



# Introdução a Ciência dos Materiais

## Diagramas de fases

Professora: Maria Ismenia Sodero

[maria.ismenia@usp.br](mailto:maria.ismenia@usp.br)



# O que você vai aprender?

- definição de “fase”;
- curva de resfriamento;
- diagramas de equilíbrio de sistemas binários;
- equilíbrio de formação e decomposição de fases.
- exemplos de diagramas de fases relacionados com a microestrutura dos materiais.

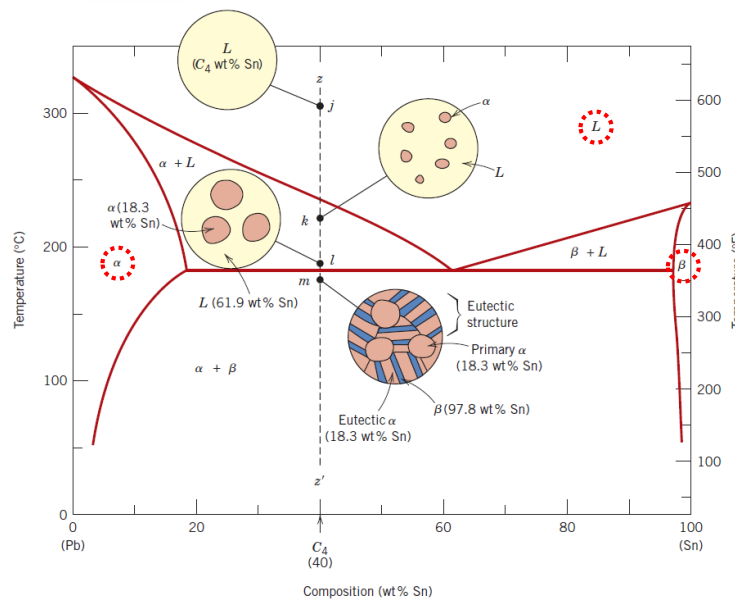
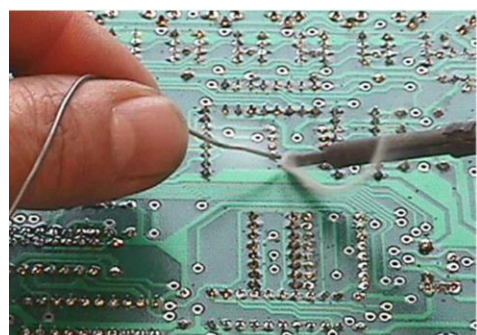


# Por que estudar diagramas de fases?

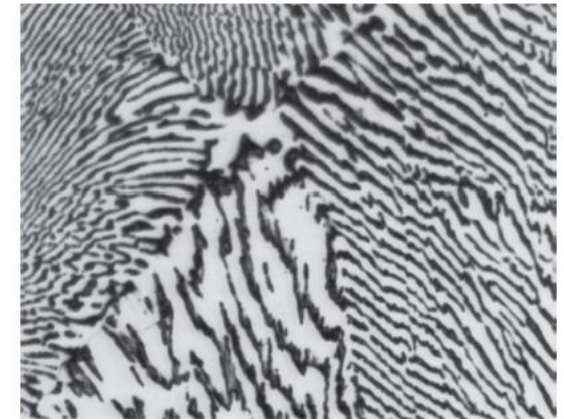
Os diagramas de fases relacionam temperatura, composição química e quantidade das fases em equilíbrio.

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

Forte correlação entre a **MICROESTRUTURA** e as **PROPRIEDADES**;



Exemplo de Diagrama de Fases do Sistema Pb-Sn



A microestrutura de uma solda macia eutética resfriada lentamente (38%Pb-62%Sn), consiste de uma estrutura lamelar de solução sólida rica em estanho (branca) e solução sólida rica em chumbo (escura).

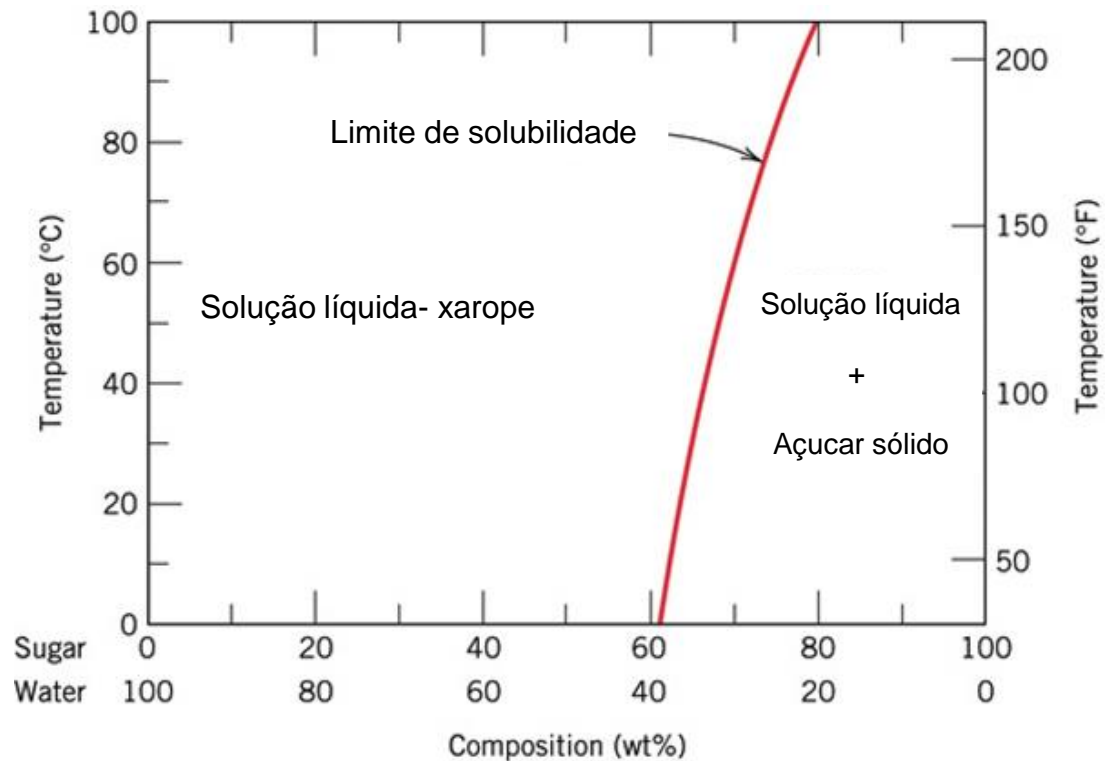


# Definições

## Limite de solubilidade

Existe uma concentração máxima de átomos de soluto que pode se dissolver no solvente para formar uma solução sólida;

Além deste limite de solubilidade, resulta na formação de uma outra solução sólida ou de um outro composto que possui uma composição diferente.





