
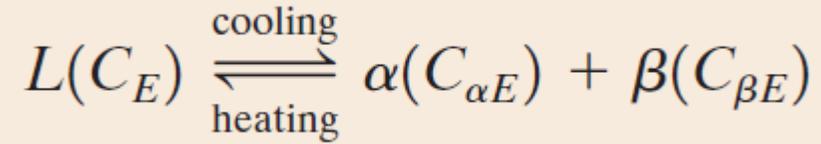
Diagramas de Fases Eutéticos

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.



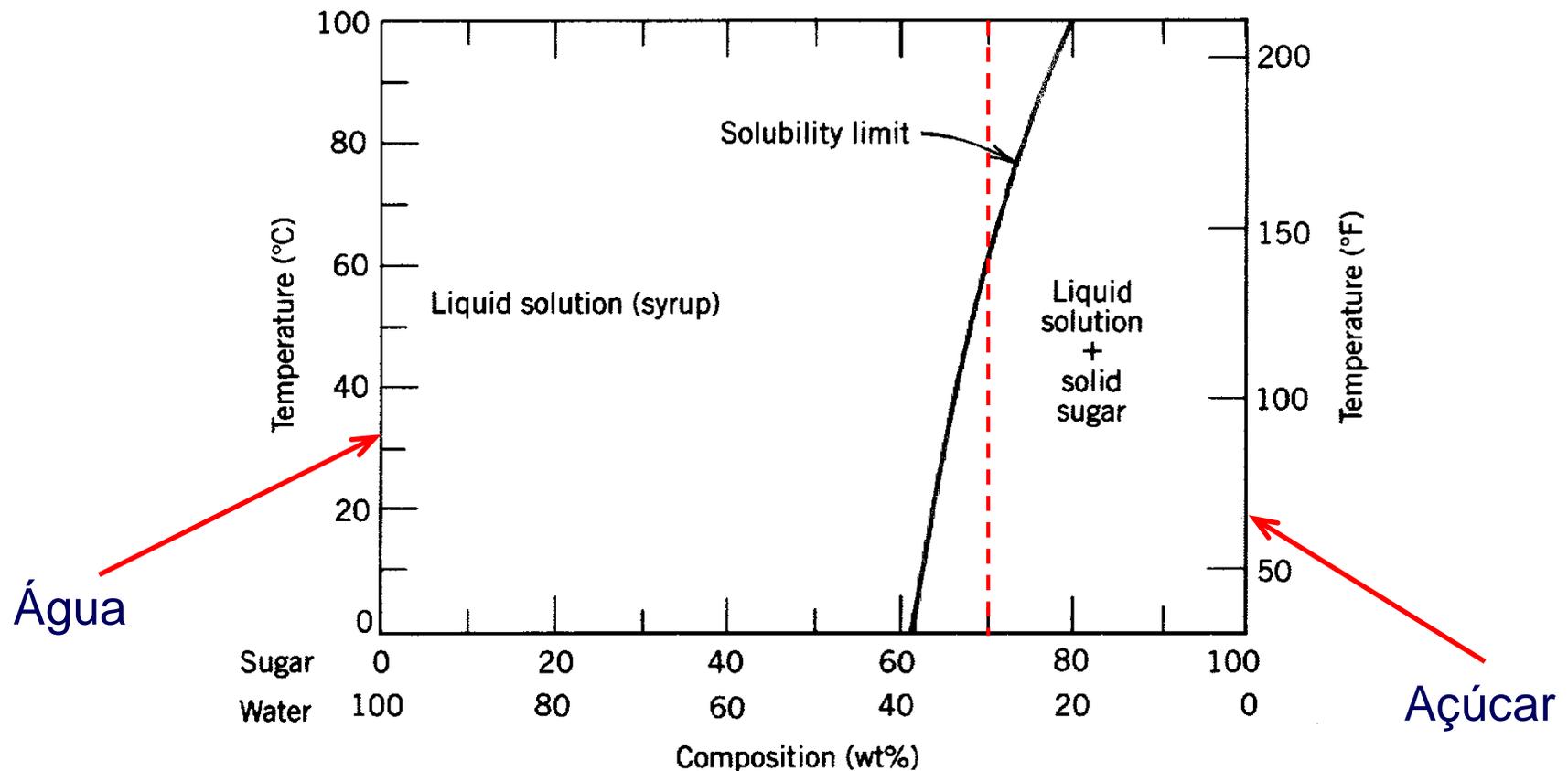
*Patamar eutético:
onde ocorre
a reação eutética*

Diagramas de Fases Eutéticos

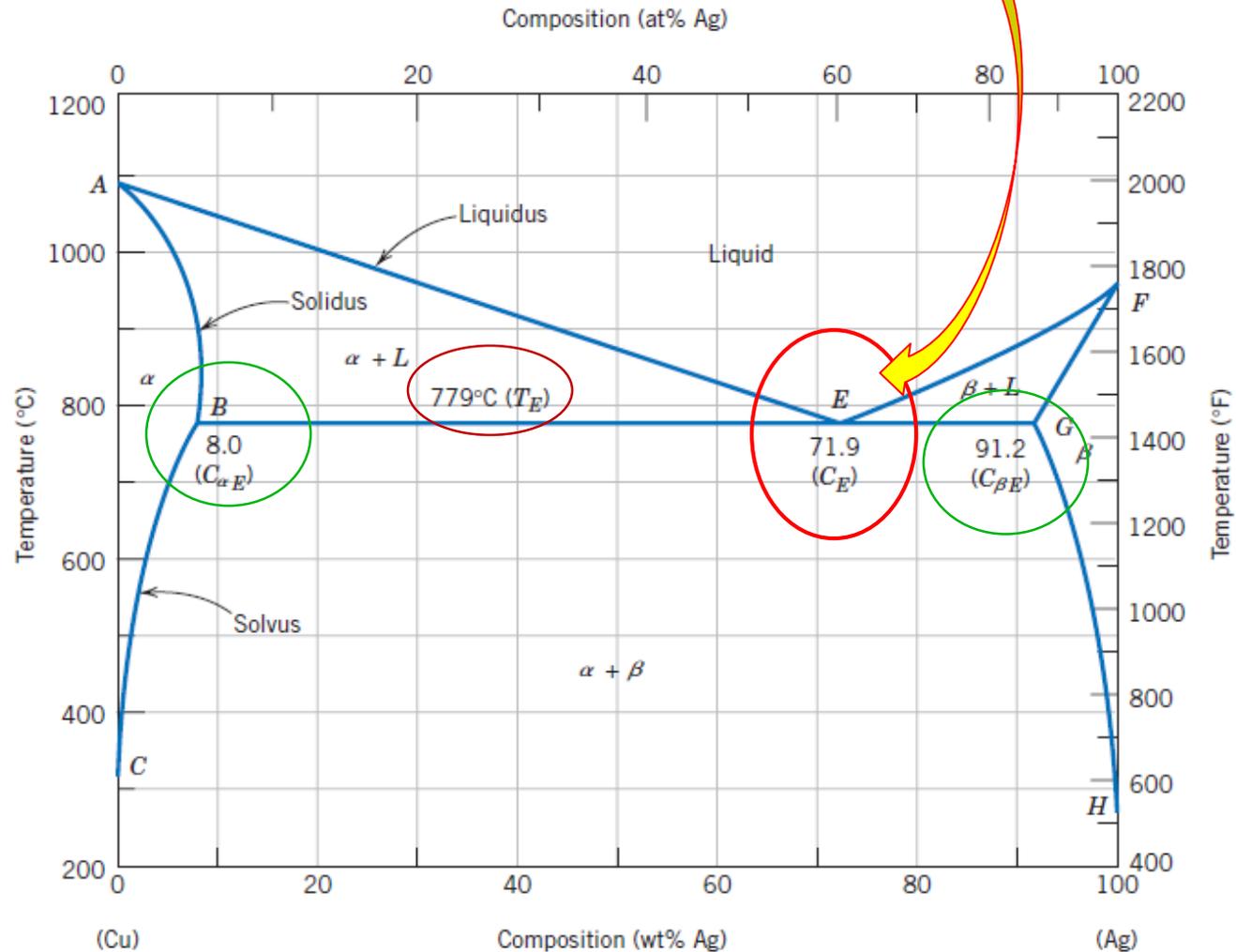
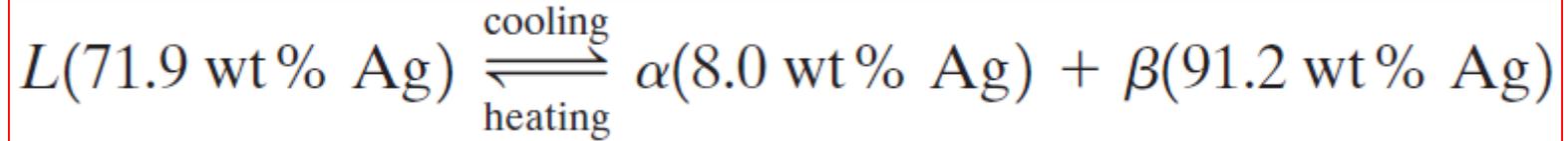


Limite de solubilidade

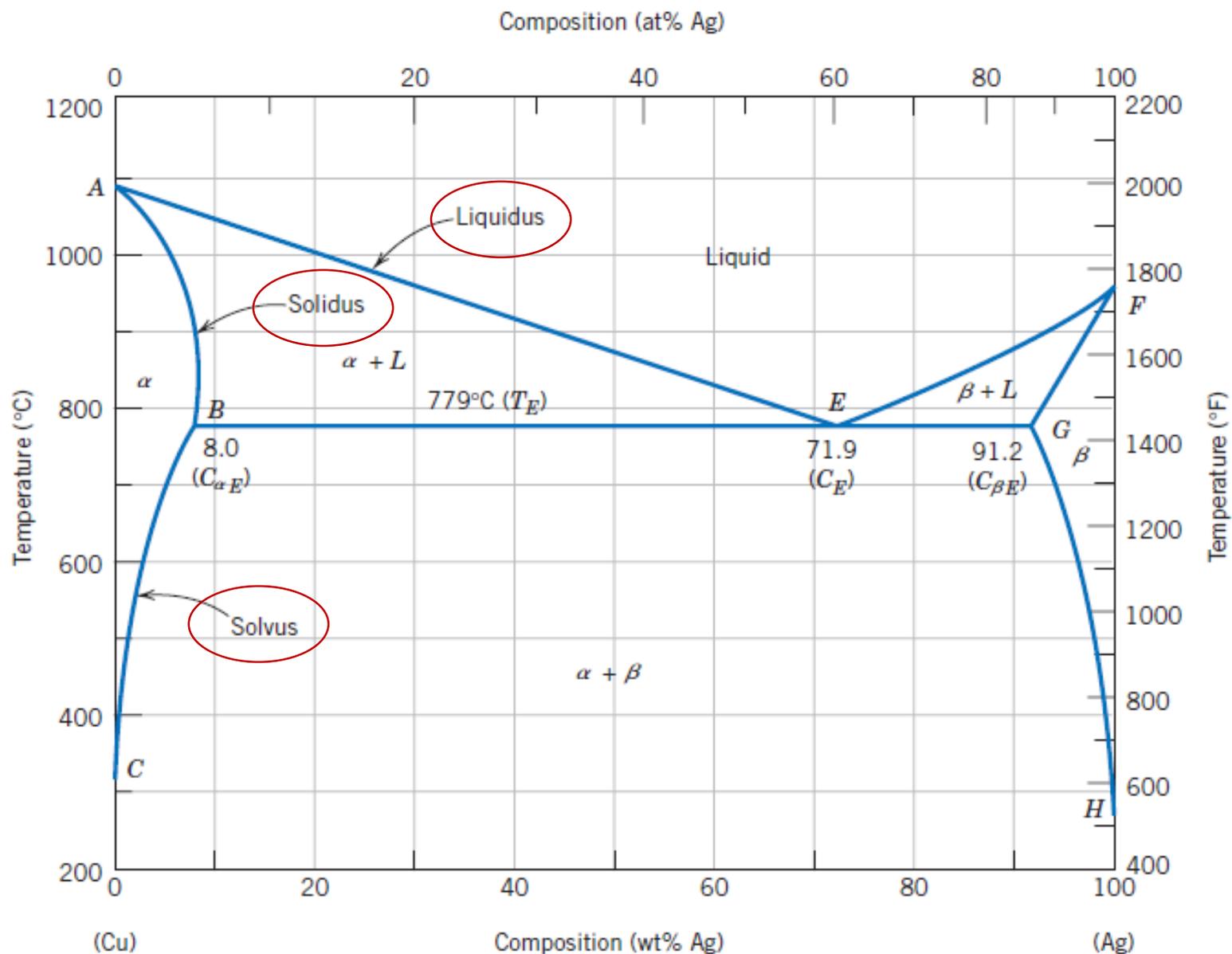
- Para uma determinada temperatura, existe uma concentração máxima de átomos de soluto que pode ser dissolvida no solvente formando uma solução sólida.
- Essa concentração máxima é chamada **LIMITE DE SOLUBILIDADE**.



