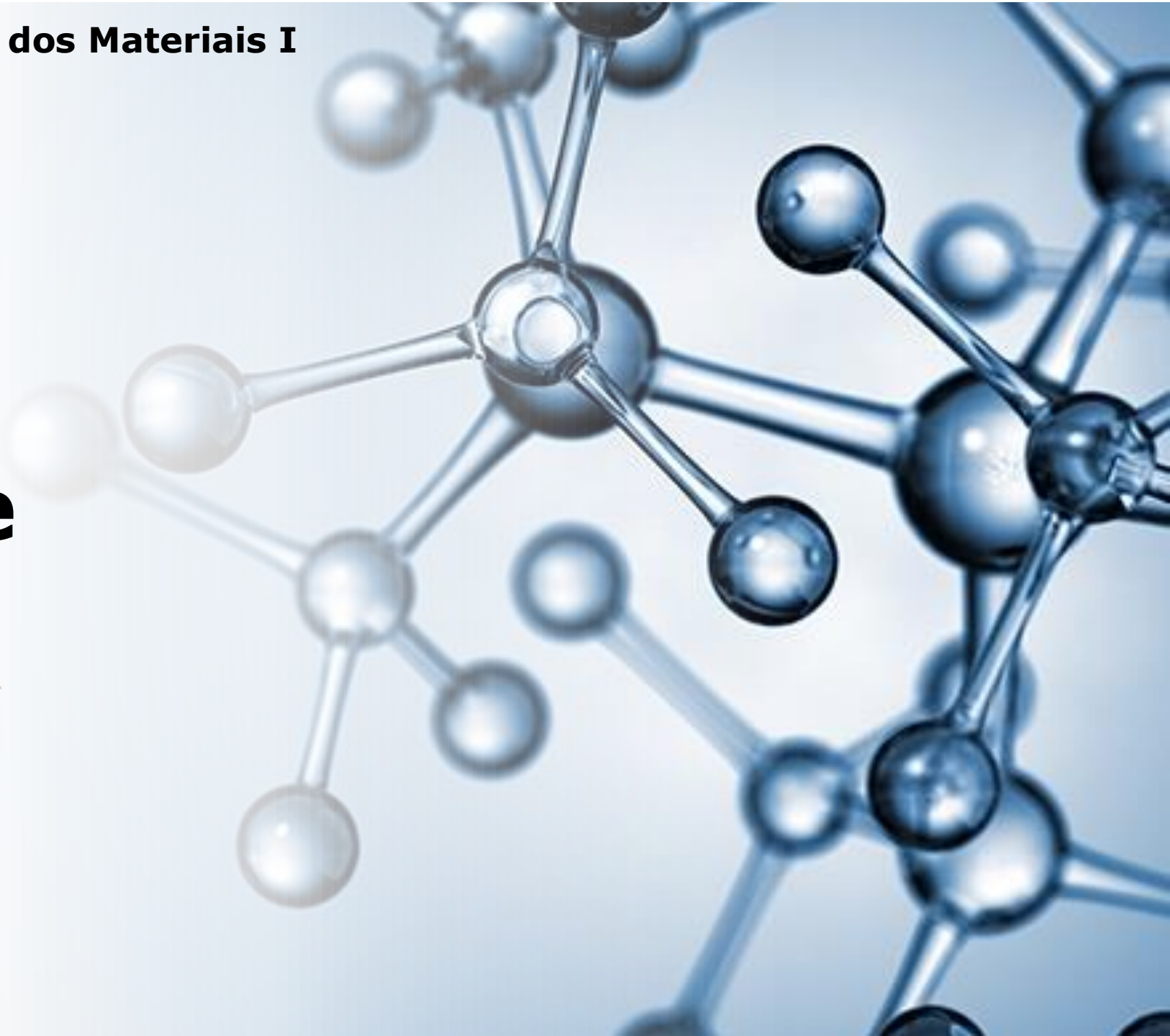


Aula 6: Diagrama de fases

Prof. Fernando Sabino

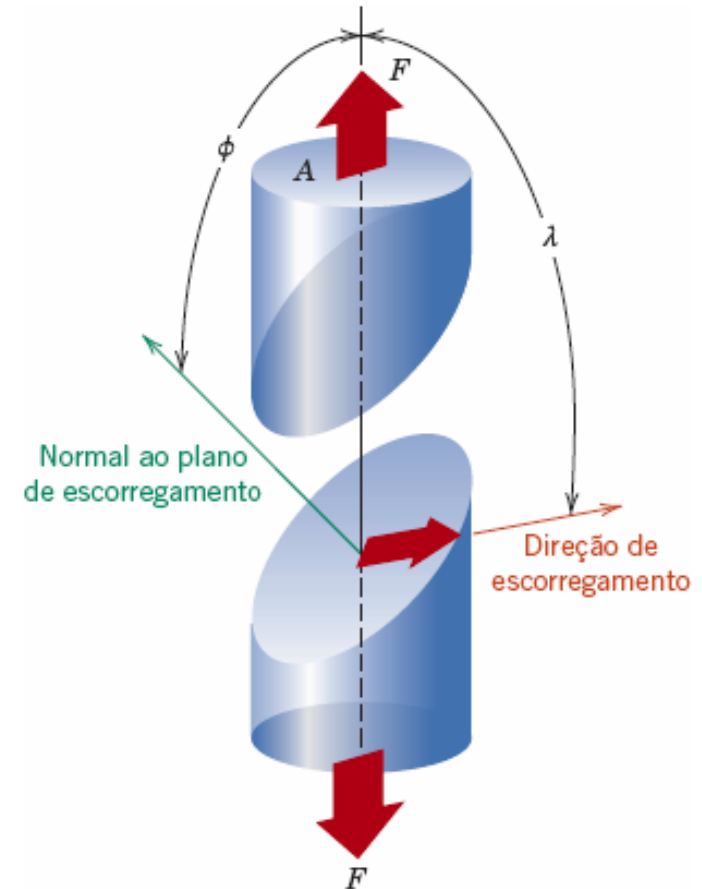
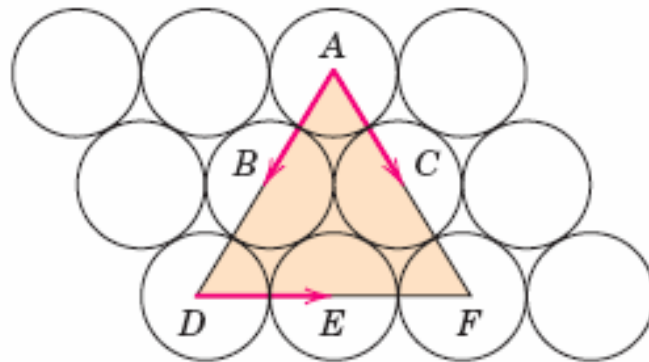
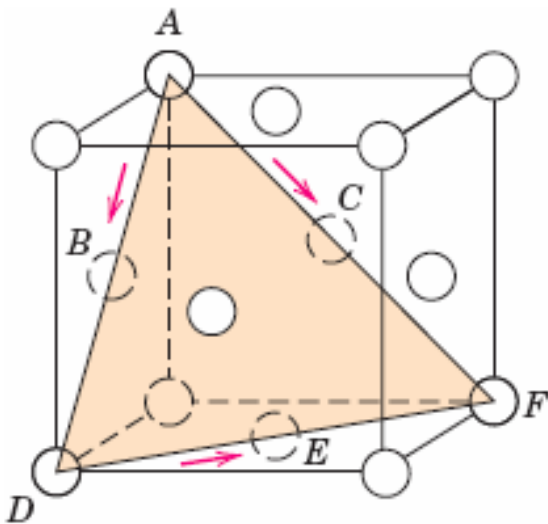
Email: fpsabino@usp.br



Última aula...

1. Discordância e deformação plástica

- I. Sistema de escorregamento (estrutura cristalina, planos e direção).
- II. Escorregamento em monocristais e policristais.
- III. Formação de macla.



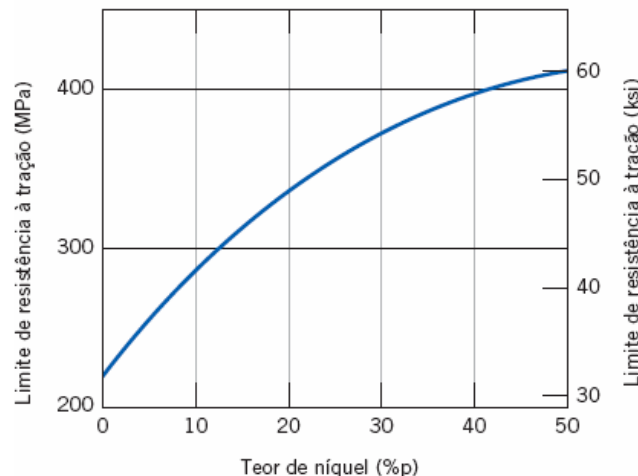
Última aula...

1. Discordância e deformação plástica

- I. Sistema de escorregamento (estrutura cristalina, planos e direção).
- II. Escorregamento em monocristais e policristais.
- III. Formação de macla.

2. Mecânismo de aumento de resistência em metais

- I. Variação nas propriedades mecânicas (limite de escoamento, limite de resistência a tração, ductilidade, encruamento).



Última aula...

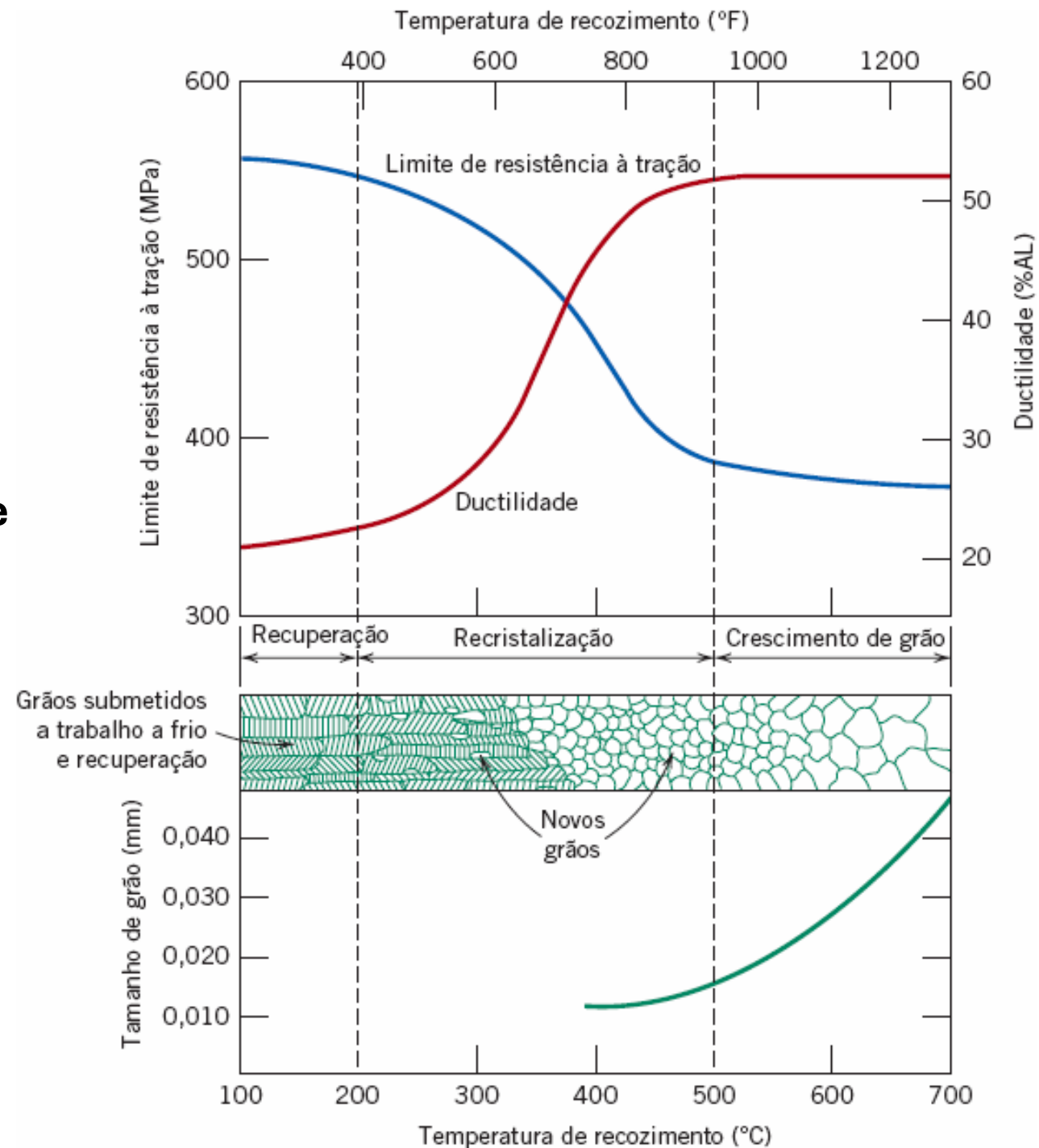
1. Discordância e deformação plástica

- I. Sistema de escorregamento (estrutura cristalina, planos e direção).
- II. Escorregamento em monocristais e policristais.
- III. Formação de macla.

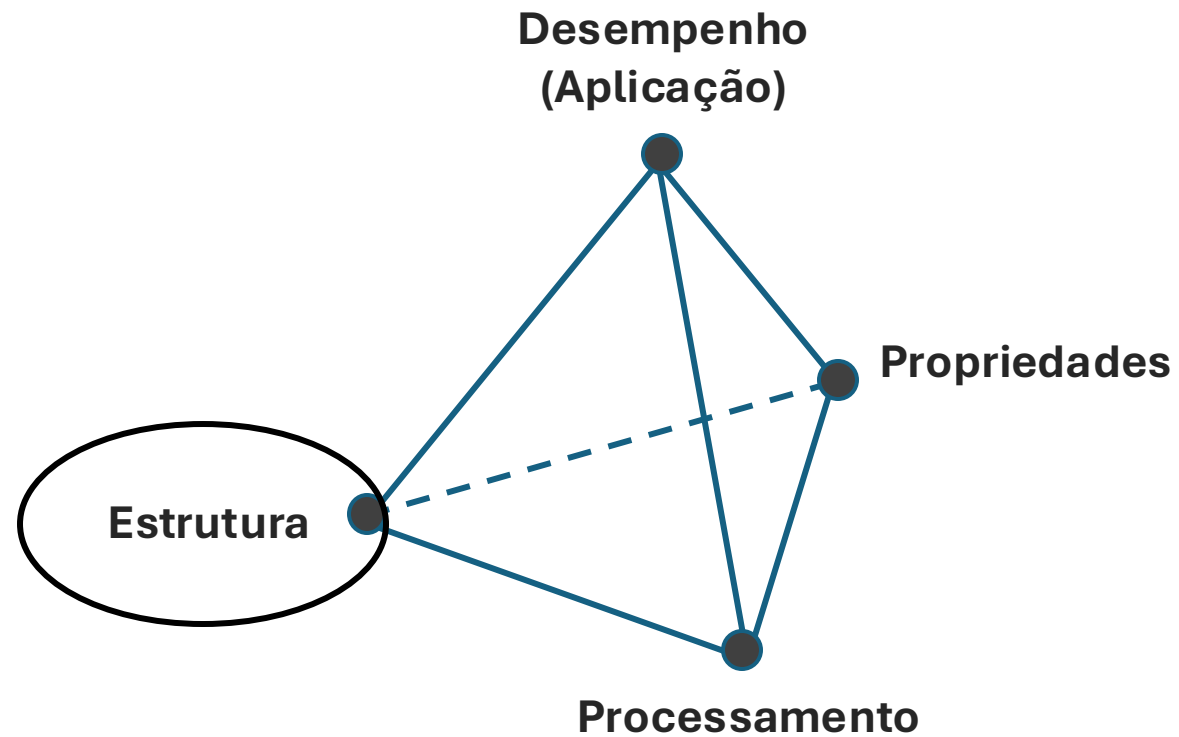
2. Mecanismo de aumento de resistência em metais

- I. Variação nas propriedades mecânicas (limite de escoamento, limite de resistência a tração, ductilidade, encruamento).

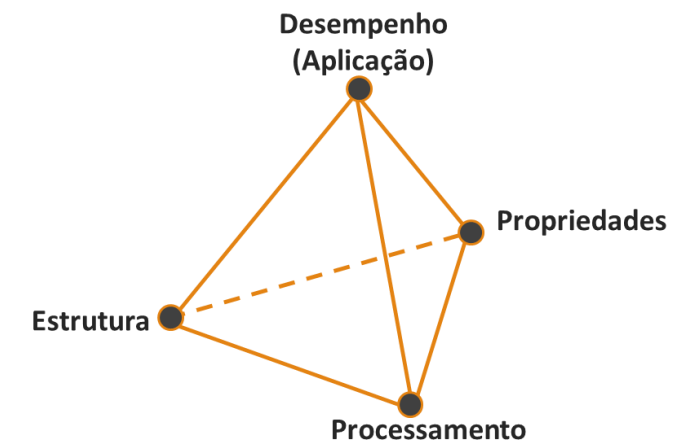
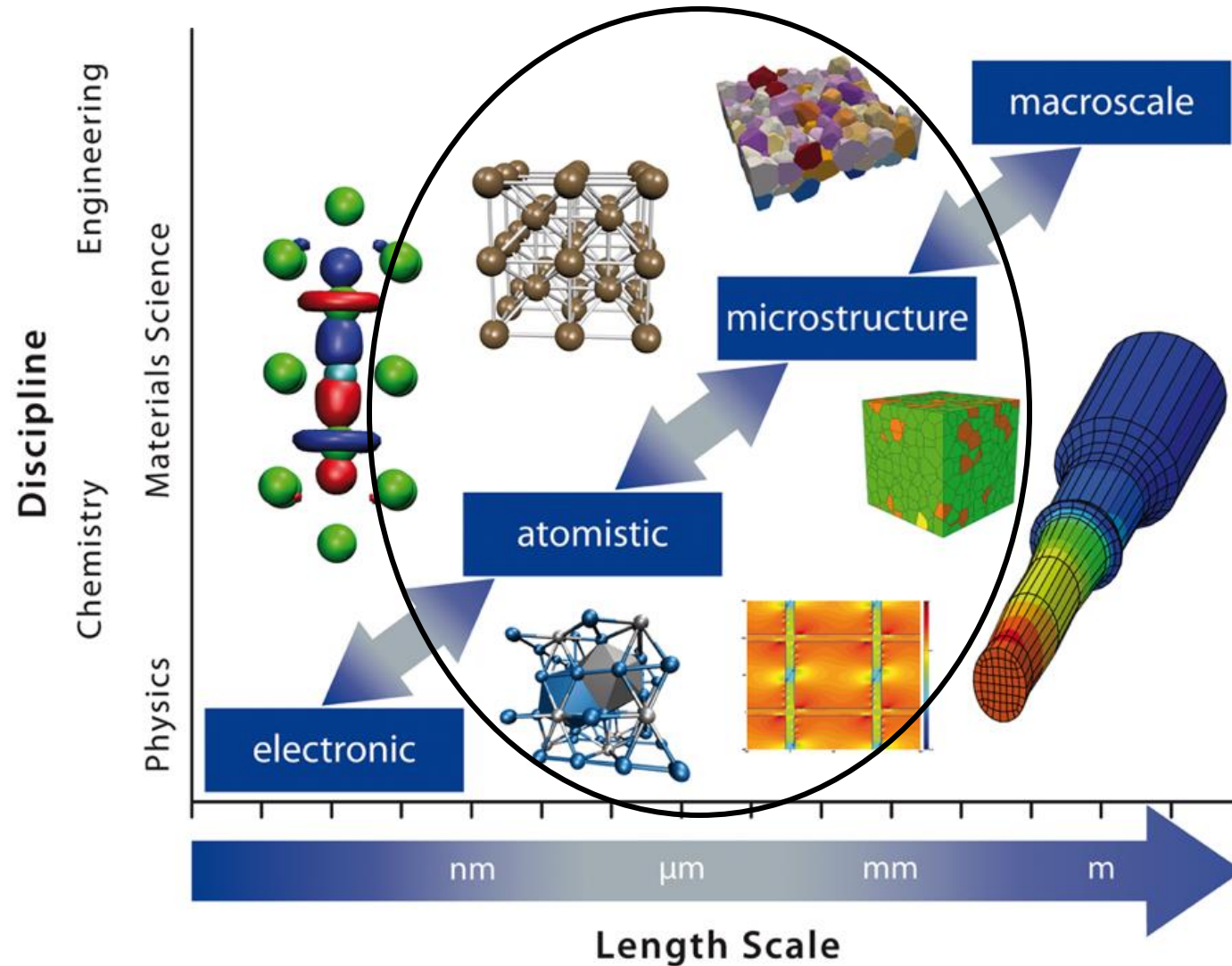
3. Recuperação, recristalização e crescimento de grão



Ciência dos materiais



Escalas em um Material



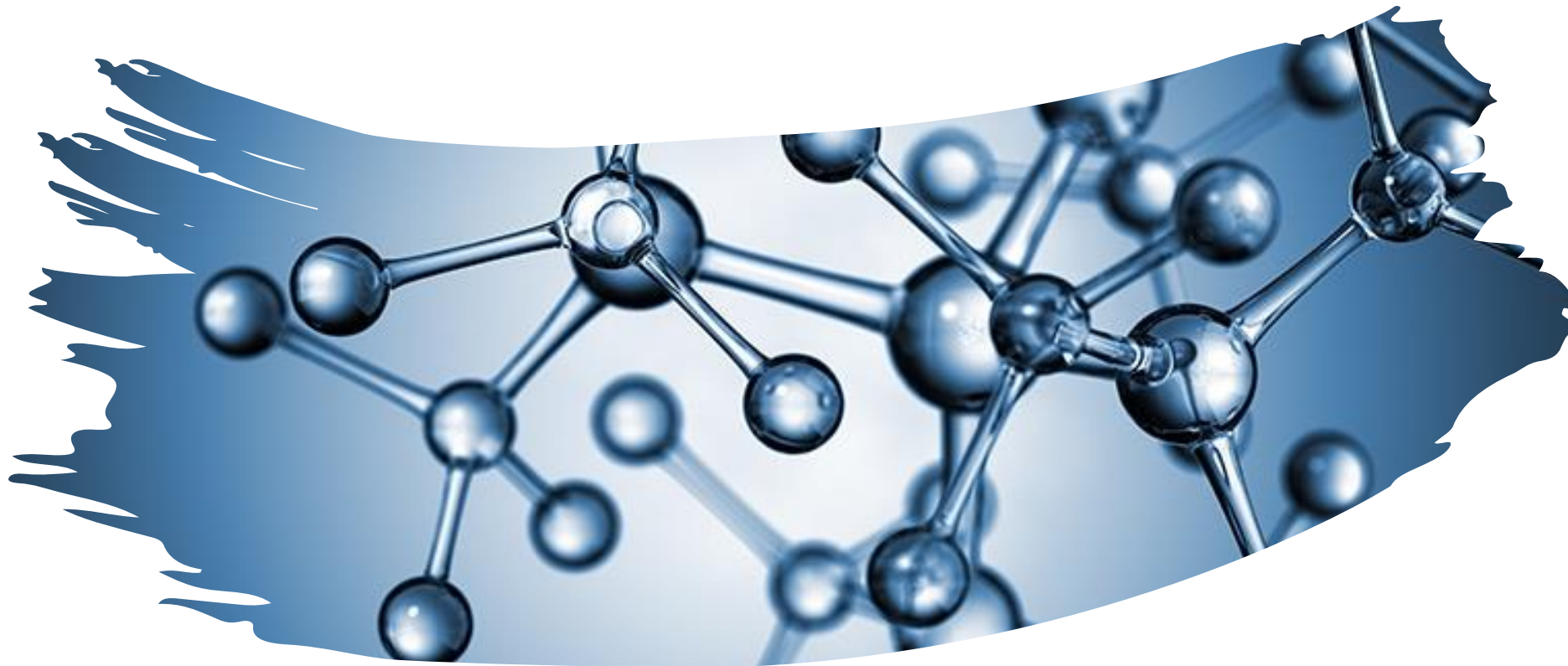
Aula de hoje

1. Definições e conceitos básicos

2. Diagramas de fases binário

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

3. Sistema Ferro-Carbono



1. Definição e conceitos

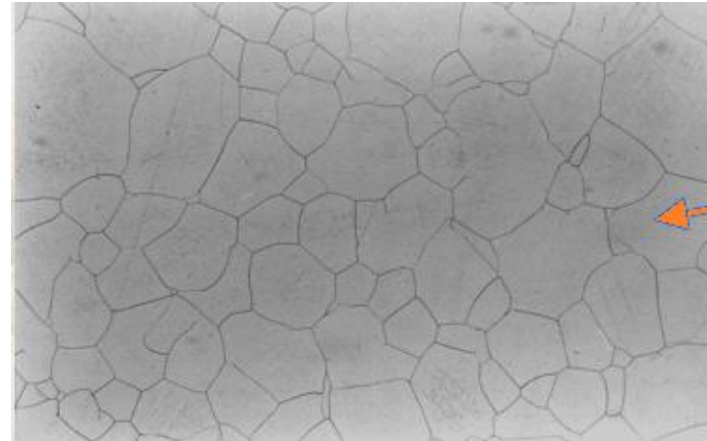
Definições e conceitos

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

Número de Fases em um Material

Material monofásico

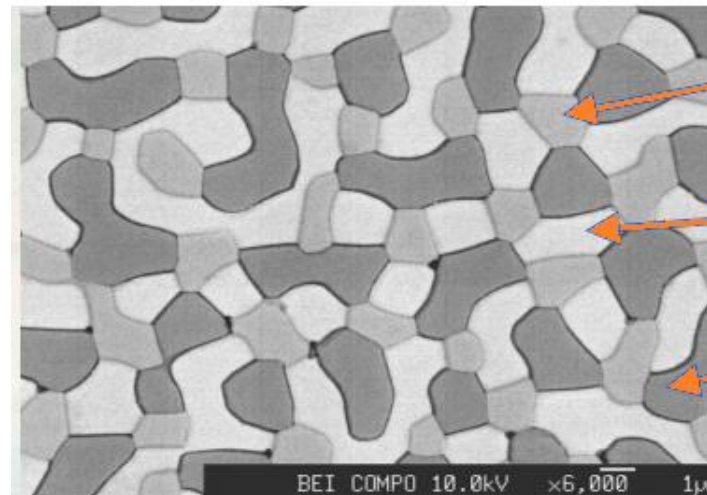
Exemplo: Aço inox autentico
(Liga do sistema Fe-Cr-Ni-C)