# Diagramas de fase de substância pura

Ponto: equilíbrio trifásico  
Linha: equilíbrio bifásico

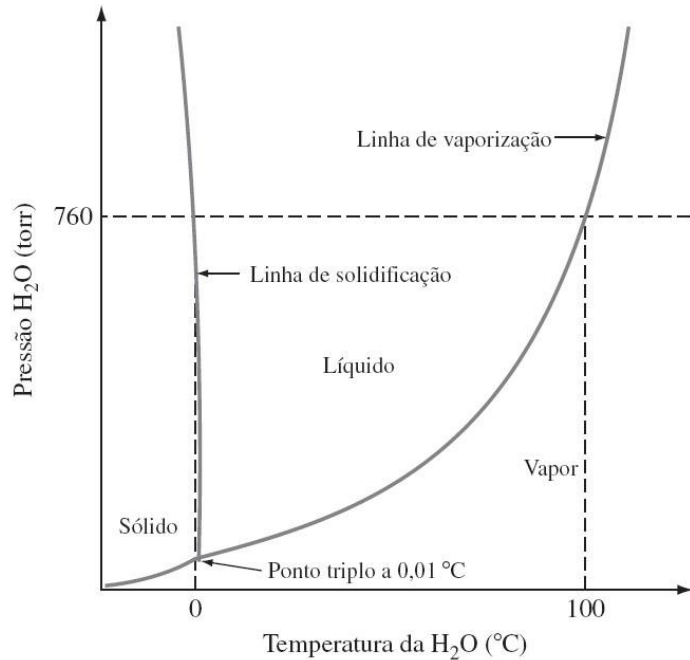


Diagrama aproximado de pressão-temperatura  $PT$  para a água pura

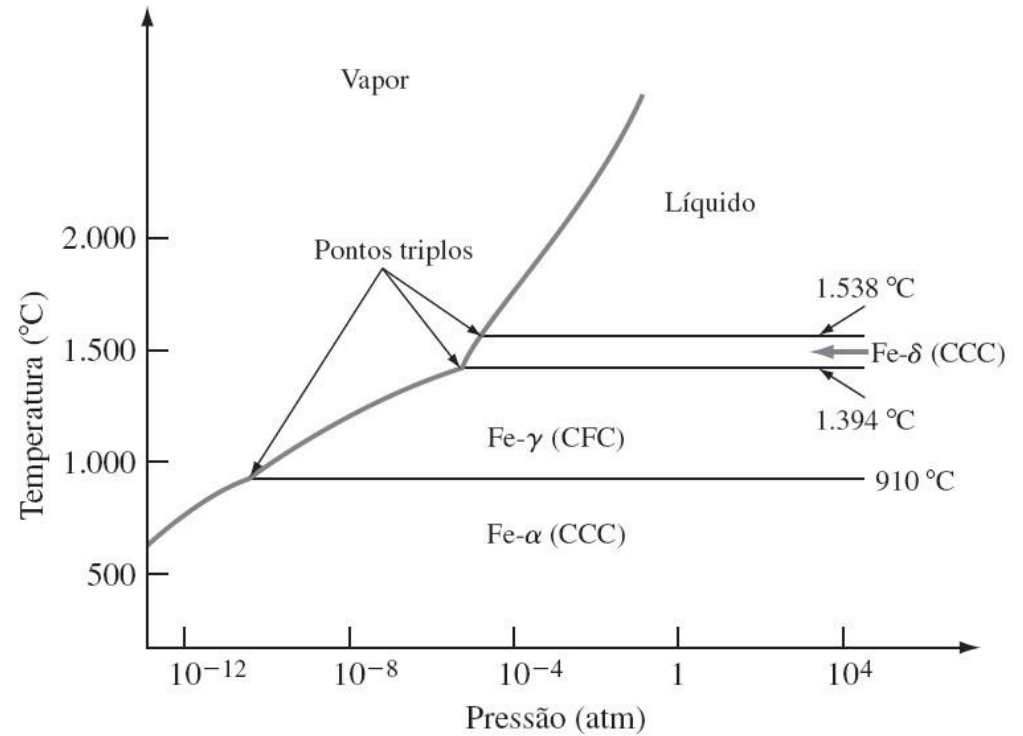


Diagrama aproximado pressão-temperatura  $PT$  para o ferro puro



# Diagrama isomorfo binário

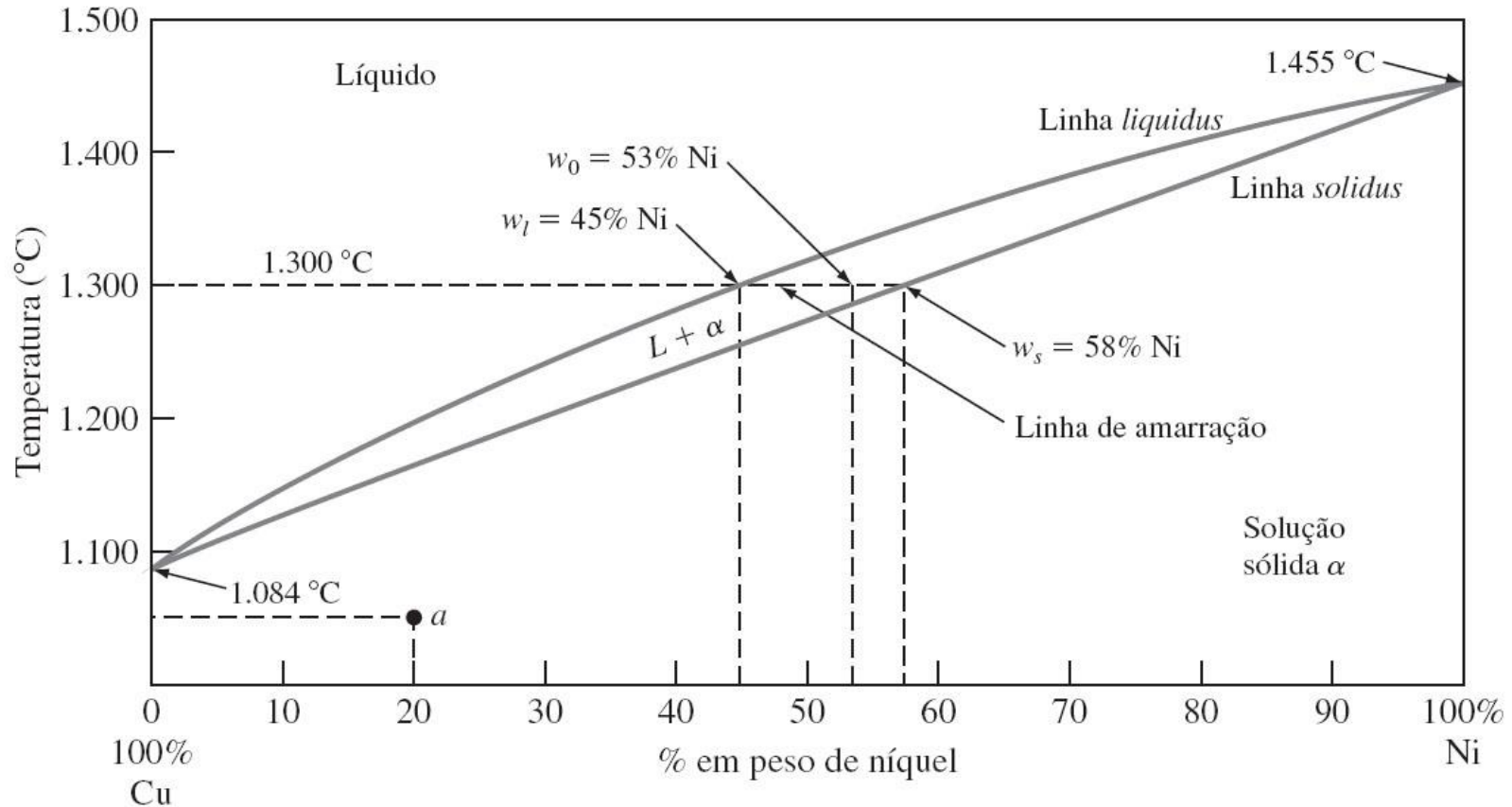
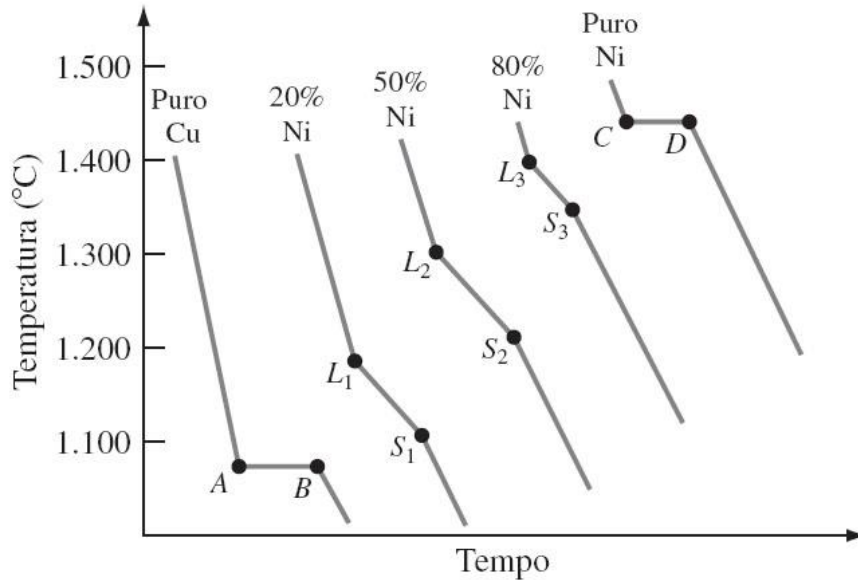