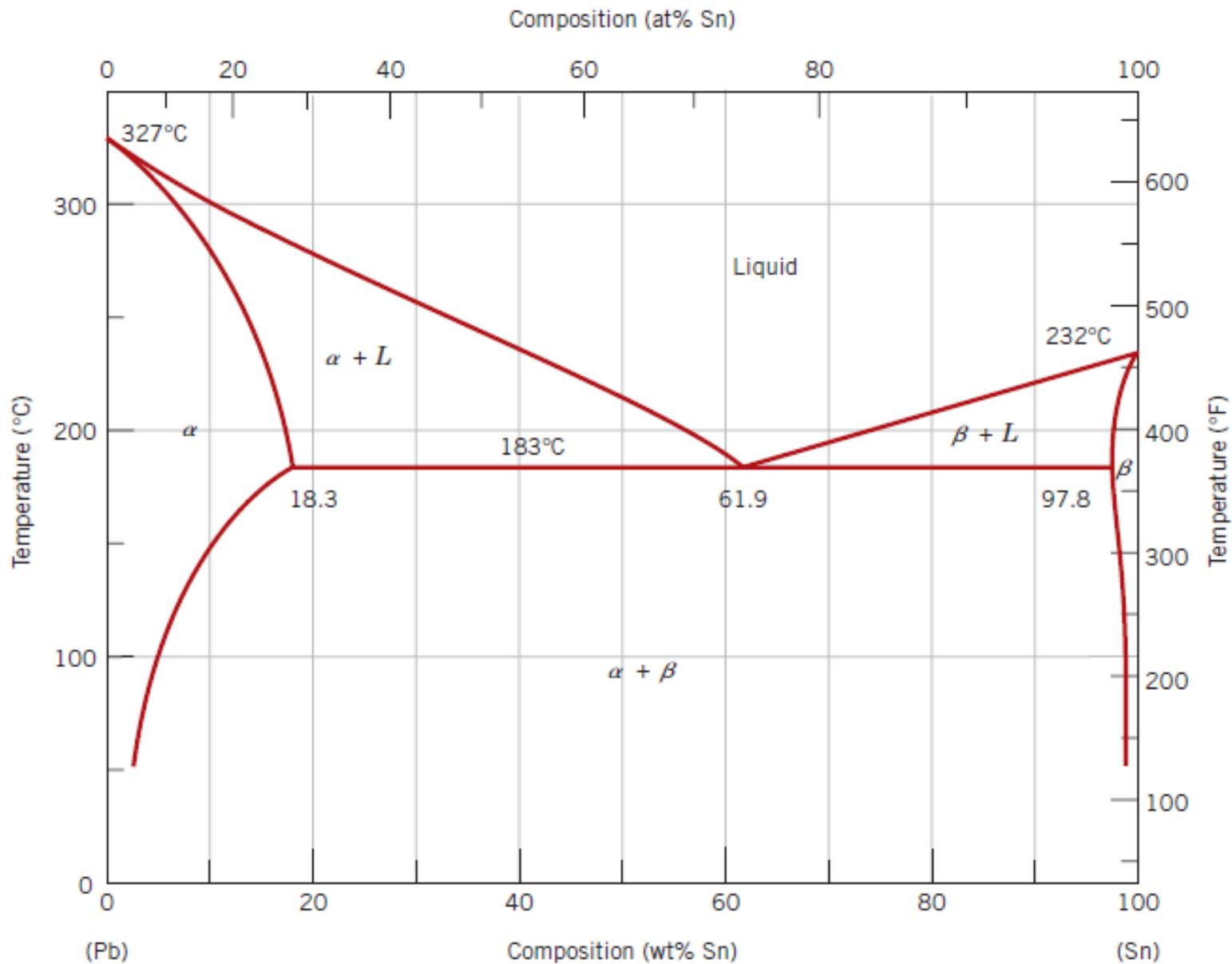
Diagramas de Fases Eutéticos



Diagramas de Fases Eutéticos

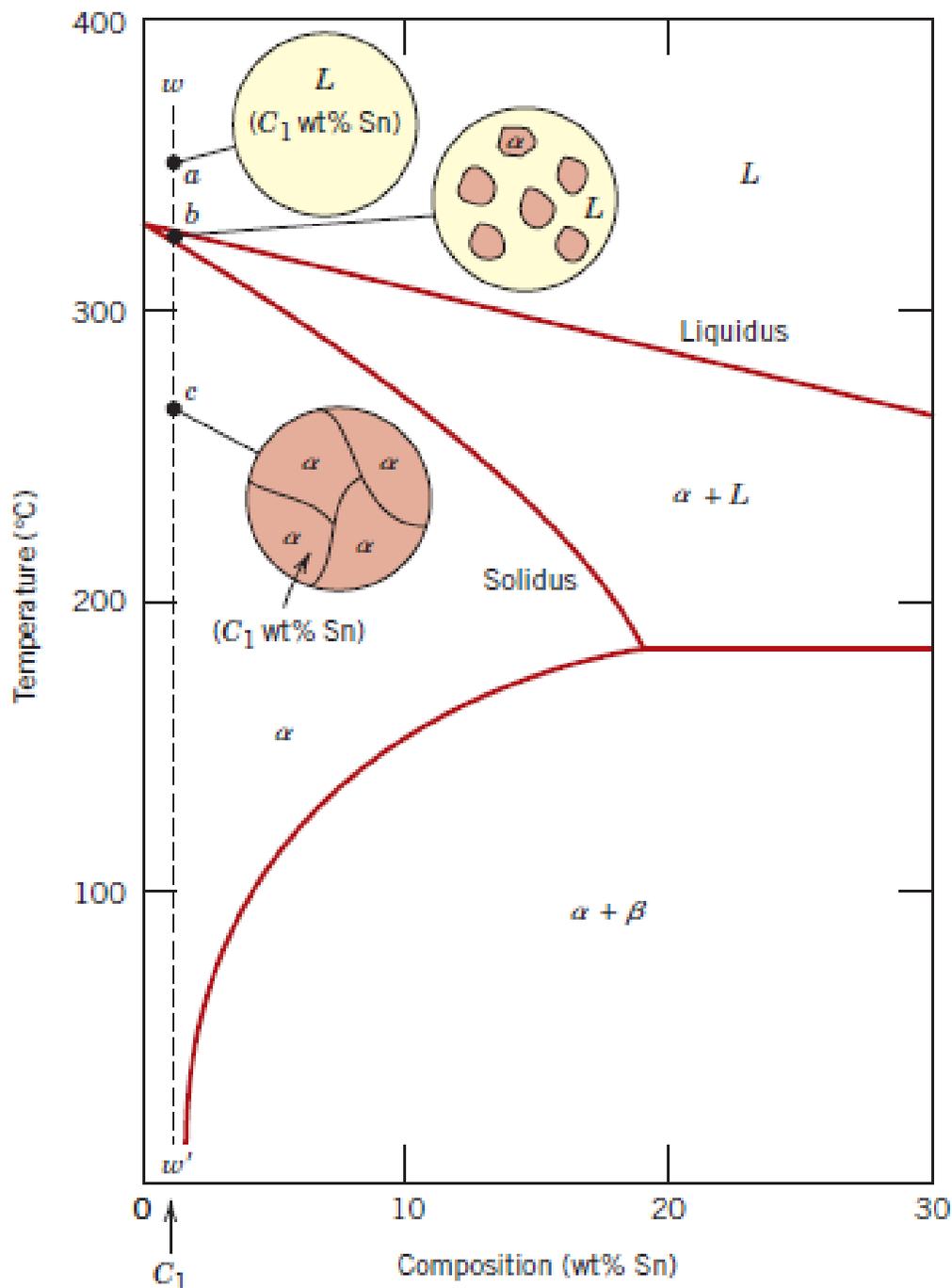


Microestructuras – Sistemas Eutéticos



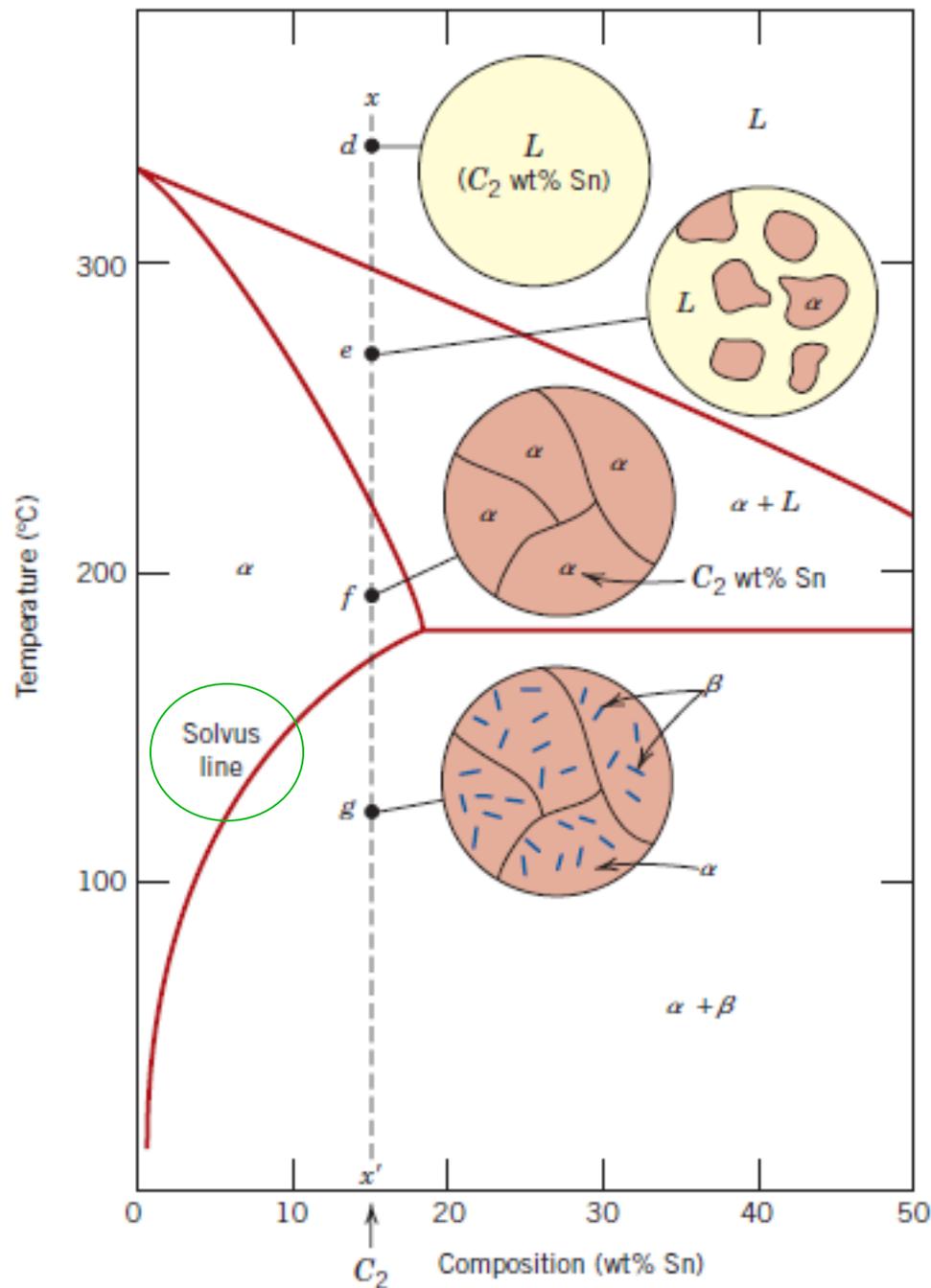
Microestrutura Monofásica

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



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 β** , de reticulado cristalino distinto do reticulado da fase α e com distintas propriedades físico-químicas, no interior da fase α .

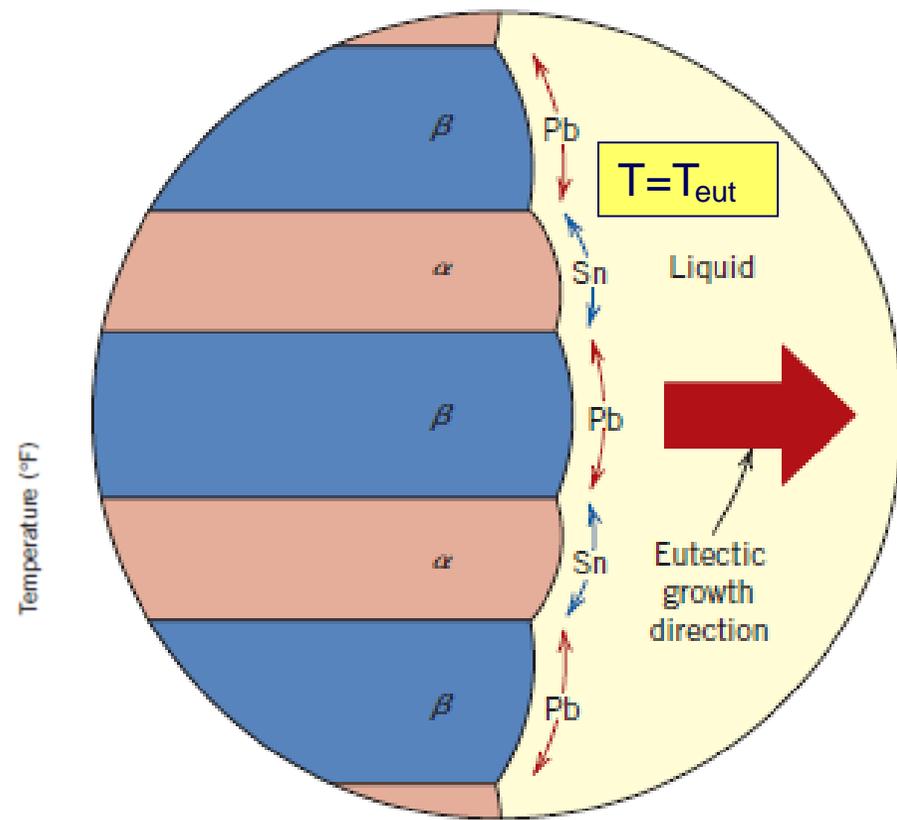
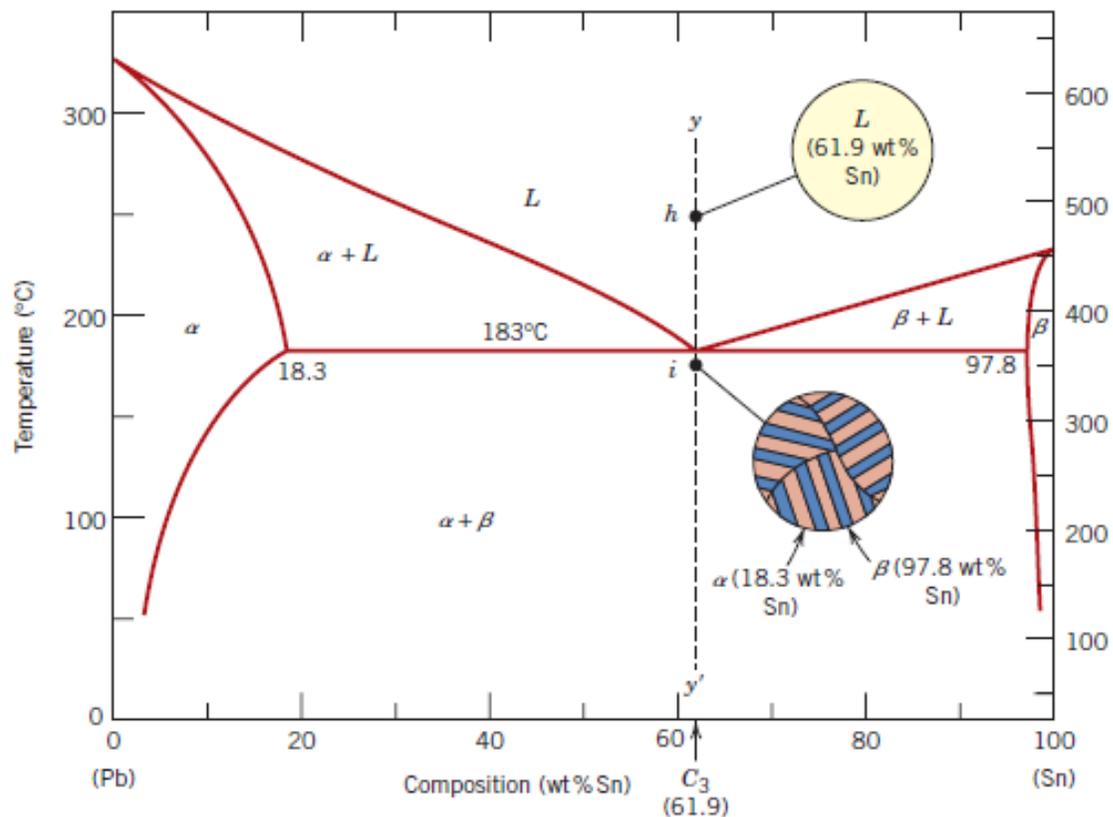


Transformação Eutética

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



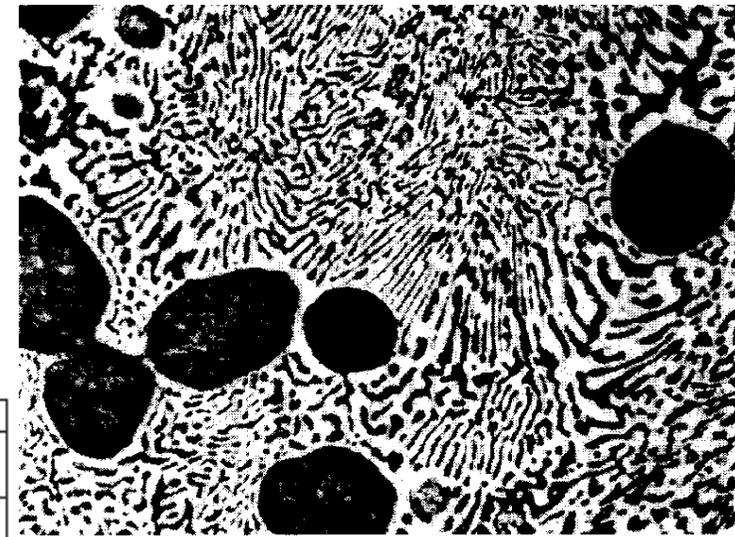
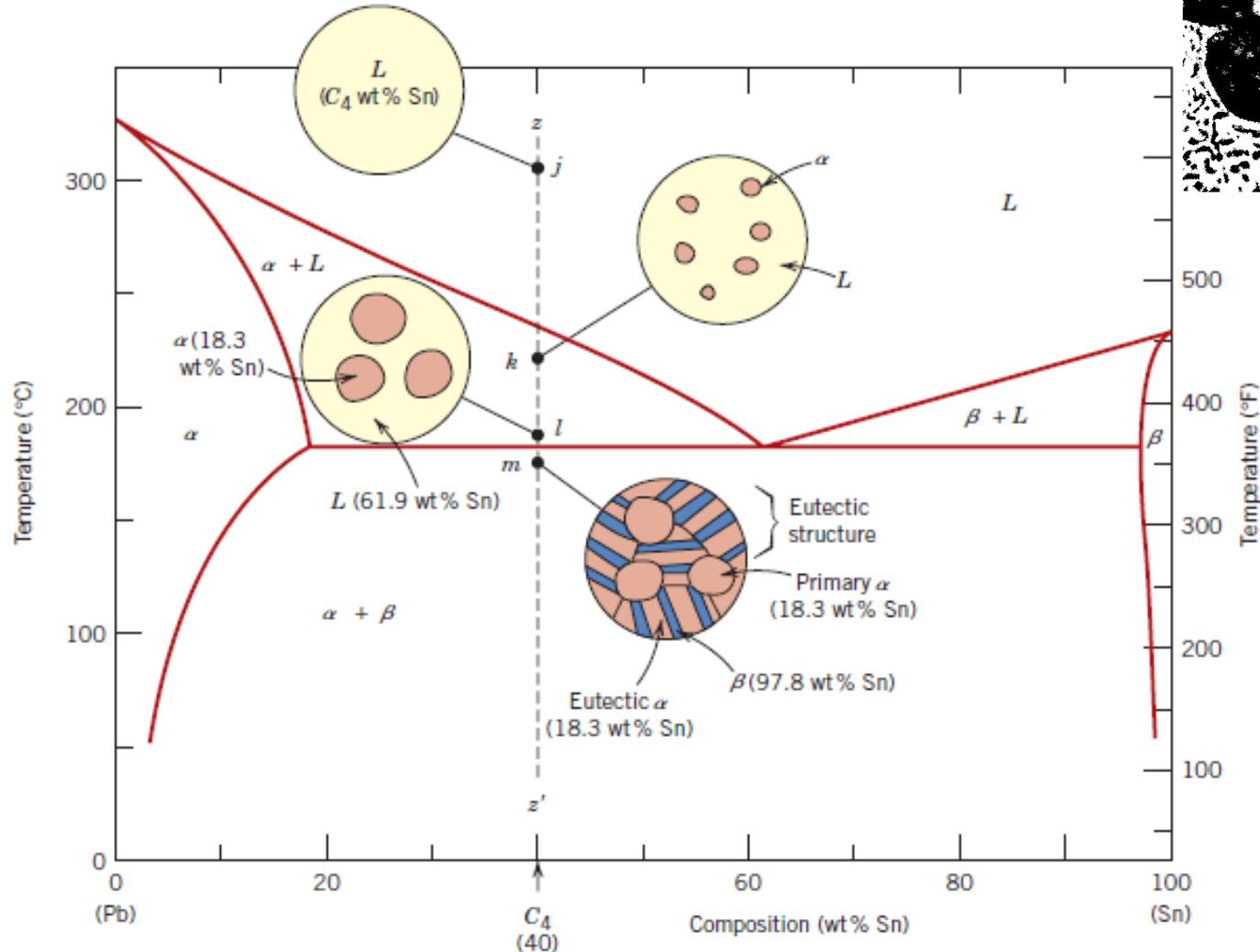
A fase escura é a fase α , rica em Pb;
a fase clara é a fase β rica em Sn