**Austenita
(CFC)**

Material polifásico

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



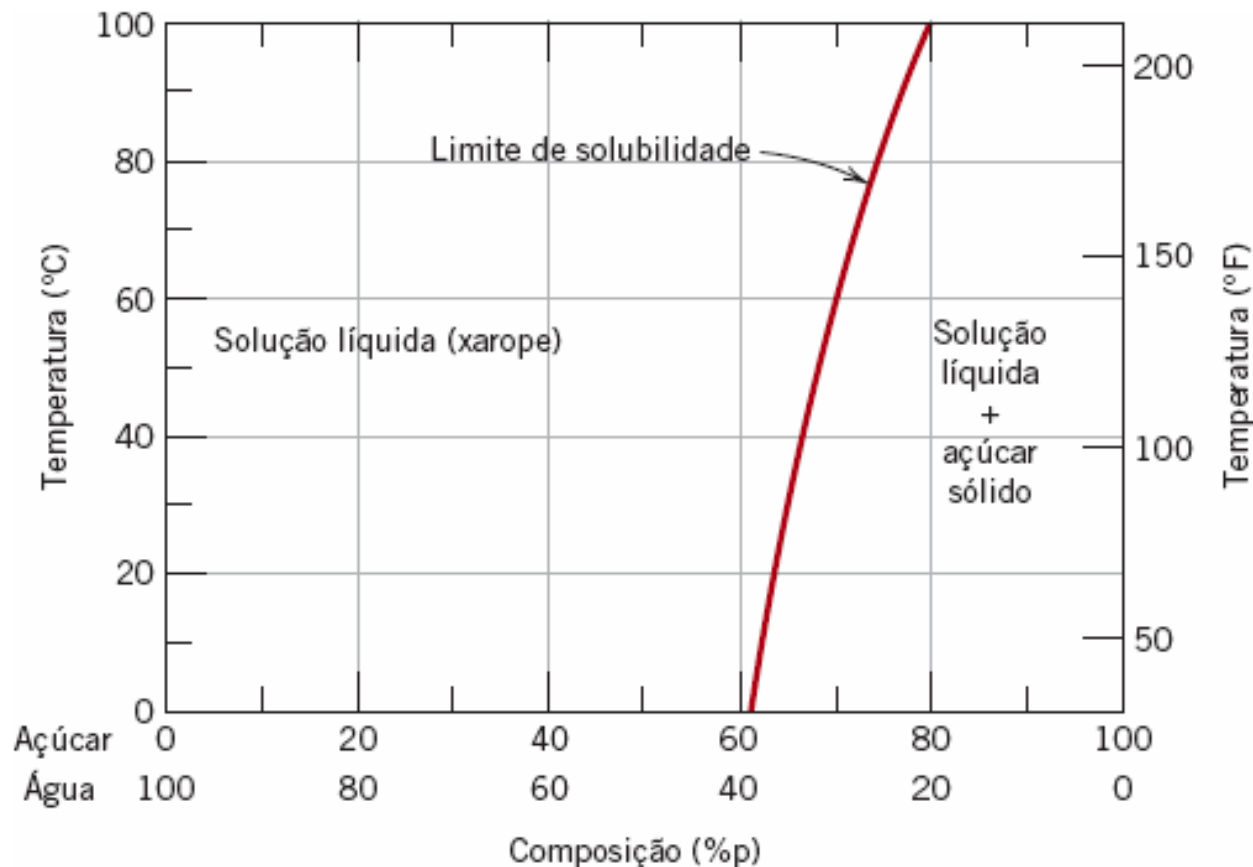
AlNbNi

Nb₂Al

Al₃Nb

Definições e conceitos

- **Limite de solubilidade:** Concentração máxima de átomos de soluto que pode se dissolver no solvente para formar uma solução.



- **Componentes:** H_2O e $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$
- **Fases:** Solução líquida (Xarope) e açúcar sólido.
- **Limite de solubilidade** varia com a **temperatura**, portanto, se alterarmos a temperatura, há uma alteração nas fração e na composição **das fases de equilíbrio**.

Definições e conceitos

- **Equilíbrio de fases:** Um sistema está em equilíbrio se sua energia livre de Gibbs está em um valor mínimo sob uma combinação específica de temperatura, pressão e composição. Quando um sistema está em equilíbrio ele não irá mudar com o tempo. Um sistema fora do equilíbrio irá mudar até atingir o estado de equilíbrio.

The diagram shows the equation for Gibbs free energy: $G = H - TS = U + PV - TS$. The terms are color-coded and labeled with arrows:

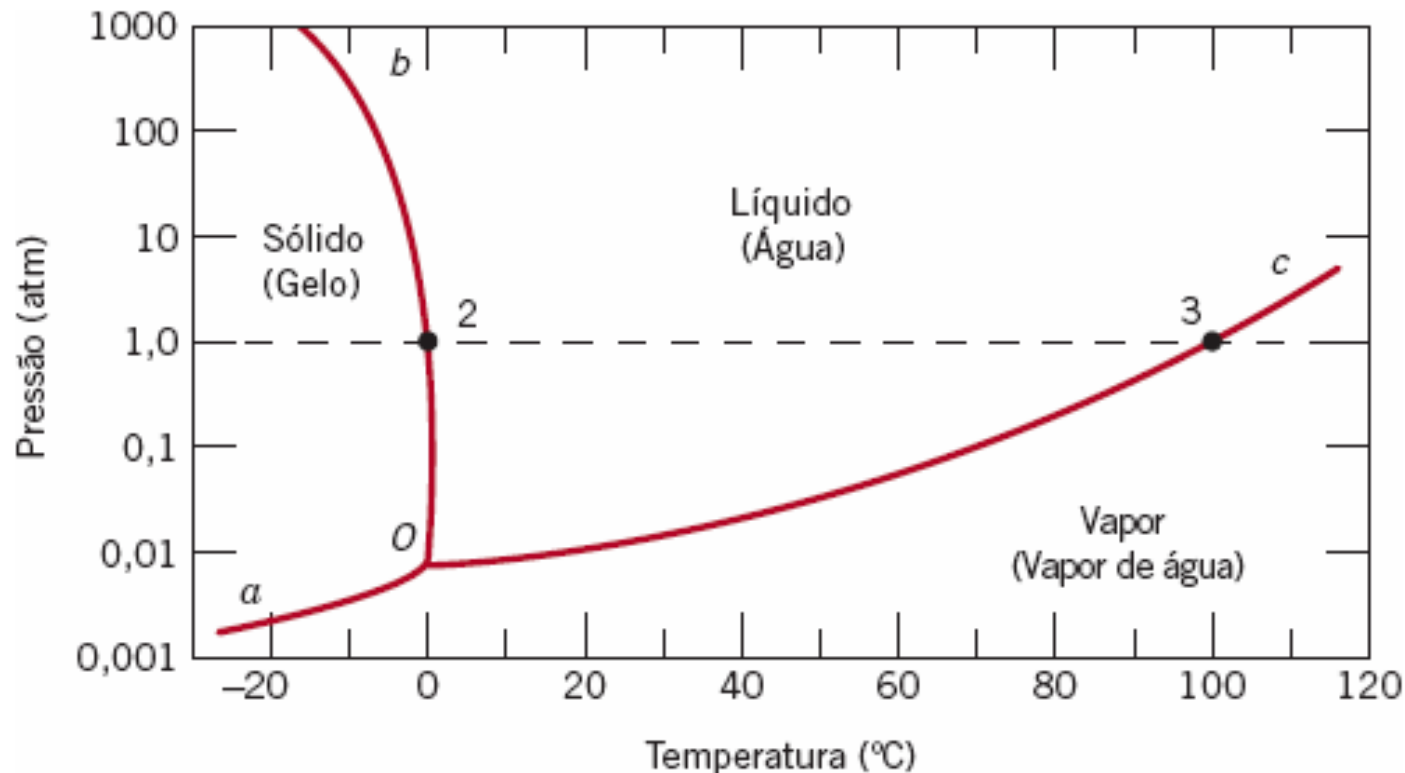
- G : Energia livre de Gibbs (black arrow)
- H : Entalpia de formação (red arrow)
- T : Temperatura (blue arrow)
- S : Entropia (green arrow)
- U : Energia interna (yellow arrow)
- P : Pressão (purple arrow)
- V : Volume (black arrow)

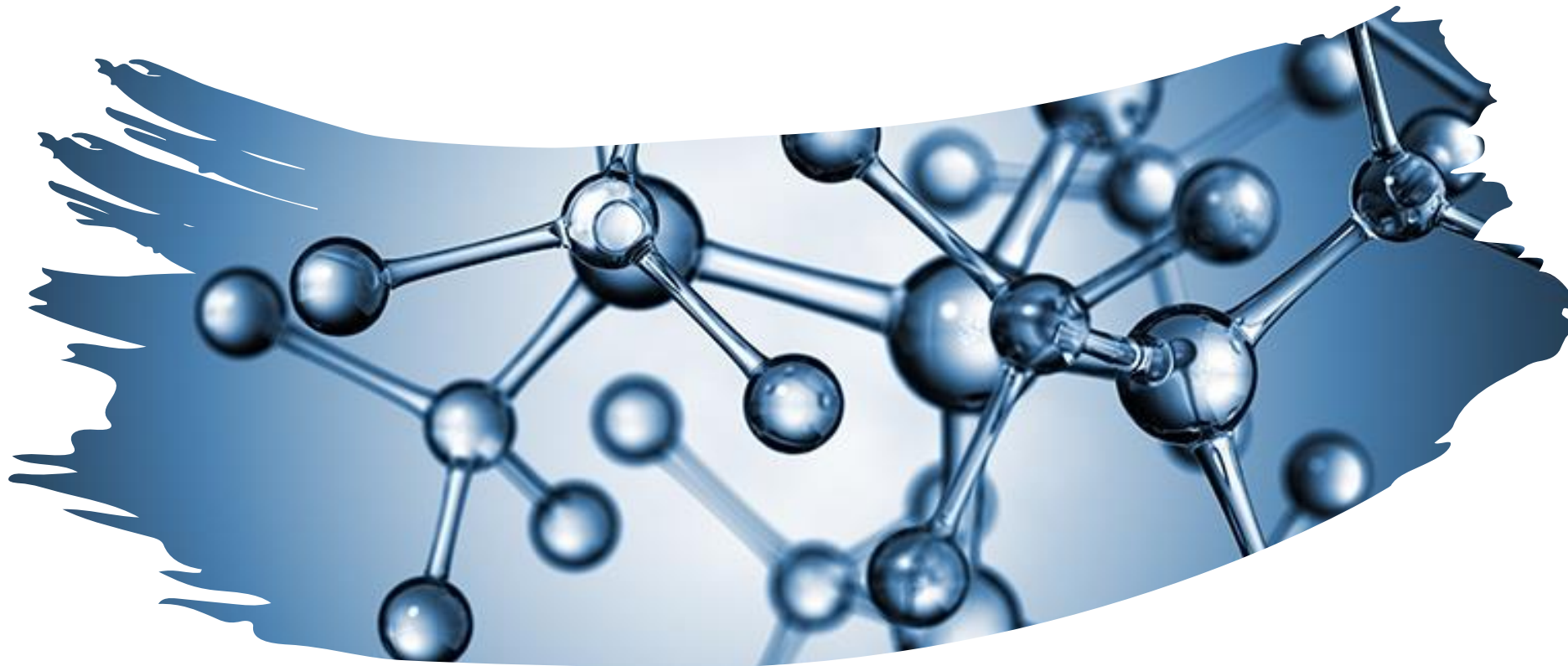
- **Diagramas de equilíbrio de fases:** Representação gráfica das fases presentes em um sistema de acordo com as condições de temperatura, composição e pressão.

Diagrama de fases de um componente (ou unário)

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

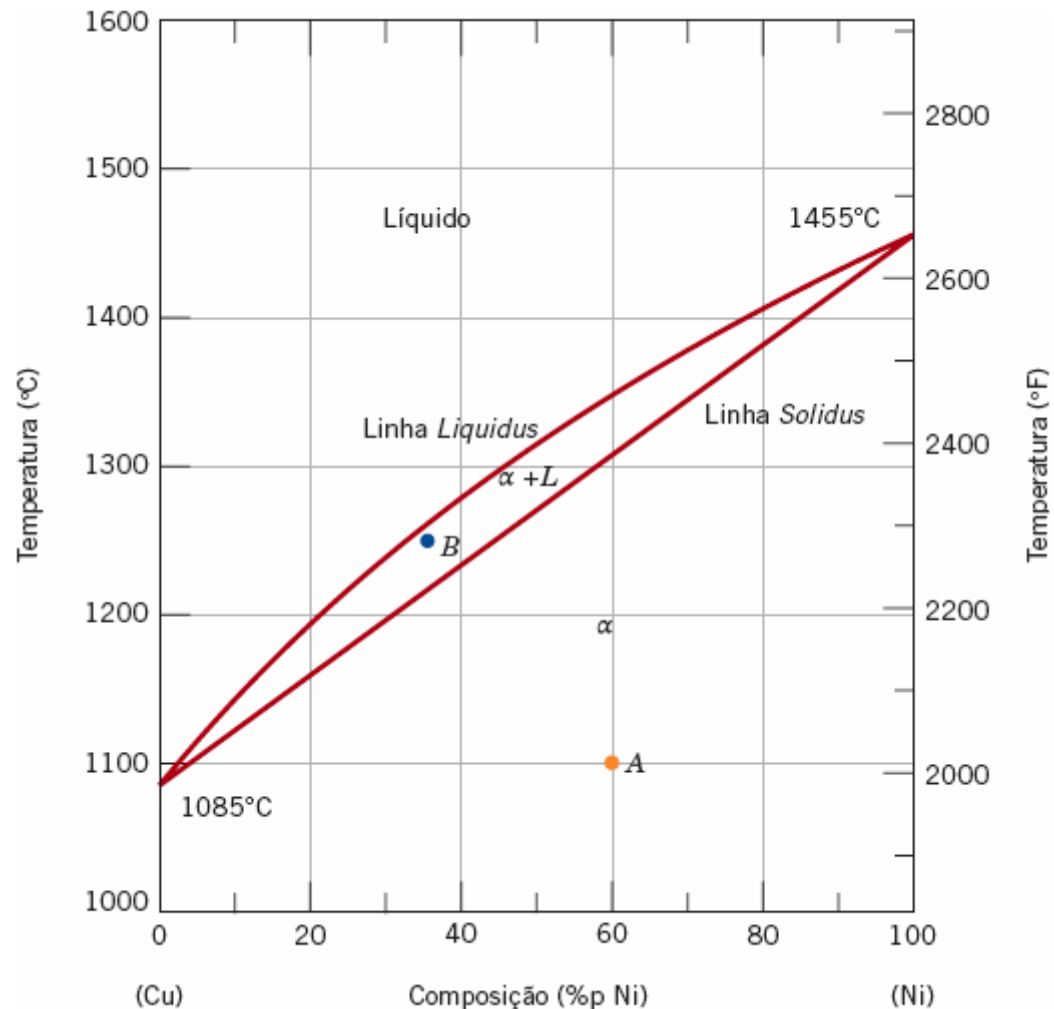
Diagramas que mostram as fases de equilíbrio em um material!





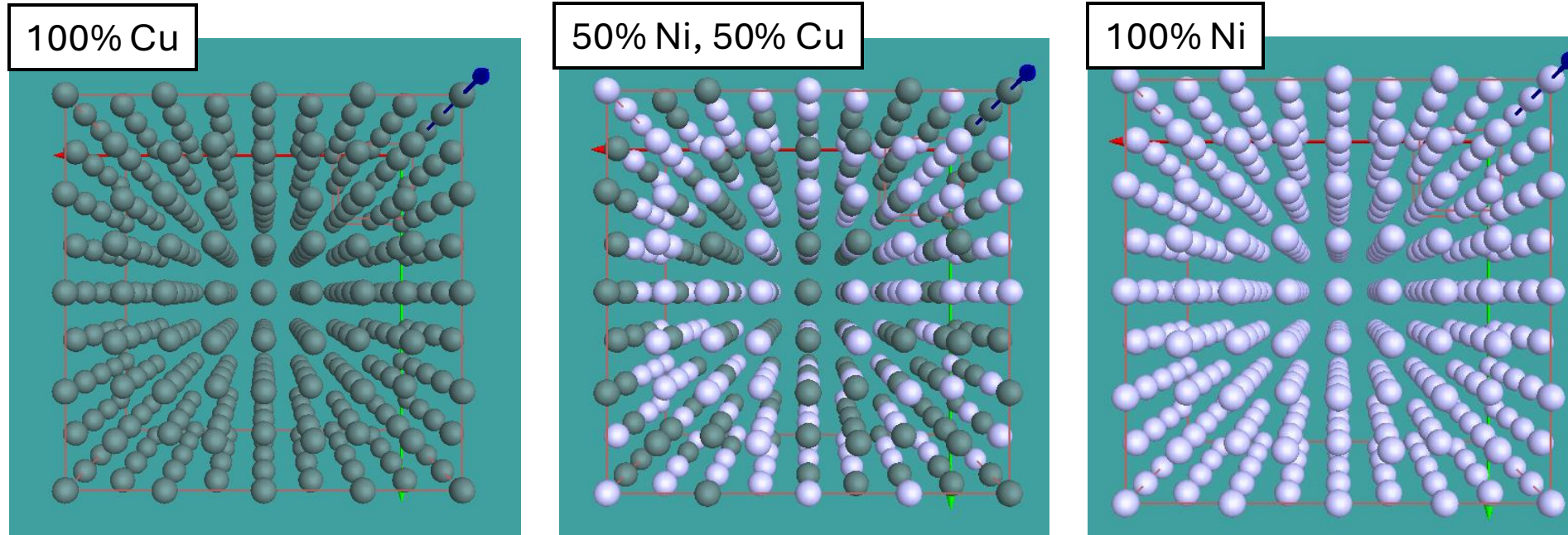
2. Diagrama de fases binários

Sistemas Isomorfos



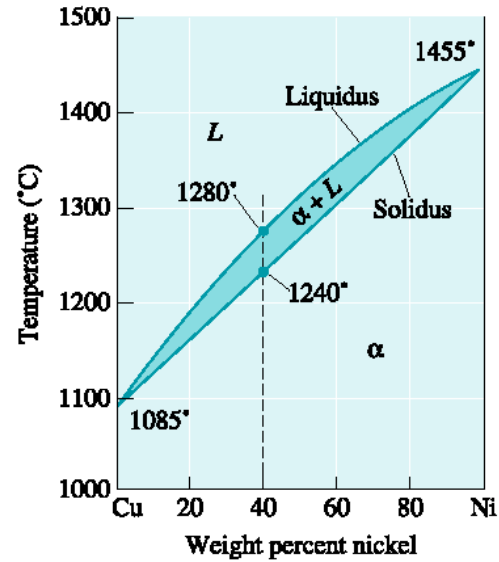
- **Diagramas binários:** Apenas dois componentes.
- Diagramas de fases são chamados **isomorfos** quando os dois componentes apresentam **solubilidade completa** nos estados líquido e sólido.
- **Exemplo:** Sistema Cu-Ni.
 - **Componentes:** Cu e Ni.
 - **Fases:** Líquido e α (solução sólida substitucional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

Estrutura Atômica da Solução Sólida

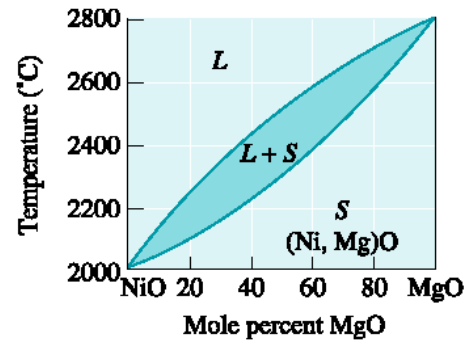


- Mesma estrutura para todas as composições
- Átomos ocupam as posições atômicas de forma aleatória

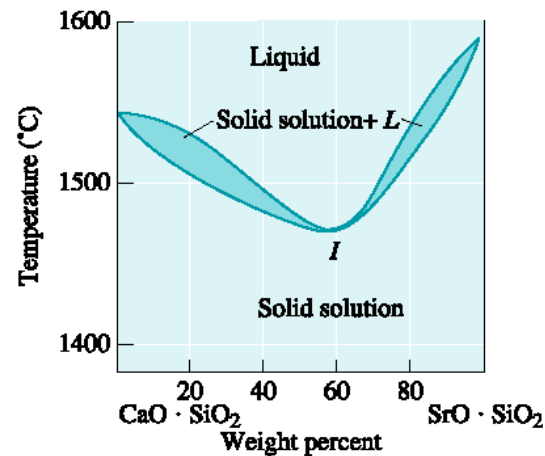
Informações fornecidas por um diagrama de fase



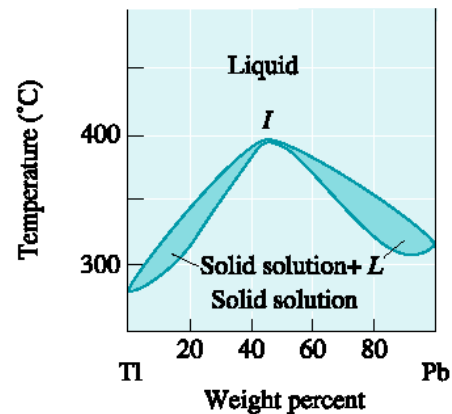
(a)



(b)



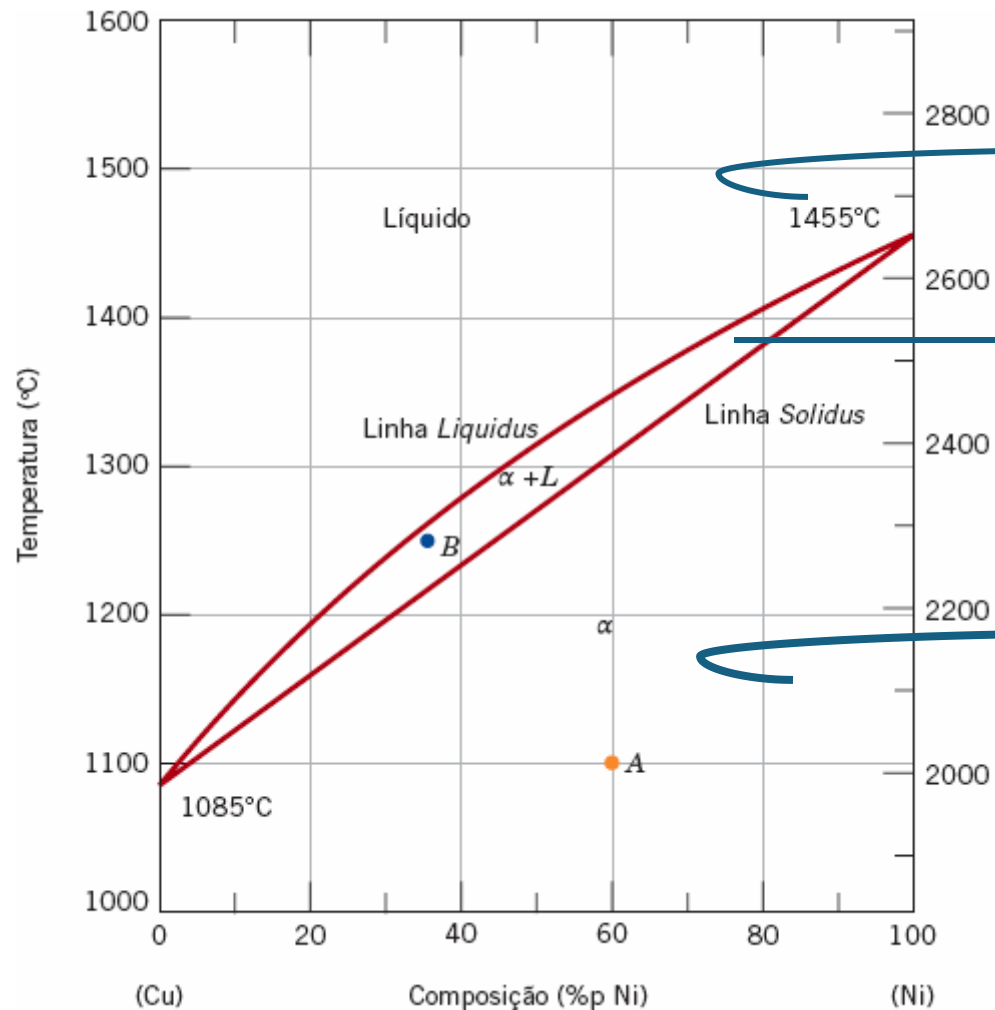
(c)



(d)

- Temperatura de fusão;
- Fases presentes em função da temperatura;
- Composição química das fases;
- Proporção das fases;
- Limite de Solubilidade;
- Distribuição de fases.