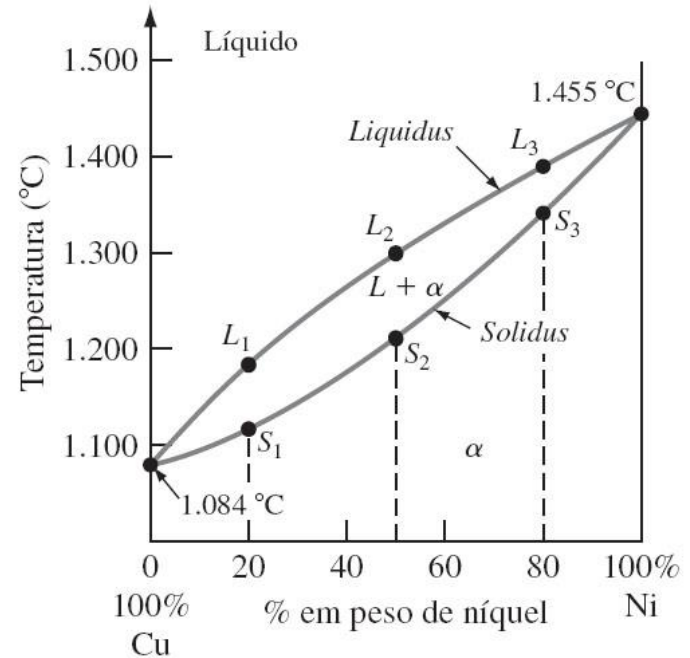
Diagrama de fases cobre-níquel. O cobre e o níquel têm solubilidade total no estado líquido e no estado sólido. As soluções sólidas cobre-níquel fundem num intervalo de temperaturas, em vez de fundirem a uma determinada temperatura, como acontece no caso dos metais puros.



## Como se constrói experimentalmente um diagrama de fases?



(a)

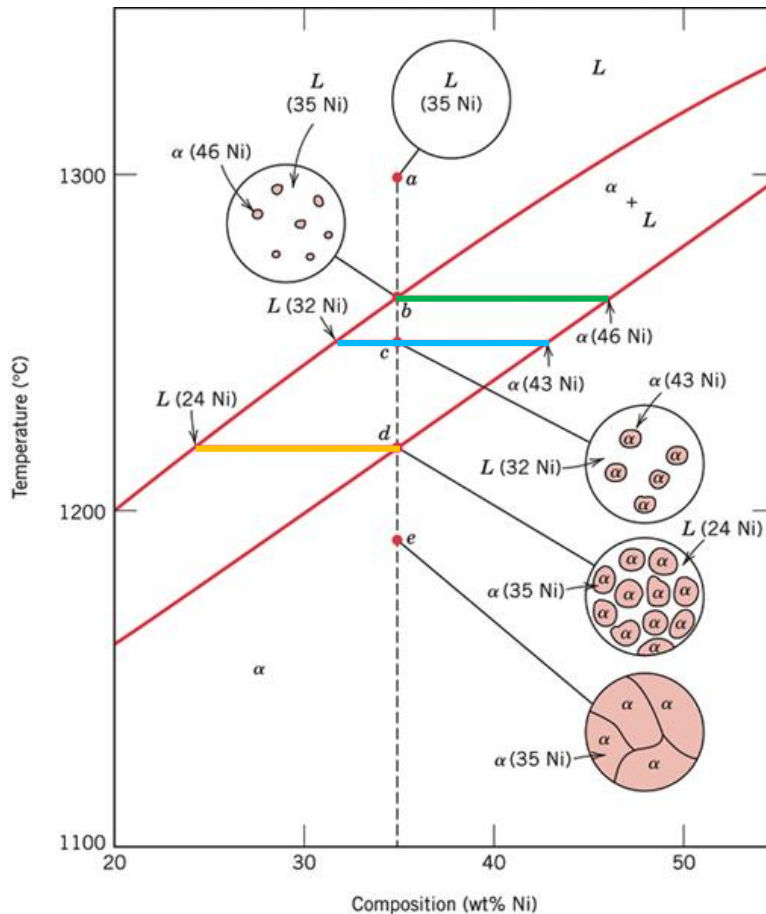


(b)

Construção do diagrama de equilíbrio de fases Cu-Ni a partir de curvas de resfriamento líquido-sólido. (a) curvas de resfriamento, (b) diagrama de equilíbrio de fases.



# Desenvolvimento das ligas isomorfas



- 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 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.

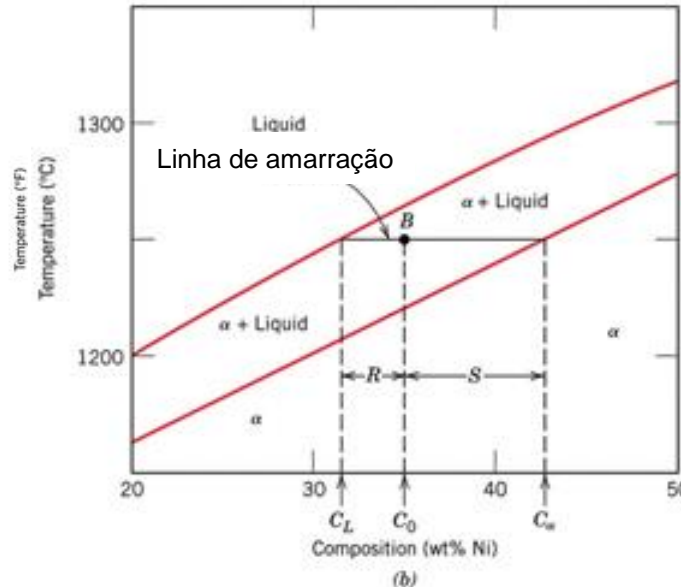
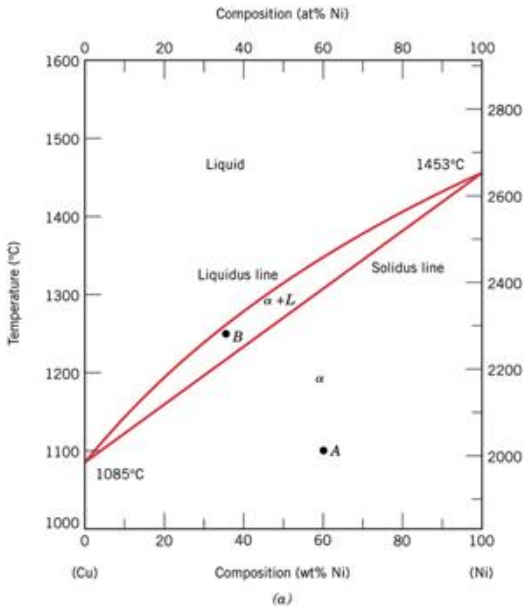