Crescimento cooperativo

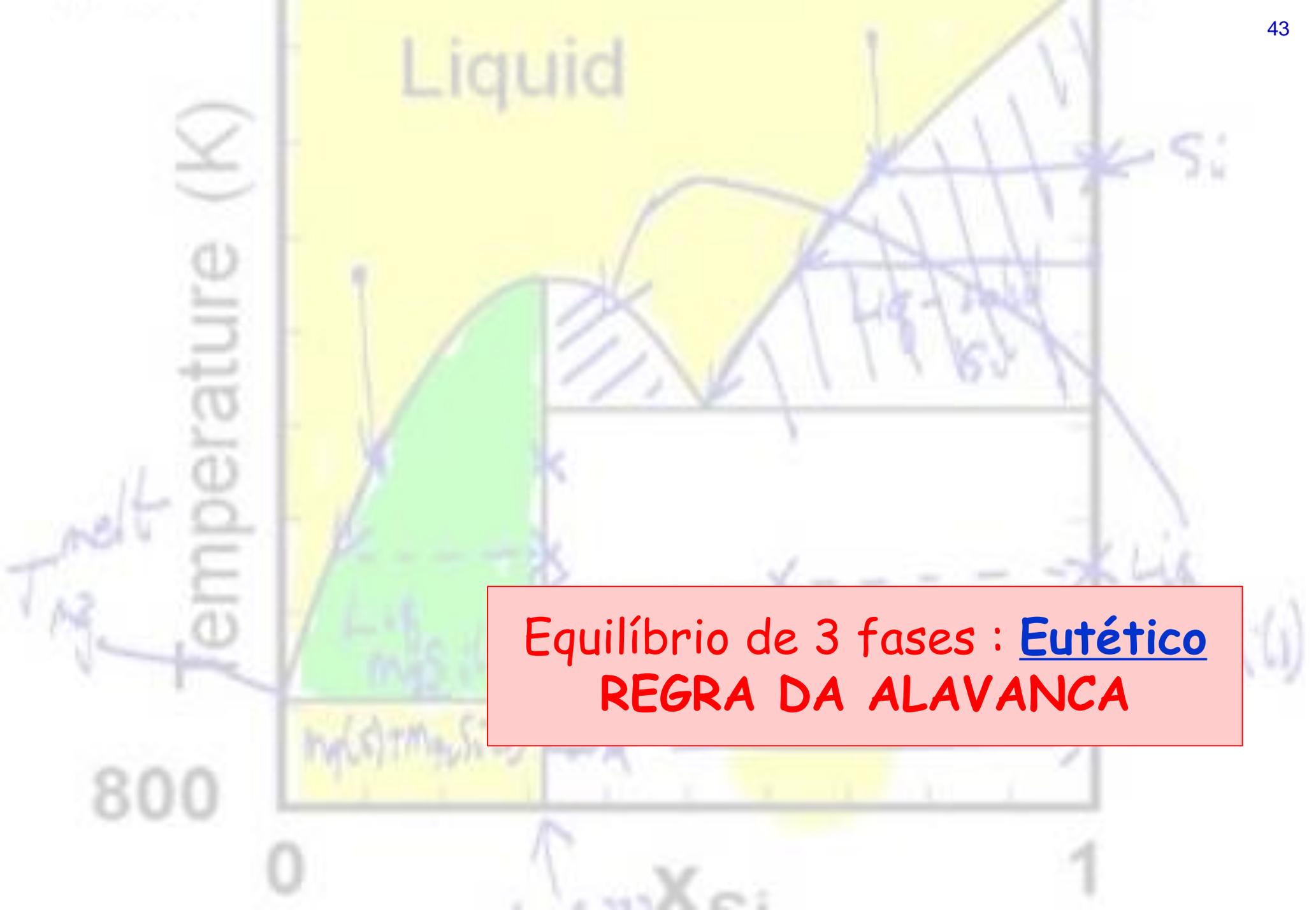
Microestrutura Hipoeutética

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



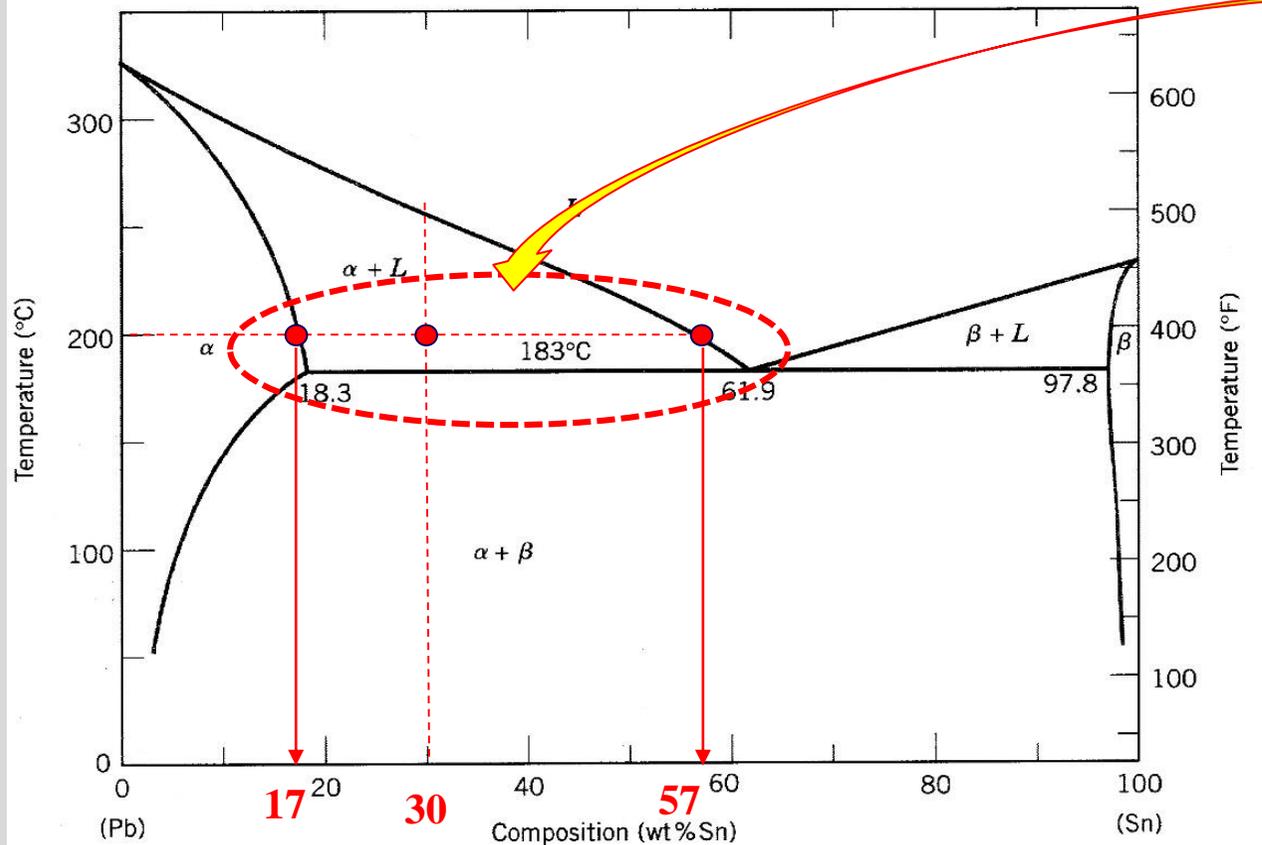
O líquido eutético residual L (de composição 61,9% Sn) sofre a transformação eutética.