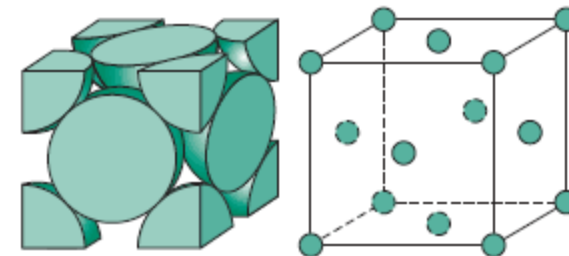
Interpretação do diagrama de fase



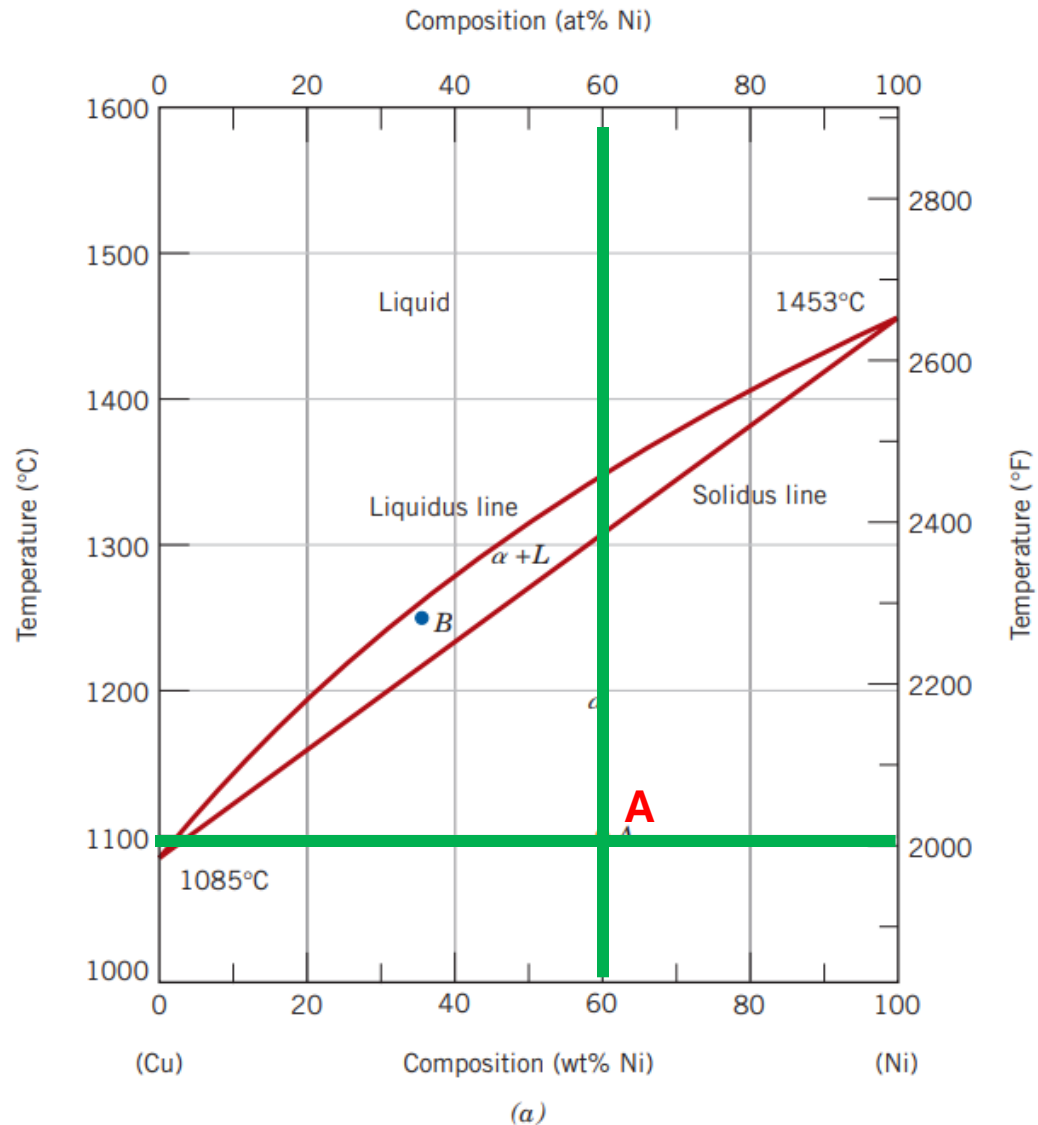
Região 1: solução líquida homogênea de Cu e Ni.

Região 3: região bifásica contendo fase L e α .

Região 2: solução sólida substitucional de Cu e Ni.



Interpretação do diagrama de fase



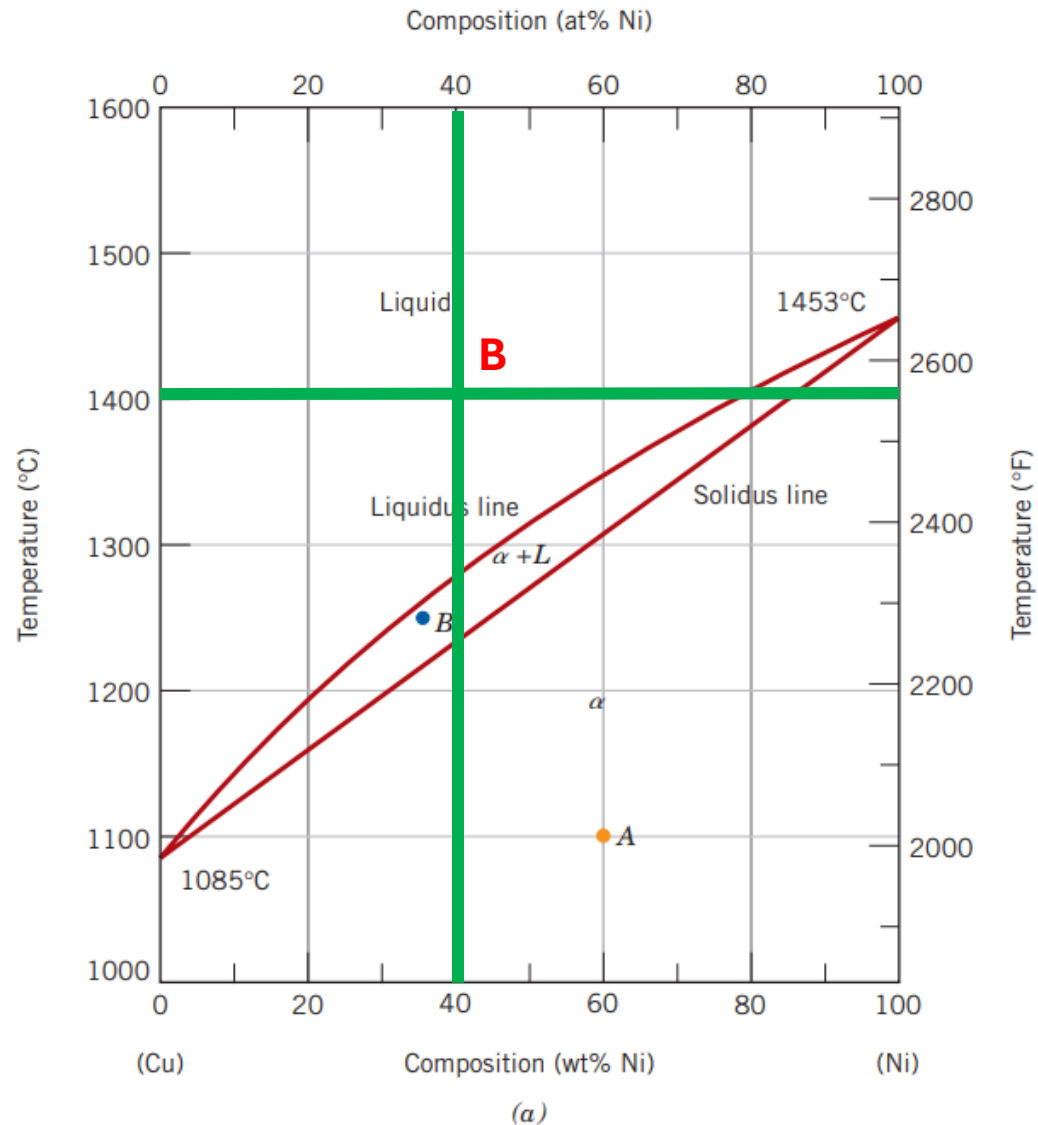
Ponto A: $T = 1100^{\circ}\text{C}$, 60%Ni e 40%Cu

Fase presente: Sólida (α)

Composição da fase: α

Proporção das fases: 100% α

Interpretação do diagrama de fase



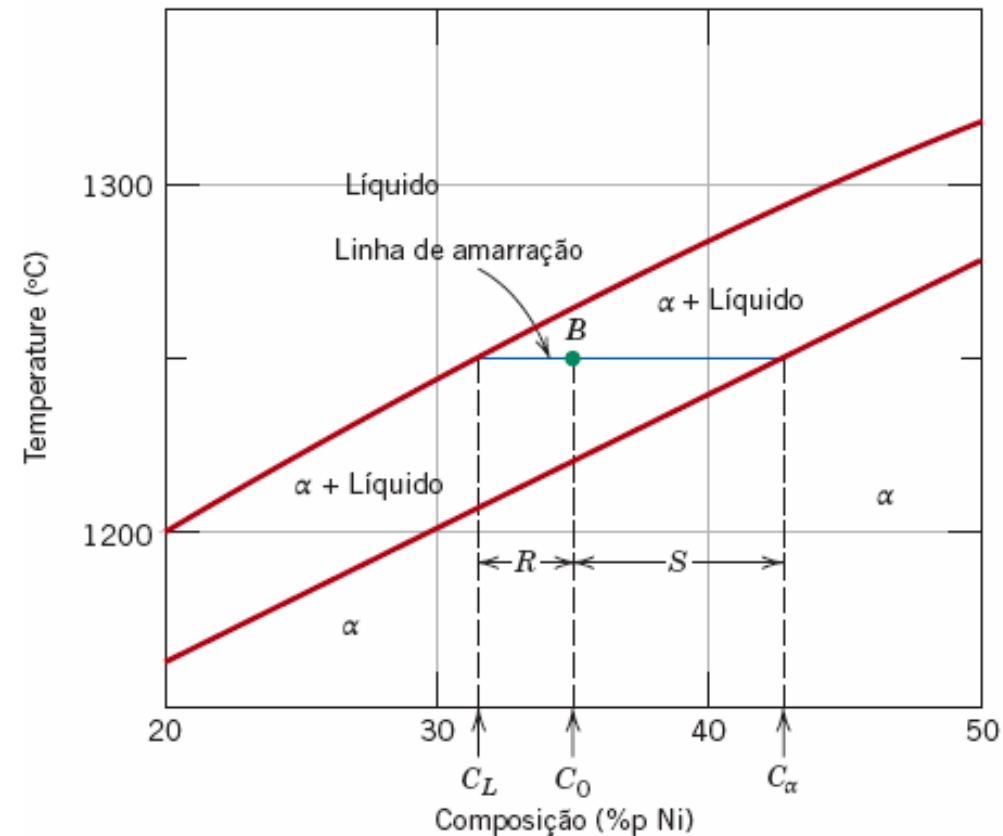
Ponto B: $T = 1400^{\circ}\text{C}$, 40%Ni e 60%Cu

Fase presente: Líquida (L)

Composição da fase: L

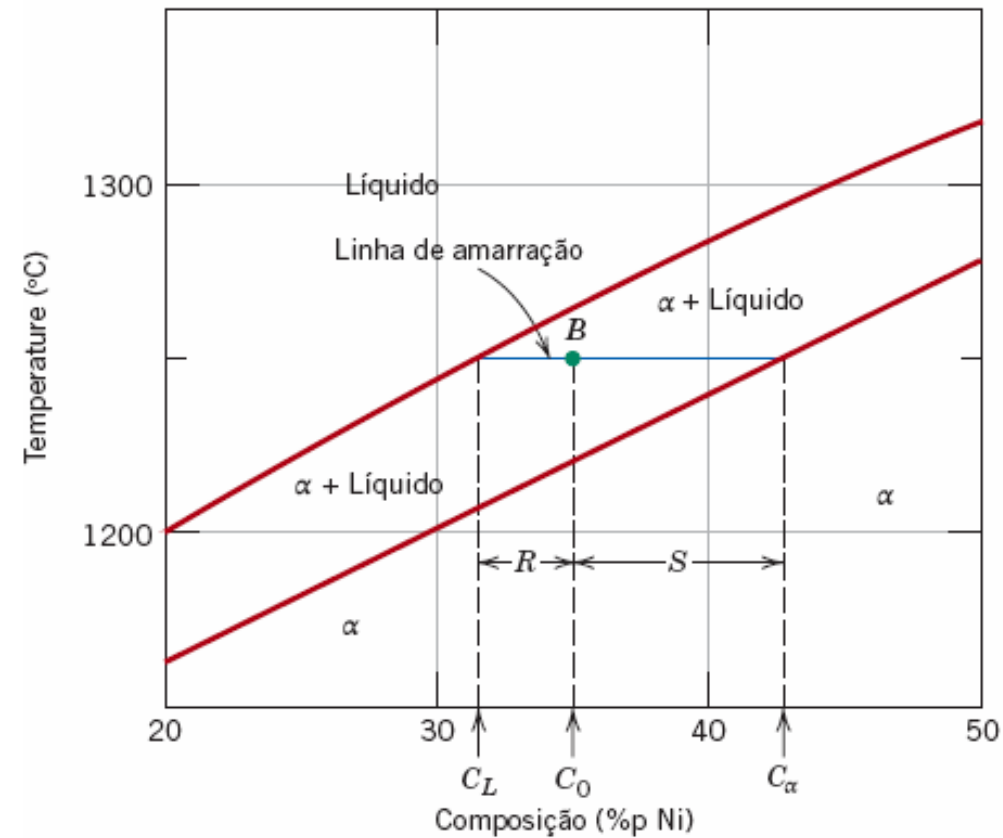
Proporção das fases: 100% L

Regra da alavanca



1. A linha de amarração ou isoterma é construída através da região bifásica na temperatura da liga;
2. A composição global da liga é localizada sobre a linha de amarração;
3. A fração de uma fase é calculada tomando-se o comprimento da linha de amarração desde a composição global da liga até a fronteira entre fases com a outra fase e então divide-se esse valor pelo comprimento total da linha de amarração

Regra da alavanca



C_0 : composição da liga $\longrightarrow C_0$: 35%p Ni, 65%p Cu

C_α : composição da fase α $\longrightarrow C_\alpha \rightarrow 42,5\% \text{p Ni}, 57,5\% \text{p Cu}$

C_L : composição do líquido $\longrightarrow C_L \rightarrow 31,5\% \text{p Ni}, 68,5\% \text{p Cu}$

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



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

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

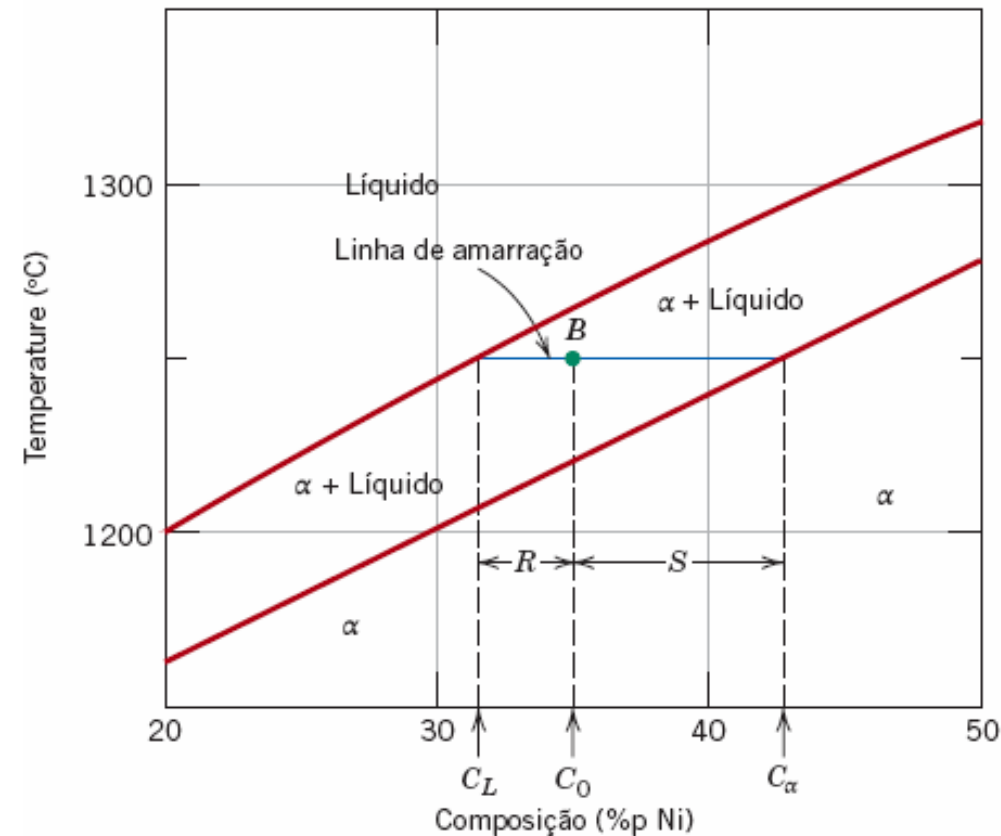


$$W_\alpha = \frac{C_\alpha - C_0}{C_\alpha - C_L}$$

Regra da alavanca

- **Determinação das quantidade de fases**

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



Fração de líquido

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

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

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

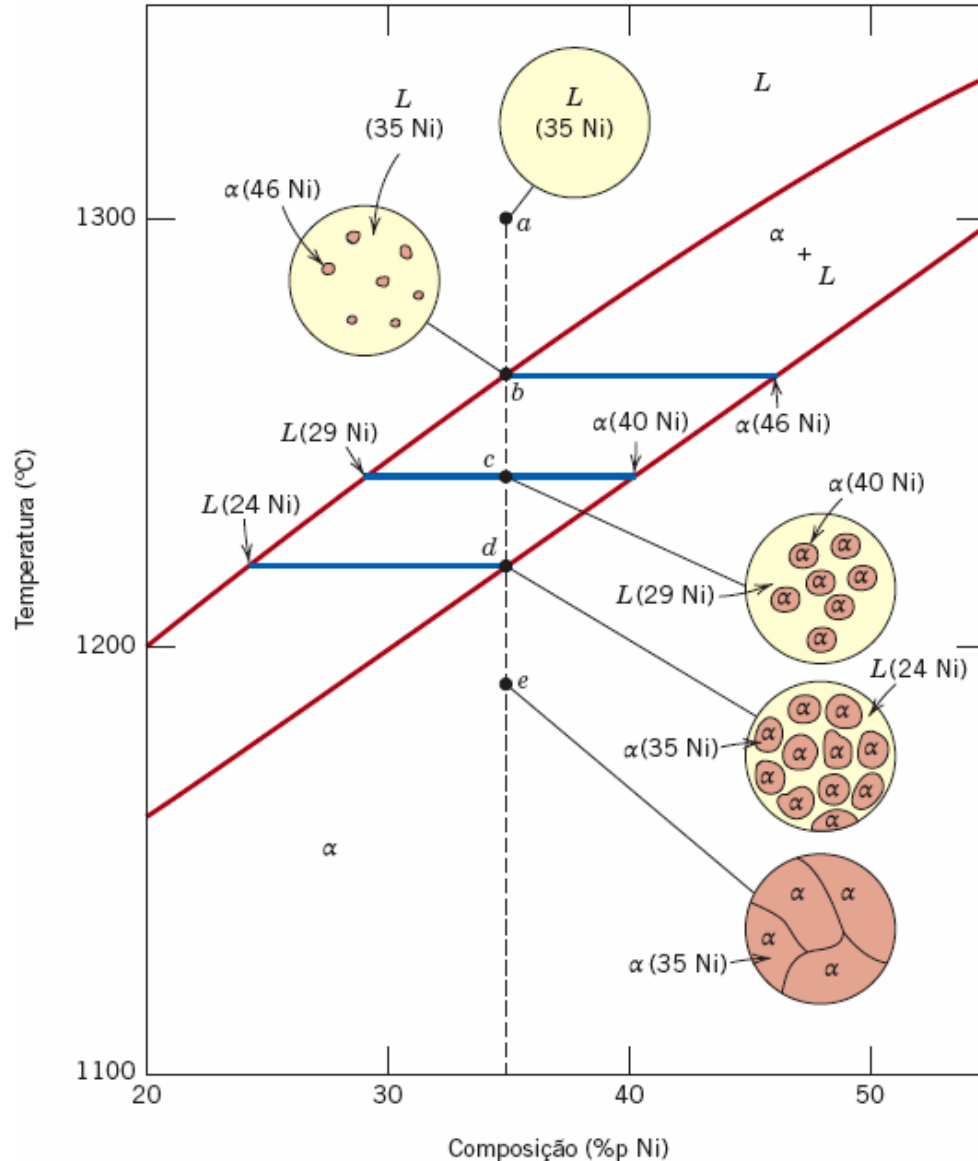
Fração de sólido

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

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

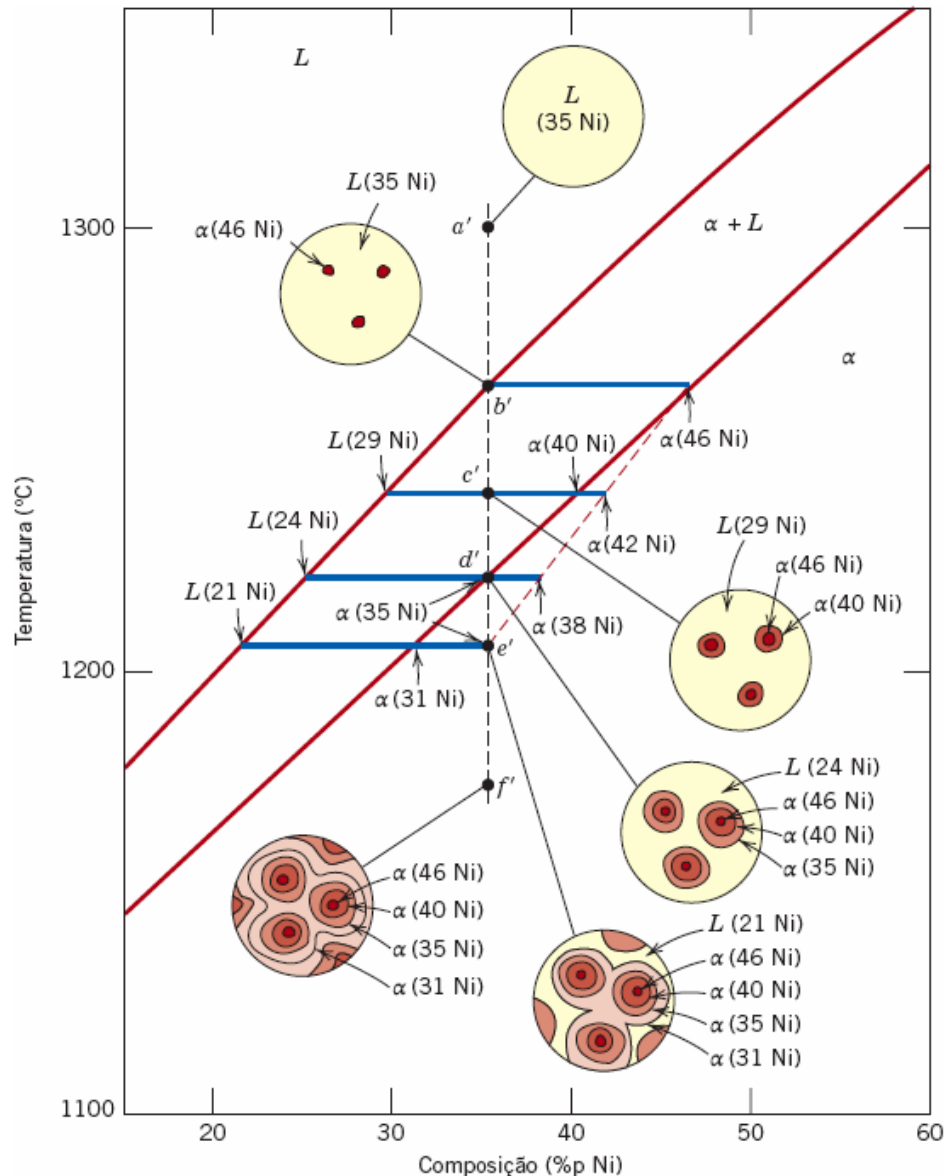
$$= \frac{35 - 31,5}{42,5 - 31,5} = 0,32$$

Formação de Morfologia



- Liga de interesse: 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 *liquidus* 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.