# Interpretação de diagramas de fases

- Fases presentes;
- Determinação da **composição** das fases presentes;
- Determinação da **quantidade** das fases presentes: Regra da alavanca, é usada para se determinar as proporções das fases em equilíbrio em um campo de duas fases.

Consideremos  $W_L$  e  $W_\alpha$  as frações mássicas, respectivamente, da fase líquida, L, e da fase sólida,  $\alpha$



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

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

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

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

# Ligas Eutéticas

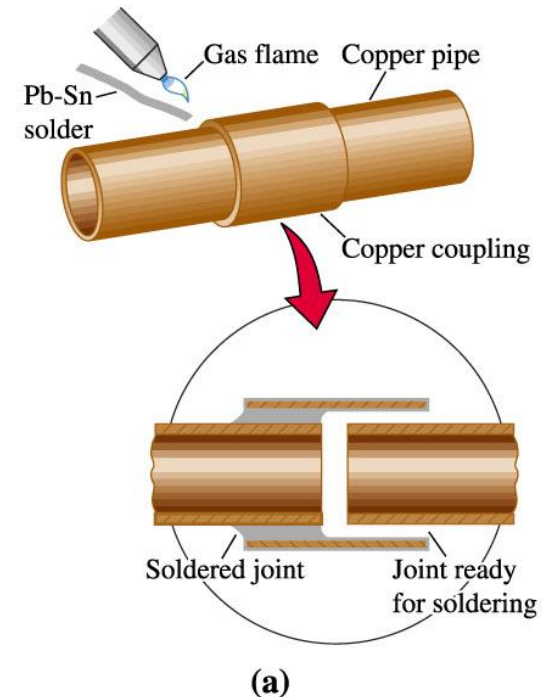
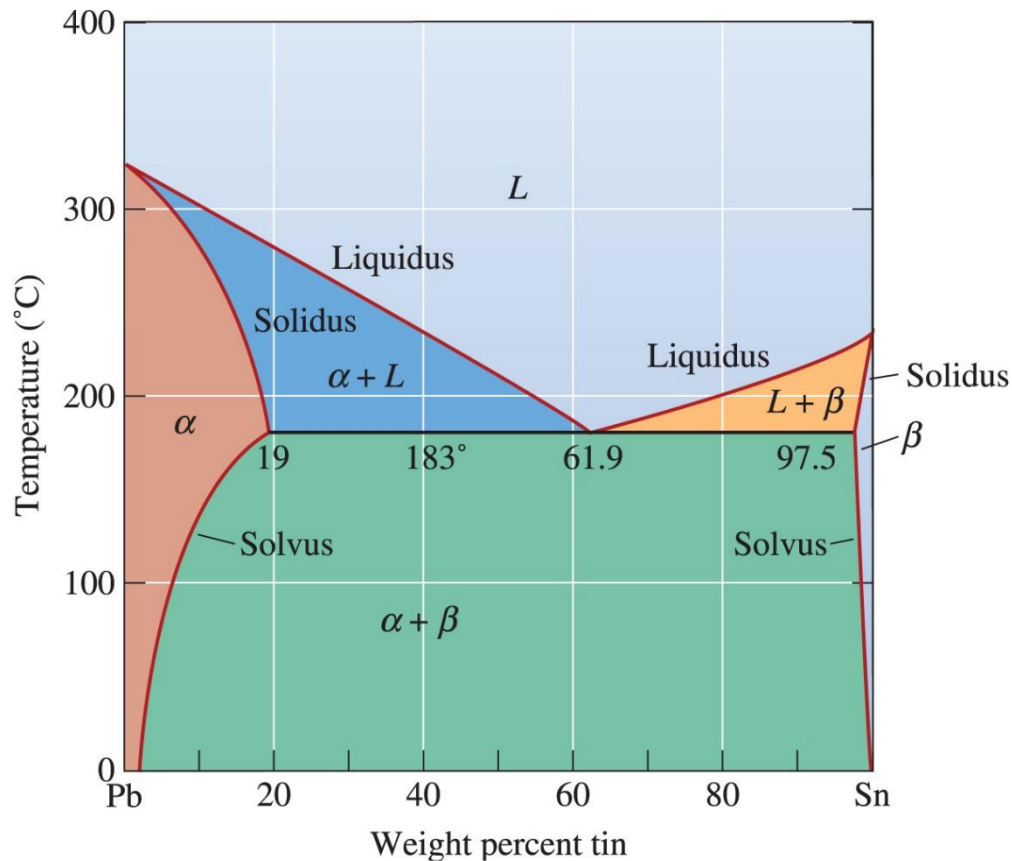
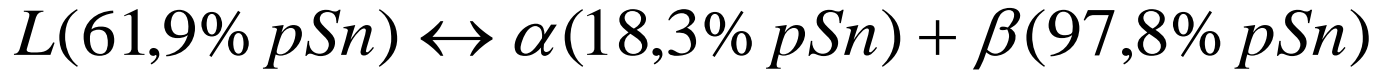


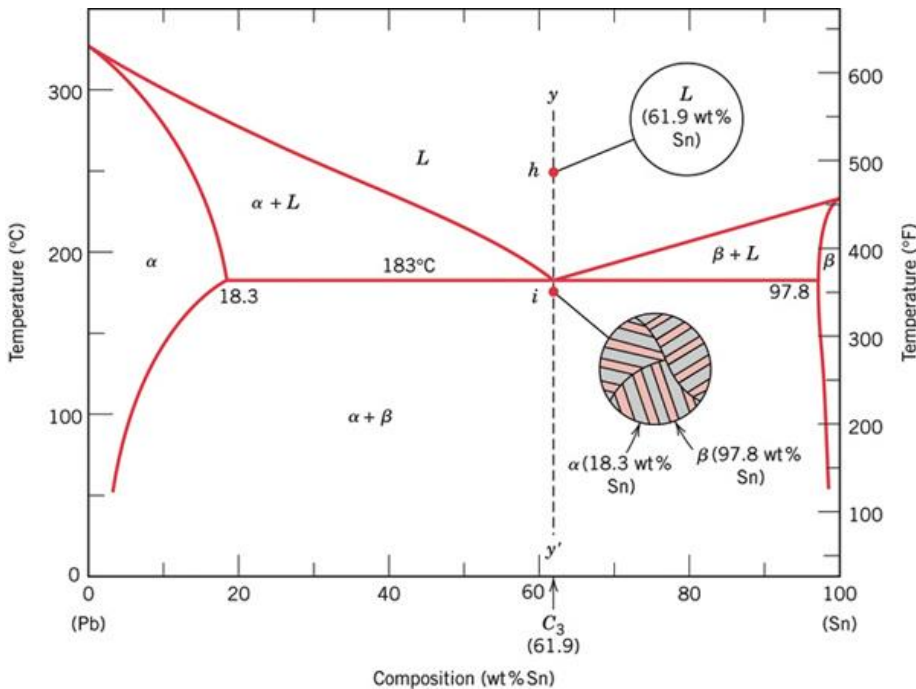
Diagrama de fases chumbo-estanho. Este diagrama se caracteriza por apresentar fases terminais ( $\alpha$  e  $\beta$ ) com solubilidade limitada no estado sólido. A característica mais importante deste sistema é a reação eutética que ocorre a 183 °C para 61,9% Sn. No ponto eutético, podem coexistir as fases  $\alpha$  (19,2% Sn),  $\beta$  (97,5% Sn) e líquido (61,9% Sn).