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



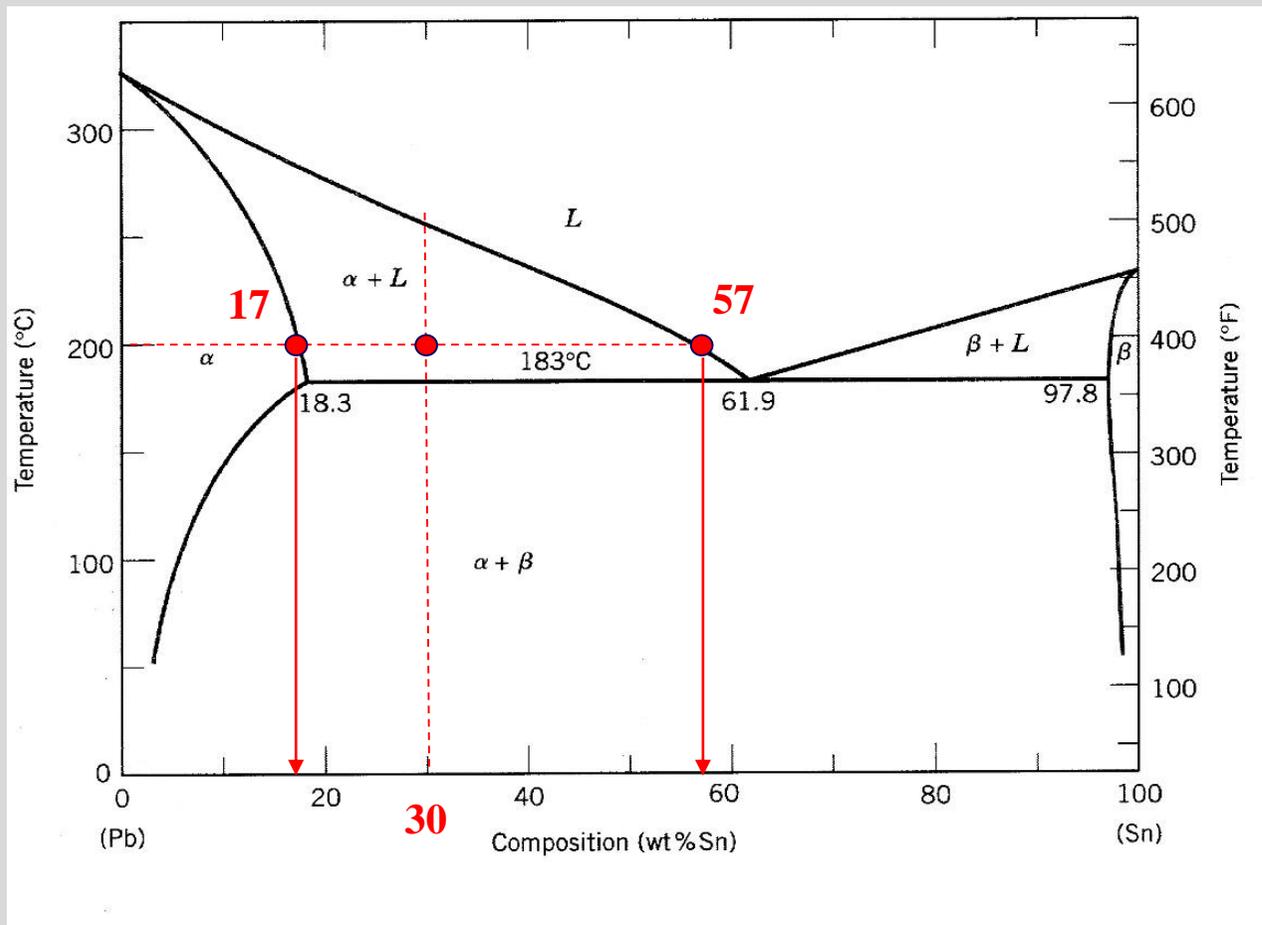
Liga Pb 30%Sn

200°C

2 fases: α e L
 Fase α : 17%Sn
 Fase L: 57%Sn

100°C

Regra da Alavanca – Sistemas Eutéticos



Liga Pb 30%Sn

200°C

2 fases: α e L

Fase α : 17%Sn

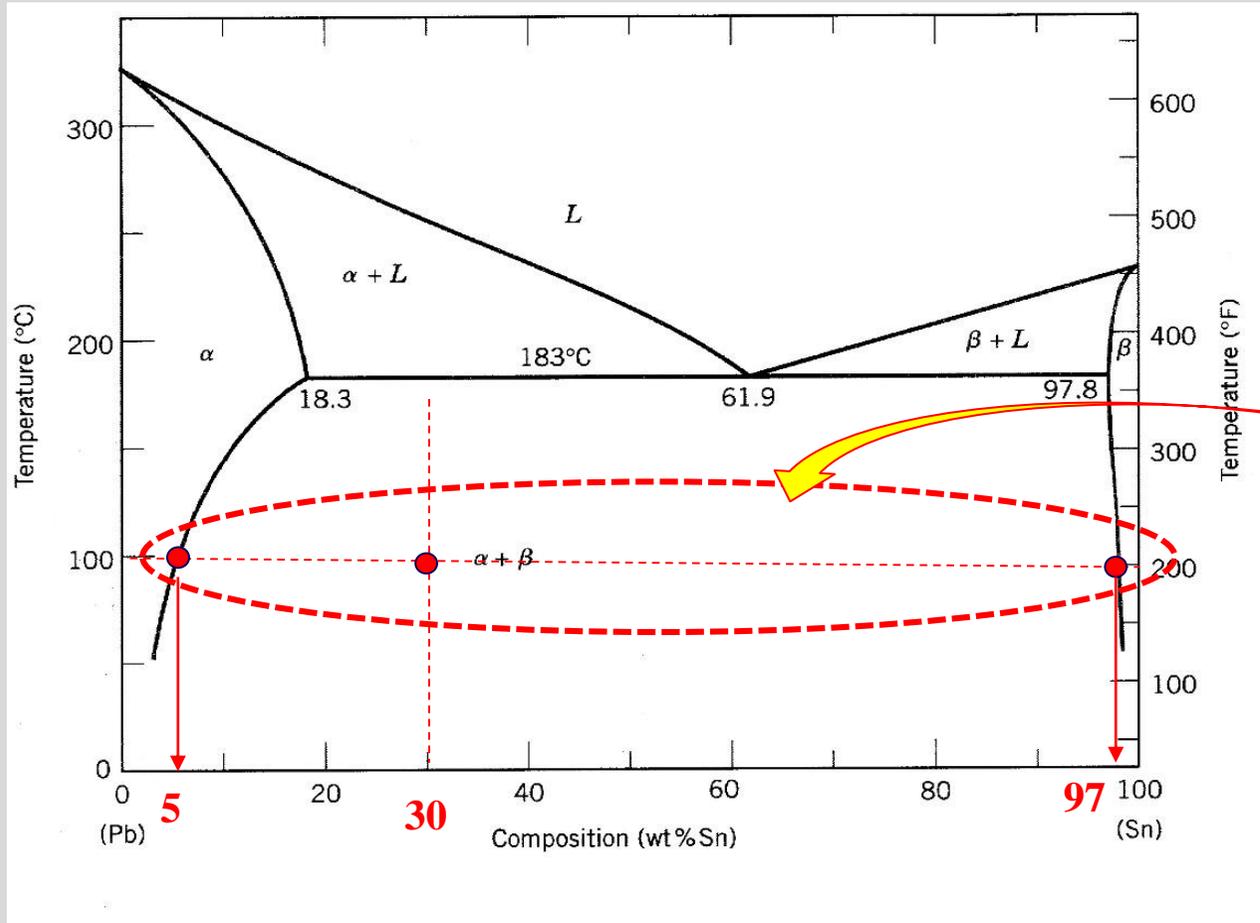
Fase L: 57%Sn

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

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

100°C

Regra da Alavanca – Sistemas Eutéticos



Liga Pb 30%Sn

200°C

2 fases: α e L

Fase α : 17%Sn

Fase L: 57%Sn

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

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

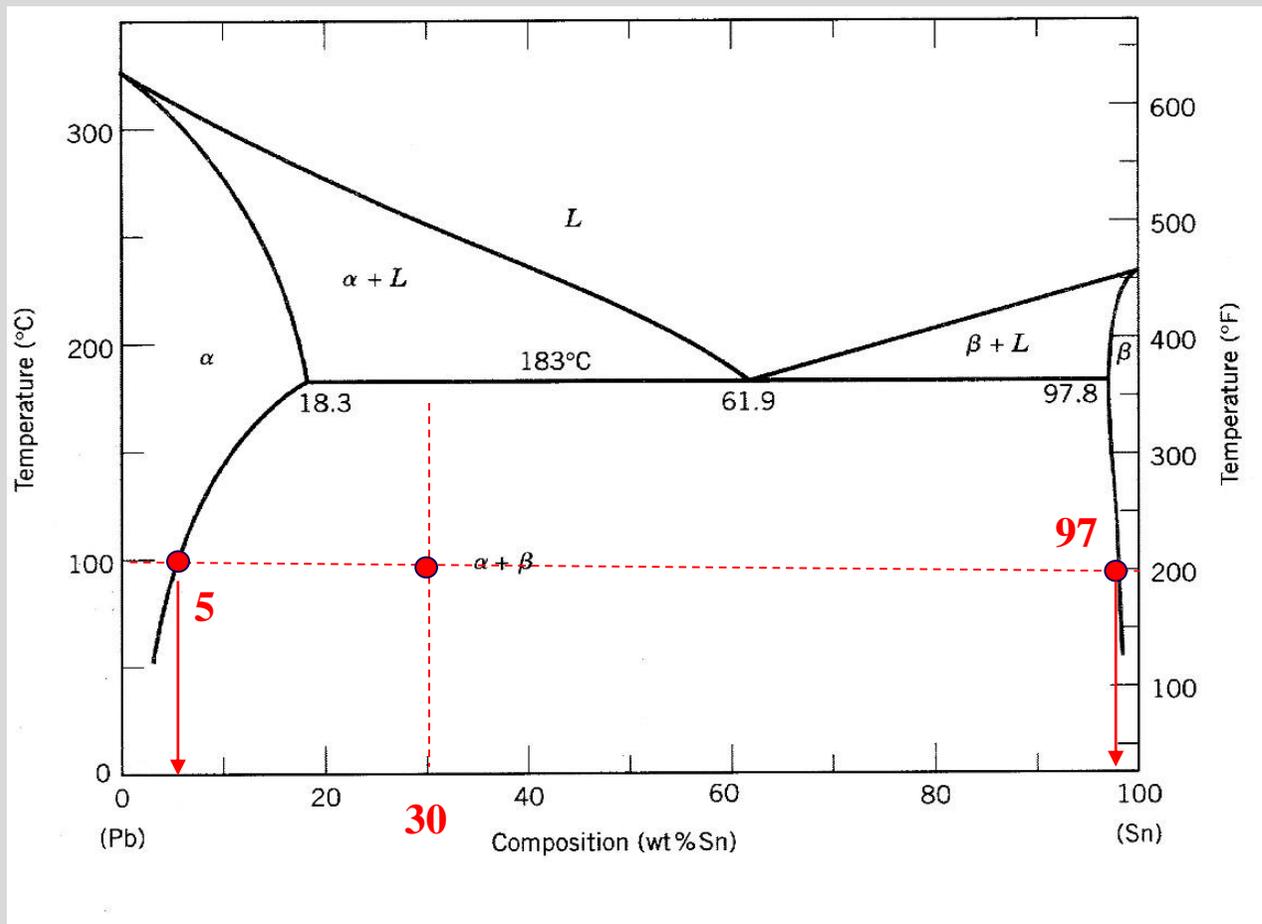
100°C

2 fases: α e β

Fase α : 5%Sn

Fase β : 97%Sn

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

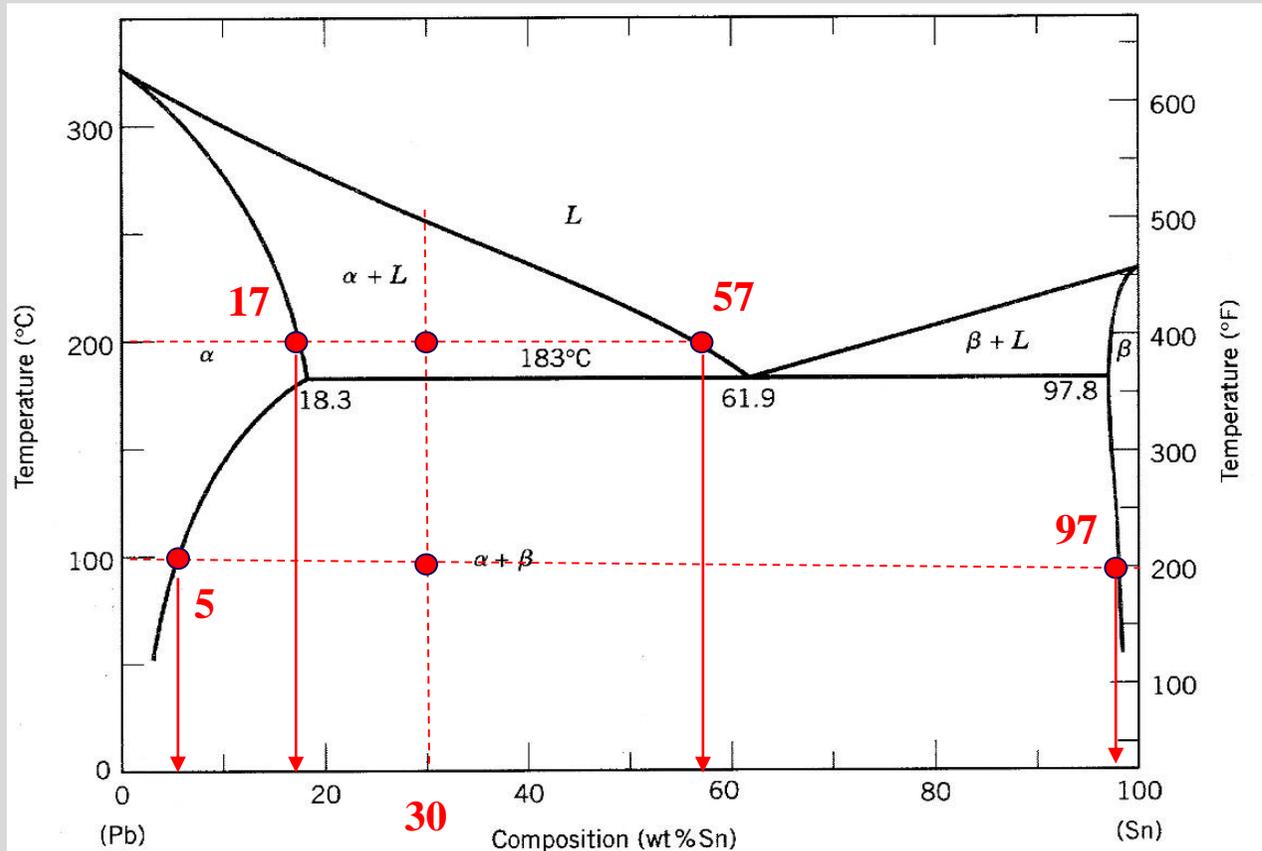
Fase α : 5%Sn

Fase β : 97%Sn

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

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

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

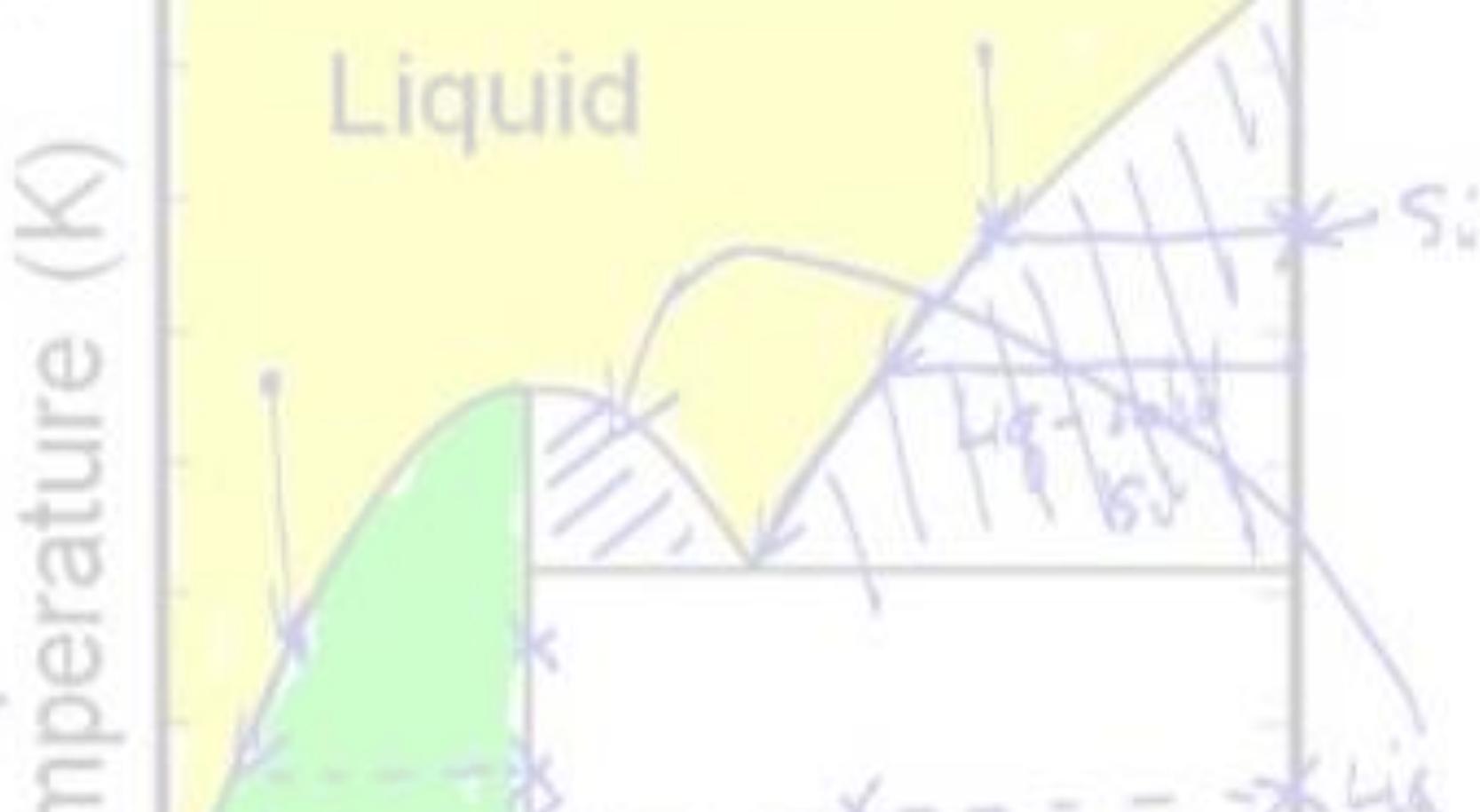
2 fases: α e β

Fase α: 5%Sn

Fase β: 97%Sn

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

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

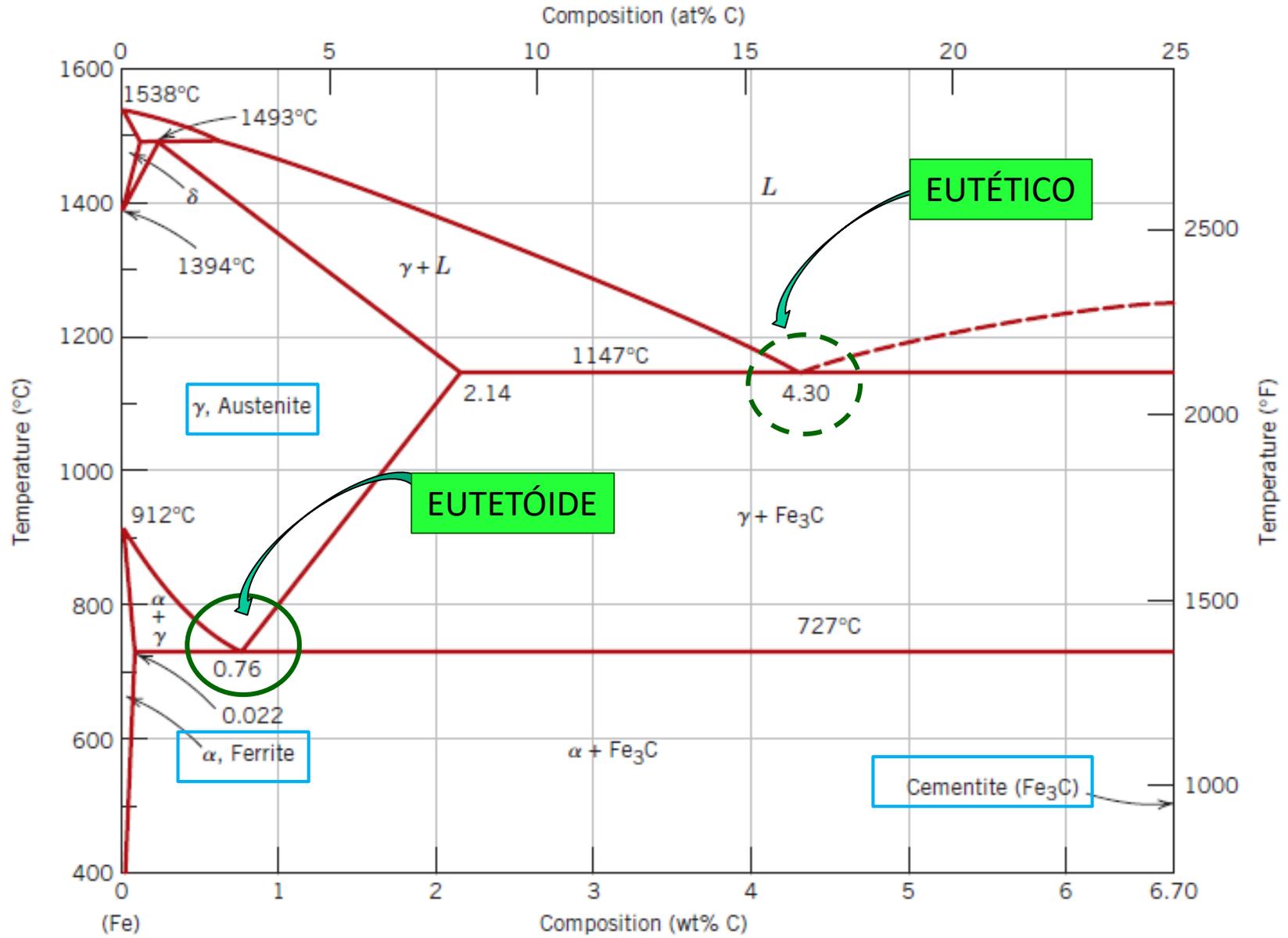


SISTEMAS BINÁRIOS NÃO-ISOMORFOS

Equilíbrio de 3 fases : Eutetóide

Análise das Microestruturas

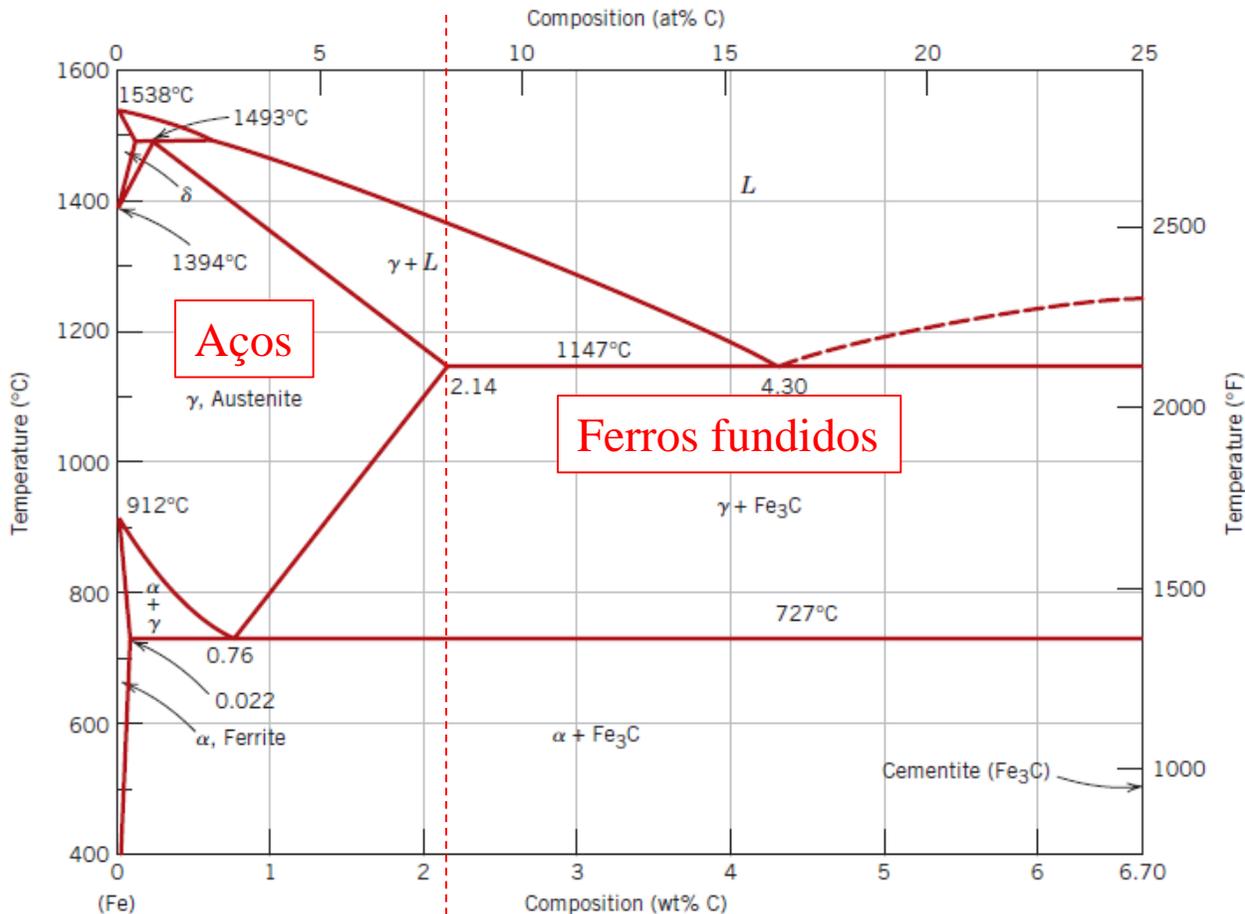
Diagramas de Fases Eutéide



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)
- Fe_3C (metaestável): cementita

Diagrama de Fases Fe-Fe₃C

52

- O **carbono** forma uma solução sólida intersticial com o **Fe**, mas com solubilidade limitada.
- Atingido o limite de solubilidade, precipita grafite ou Fe₃C.
- A solubilidade do C na ferrita (α) é muito baixa (0,022 %) comparada com a solubilidade na austenita (γ) (2,14 %).
- **PERLITA** (*não é fase, é microestrutura!*)
- Microestrutura formada por lamelas alternadas Fe₃C e ferrita.