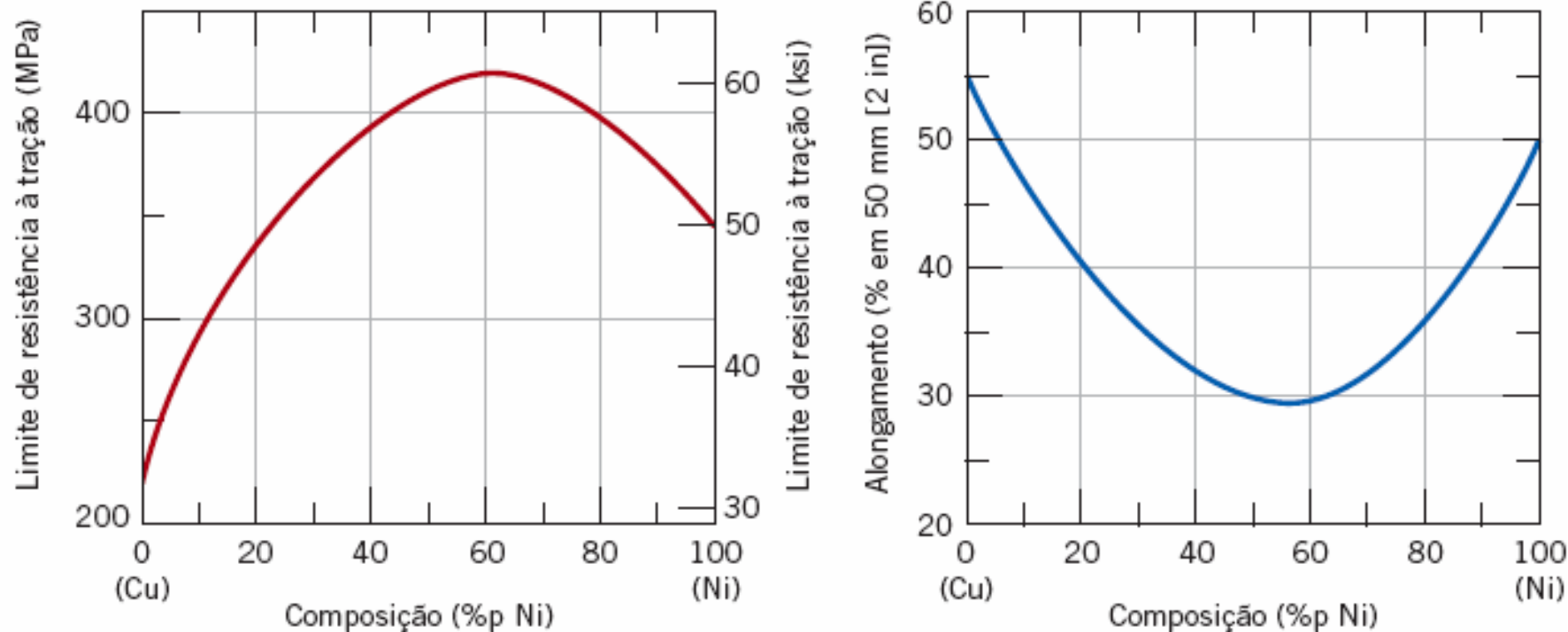
Formação de Morfologia: Resfriamento Fora do equilíbrio



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

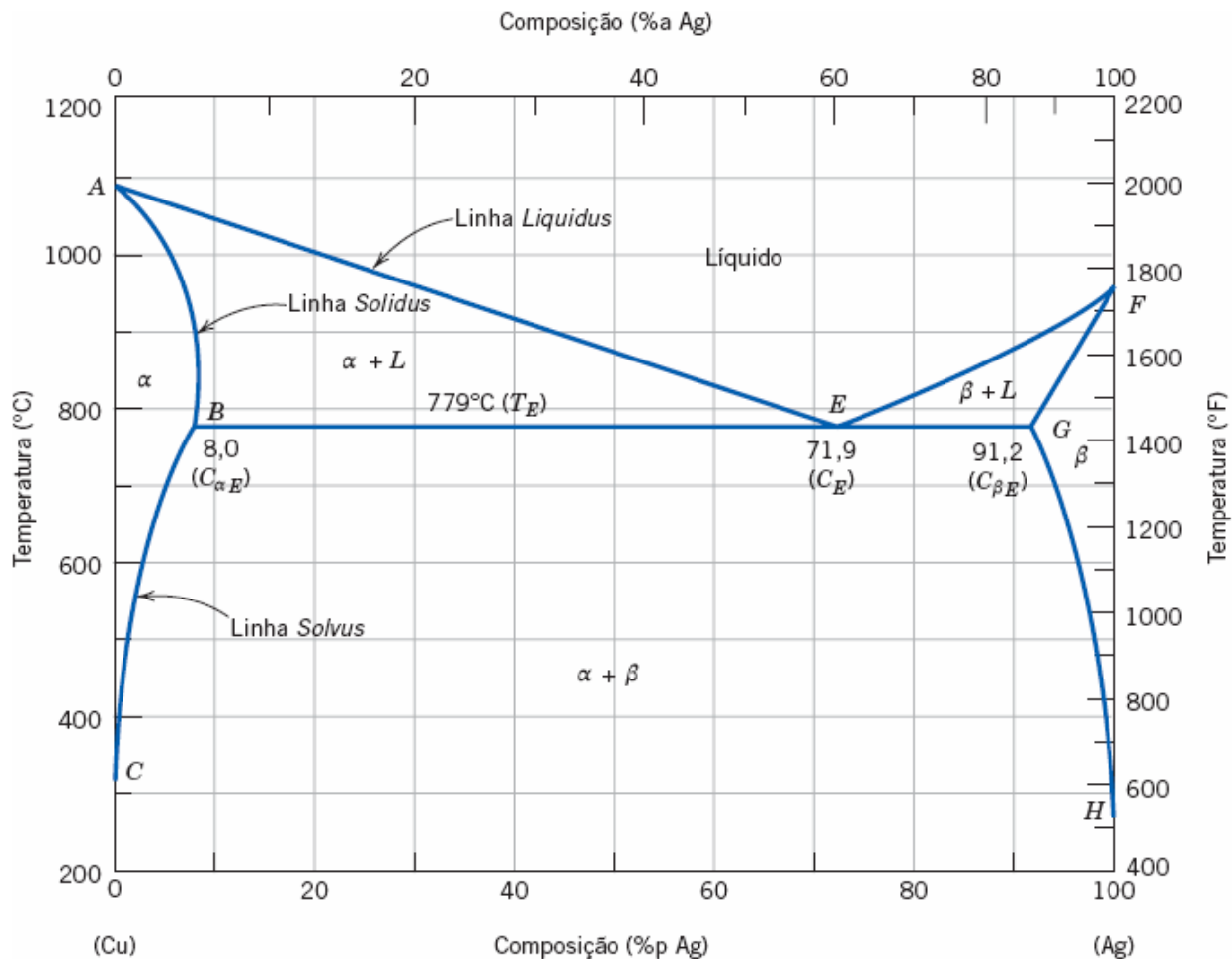
Propriedades mecânicas das ligas isomorfas

- As propriedades mecânicas das ligas isomorfas sólidas são afetadas pela composição.



Para o sistema Cu-Ni, (a) o limite de resistência à tração em função da composição, (b) a ductilidade (AL%) em função da composição à temperatura ambiente. Existe uma solução sólida para todas as composições nesse sistema.

Sistemas eutéticos binários



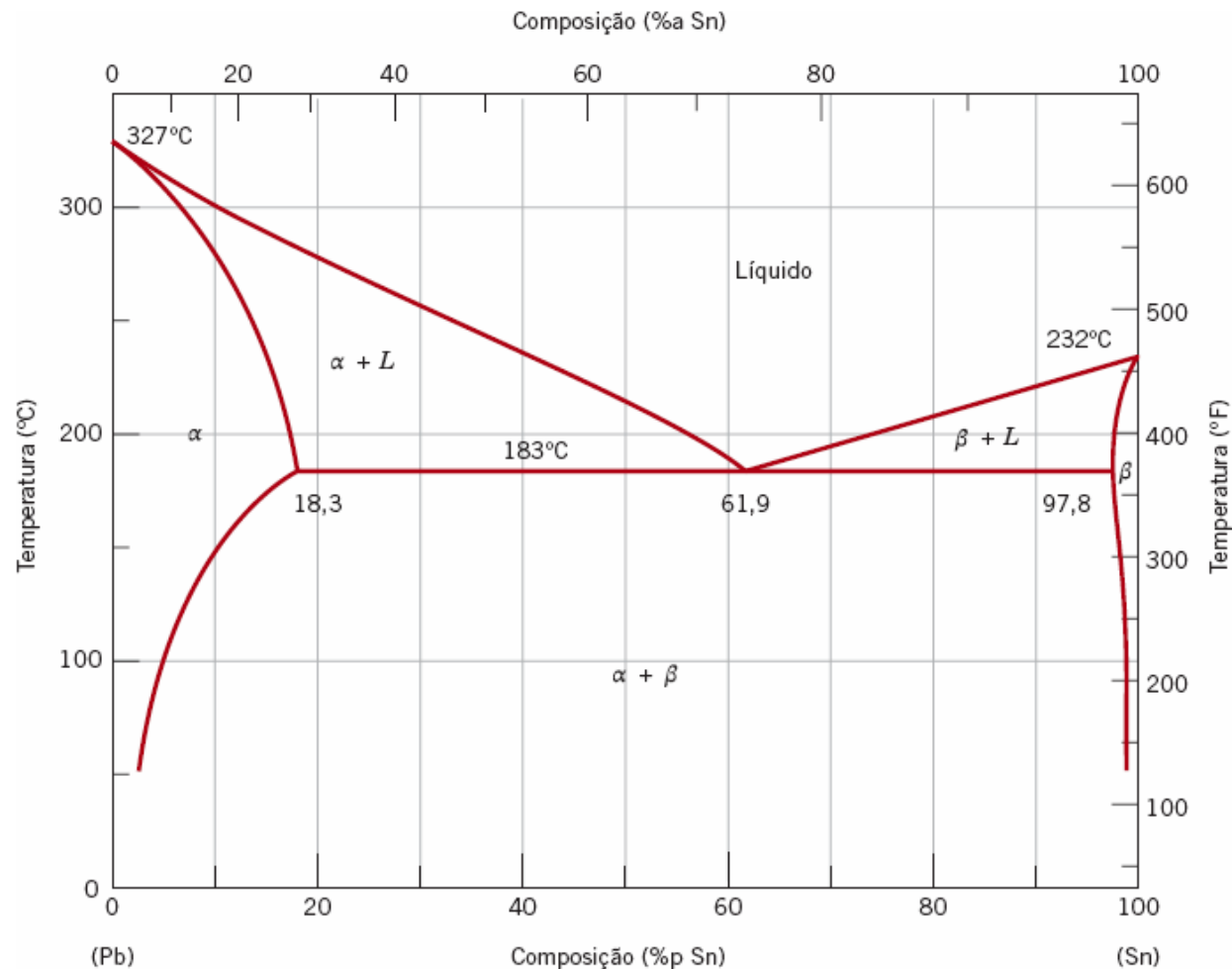
Reação eutética:



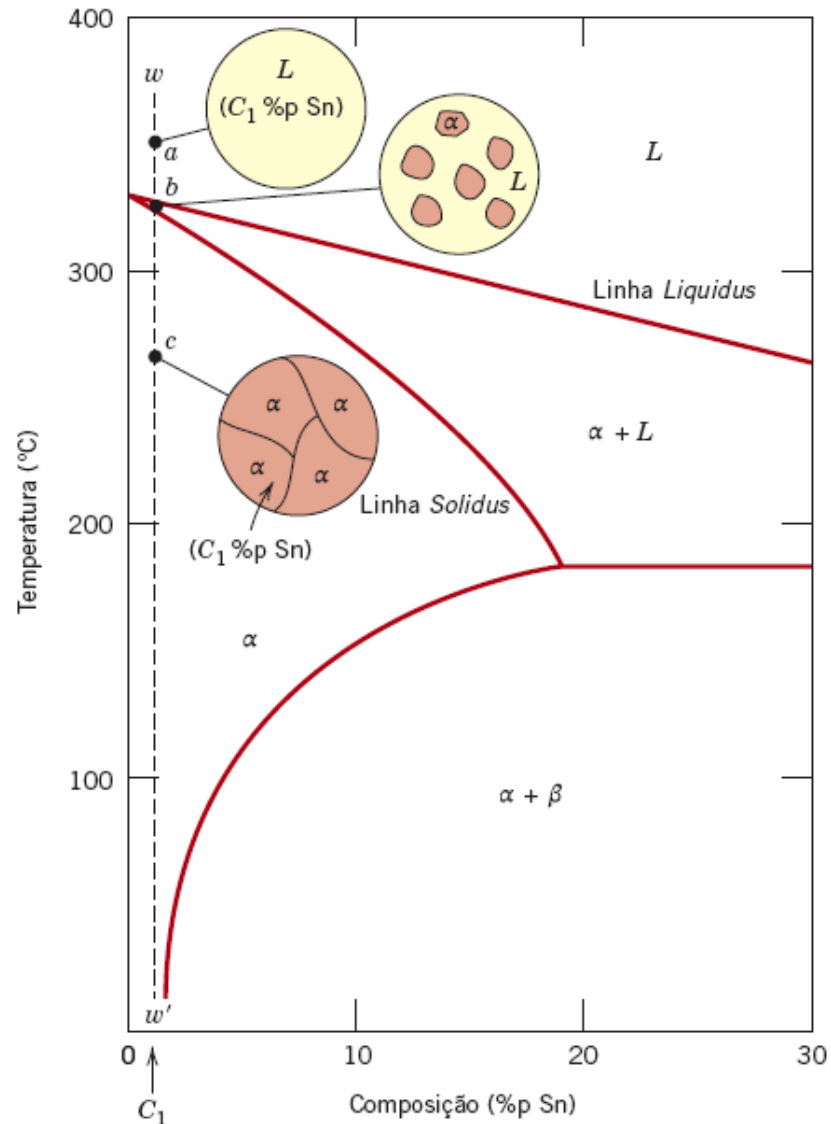
- **Exemplo:** Sistema Cu-Ag.
 - **Componentes:** Cu e Ag.
 - **Fases:** Líquido e α (solução sólida substitucional rica em Cu com estrutura cristalina CFC) e β (solução sólida substitucional rica em Ag com estrutura cristalina CFC).
- **Definições:**
 - Linha **solvus**: ponto invariante designado pela temperatura T_E e C_E

Sistemas eutéticos binários

Muito comum! Presente em vários sistemas metálicos e cerâmicos

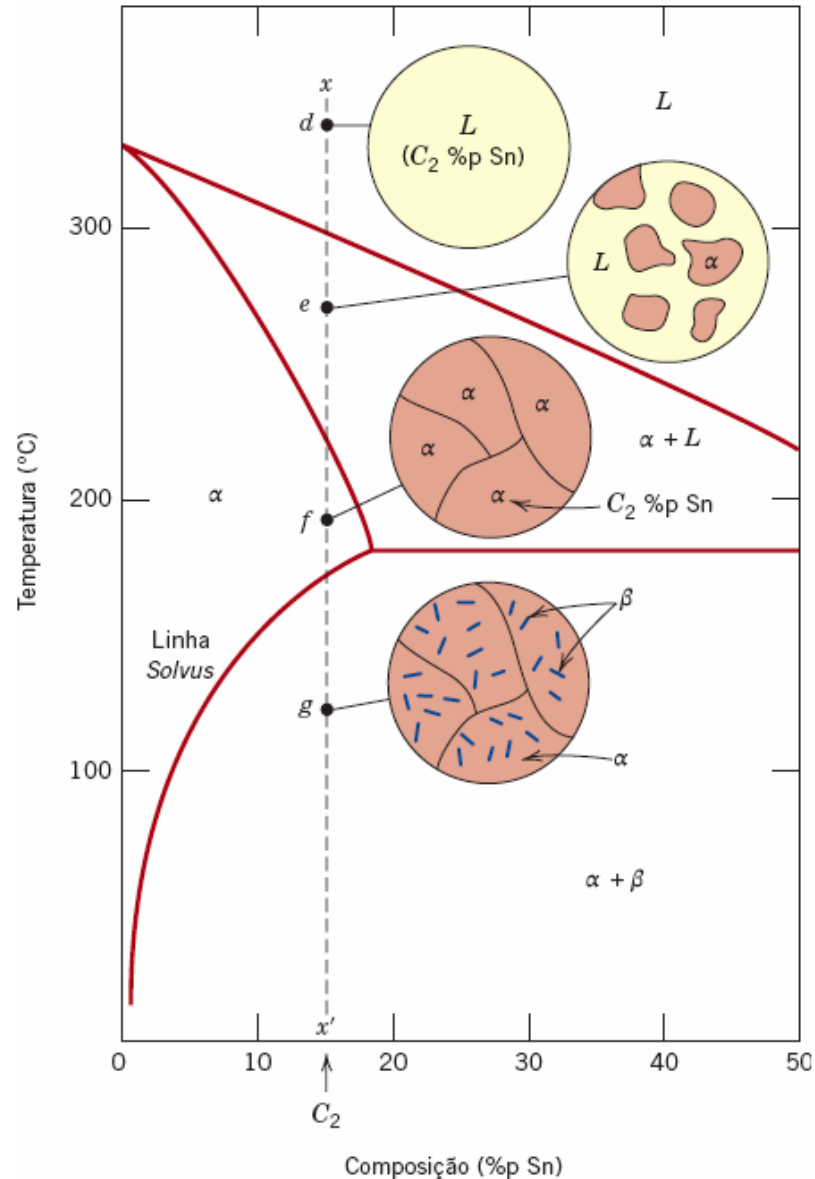


Formação de Morfologia em Sistemas Eutéticos



Morfologia: Uma fase, vários grãos

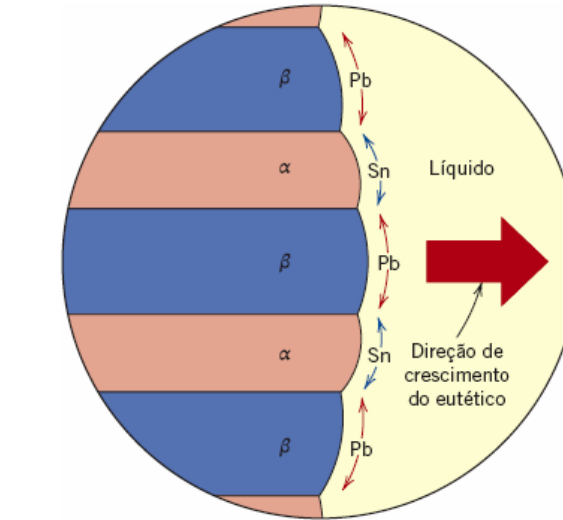
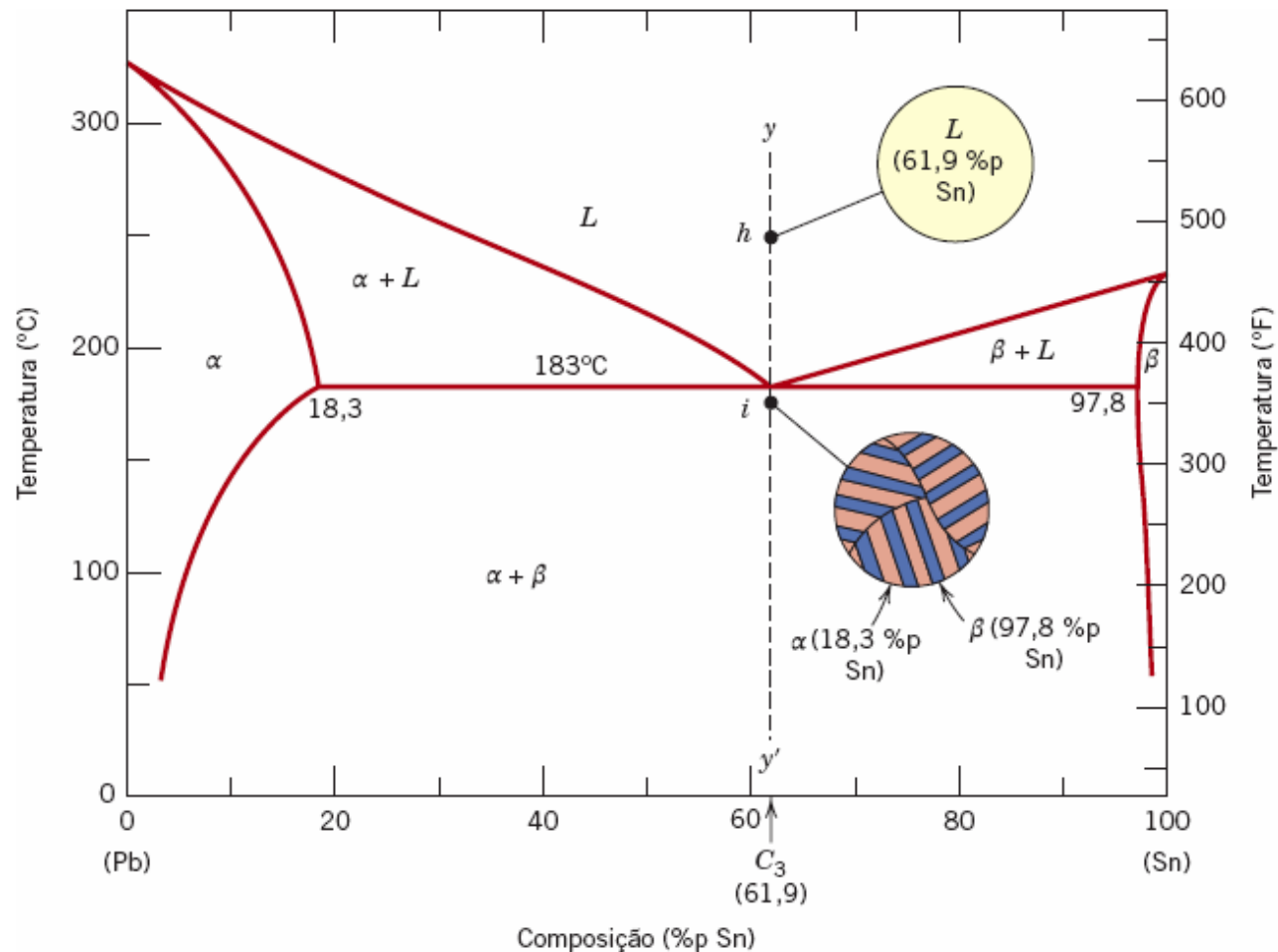
Formação de Morfologia em Sistemas Eutéticos