# Desenvolvimento da microestrutura em ligas eutéticas

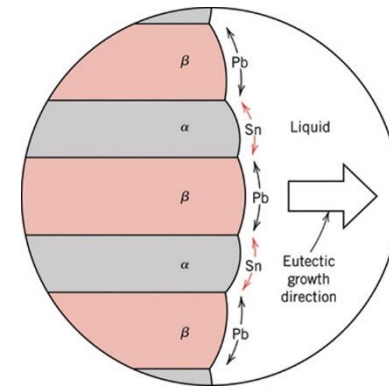
resfriamento



aquecimento



Microestrutura de uma liga chumbo-estanho com composição eutética



Representação esquemática das microestruturas em condições de equilíbrio para uma liga chumbo-estanho com a composição eutética C<sub>3</sub>, acima e abaixo da temperatura eutética

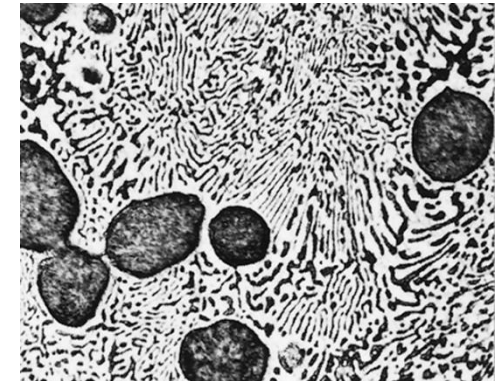
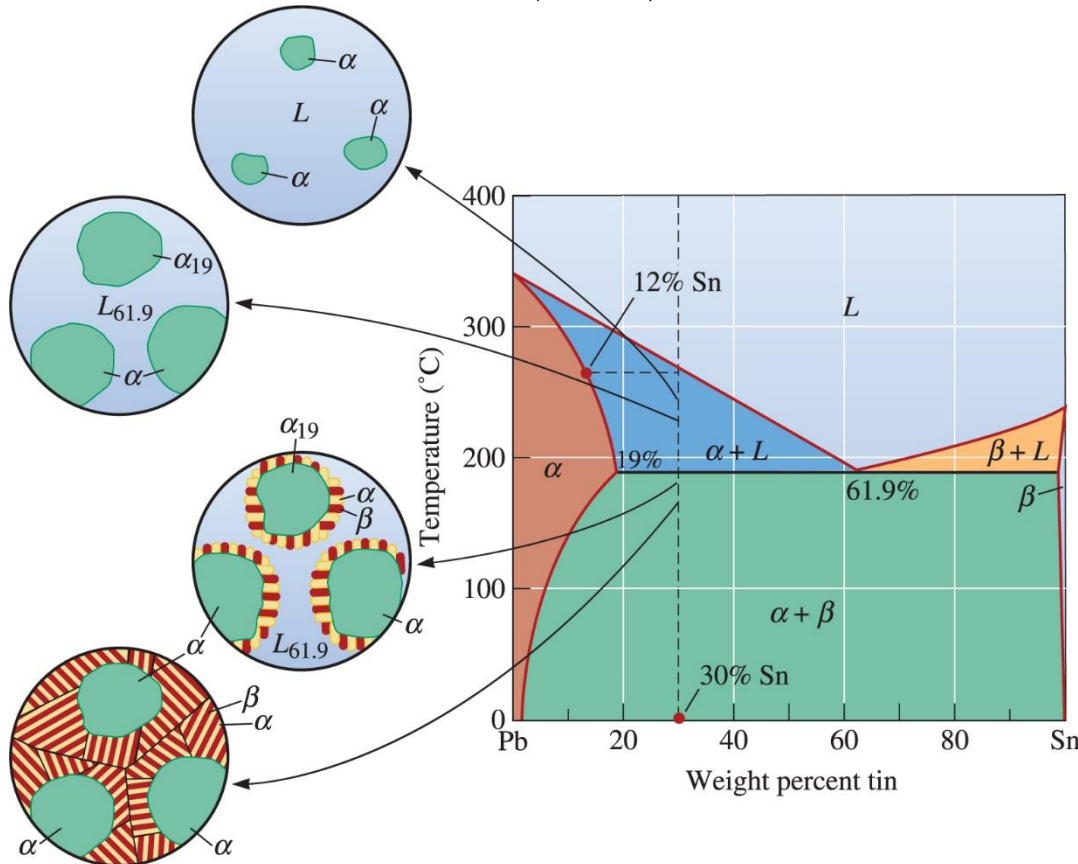
Representação esquemática da formação da estrutura eutética para o sistema Pb-Sn. As direções da difusão dos átomos de Sn e de Pb estão indicadas pelas respectivas setas.



# Desenvolvimento da microestrutura em ligas eutéticas Hipoeutética

Em ligas hipoeutéticas ocorre inicialmente precipitação de fase primária -  $\alpha$  *pró-eutéticas*.

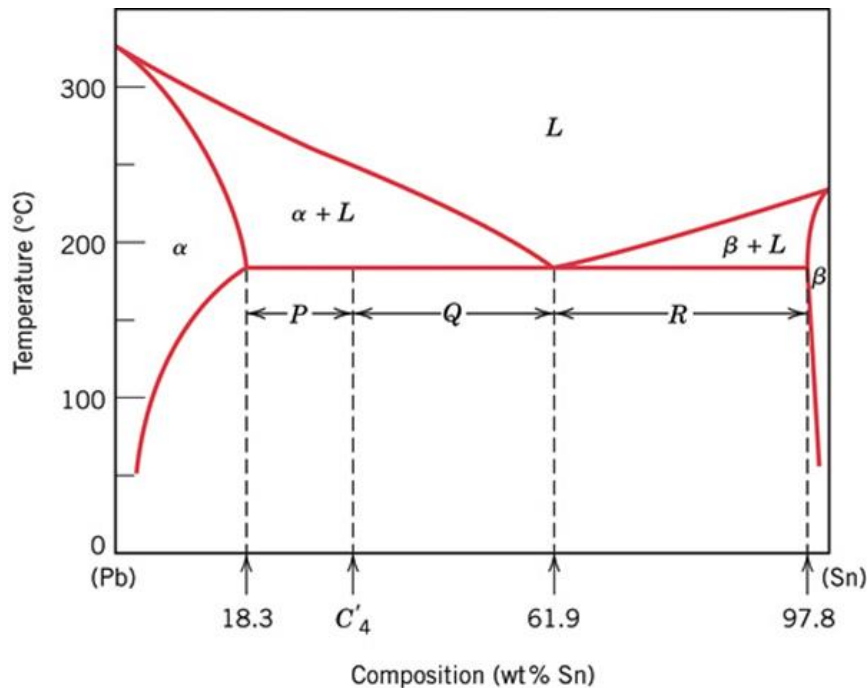
O líquido eutético residual  $L_{(61,9\% \text{ Sn})}$  se transforma em microestrutura *eutética* [ $\alpha_{(18,3\% \text{ Sn})} + \beta_{(97,8\% \text{ Sn})}$ ].