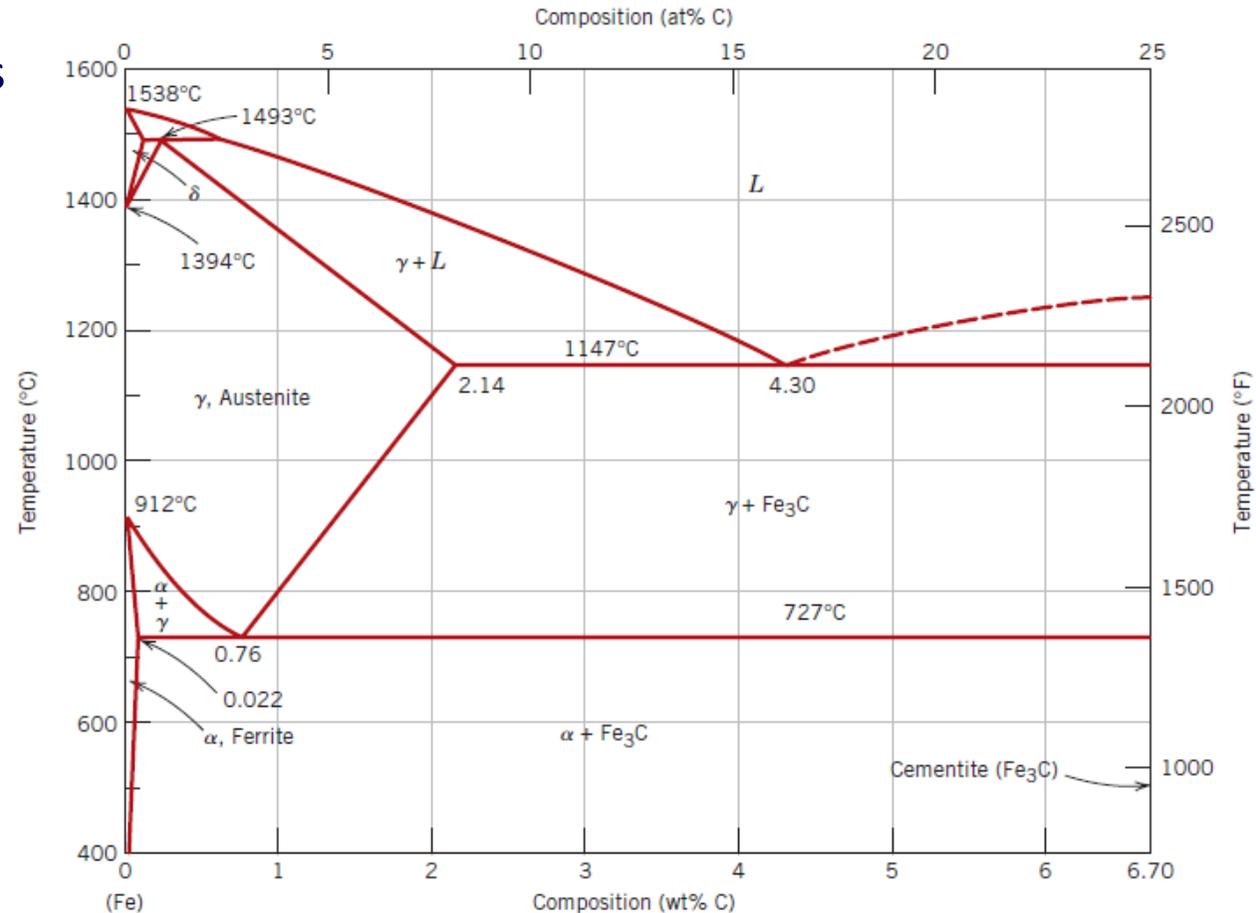
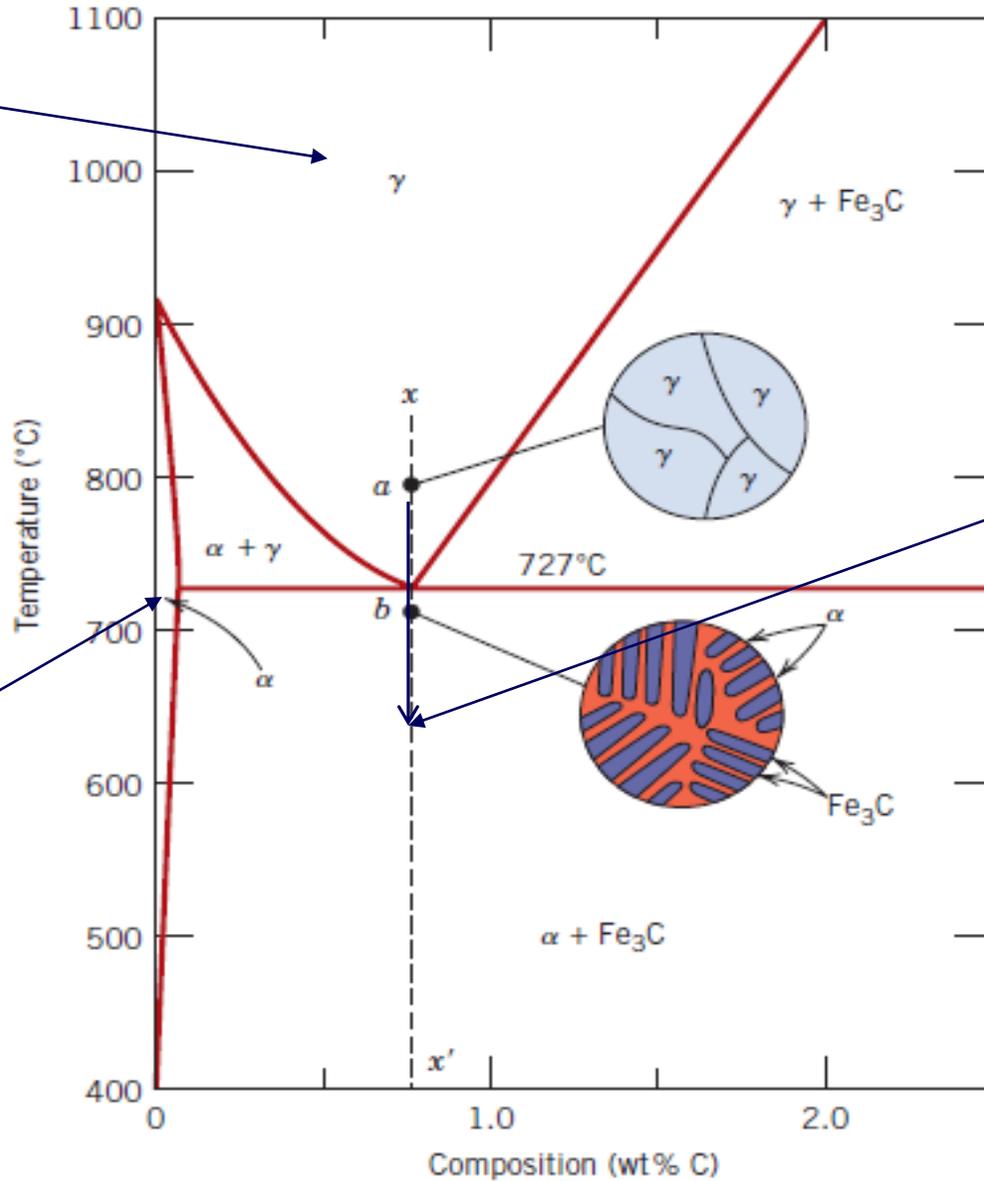
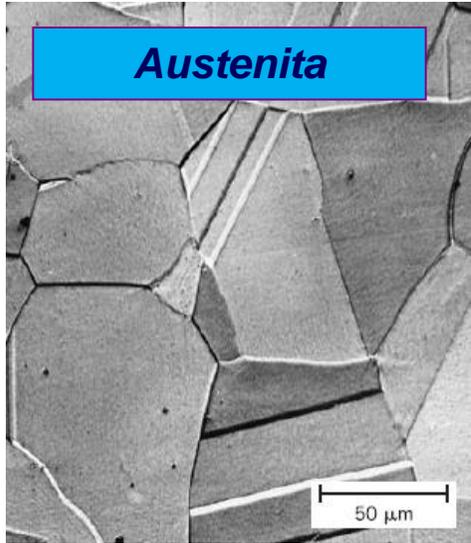


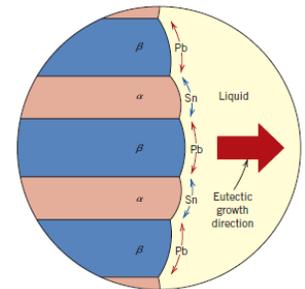
Diagrama de Fases Fe-Fe₃C



TRANSFORMAÇÃO EUTETÓIDE:



Microestrutura PERLÍTICA



Crescimento cooperativo

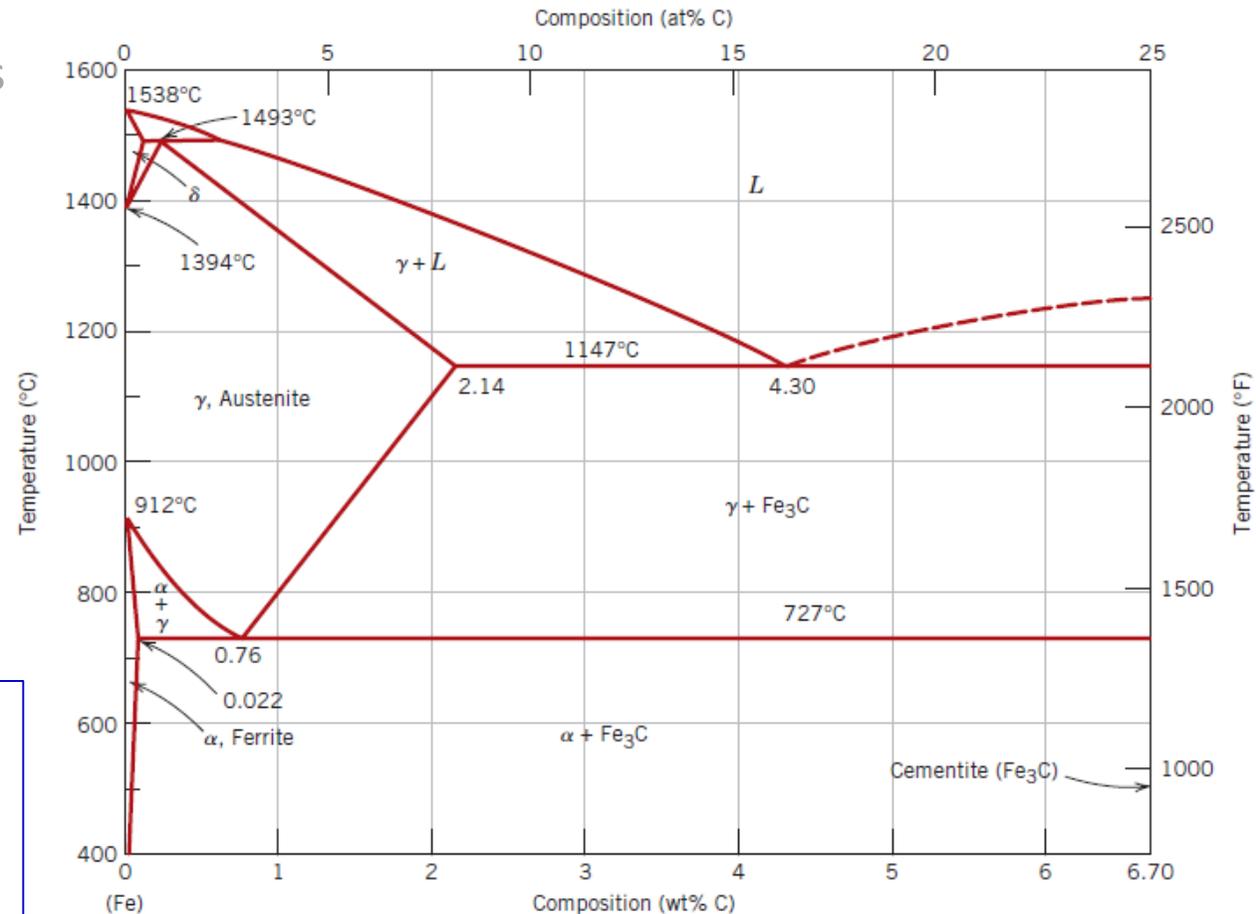
Diagrama de Fases Fe-Fe₃C

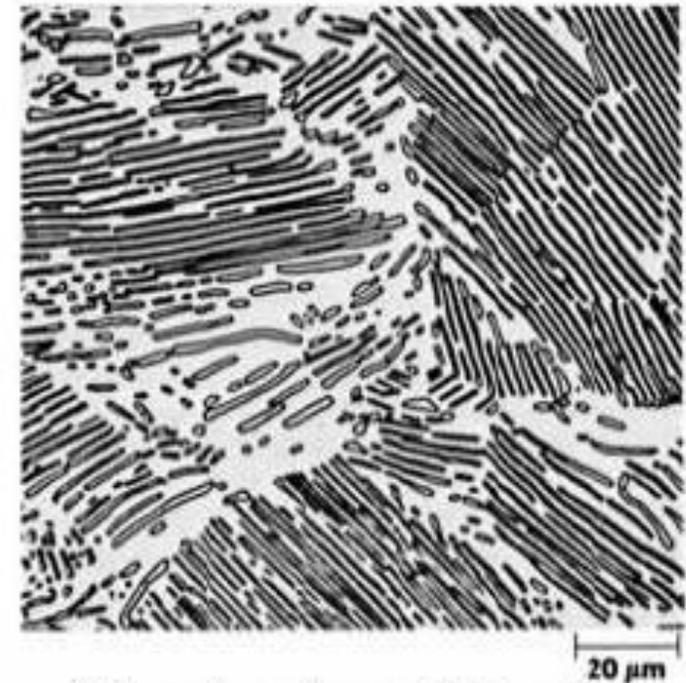
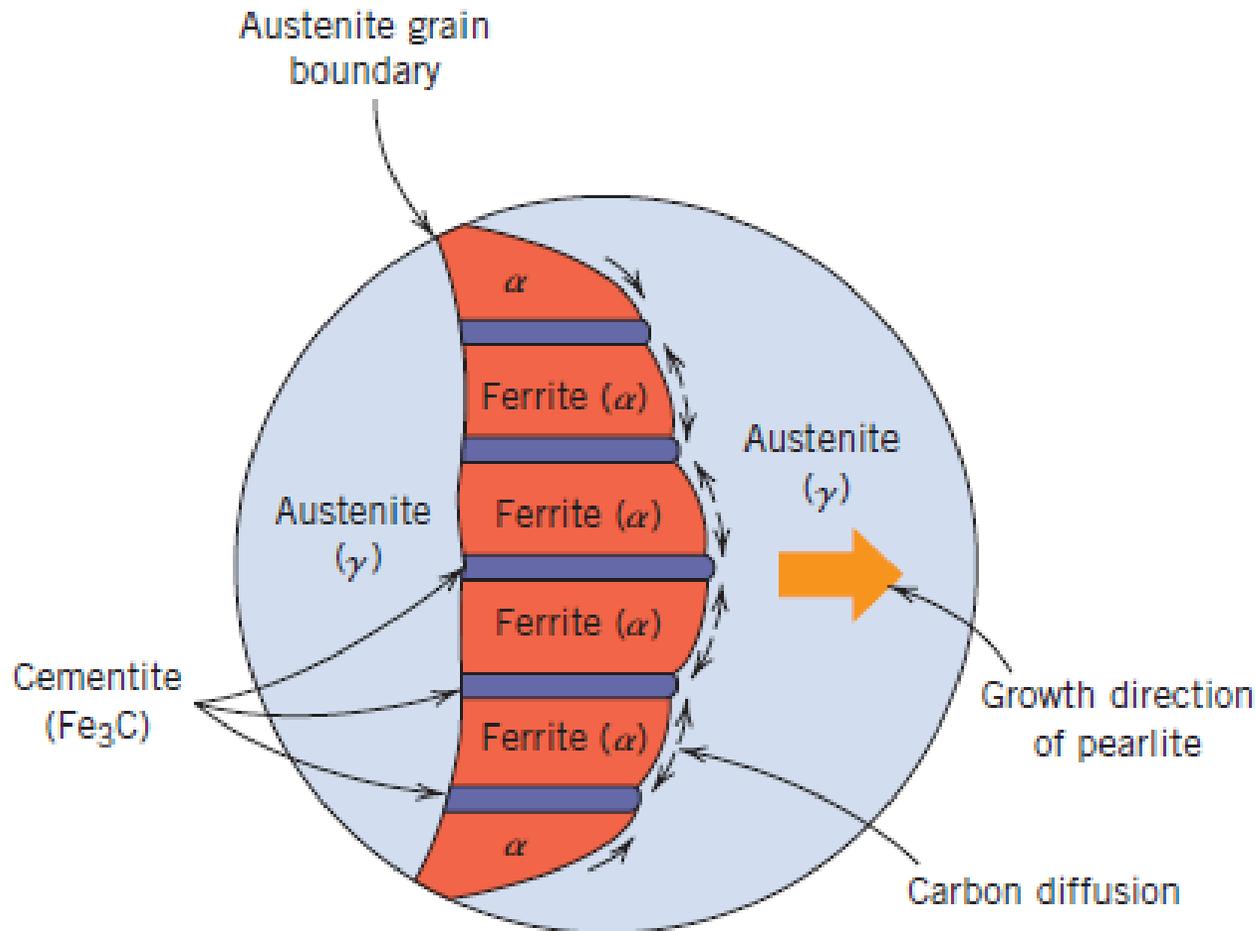
54