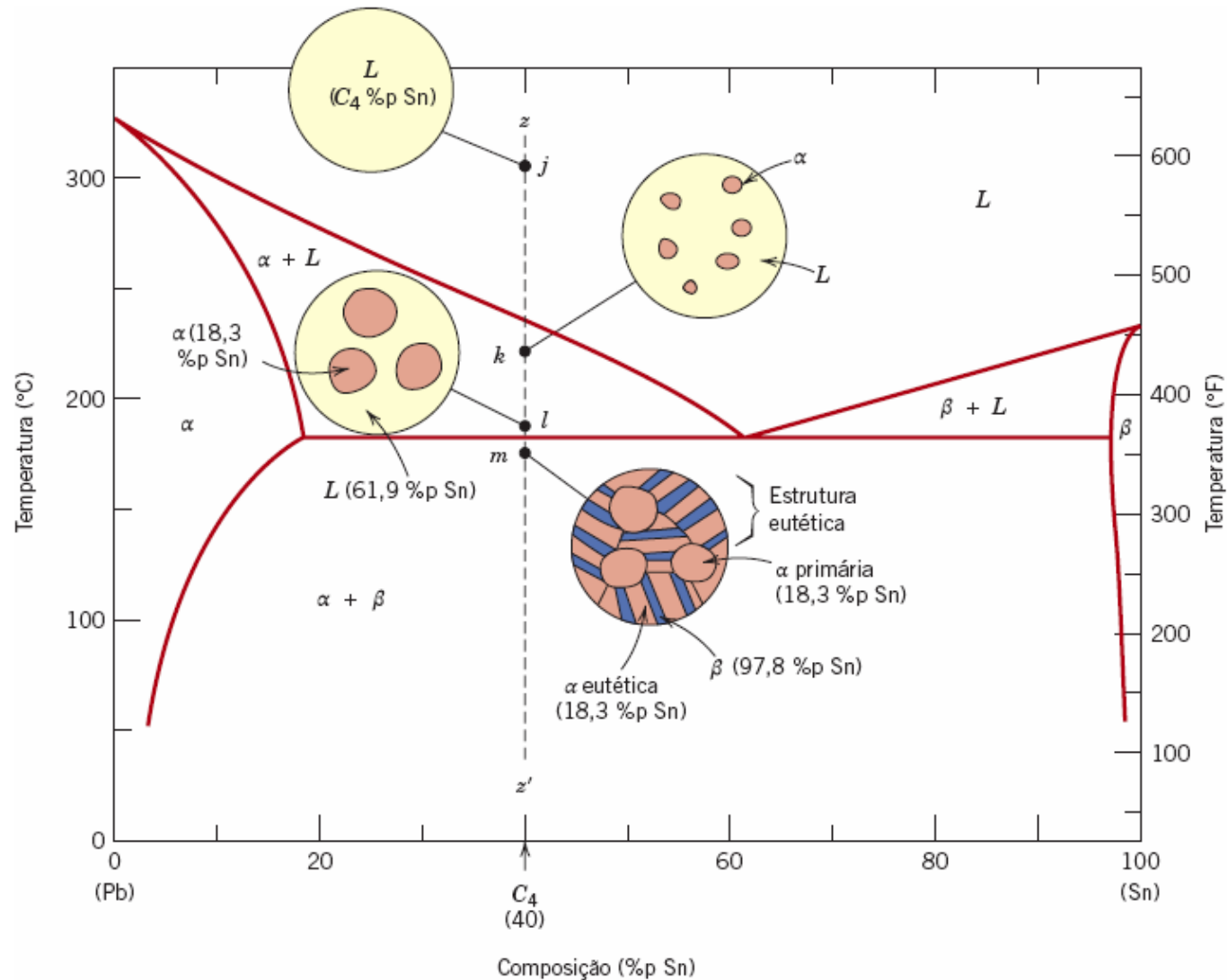
Morfologia: duas fases,
grãos da fase α contendo
precipitados de β

Formação de Morfologia em Sistemas Eutéticos

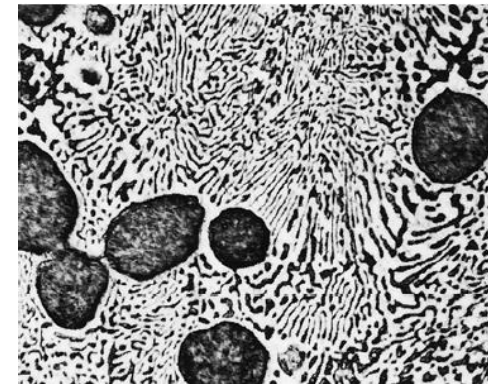
Fenômeno chamado **crescimento acoplado**
Crescimento conjunto de ambas fases



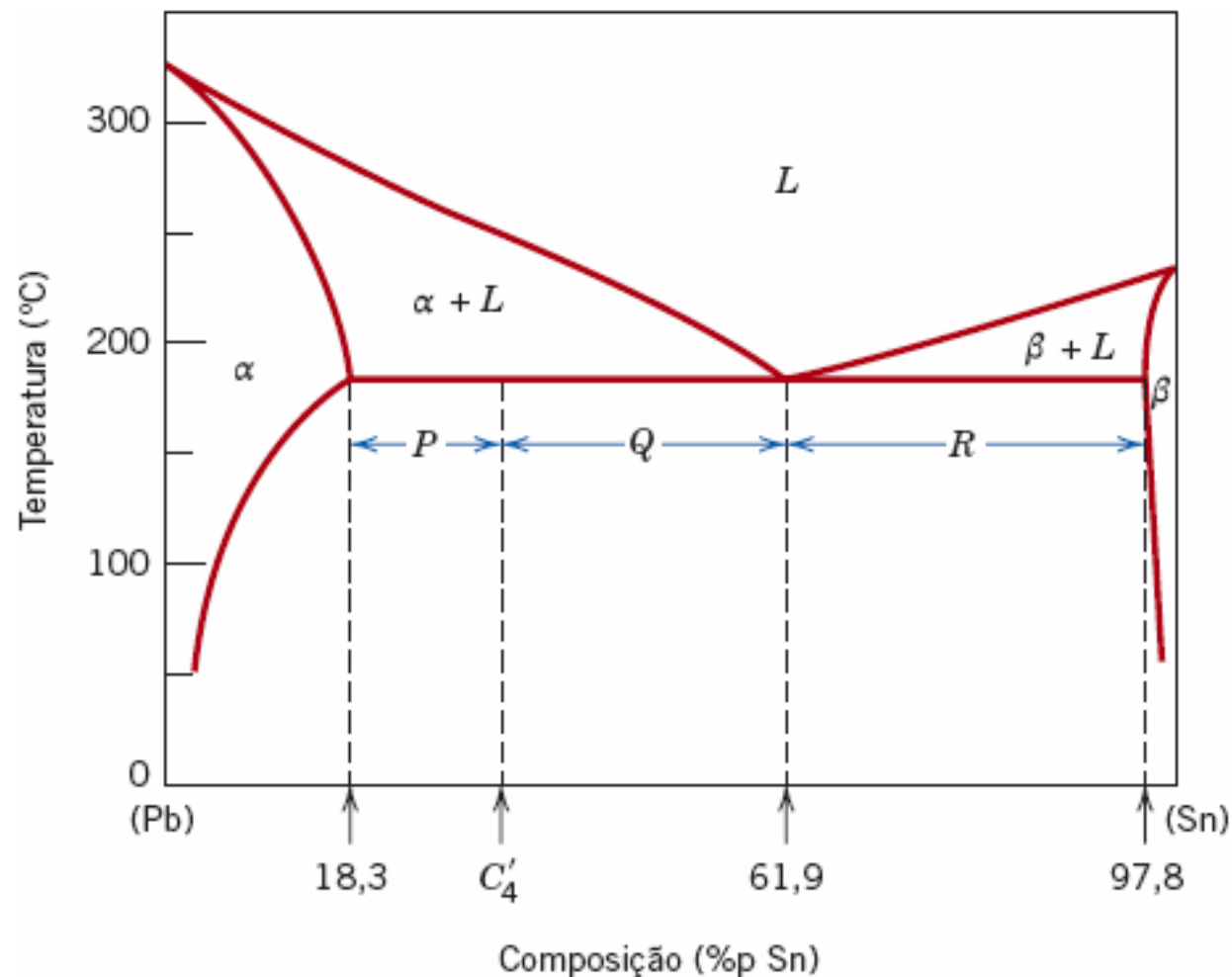
Formação de Morfologia em Sistemas Eutéticos



- Morfologia: Ilhas da fase α com matriz eutética
- Ponto m , **dois microconstituintes**: fase α e estrutura eutética.



Regra da Alavanca com Eutético



Fração de fase α:

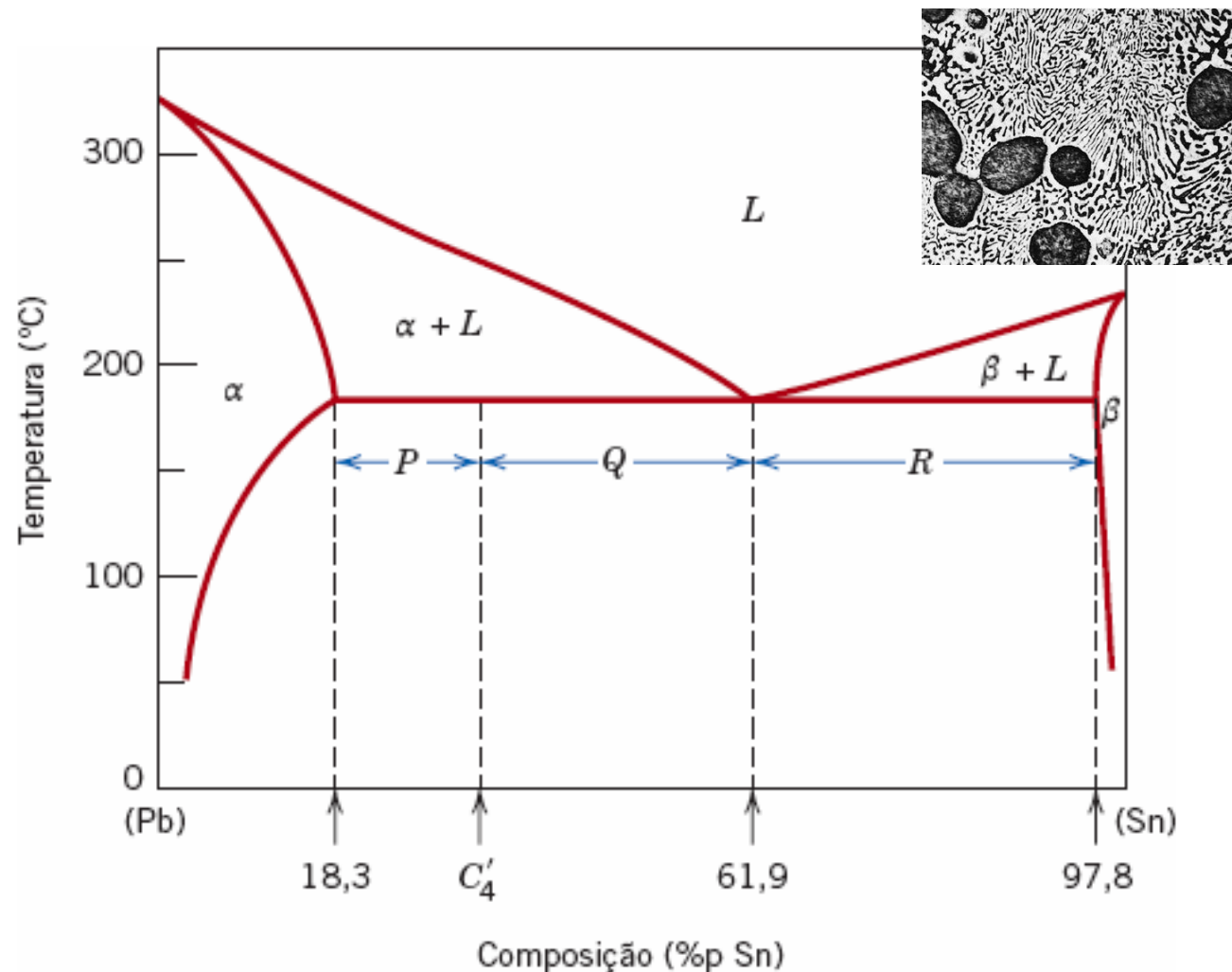
$$W_{\alpha} = \frac{Q + R}{P + Q + R}$$
$$= \frac{97.8 - C'_4}{97.8 - 18.3} = \frac{97.8 - C'_4}{79.5}$$

Fração de fase β:

$$W_{\beta} = \frac{P}{P + Q + R}$$
$$= \frac{C'_4 - 18.3}{97.8 - 18.3} = \frac{C'_4 - 18.3}{79.5}$$

E como seria a expressão para calcular a fração de morfologia eutética?

Regra da Alavanca com Eutético



Fração de fase α primária:

$$W_{\alpha'} = \frac{Q}{P + Q}$$
$$= \frac{61.9 - C'_4}{61.9 - 18.3} = \frac{61.9 - C'_4}{43.6}$$

**Fração da estrutura eutética
(ou microconstituente eutético):**

$$W_e = W_L = \frac{P}{P + Q}$$
$$= \frac{C'_4 - 18.3}{61.9 - 18.3} = \frac{C'_4 - 18.3}{43.6}$$

Diagrama de equilíbrio contendo fases ou compostos intermediários.

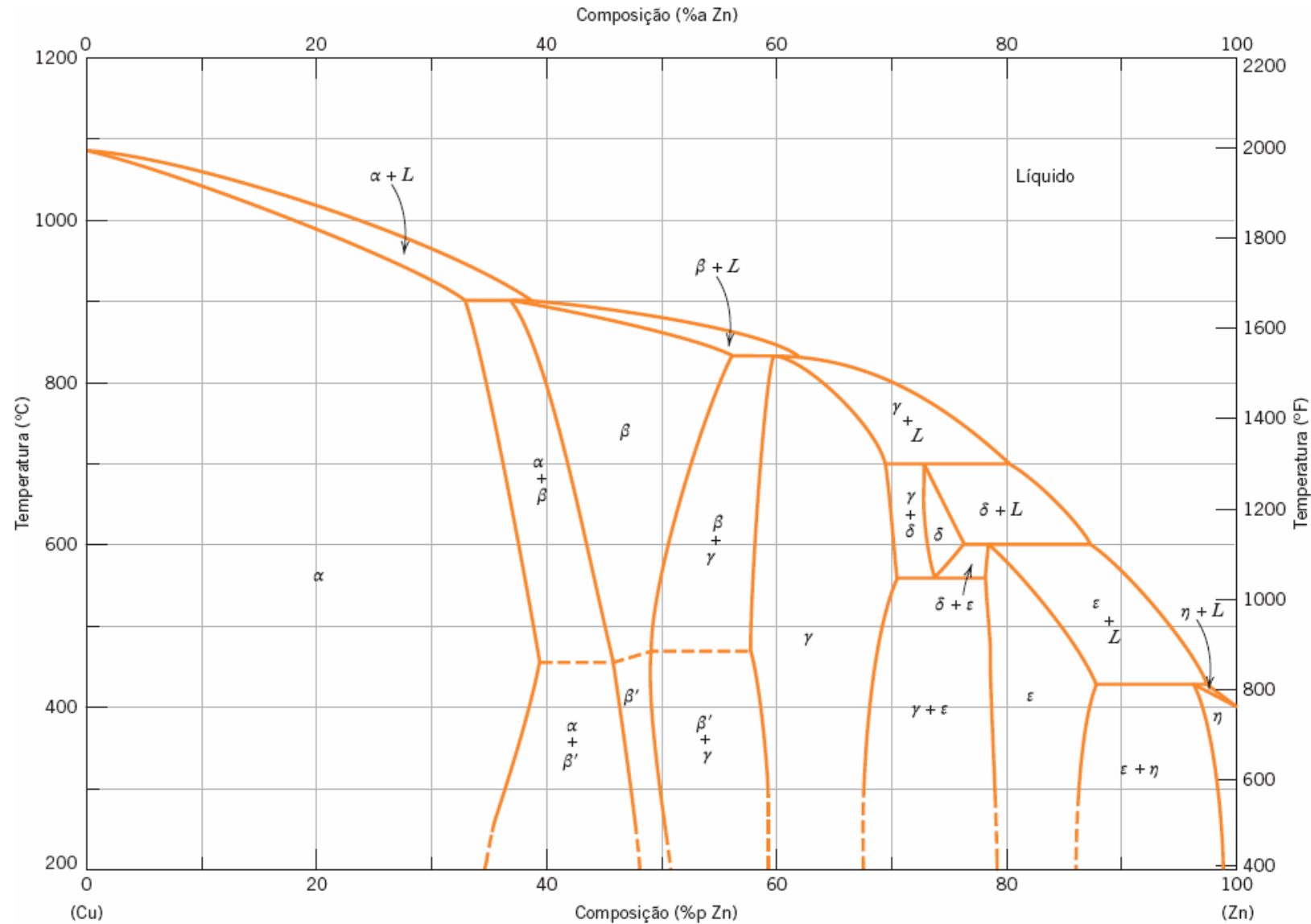
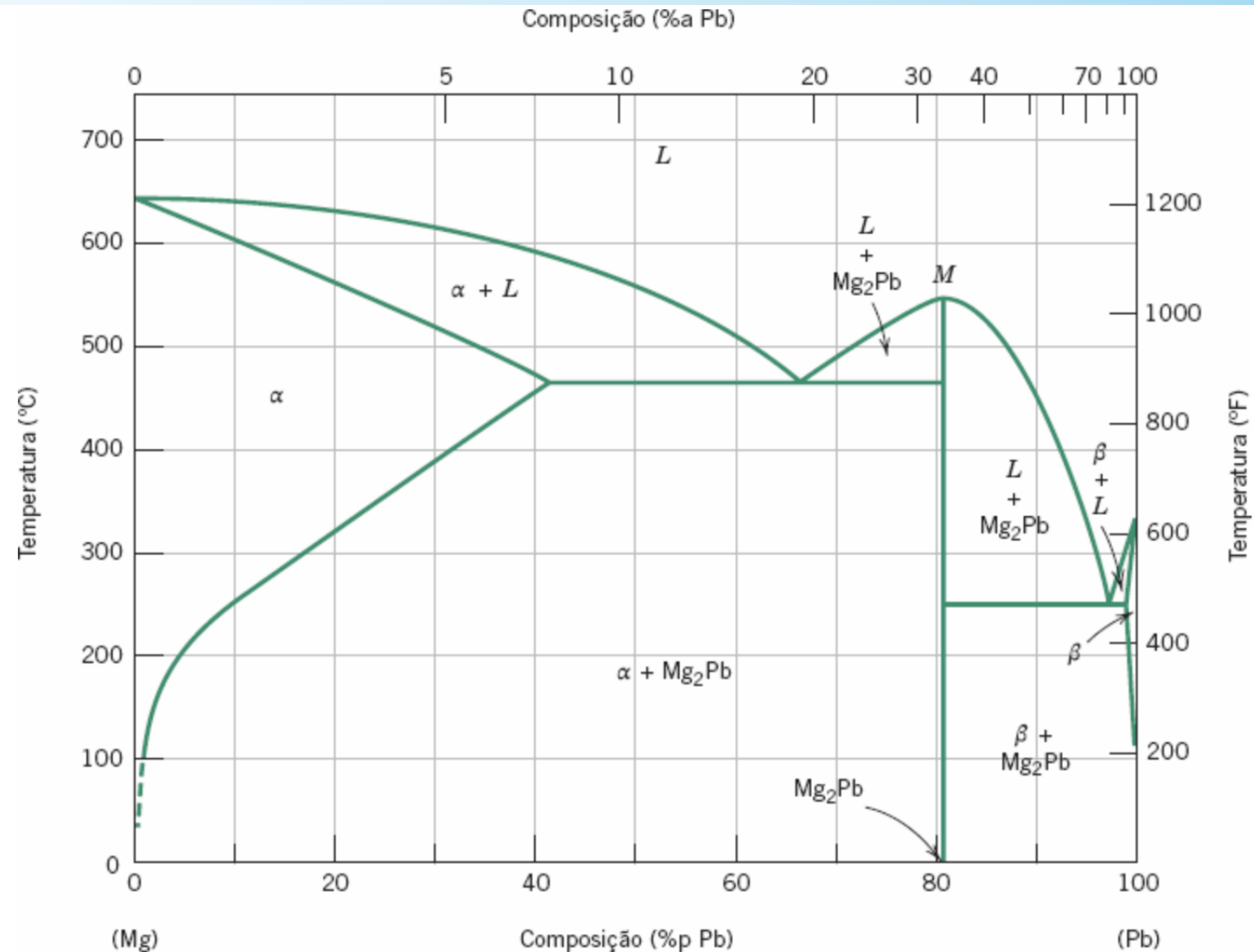
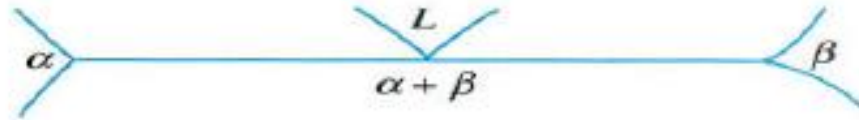


Diagrama de equilíbrio contendo fases ou compostos intermediários.

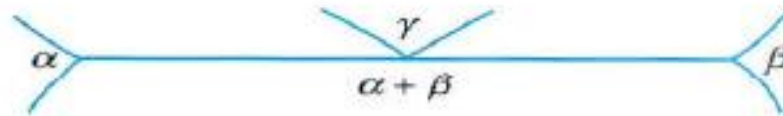


Reações Invariantes: Eutetóides, peritéticas e peritedóides

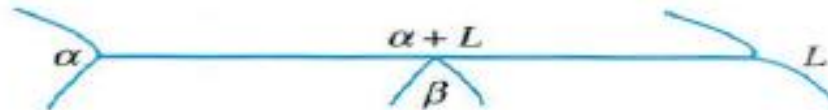
Eutética: $L \rightarrow \alpha + \beta$



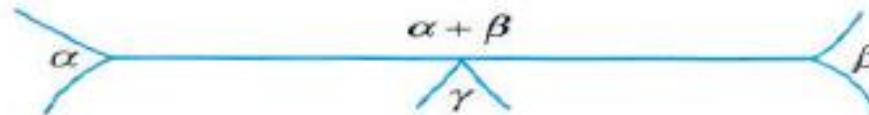
Eutetóide: $\gamma \rightarrow \alpha + \beta$



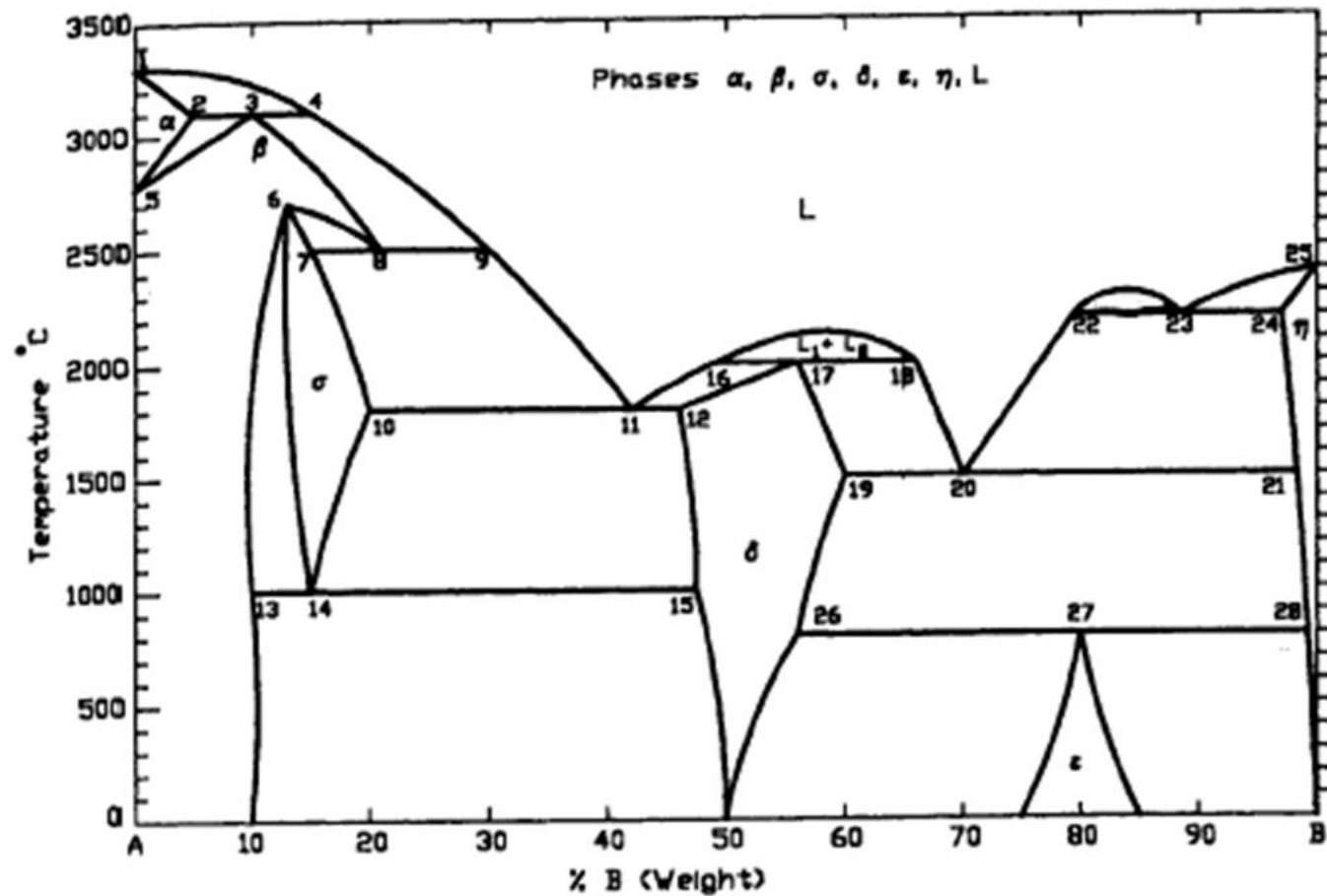
Peritética: $L + \alpha \rightarrow \beta$