# Cálculo das quantidades relativas

## Microconstituente eutético e $\alpha$ primária



A fração do microconstituente eutético  $W_e$  é a mesma fração do líquido a partir do qual ele se transforma

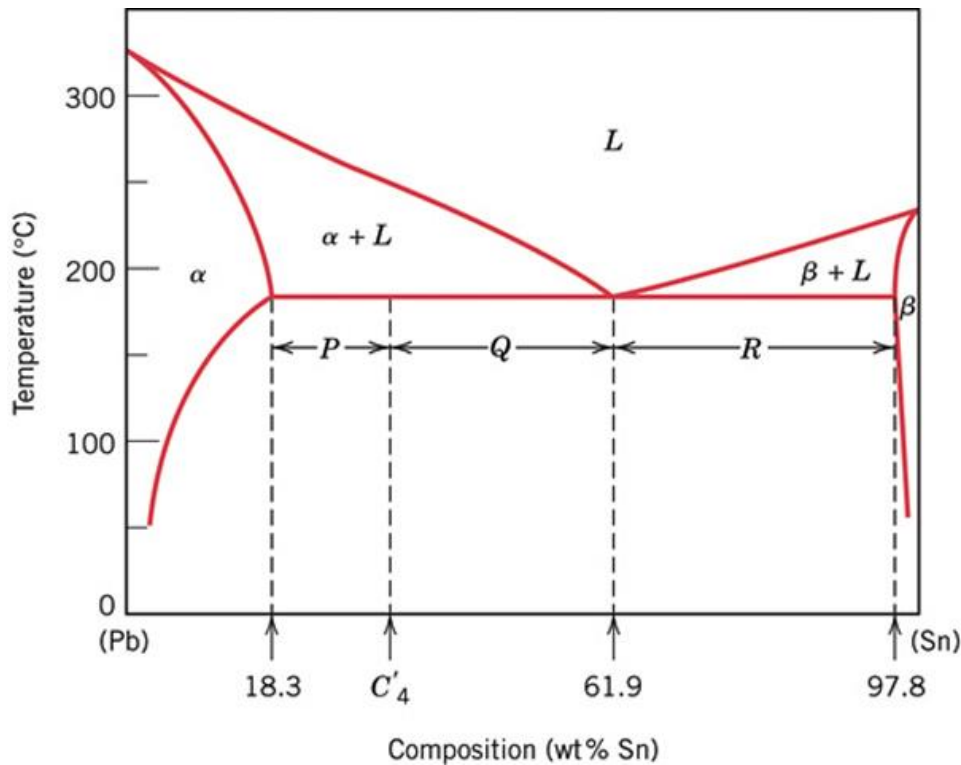
$$W_e = W_L = \frac{P}{P + Q}$$

A fração de  $\alpha$  primária  $W_{\alpha'}$ , é a fração da fase  $\alpha$  que existia antes da transformação eutética

$$W_{\alpha'} = \frac{Q}{P + Q}$$



# Cálculo das quantidades relativas



A fração da fase  $\alpha$  total,  $W_\alpha$  e também da fase  $\beta$ ,  $W_\beta$ , são determinadas pelo uso da regra da alavanca juntamente com uma linha de amarração que se estende totalmente ao longo do campo das fases  $\alpha + \beta$ .

$$W_\alpha = \frac{Q + R}{P + Q + R}$$

$$W_\beta = \frac{P}{P + Q + R}$$

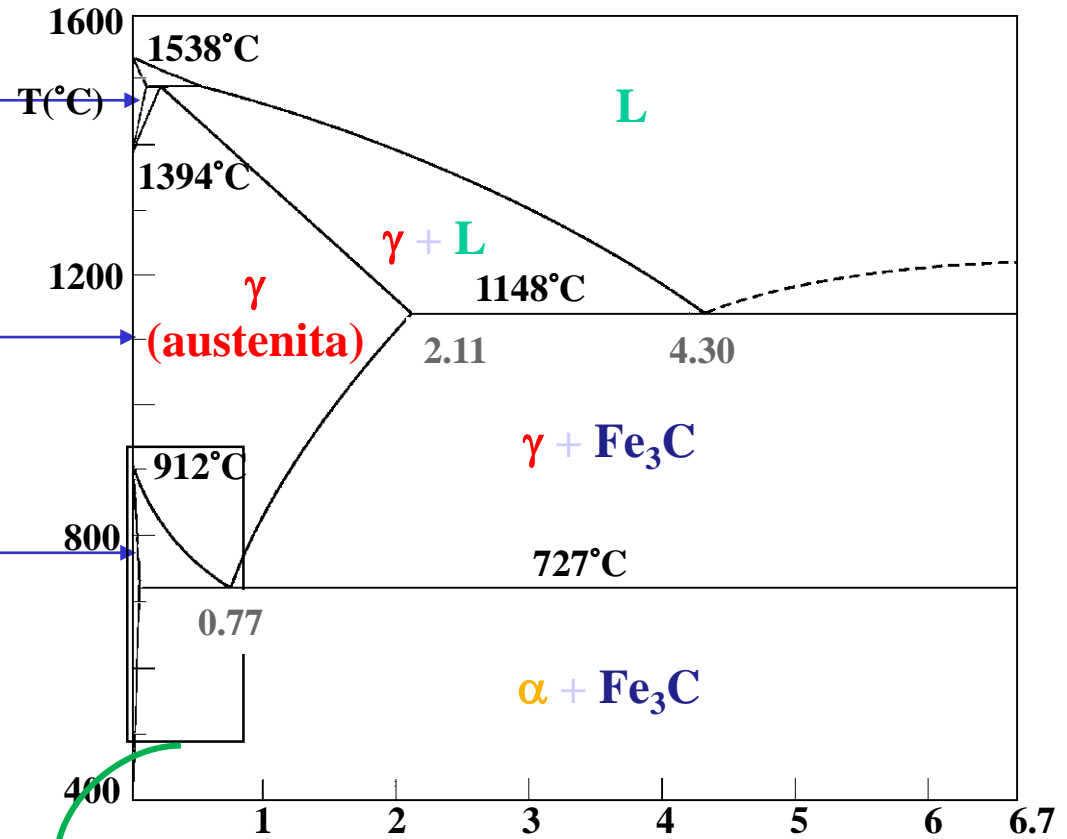
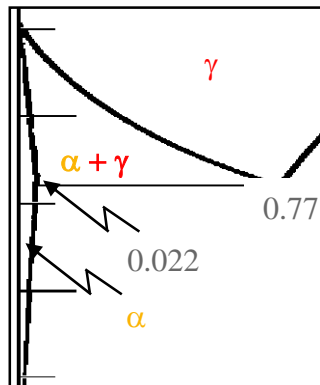
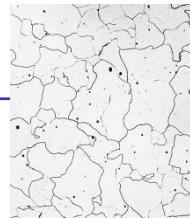
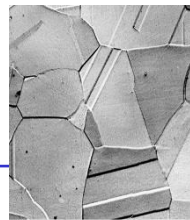