- O **carbono** forma uma solução sólida intersticial com o **Fe**, mas com solubilidade limitada.
- Atingido o limite de solubilidade, precipita grafite ou Fe₃C.
- A solubilidade do C na ferrita (α) é muito baixa (0,022 %) comparada com a solubilidade na austenita (γ) (2,14 %).

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

- Microestrutura formada por lamelas alternadas Fe₃C e ferrita.





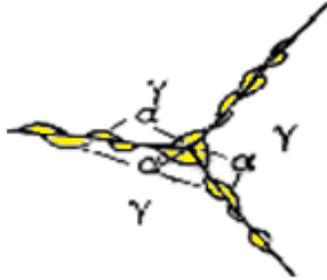
Microstructure of Pearlite

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

Microestrutura Hipoeutetóide

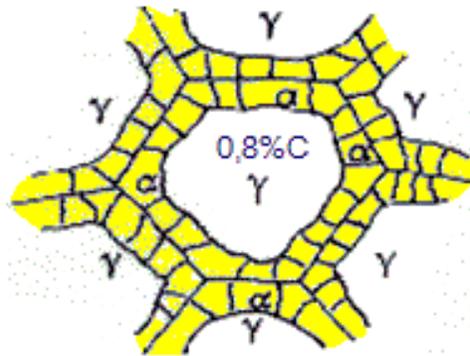
Ponto c: Grãos de Austenita (γ) – estrutura CFC

Ponto d: Nucleação e crescimento da ferrita (α – CCC) nos contornos de grão da austenita (γ – CFC).

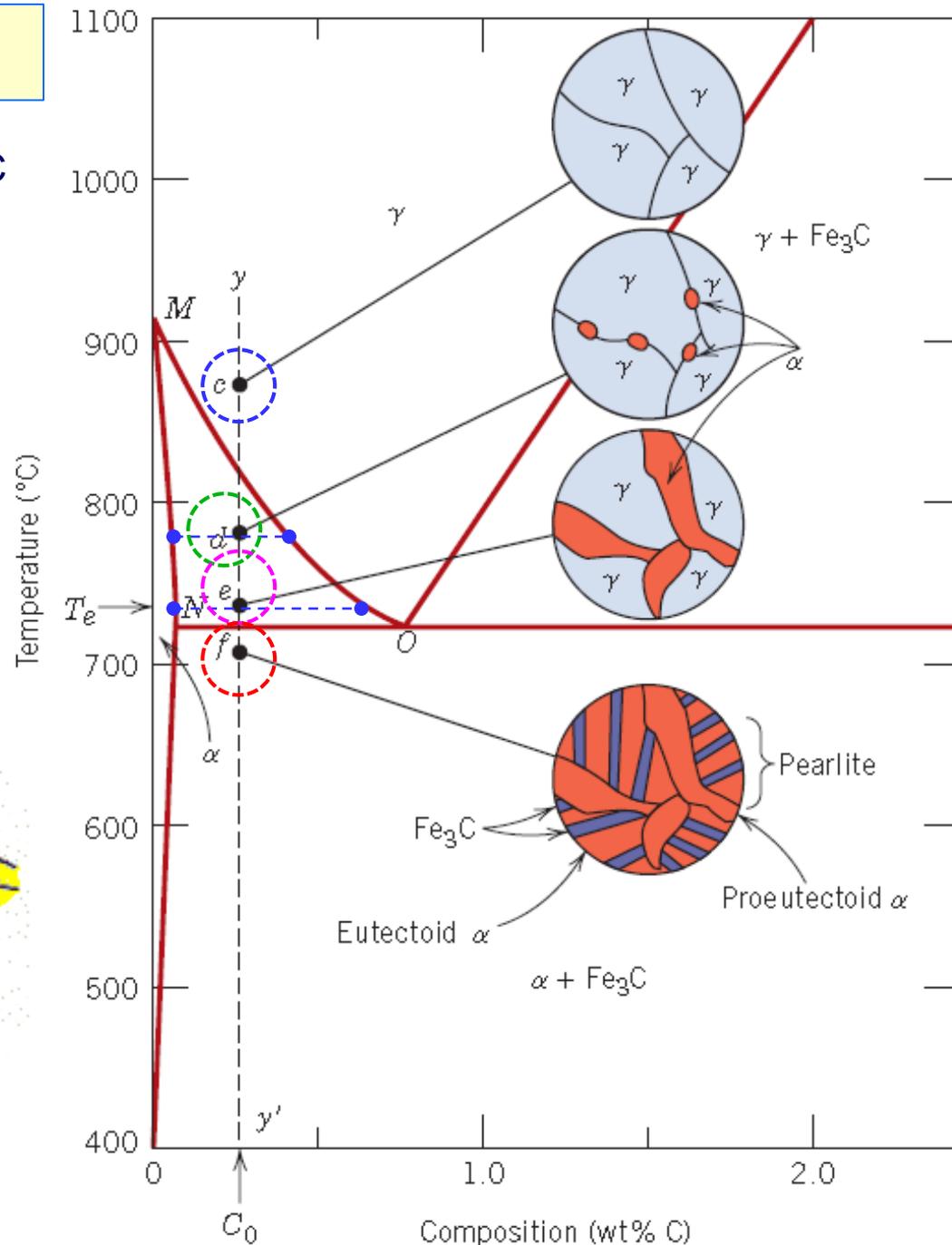


Os contornos de grão apresentam elevada energia interfacial que é aproveitada facilitando a nucleação da nova fase.

Ponto e: Aumento da proporção de ferrita na austenita.



Ponto f: Fase α 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 .

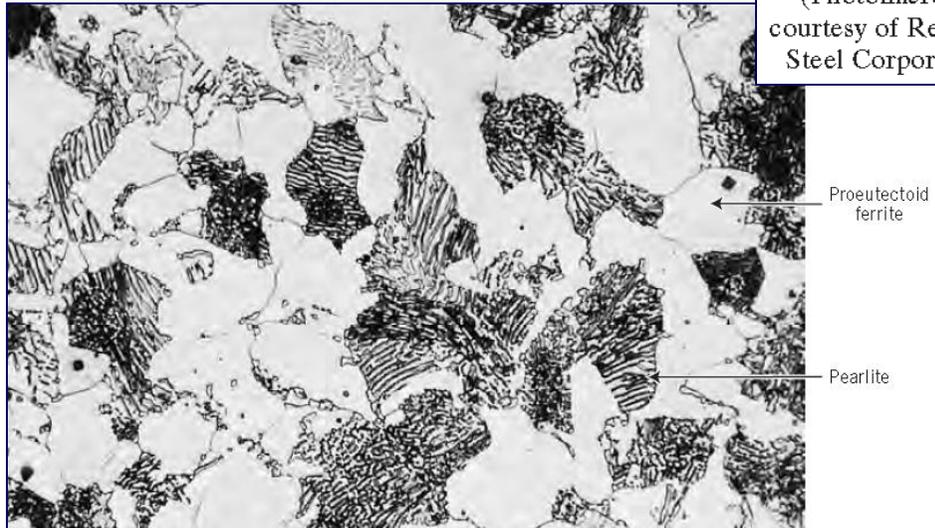
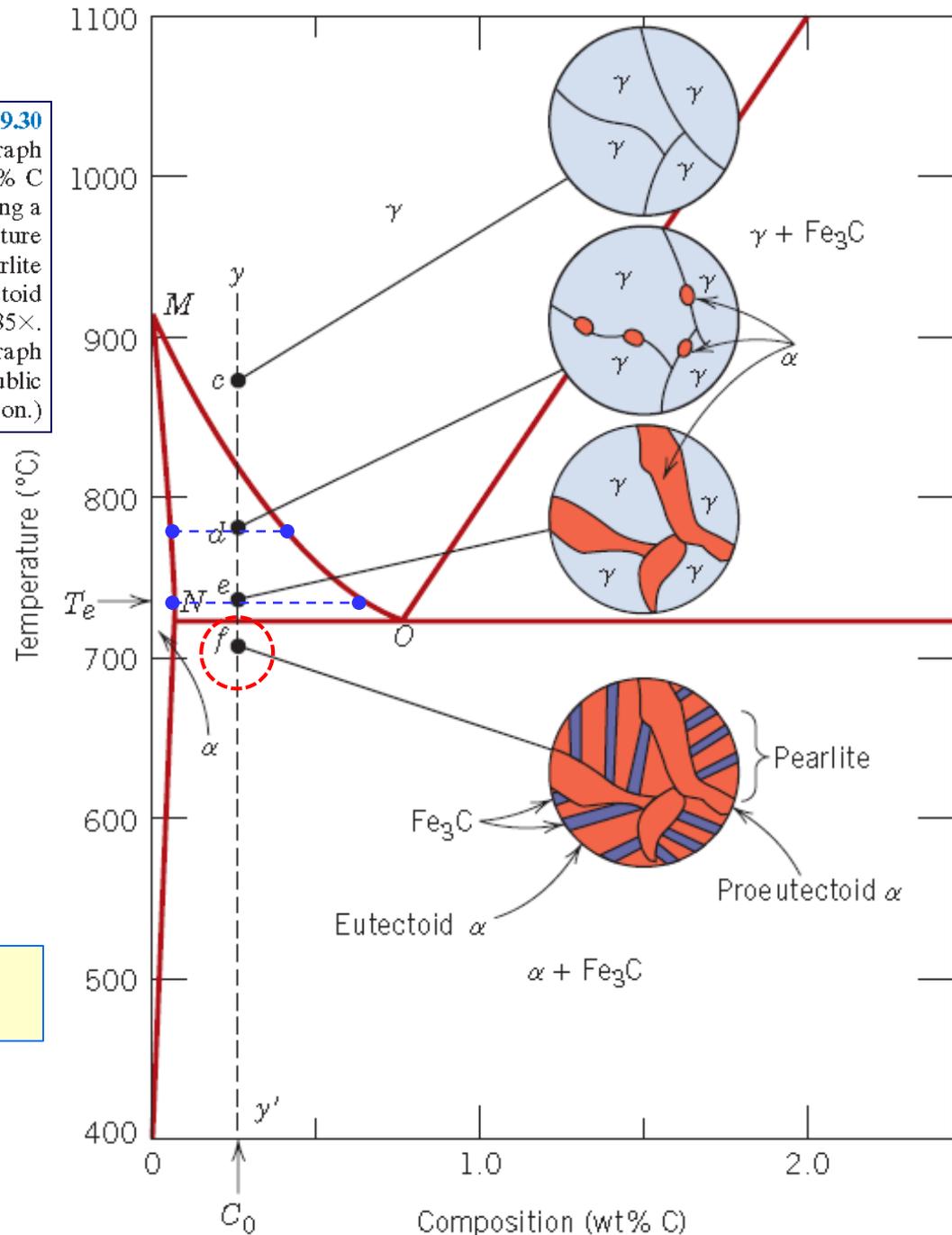
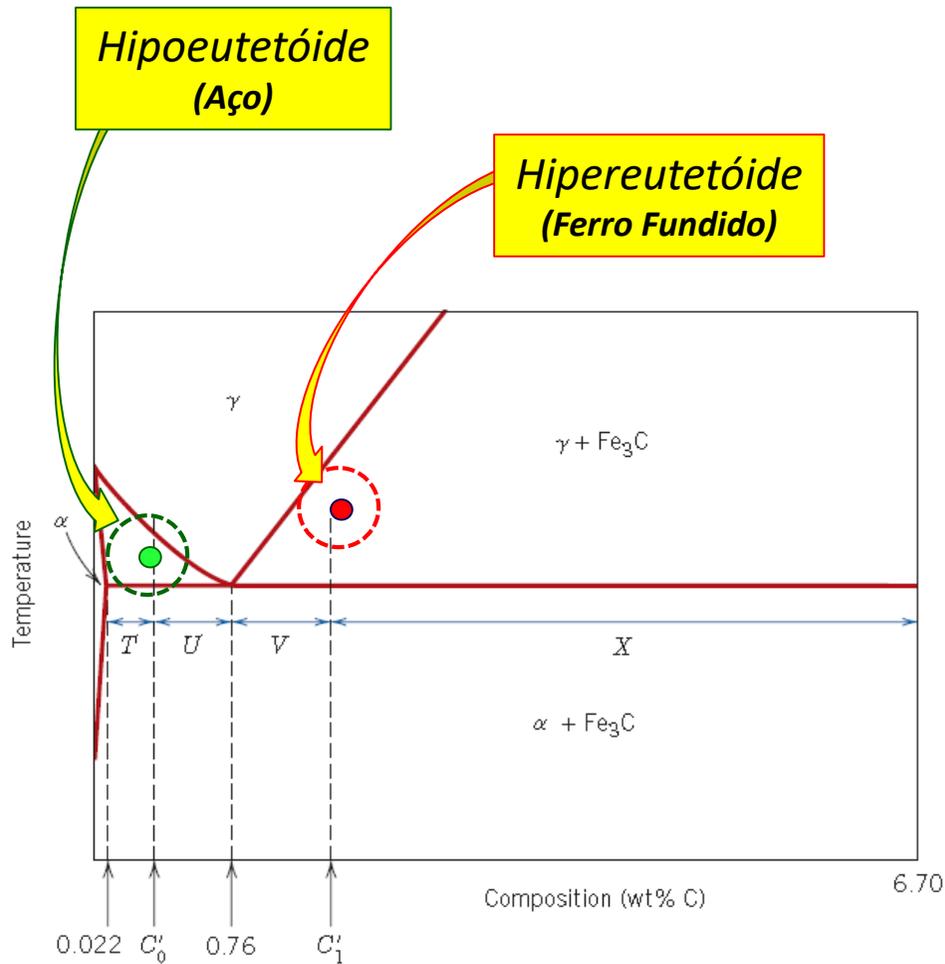


Figure 9.30
Photomicrograph of a 0.38 wt% C steel having a microstructure consisting of pearlite and proeutectoid ferrite. 635 \times . (Photomicrograph courtesy of Republic Steel Corporation.)