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



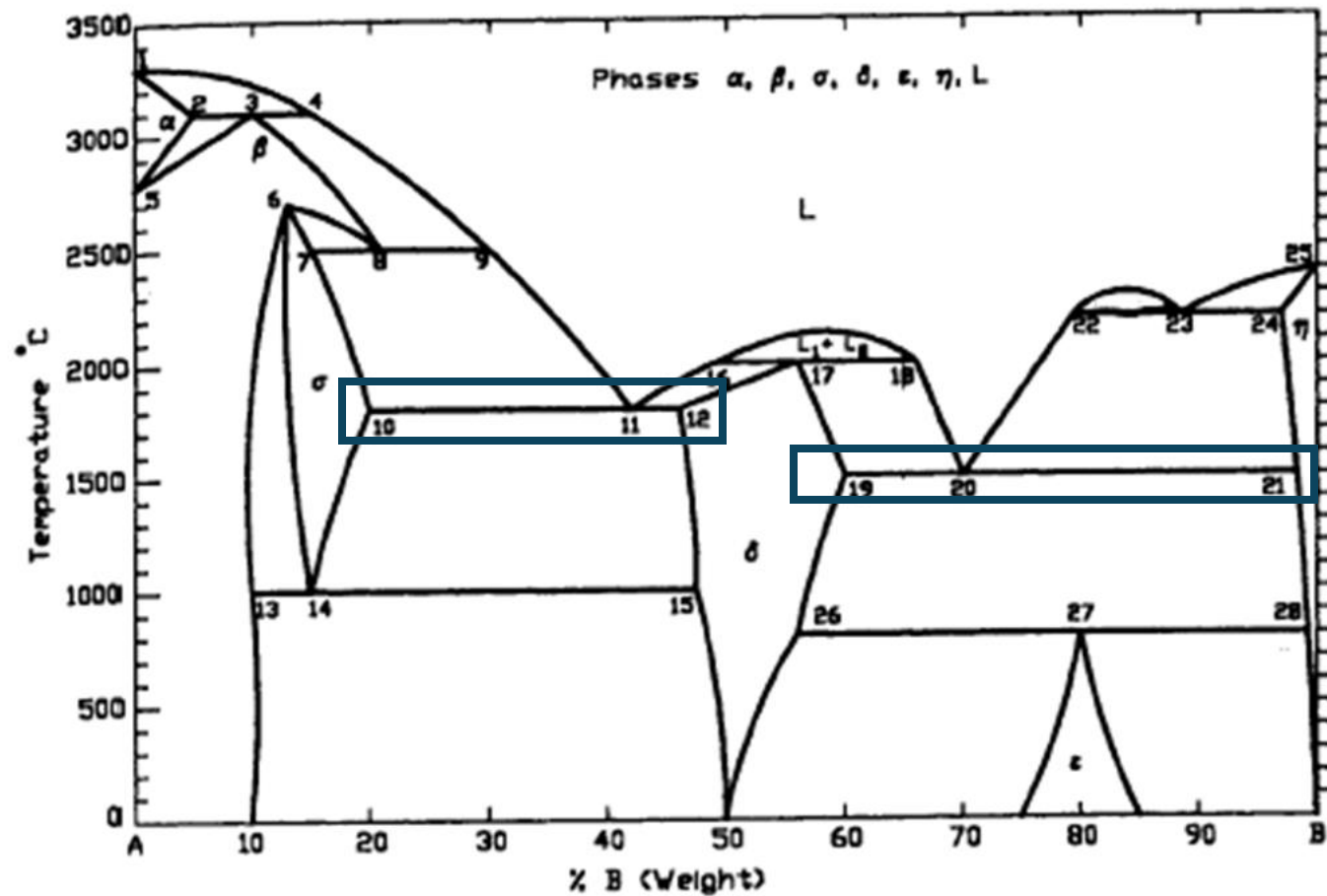
Tipos de Reação Invariante



L – Fase líquida

S – Fase Sólida

Tipos de Reação Invariante

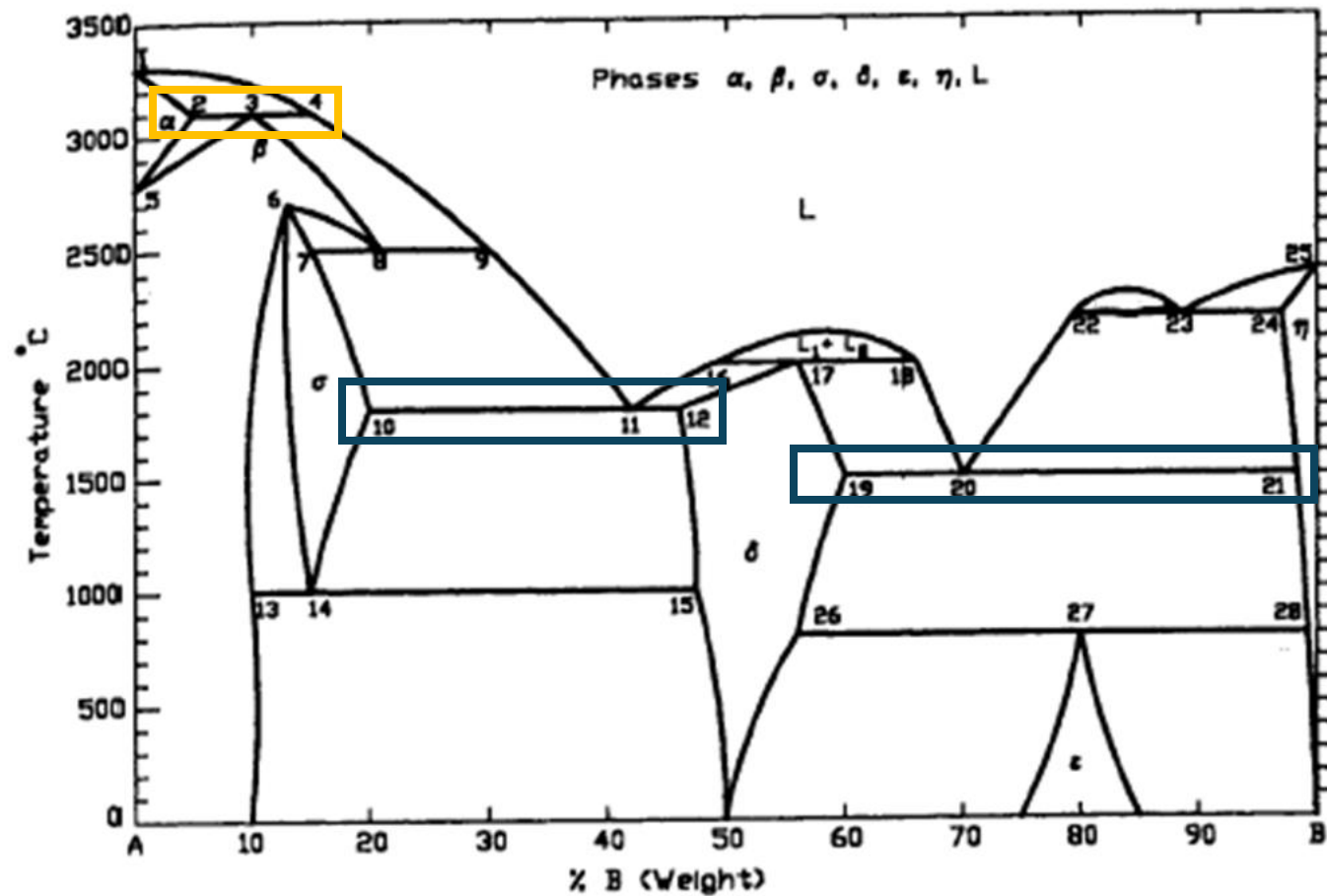


Reação eutética
 $L \rightarrow S_1 + S_2$

L – Fase líquida

S – Fase Sólida

Tipos de Reação Invariante



Reação eutética



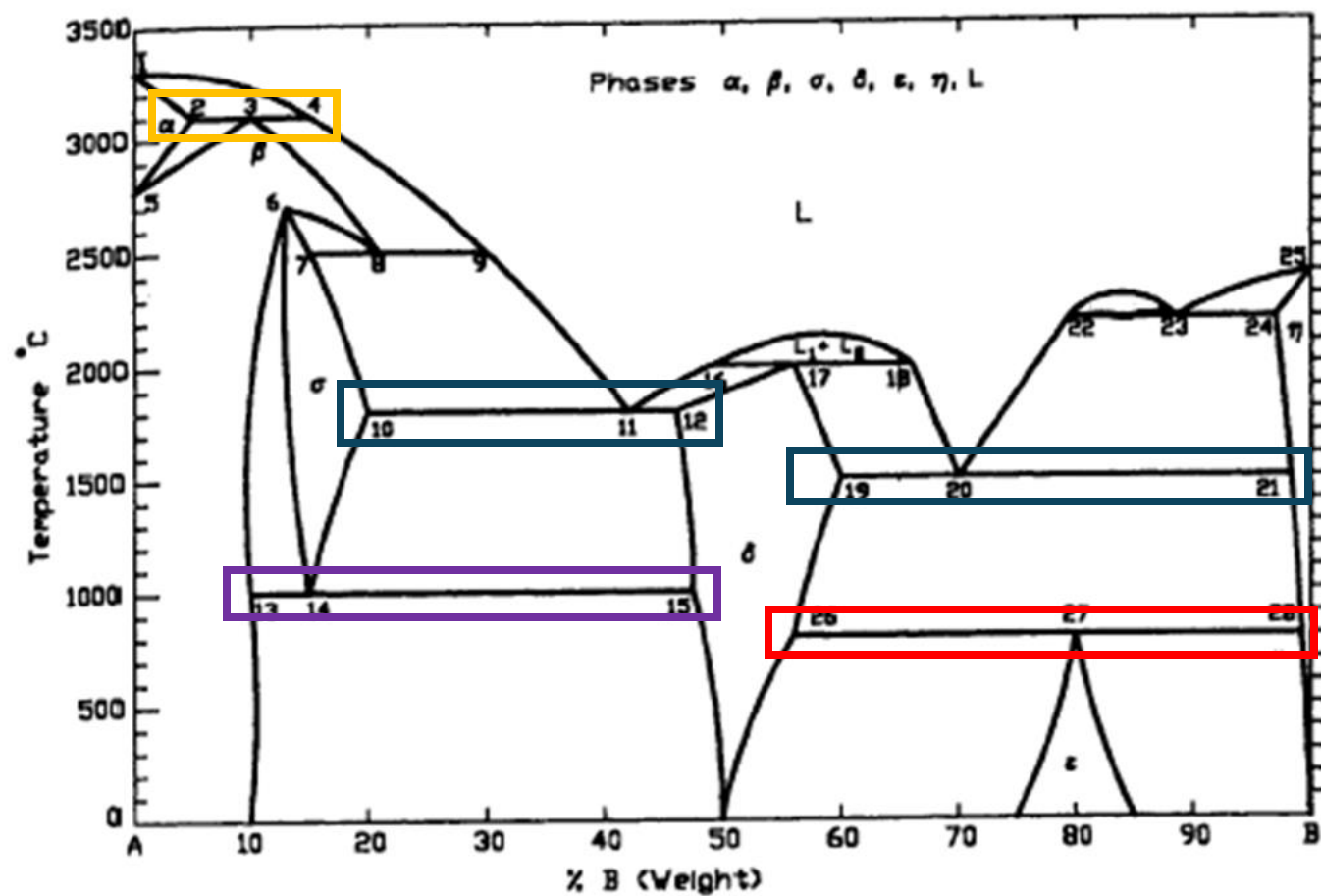
Reação peritética



L – Fase líquida

S – Fase Sólida

Tipos de Reação Invariante



Reação eutética



Reação peritética



Reação eutetóide



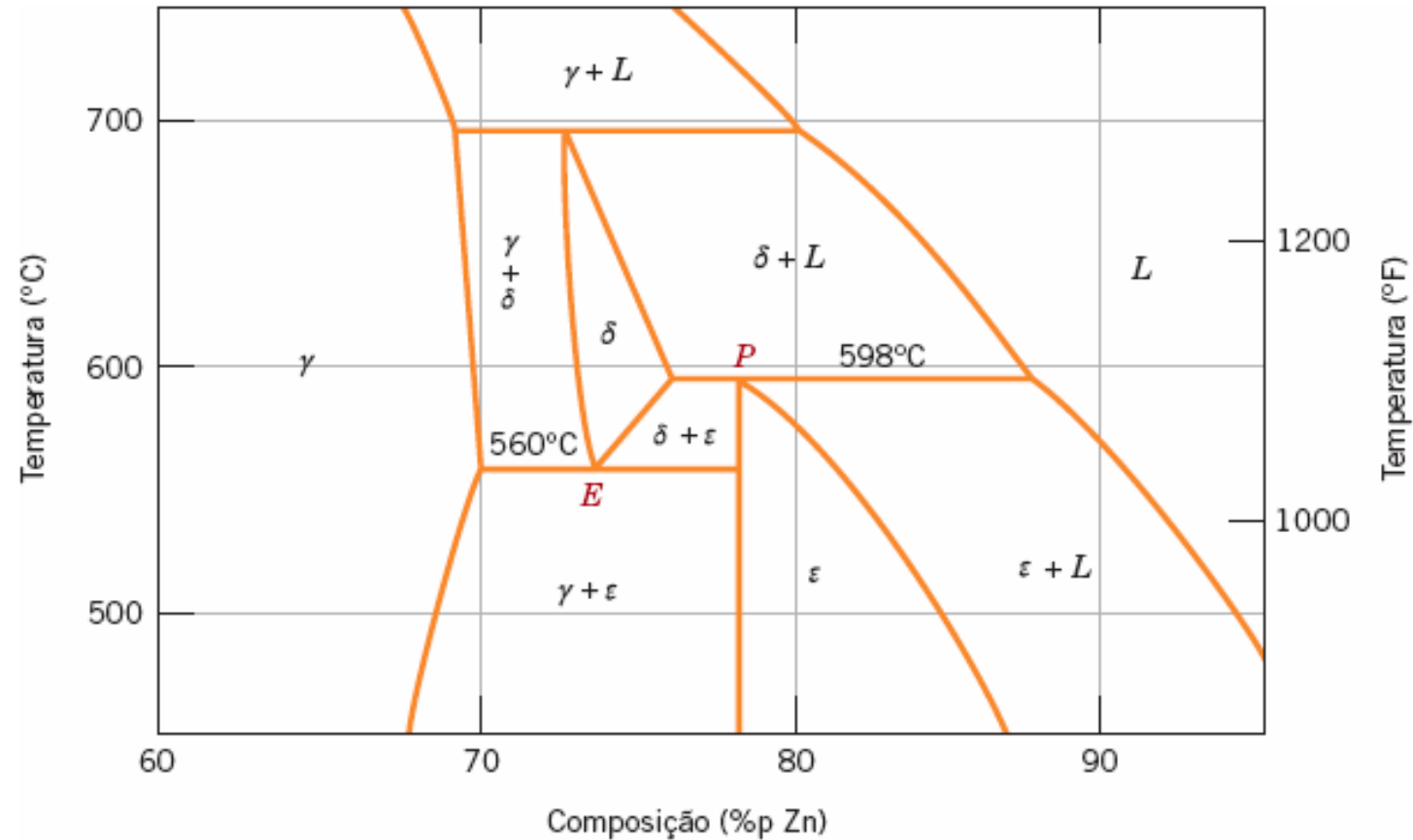
Reação peritetóide

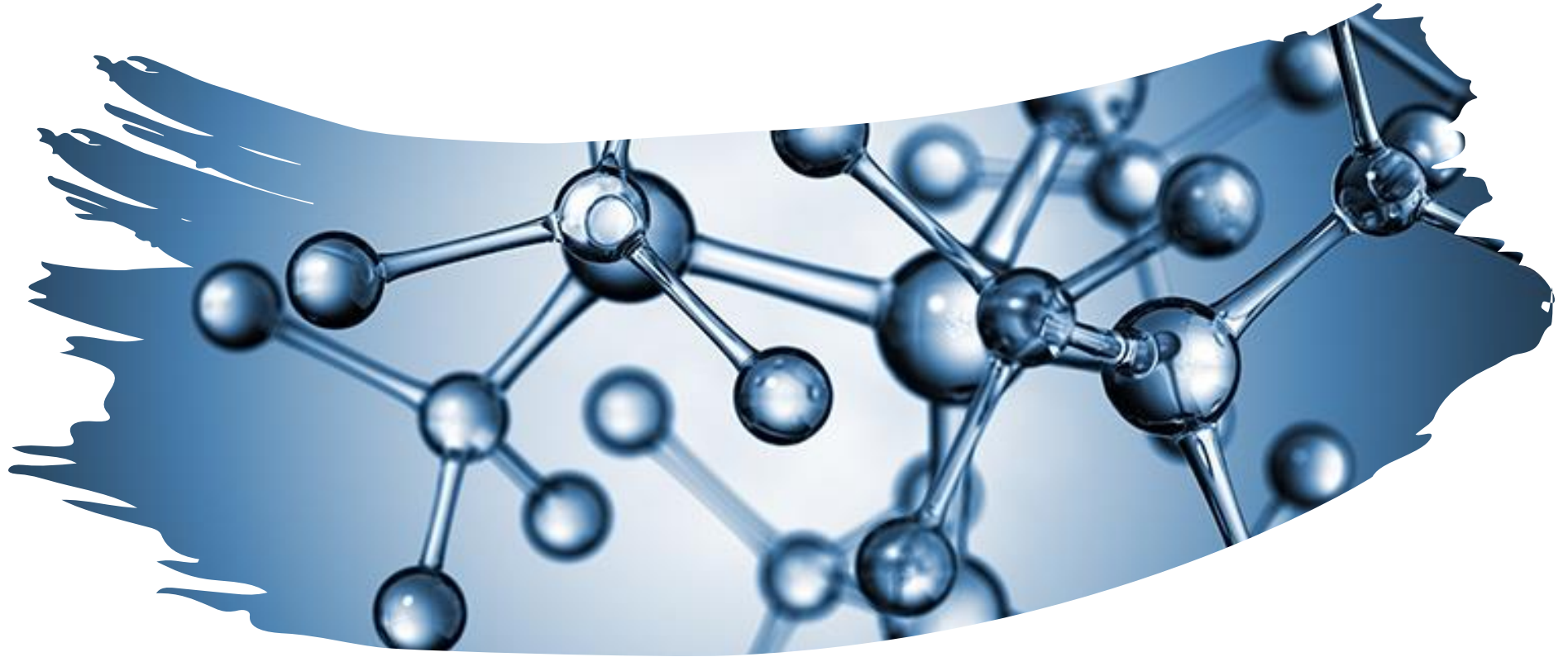


L – Fase líquida

S – Fase Sólida

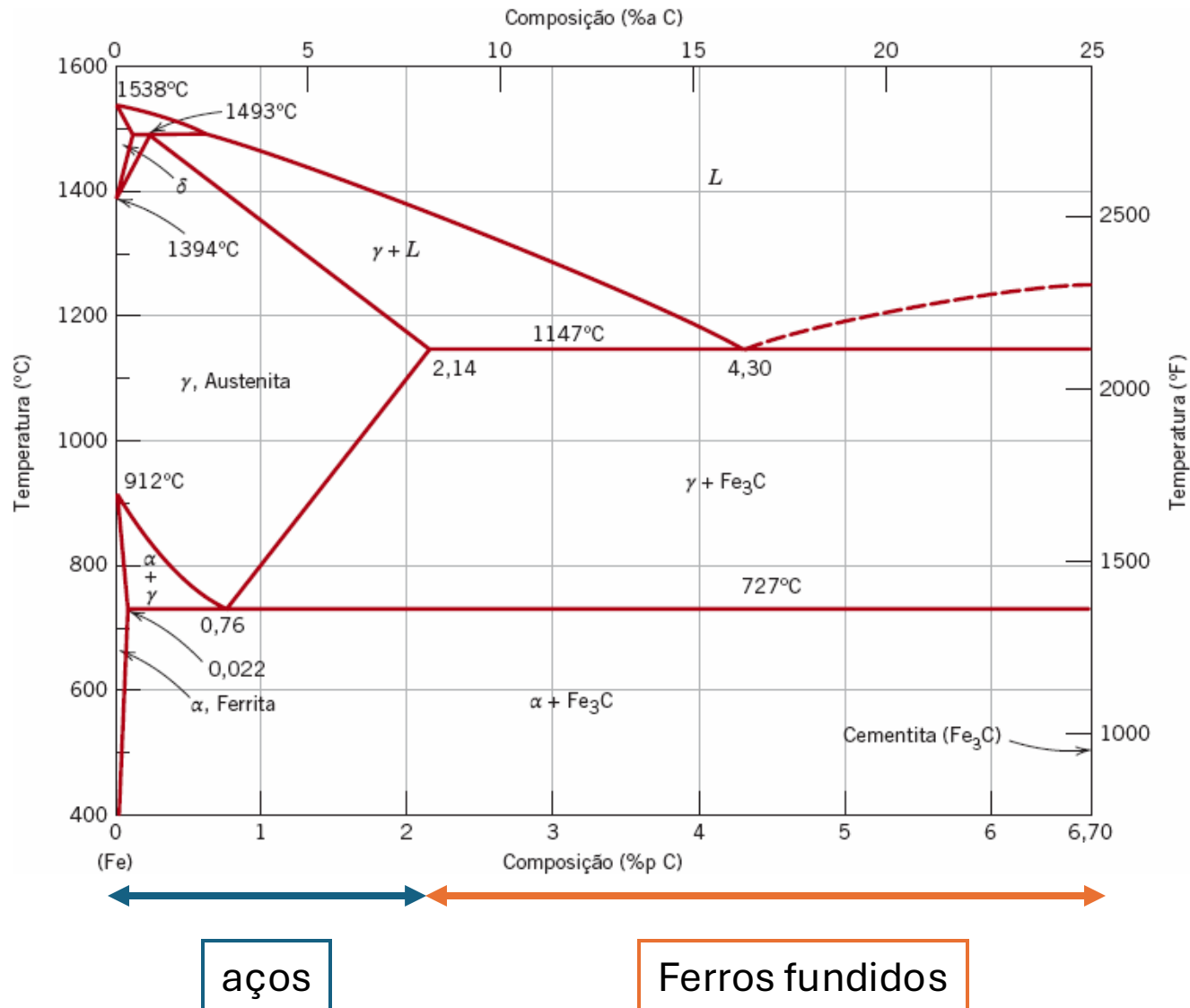
Exemplo 2 – Identificar as Reações Abaixo





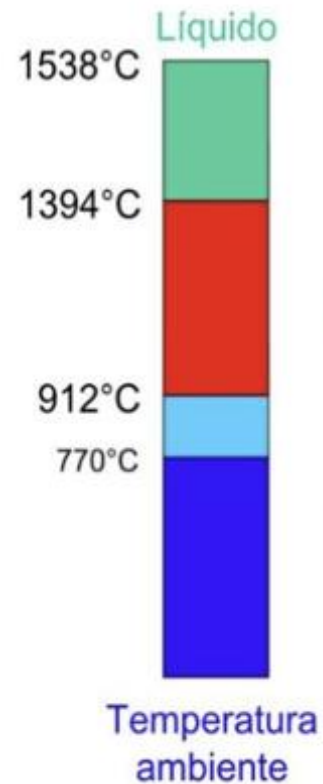
3. Sistema Ferro-Carbono

O Sistema Ferro-Carbono



- De todos os sistemas de ligas binárias, talvez o mais importante seja o formado pelo ferro e pelo carbono. Tanto os aços quanto os ferros fundidos, que são os principais materiais estruturais em toda cultura tecnologicamente avançada, são essencialmente ligas ferro-carbono.