# Diagrama de Fases do Sistema Fe-C

Fe- $\delta$  : CCC

Fe- $\gamma$  : CFC

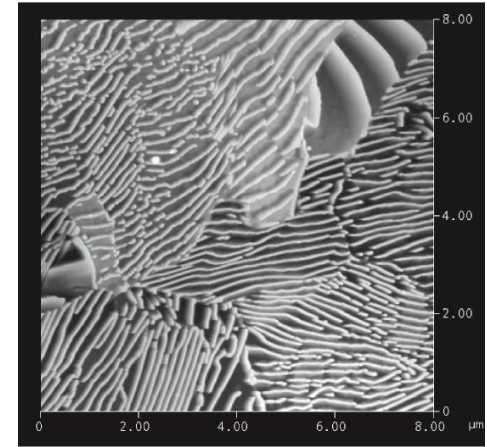
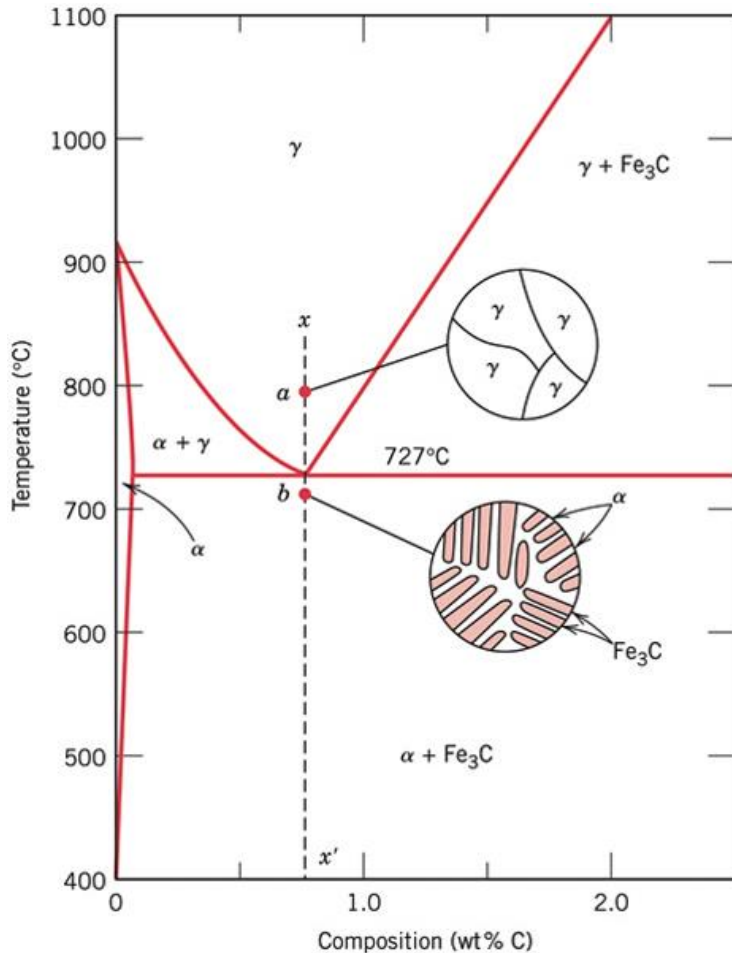
Fe- $\alpha$  : CCC



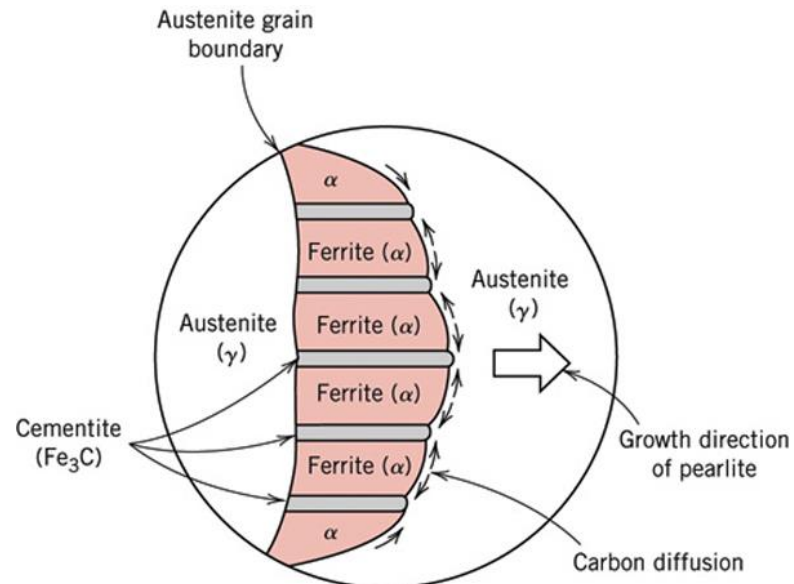


# Desenvolvimento das microestruturas em ligas Fe-C

## Ligas eutetóides



Perlita em aço eutectóide. A cementita apresenta-se em relevo, amias alta do que a ferrita devido ao ataque químico. Espaçamento entre lametla é bastante variável. Imagem de Microscopia de Força Atômica.

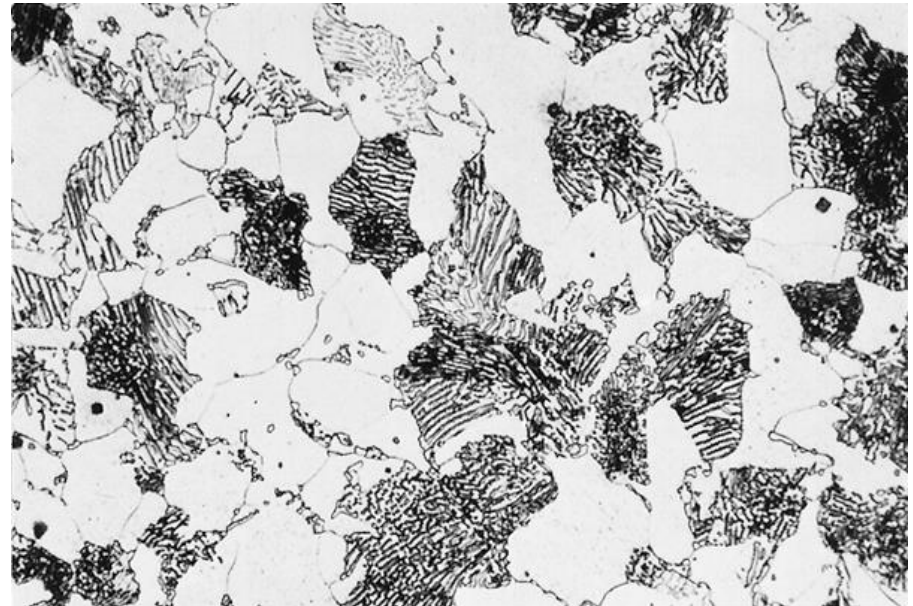
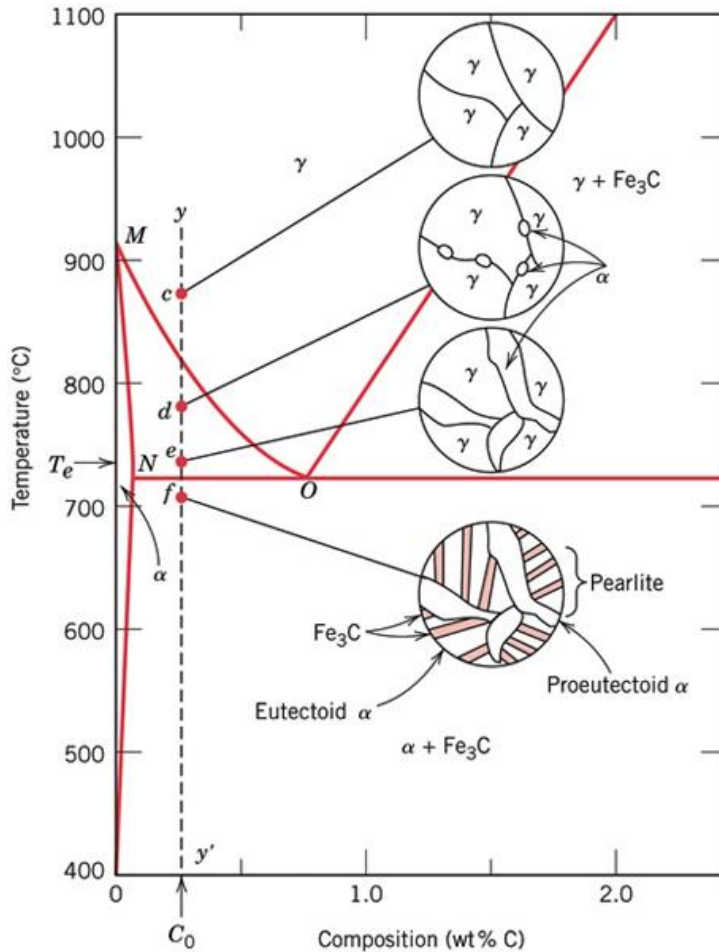