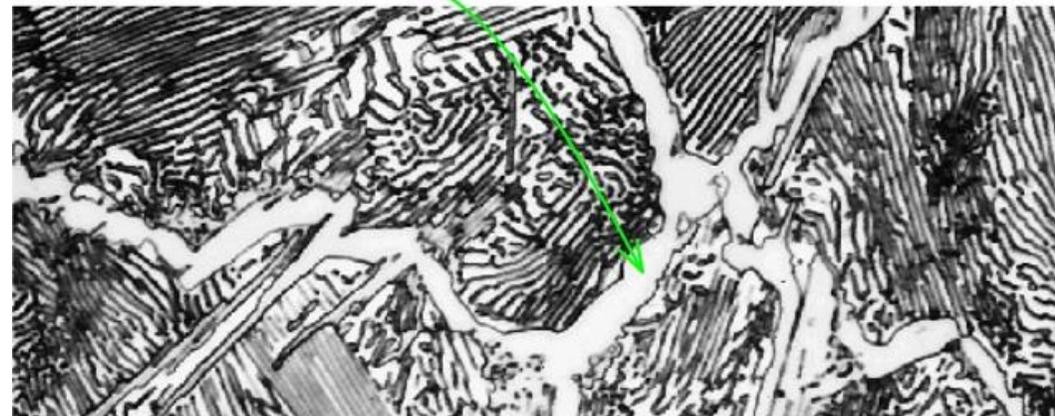
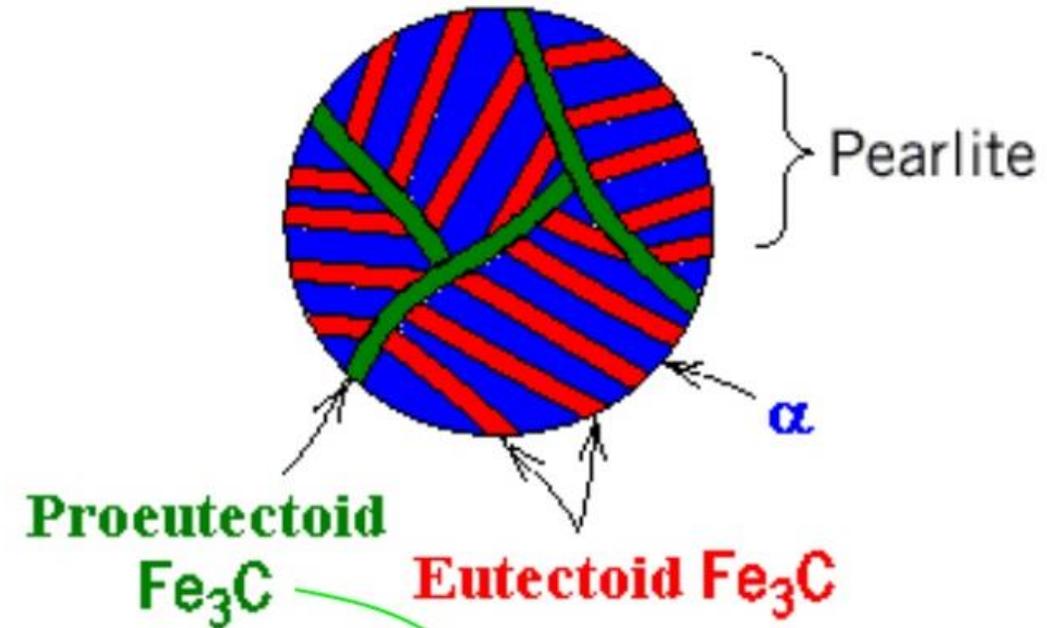
Microestrutura Hipoeutetóide

Microestrutura Hipereutetóide



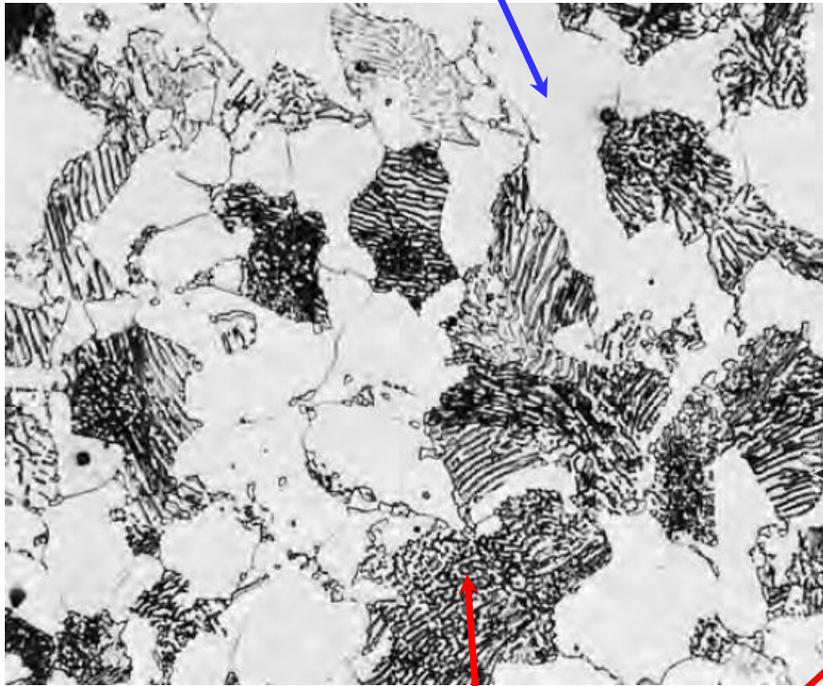
Microstructure of hypereutectoid steel

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

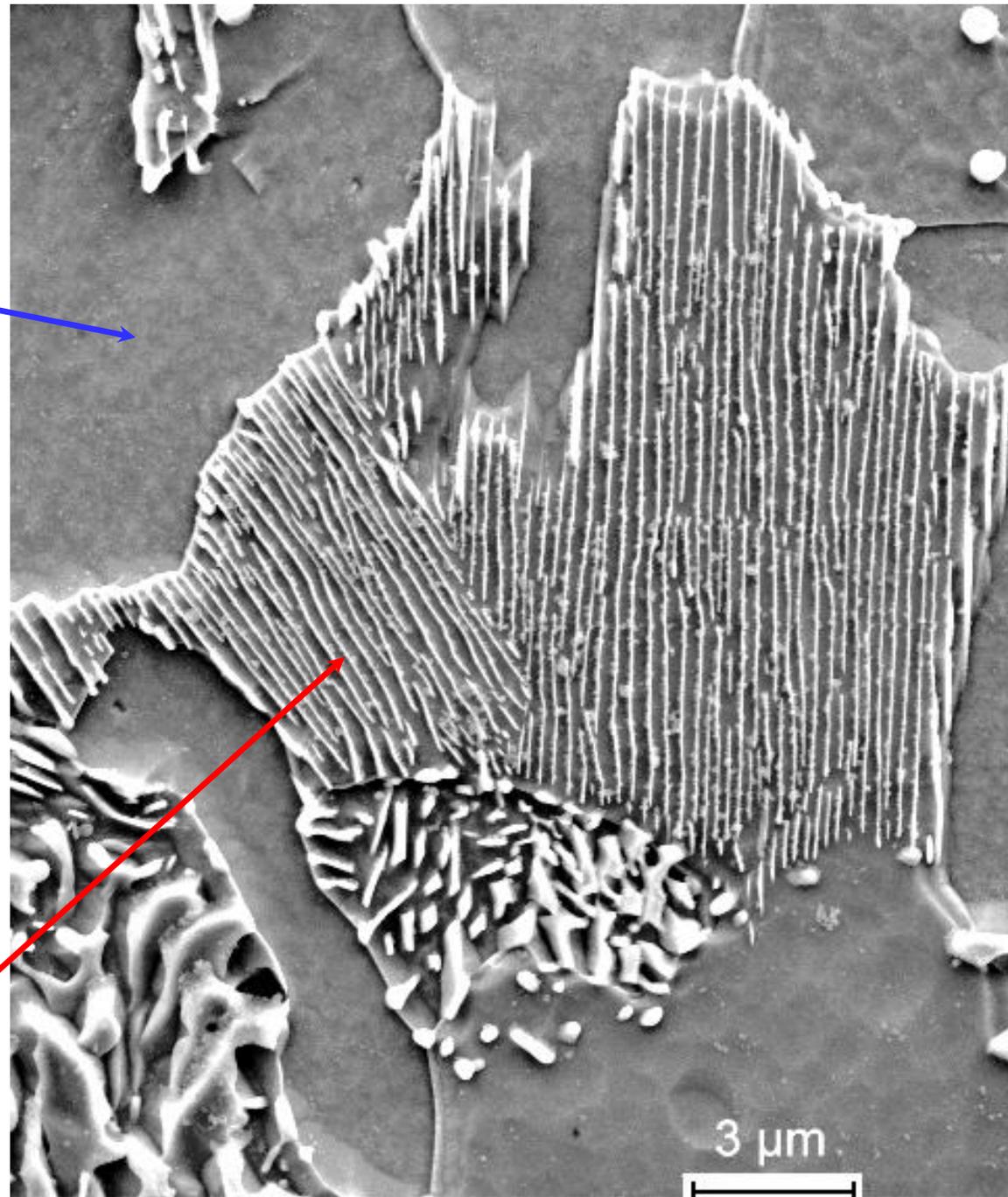


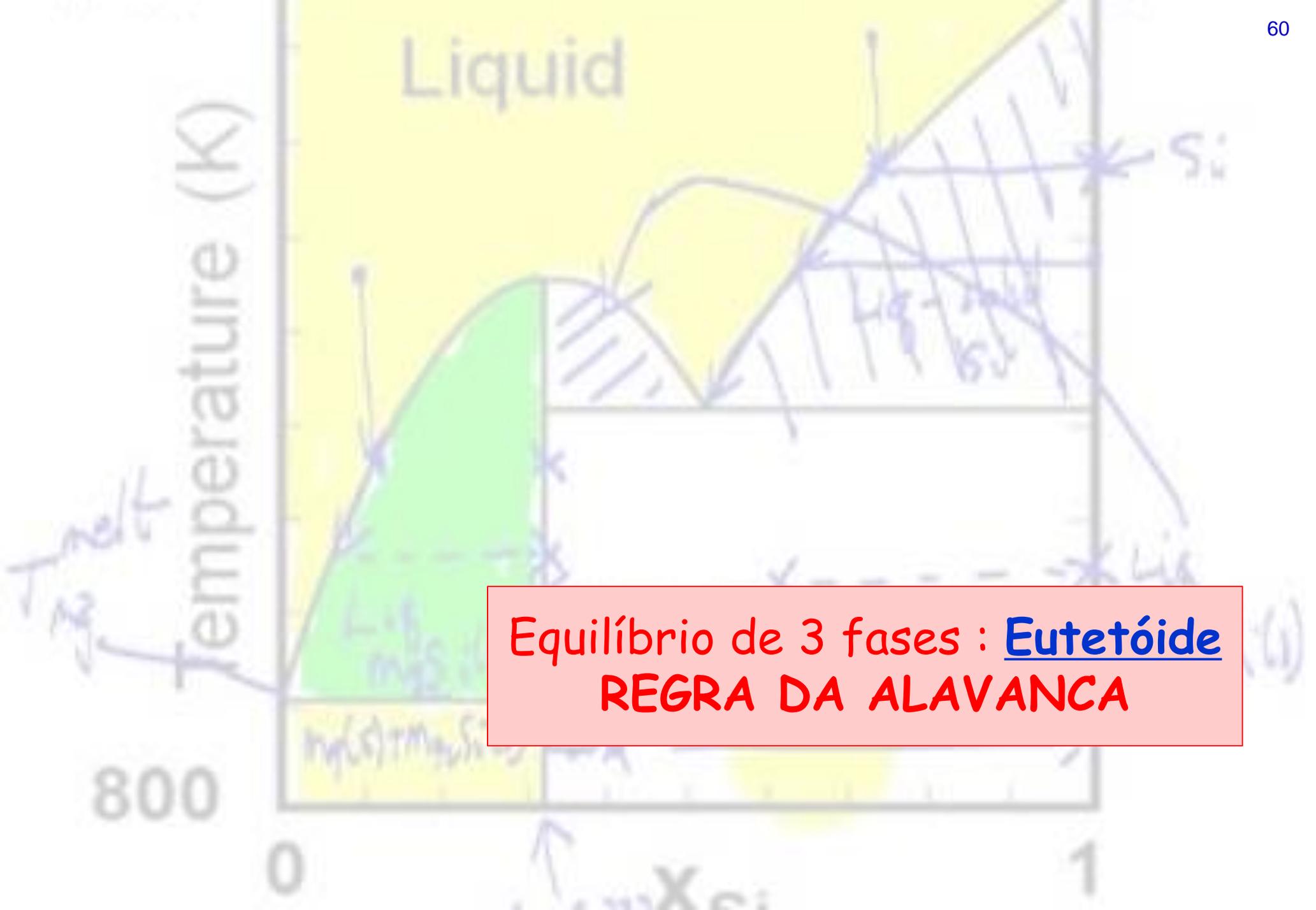
Microestrutura Hipoeutetóide

Ferrita (α) Proeutetóide



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





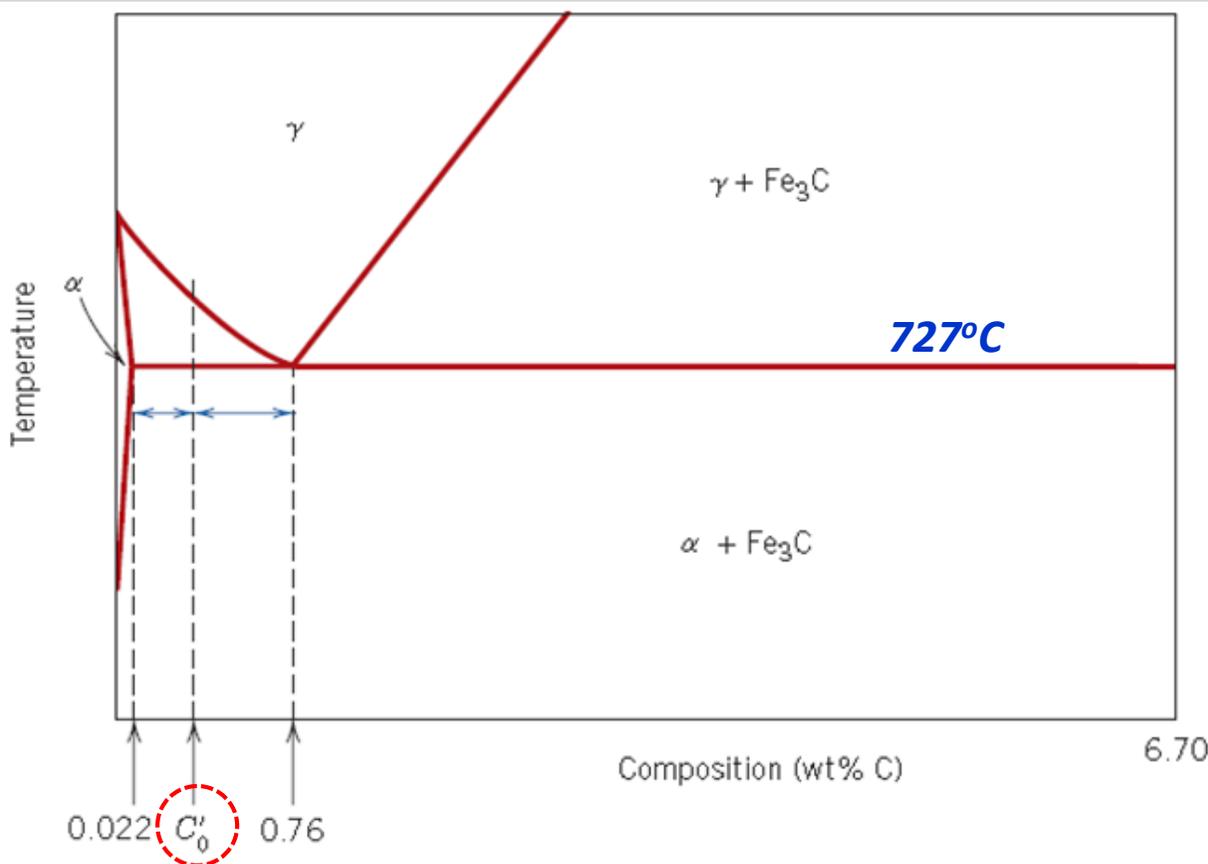
Equilíbrio de 3 fases : Eutetóide
REGRA DA ALAVANCA

Regra da Alavanca – Composição Hipoeutetóide

O QUE É POSSÍVEL CALCULAR ?