Considerações importantes

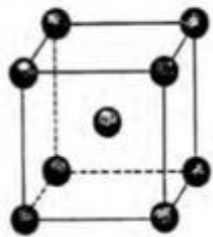


Ferro δ (CCC)

Ferro γ (CFC)

Ferro α (CCC)

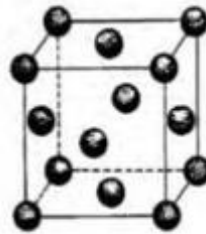
Cúbico de corpo centrado



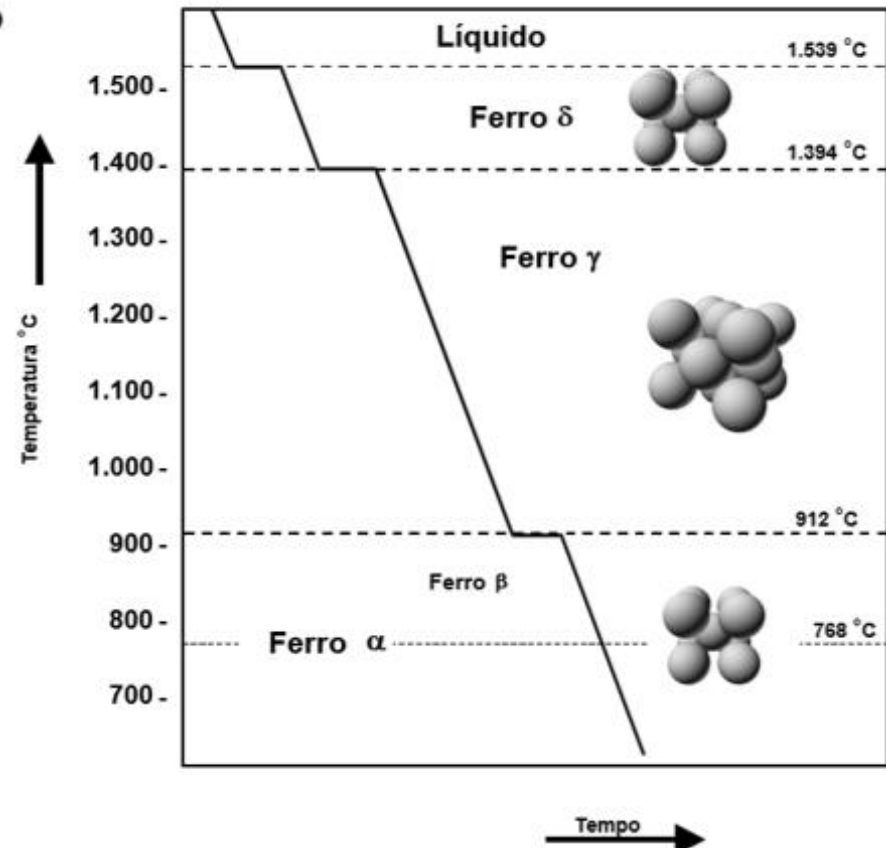
$$a_0 = 2,93 \text{ \AA} (\delta)$$

$$a_0 = 2,86 \text{ \AA} (\alpha)$$

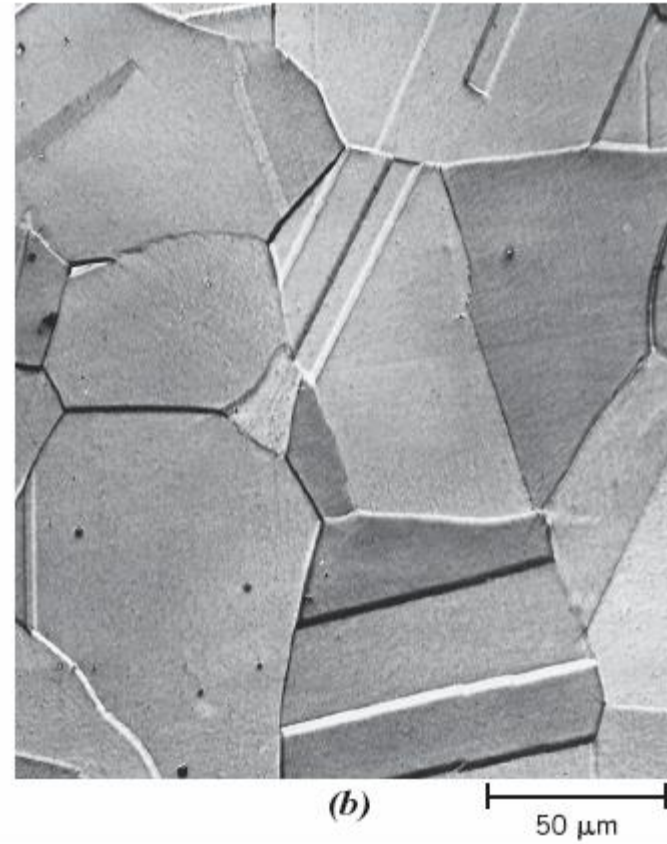
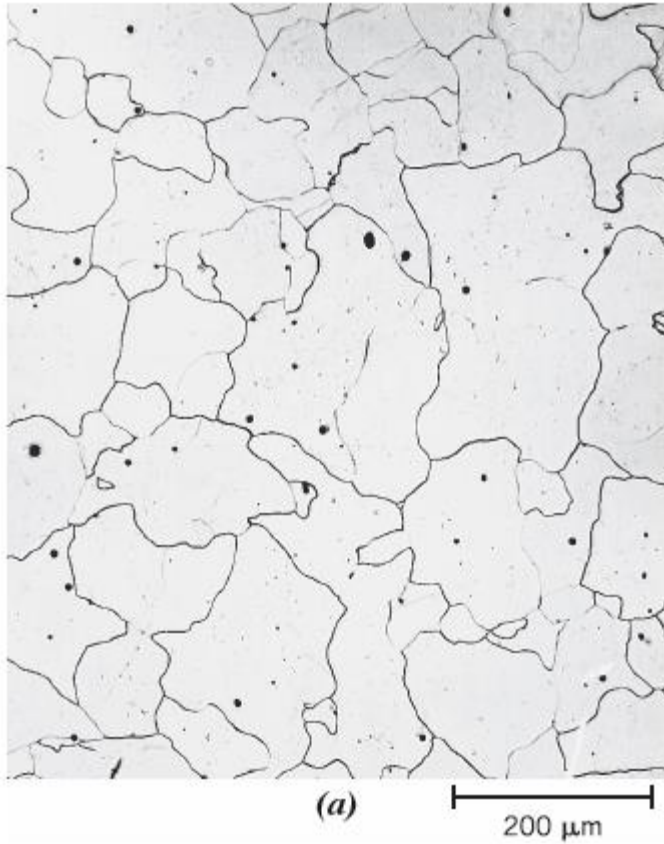
Cúbico de face centrada



$$a_0 = 3,64 \text{ \AA}$$



Ferrita e austenita



- Ferrita α :
 - Relativamente macia.
 - Magnética (até 768°C)
- Austenita γ :
 - Alta solubilidade de C
 - Não magnético

Ligas Ferrosas

Aços: uma liga Ferro-Carbono cujo teor em Carbono varia entre 0.03% e 2.06%, contendo Si, Mn, P e S;

Designação: AISI (*American Iron and Steel Institute*) e SAE (*Society of Automotive Engineers*) usam um sistema de classificação de quatro ou cinco dígitos;

Classificação: Os aços podem ser classificados pela sua composição ou pela forma de como foram processados.



**American
Iron and Steel
Institute**

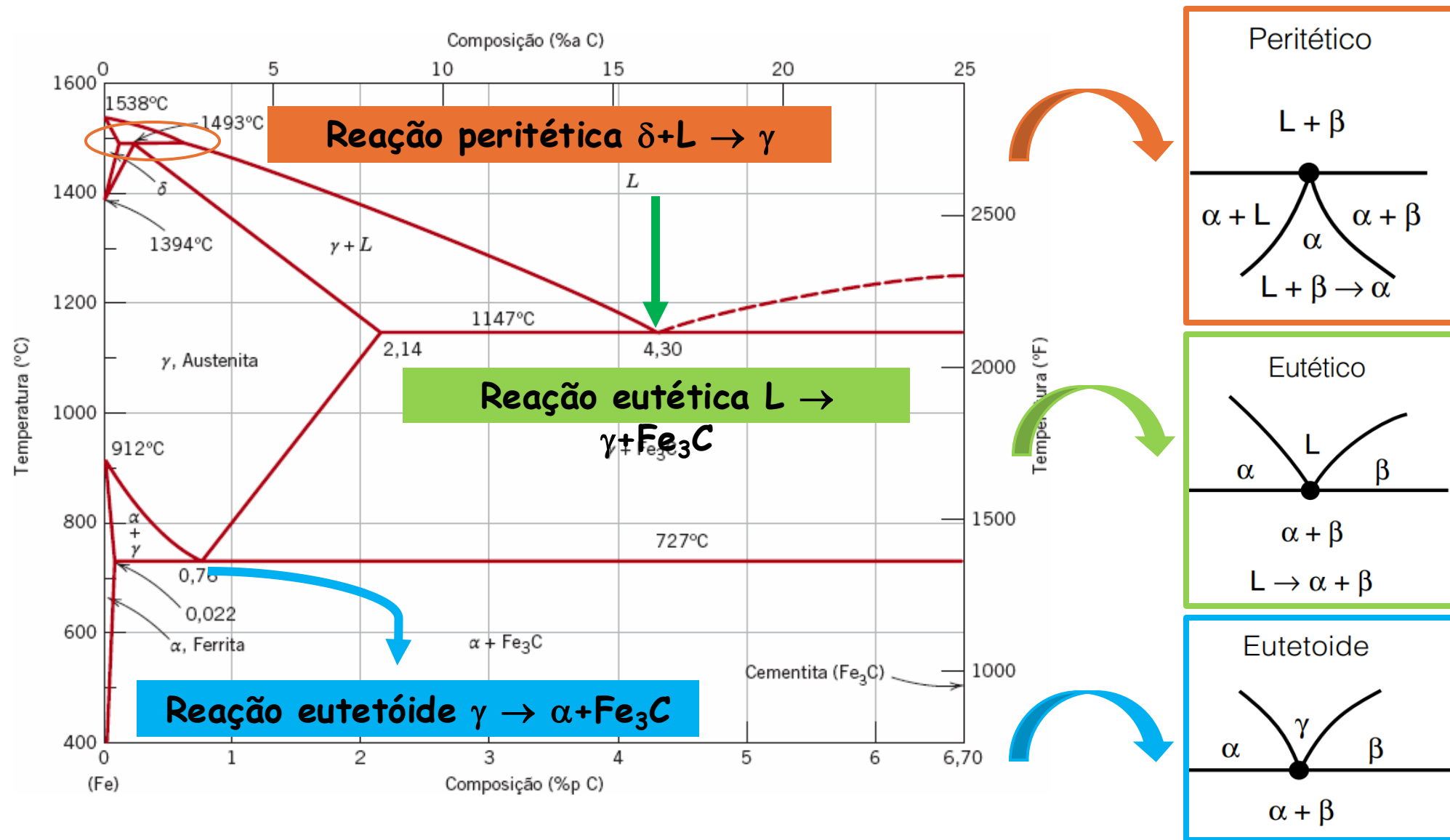


Ligas Ferrosas

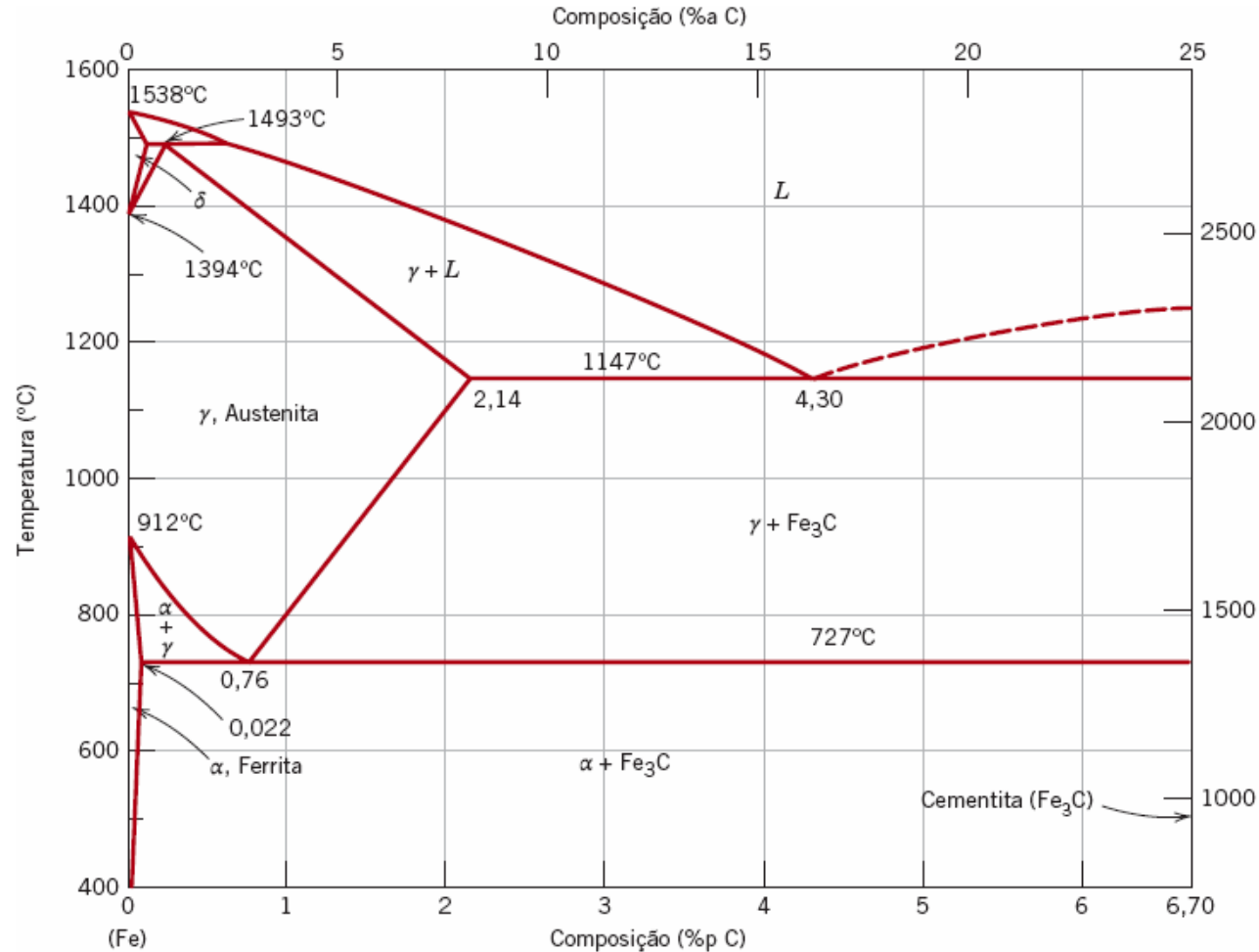
TABLE 12-1 ■ Compositions of selected AISI-SAE steels

AISI-SAE Number	% C	% Mn	% Si	% Ni	% Cr	Others
1020	0.18–0.23	0.30–0.60				
1040	0.37–0.44	0.60–0.90				
1060	0.55–0.65	0.60–0.90				
1080	0.75–0.88	0.60–0.90				
1095	0.90–1.03	0.30–0.50				
1140	0.37–0.44	0.70–1.00				0.08–0.13% S
4140	0.38–0.43	0.75–1.00	0.15–0.30		0.80–1.10	0.15–0.25% Mo
4340	0.38–0.43	0.60–0.80	0.15–0.30	1.65–2.00	0.70–0.90	0.20–0.300% Mo
4620	0.17–0.22	0.45–0.65	0.15–0.30	1.65–2.00		0.20–0.30% Mo
52100	0.98–1.10	0.25–0.45	0.15–0.30		1.30–1.60	
8620	0.18–0.23	0.70–0.90	0.15–0.30	0.40–0.70	0.40–0.60	0.15–0.25% Y
9260	0.56–0.64	0.75–1.00	1.80–2.20			

O Sistema Ferro-Carbono

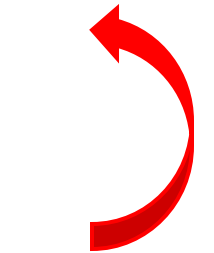
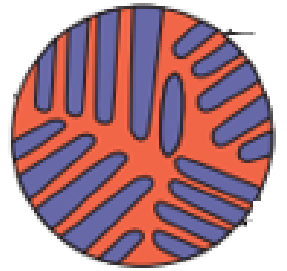
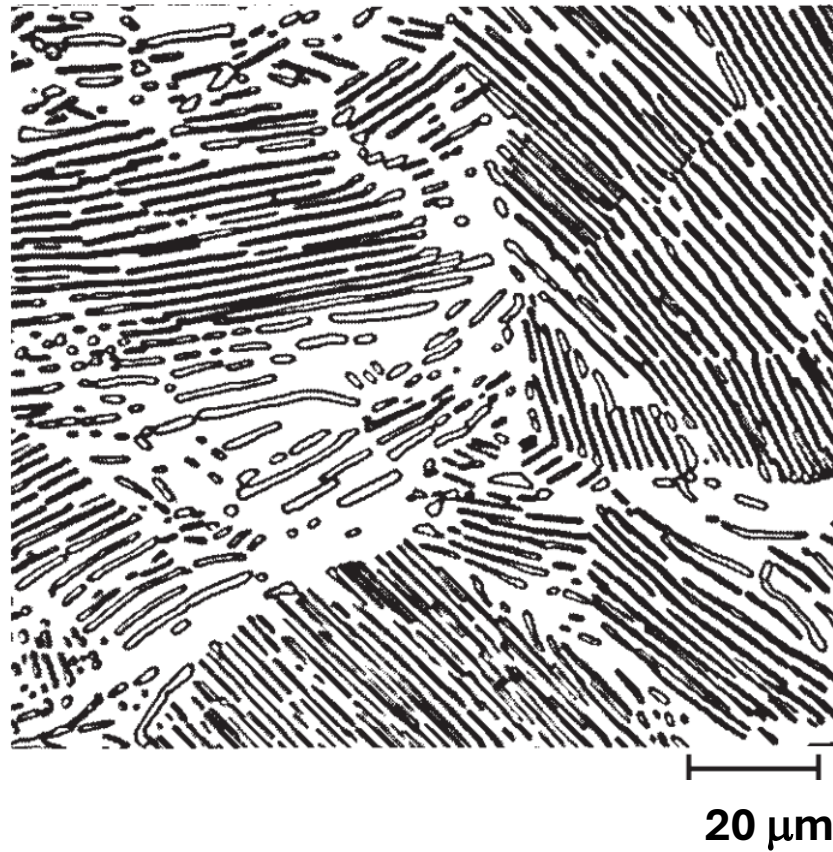
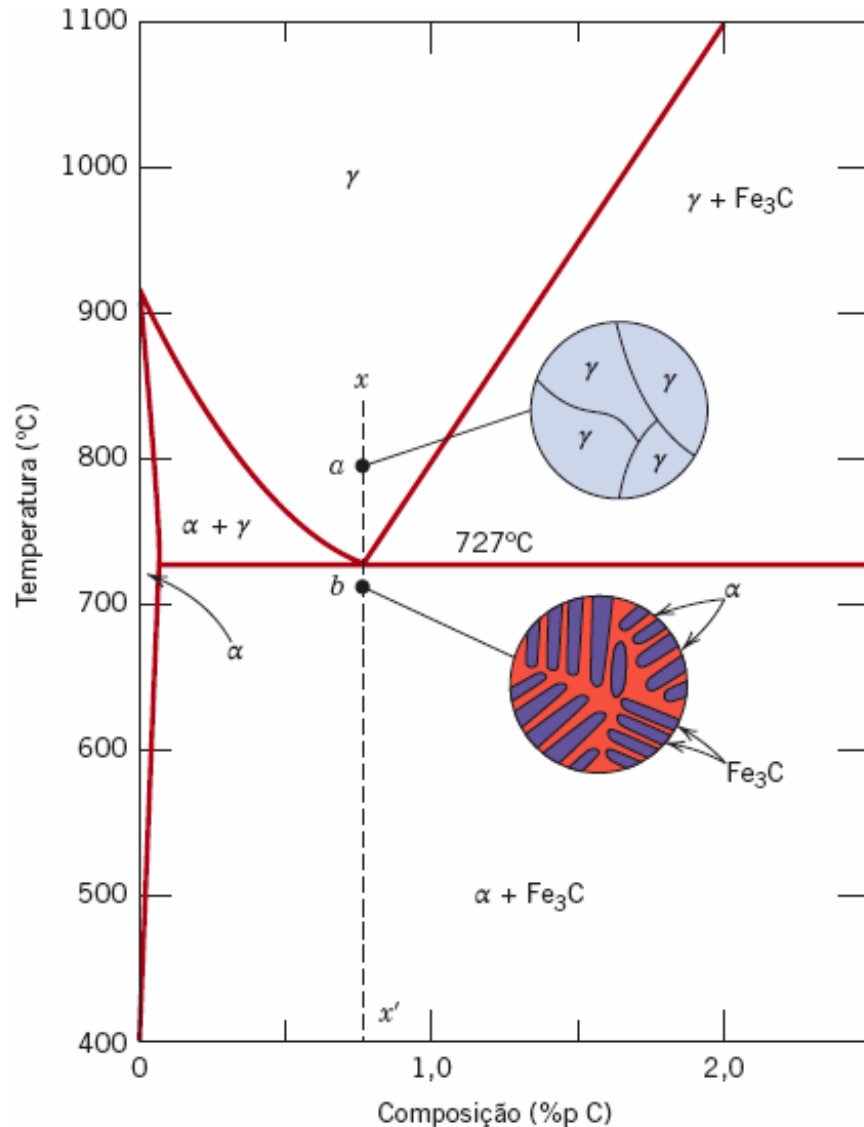


Fases presentes no diagrama ferro-carbono

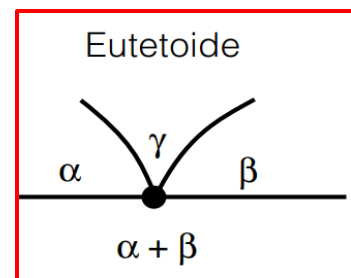


- **Ferrita α** : solução sólida intersticial de carbono no ferro CCC, a solubilidade (sólida) máxima do carbono no ferro CCC é de 0,02%;
- **Austenita γ** : solução sólida intersticial de carbono no ferro CFC, a solubilidade (sólida) máxima do carbono na austenita é de 2%;
- **Cementita (Fe_3C)**: composto intermetálico Fe_3C ; substância dura e frágil;
- **Ferrita δ** : solução sólida de carbono intersticial no ferro δ . Como a ferrita α , tem estrutura CCC, embora tenha um parâmetro de rede superior. A solubilidade do carbono no ferro δ é de 0,09%;
- **Perlita**: $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$;
- **Ledeburita**: $\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$

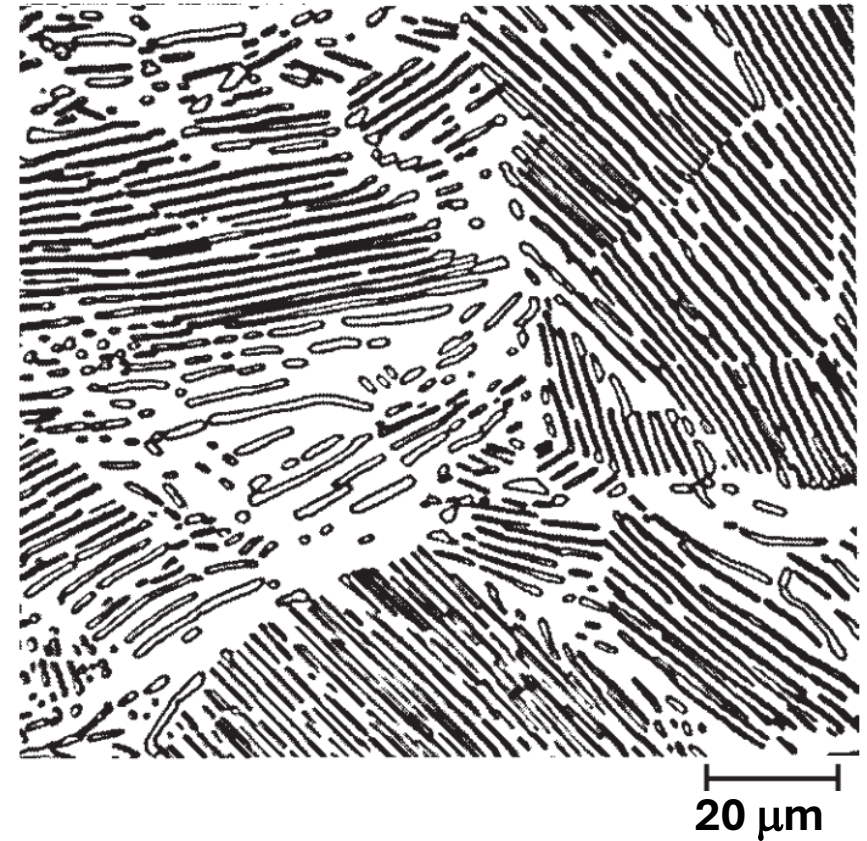
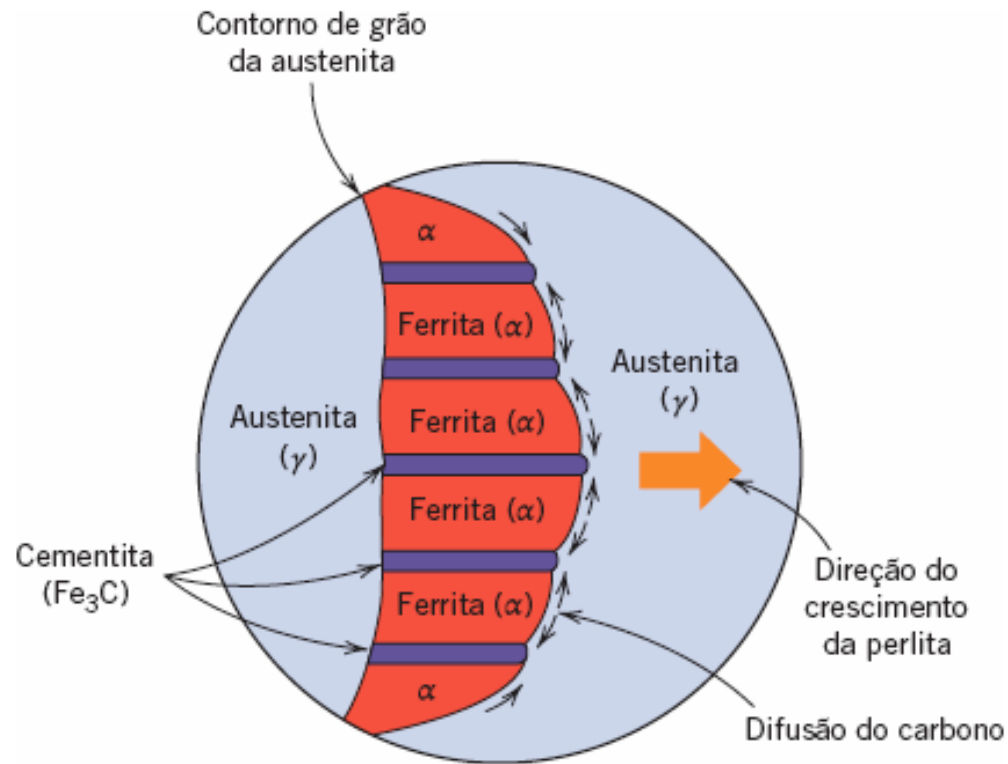
Microestrutura de composição eutetóide (0,76 %p C)



Perlita

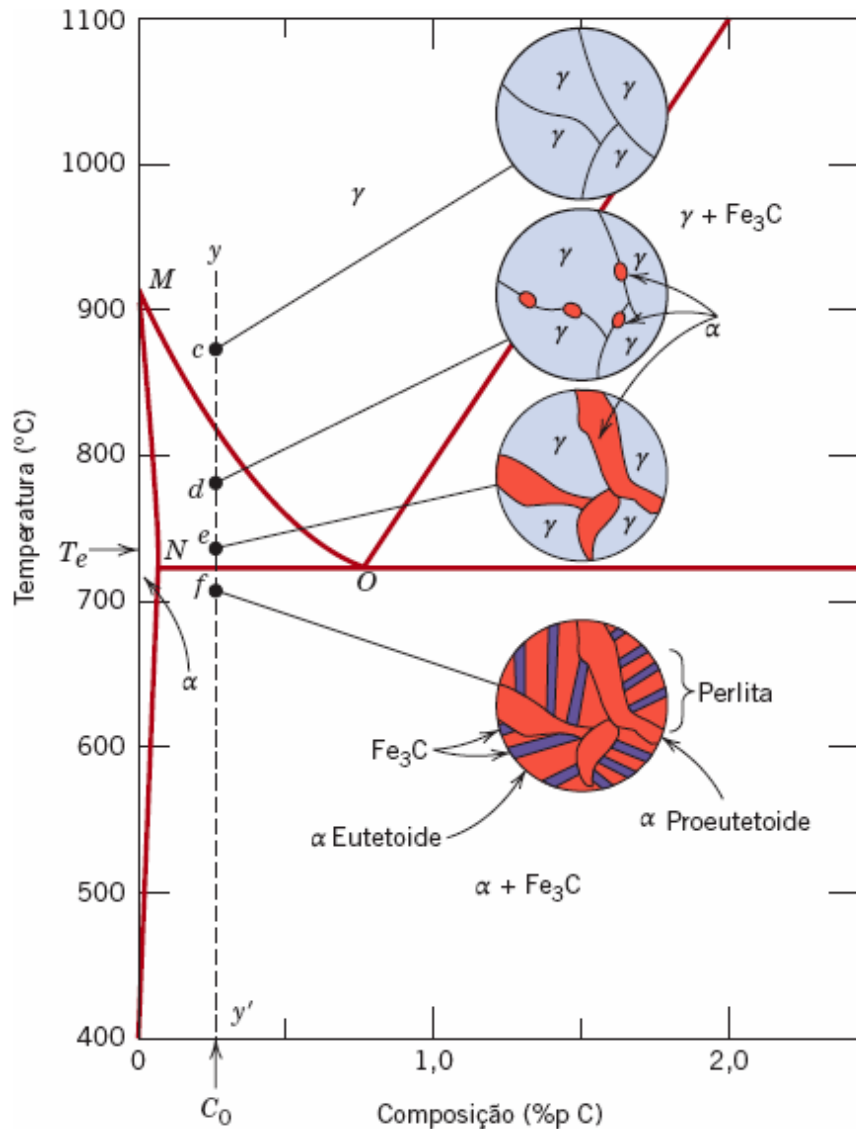


Microestrutura de composição eutetóide (0,76 %p C)



(a) Representação esquemática da formação de perlita da austenita: a direção da difusão do carbono está indicado pelas setas. (b) Microestrutura de um aço eutetóide resfriado lentamente. Consiste em perlita lamelar. A fase mais escura é a cementita, e a fase branca ferrita.

Microestrutura de composição hipoeutetóide ($< 0,76\% \text{p C}$)



Considere uma composição C_0 à esquerda do eutetóide, entre 0,022 e 0,76% em peso C; isso é denominado uma liga hipoeutetóide (menos que eutetóide).

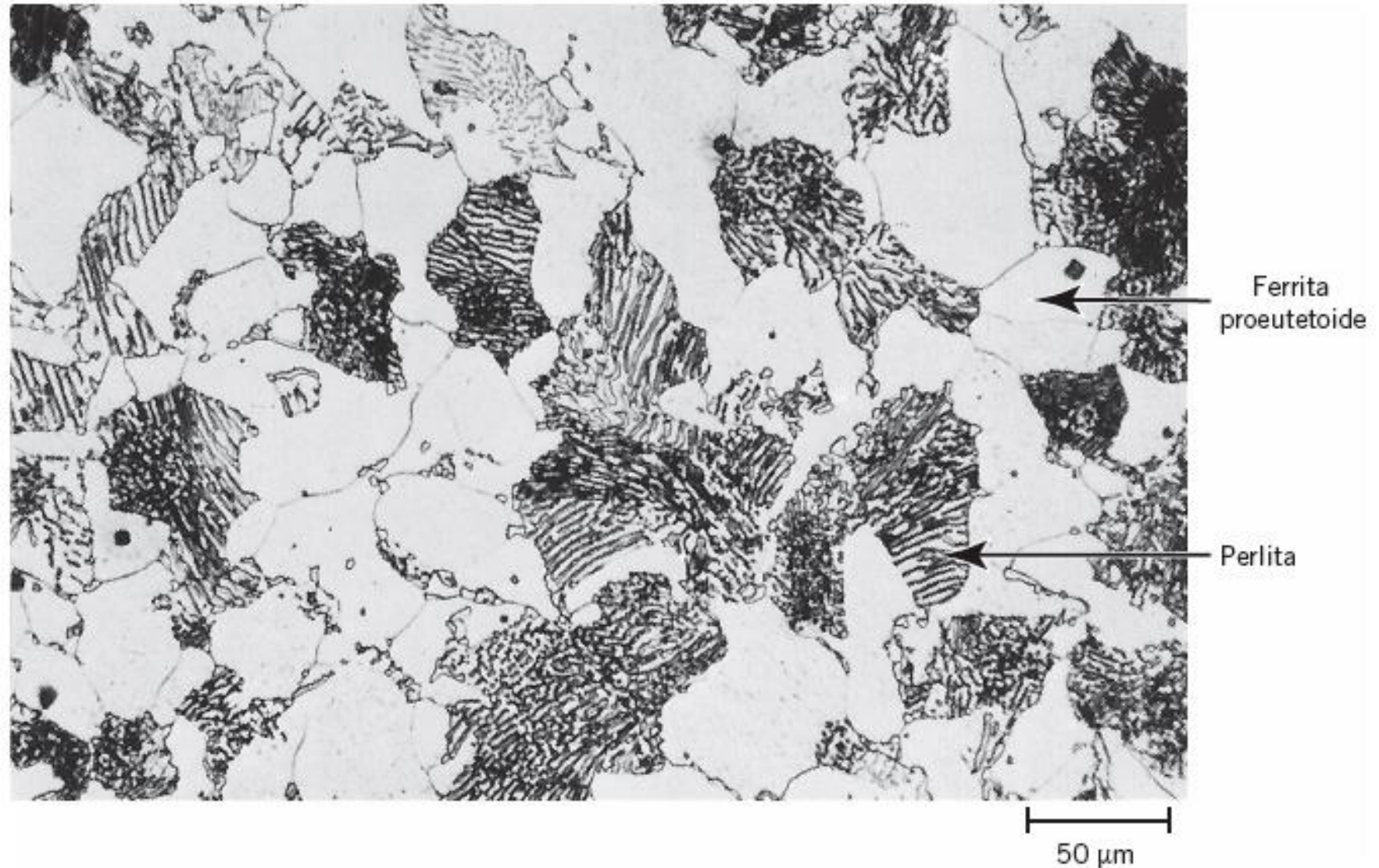
Resfriamento

875 °C - a microestrutura será constituída inteiramente por grãos da fase γ .

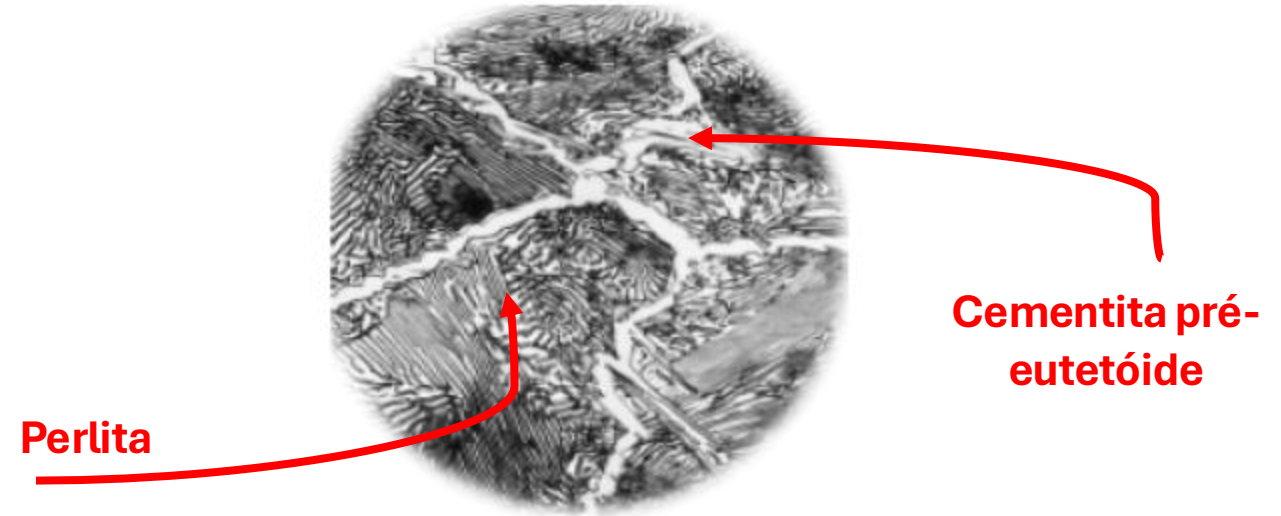
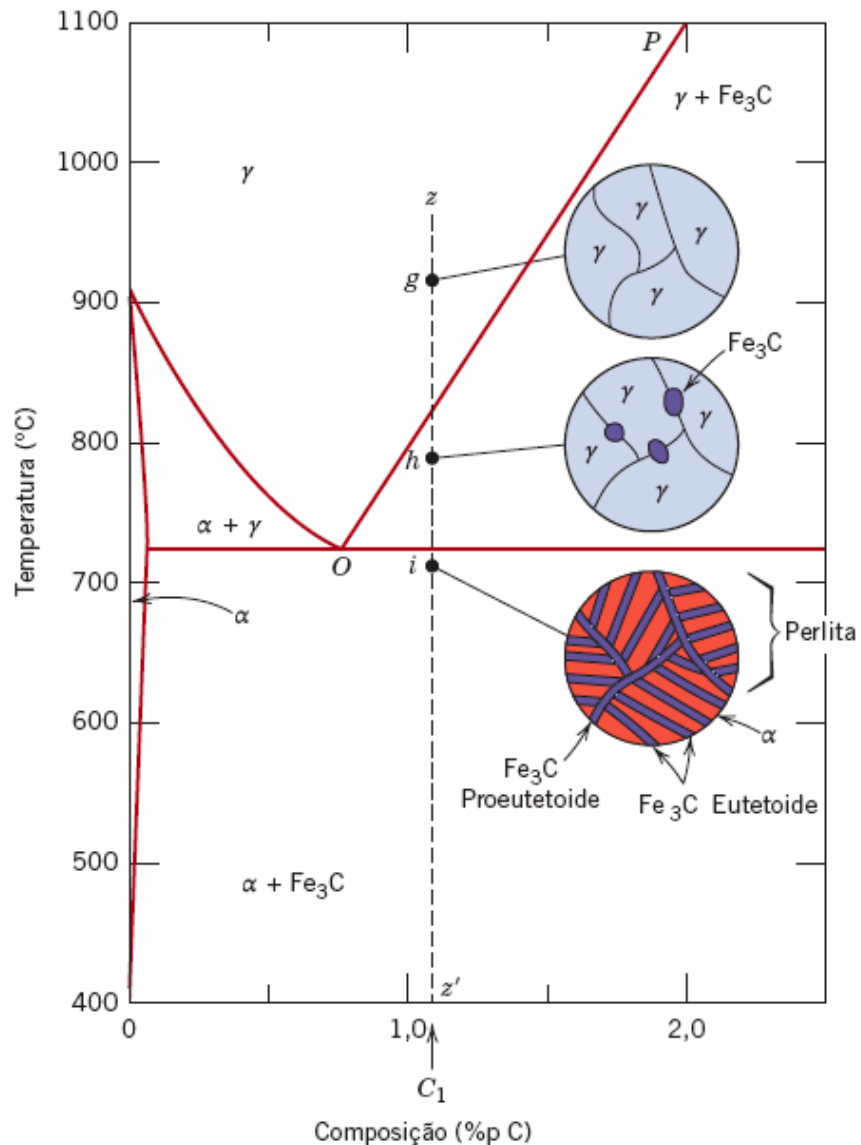
No resfriamento até o ponto d, cerca de 775 °C, coexistirão as fases $\alpha + \gamma$.

À medida que a temperatura cai logo abaixo do eutetóide, até o ponto f, toda a fase que estava presente na temperatura T_e (e tendo a composição eutetóide) se transformará em perlita, conforme a reação da Equação 9.19.

Microestrutura de composição hipoeutetoide (0,38%p C)



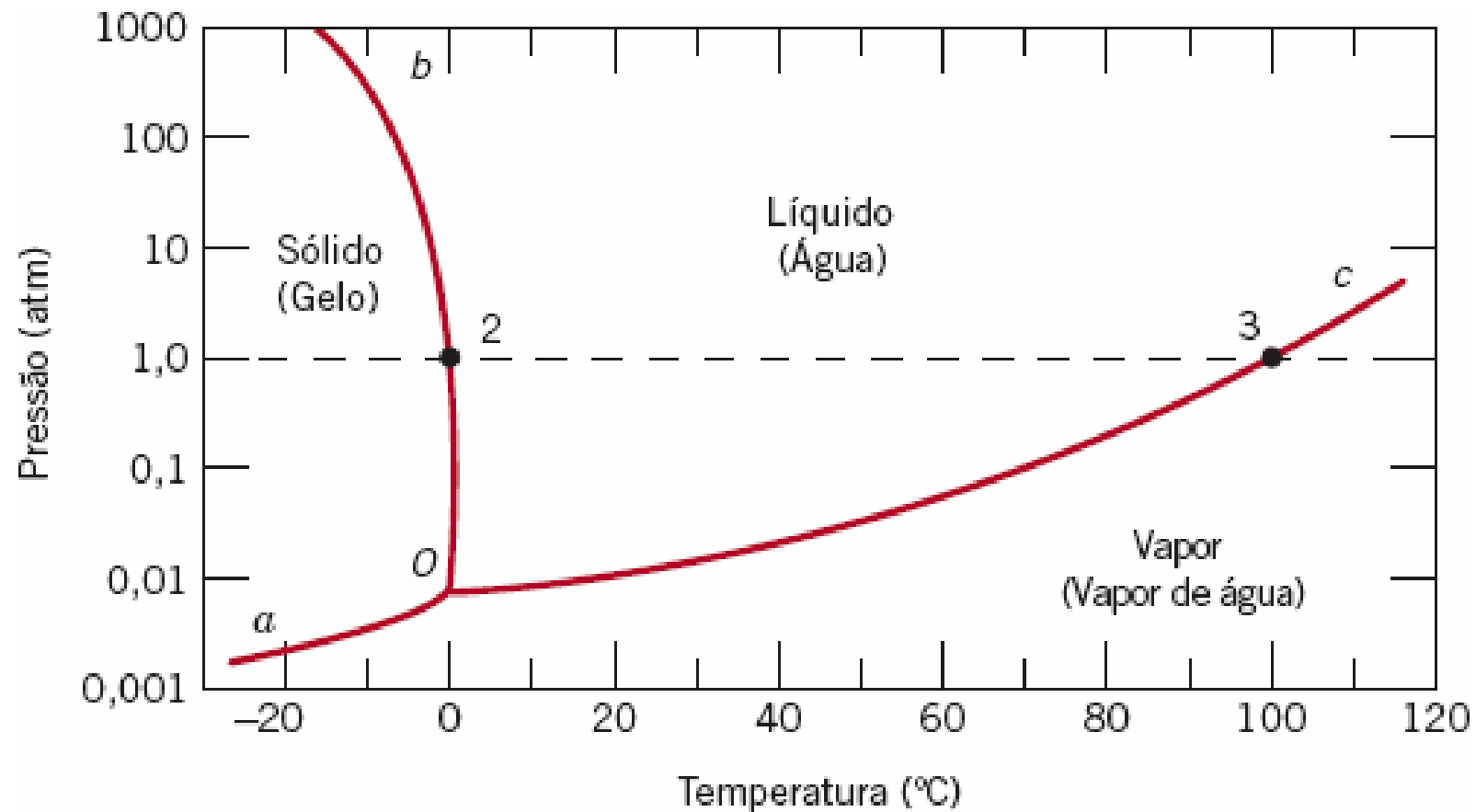
Microestrutura de composição hipereutetóide ($>0,76\% \text{p C}$)



Transformação de um aço Hipereutetóide resfriado lentamente. Em g se observa apenas austenita, em h, austenita e cementita. No ponto i toda a austenita remanescente é convertida em perlita, de forma que a microestrutura resultante consiste de perlita e cementita pró-eutetóide.

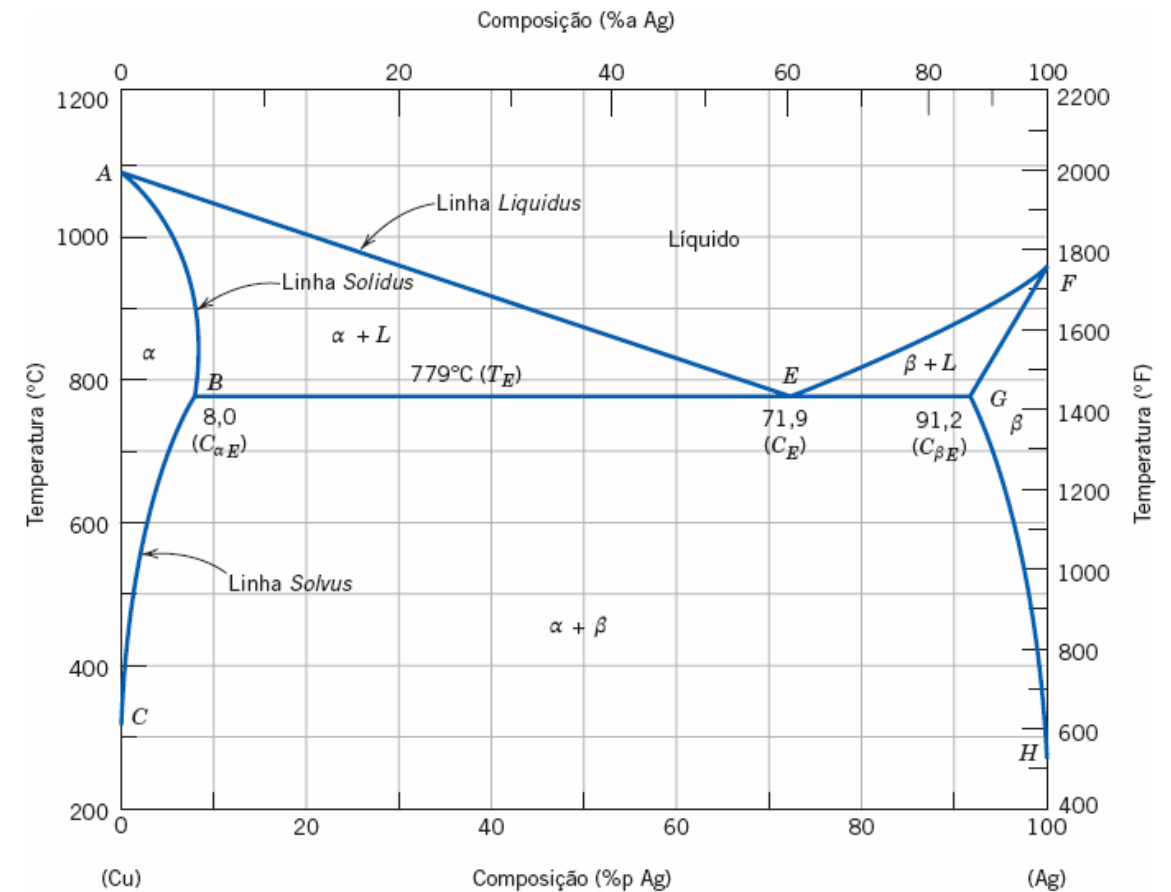
Take-home message...

1. Diagrama de fase (unário).



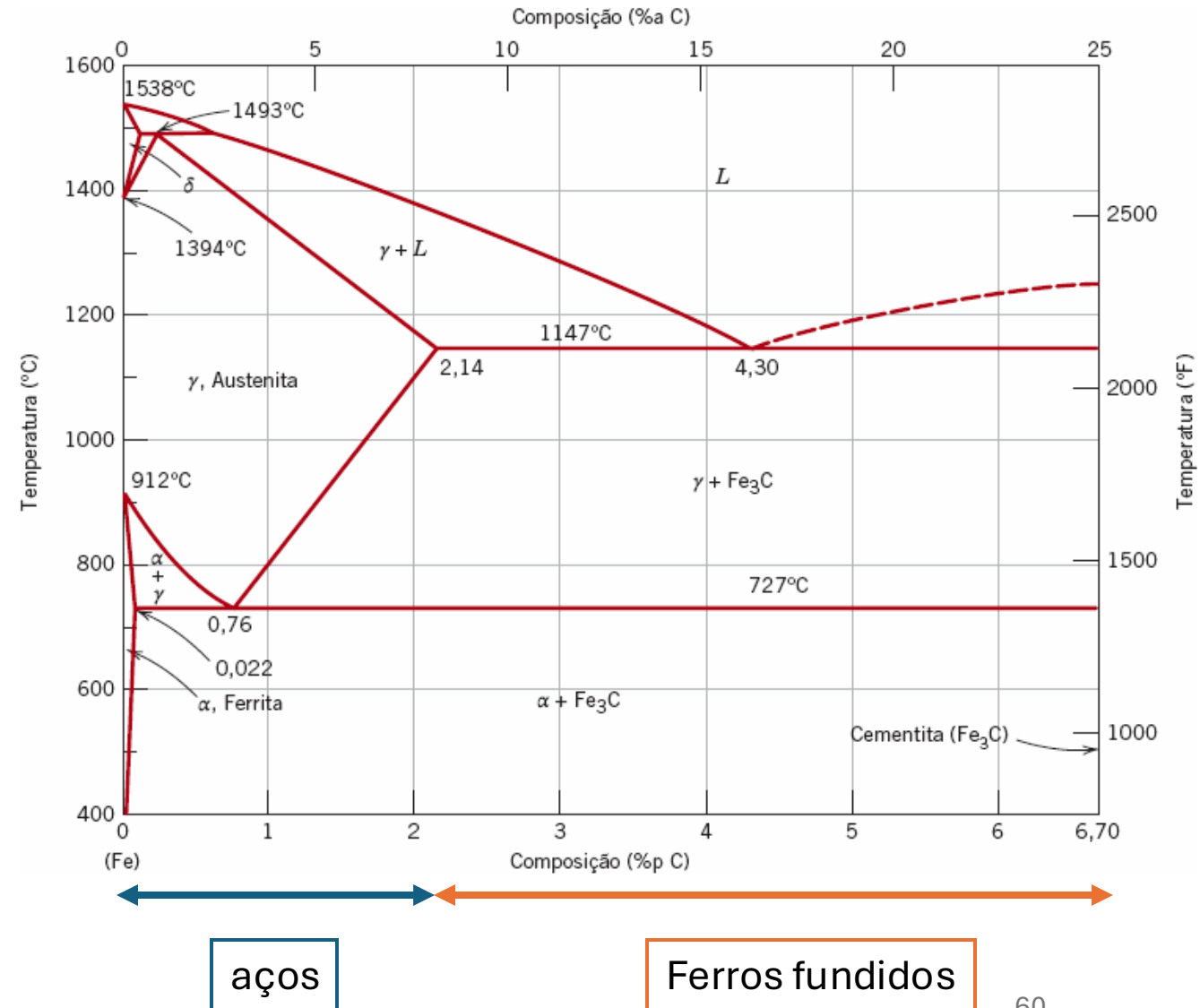
Take-home message...

1. Diagrama de fase (unário).
2. Diagrama de fase (binários).



Take-home message...

1. Diagrama de fase (unário).
2. Diagrama de fase (binários).
3. Diagrama Fe-C.



Próxima aula...

- Transformação de fase
- Tratamento térmico