- *...aplicando a regra da alavanca a 728°C*
 - % relativa de ferrita (α) proeutetóide
 - % relativa de austenita (γ) $\rightarrow \equiv$ % relativa de perlita abaixo de 727°C
- *...aplicando a regra da alavanca a 725°C*
 - % relativa de ferrita (α) TOTAL (*proeutetóide + presente na perlita*)
 - % relativa de cementita (Fe_3C) TOTAL (*somente presente na perlita*)
- *...combinando resultados (regra da alavanca a 728°C e 725°C)*
 - % relativa de ferrita (α) presente na perlita

Regra da Alavanca – Composição Hipoeutetóide



...Regra da Alavanca a 728°C

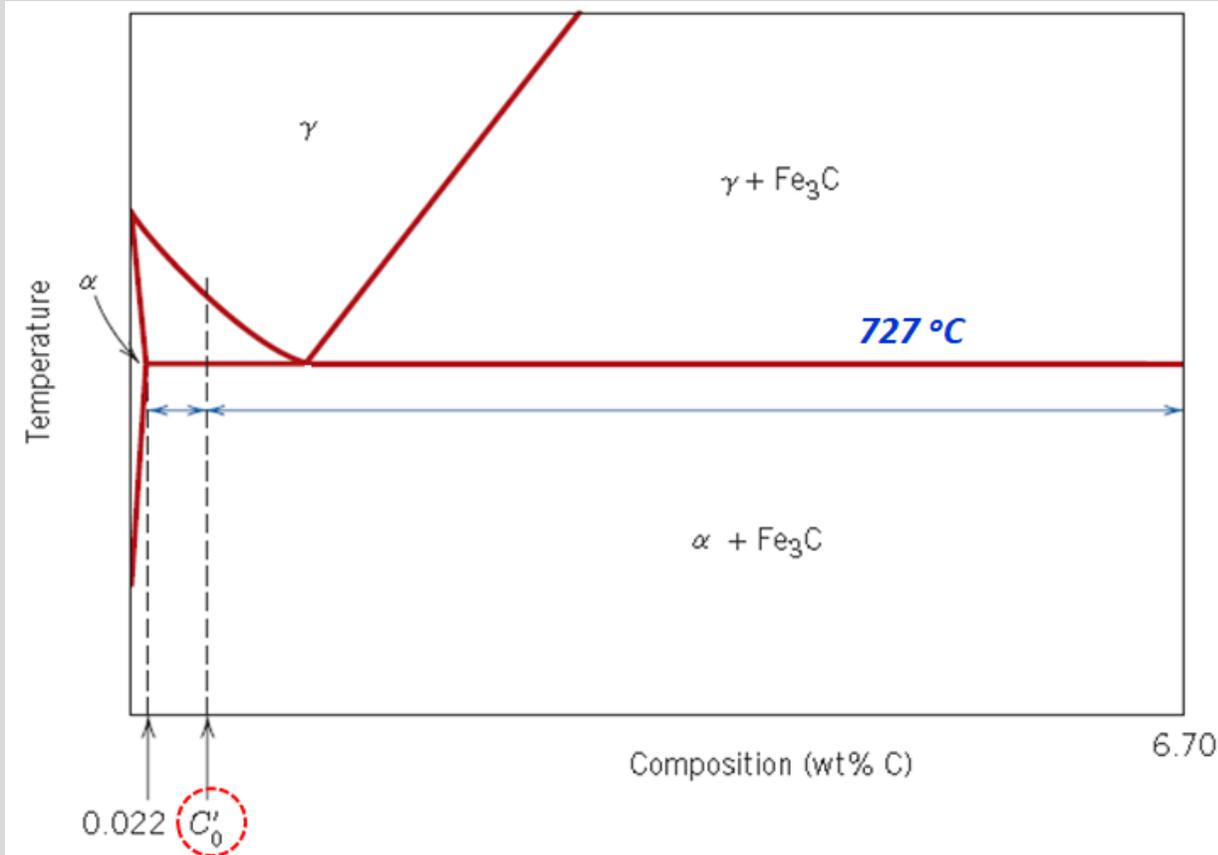
$$\% \alpha_{\text{proeutetóide}} = \frac{0,76 - 0,50}{0,76 - 0,022} \times 100$$

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

a % γ (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°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°C e a 725°C

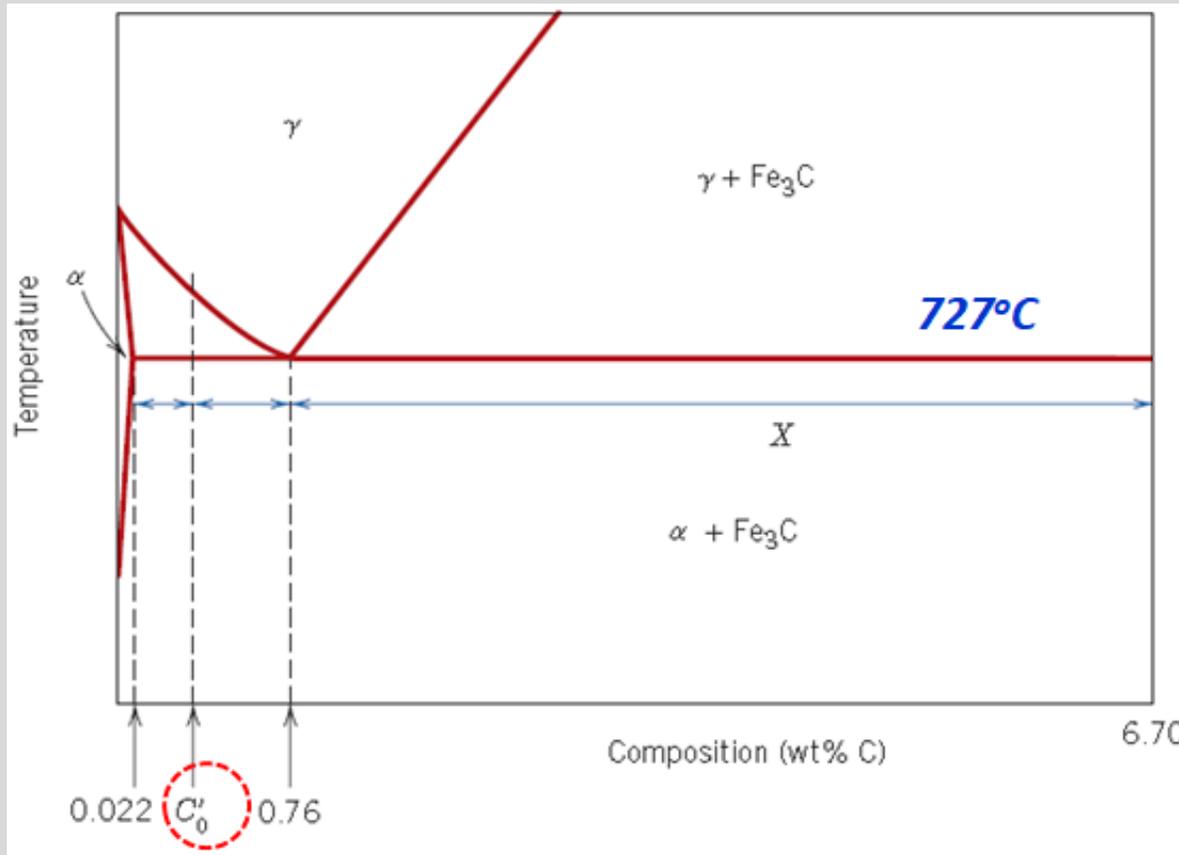
$$\% \alpha_{perlita} = \% \alpha_{TOTAL} - \% \alpha_{proeutetóide}$$

ou

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

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

Regra da Alavanca – Composição Hipoeutetóide



...Regra da Alavanca a 728°C

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

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

...Regra da Alavanca a 725°C

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

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

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

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

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

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

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

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

ou

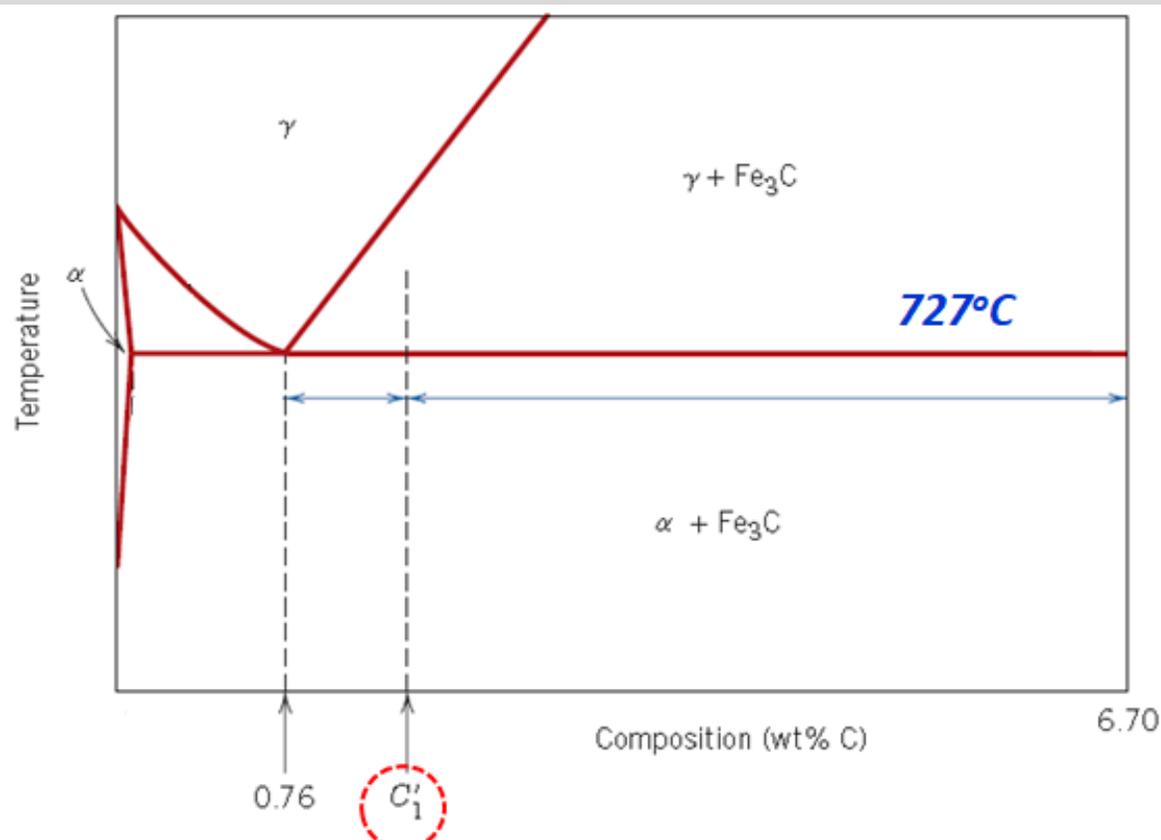
$$\% \alpha_{\text{perlita}} = \% \gamma - \% Fe_3C_{(\text{cementita})}$$

Regra da Alavanca – Composição Hipereutetóide

O QUE É POSSÍVEL CALCULAR ?

- *...aplicando a regra da alavanca a 728°C*
 - % relativa de cementita (Fe_3C) proeutetóide
 - % relativa de austenita (γ) $\rightarrow \equiv$ % relativa de perlita abaixo de 727°C
- *...aplicando a regra da alavanca a 725°C*
 - % relativa de cementita (Fe_3C) TOTAL (*proeutetóide + presente na perlita*)
 - % relativa de ferrita (α) TOTAL (*somente presente na perlita*)
- *...combinando resultados (regra da alavanca a 728°C e 725°C)*
 - % relativa de cementita (Fe_3C) presente na perlita

Regra da Alavanca – Composição Hipereutetóide



...Regra da Alavanca a 728°C

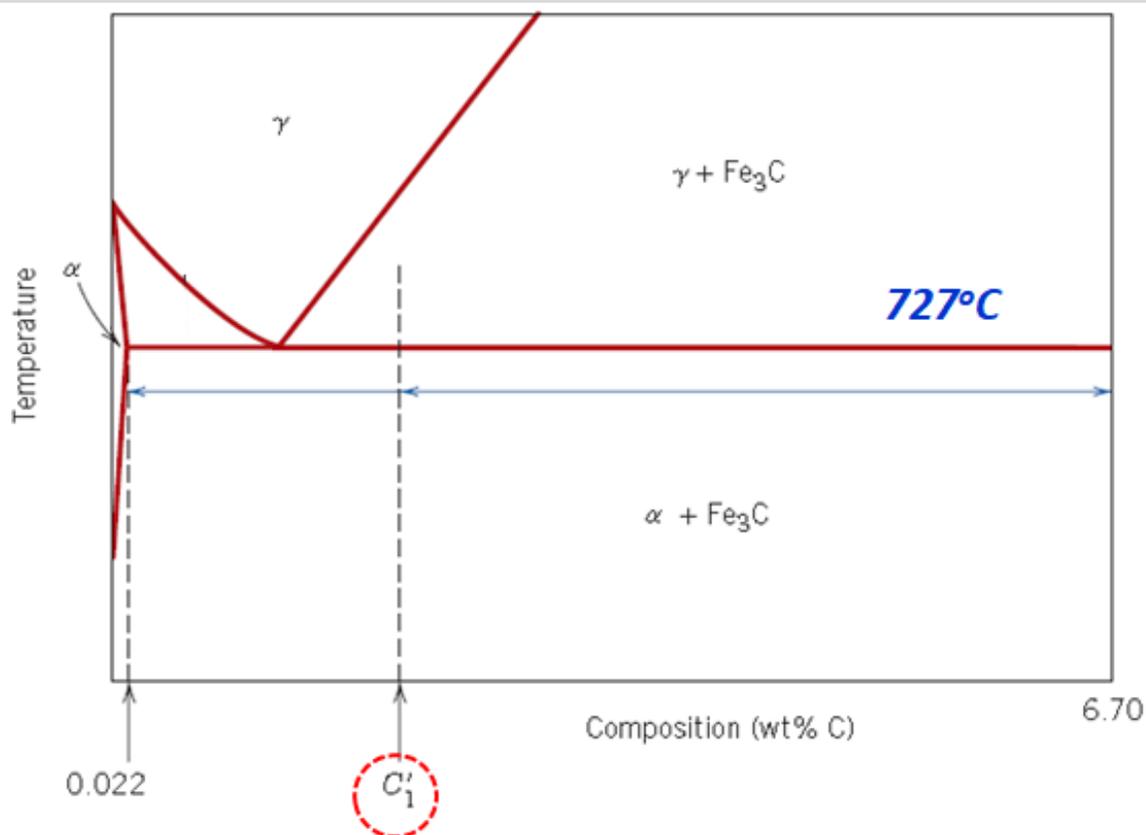
$$\%Fe_3C_{,proeutetóide} = \frac{1,00 - 0,76}{6,70 - 0,76} \times 100$$

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

a % γ (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°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

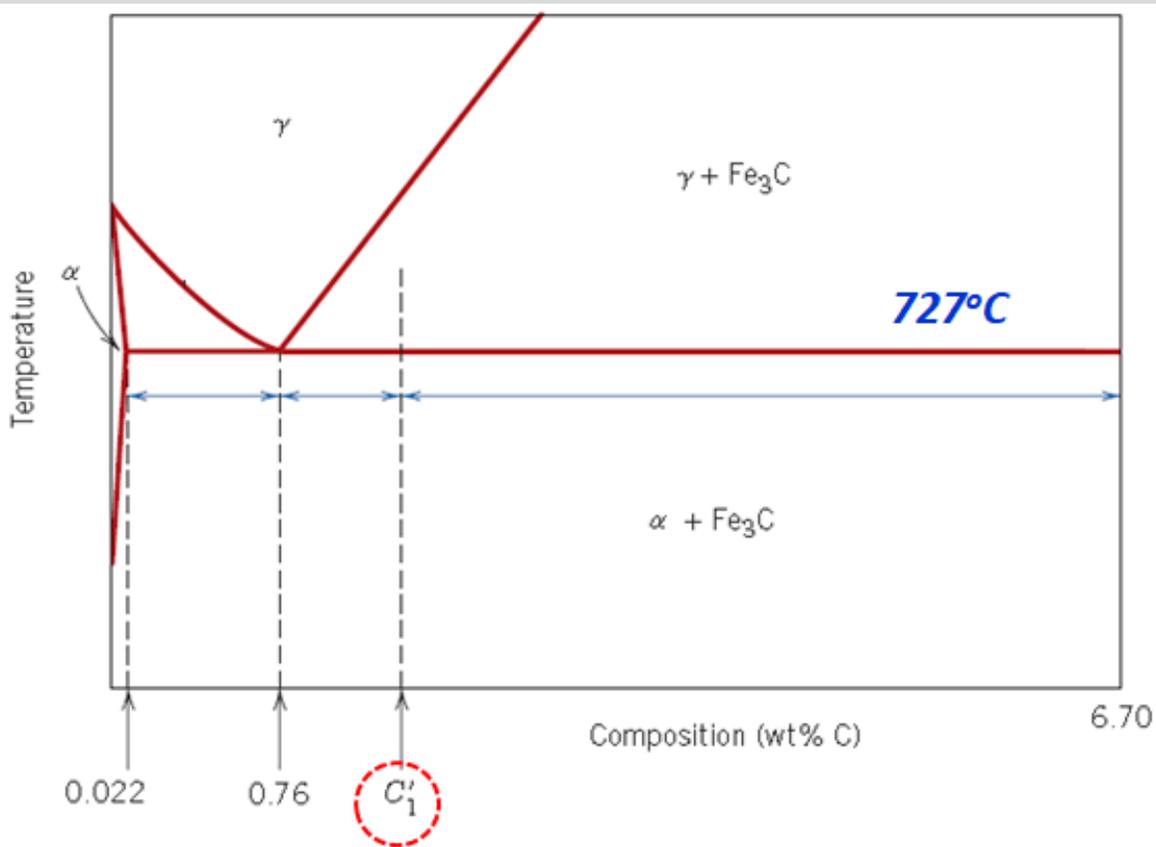
$$\%Fe_3C_{perlita} = \%Fe_3C_{TOTAL} - \%Fe_3C_{proeutetóide}$$

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 .