# Desenvolvimento das microestruturas em ligas Fe-C

## Ligas hipoeutetóides

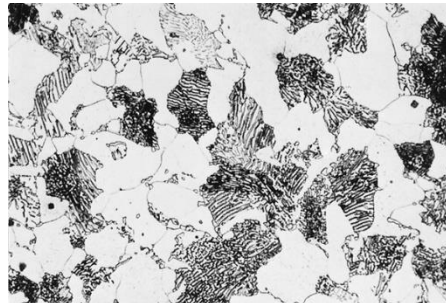
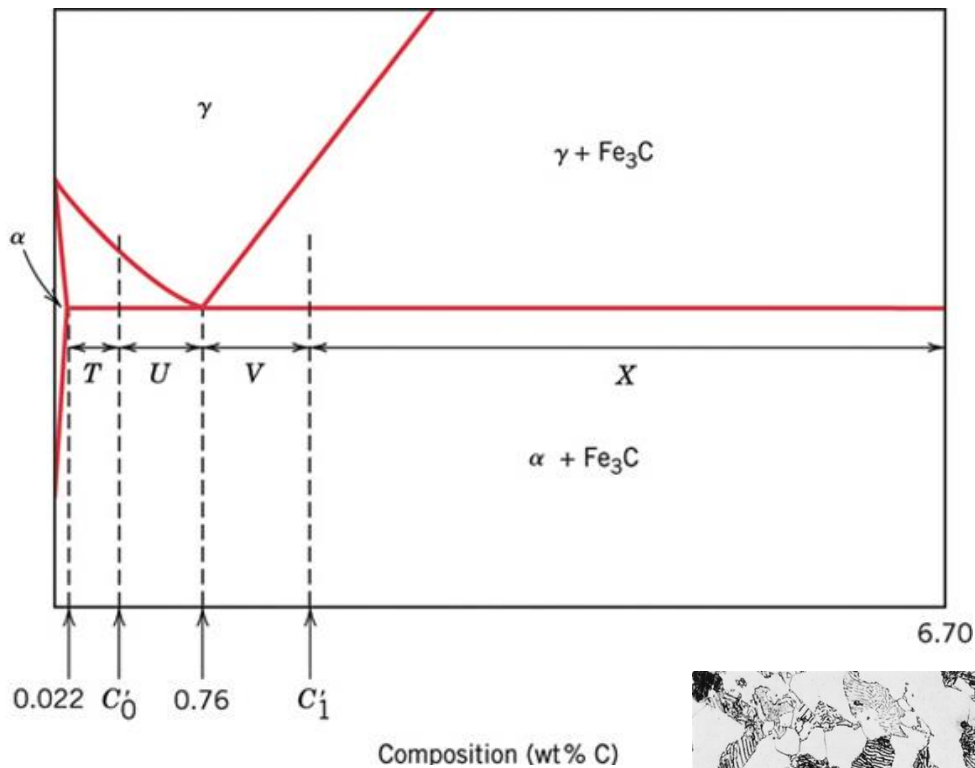




# Cálculo das quantidades relativas

## Hipoeutetóide

As quantidades relativas de  $\alpha$  proeutetóide ( $W_{\alpha'}$ ) e de perlita – linha de amarração da fronteira da fase  $\alpha$  até a composição eutetóide



$$W_P = \frac{T}{T + U}$$

$$W_P = \frac{C'_0 - 0,022}{0,76 - 0,022}$$

$$W_{\alpha'} = \frac{U}{T + U}$$

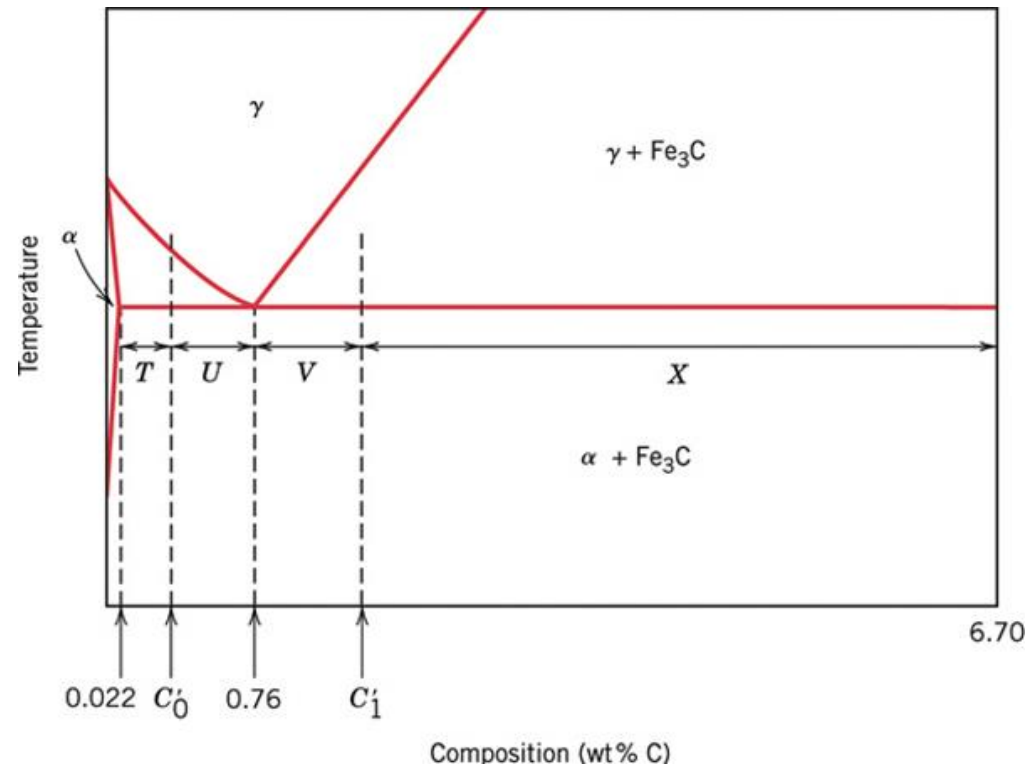
$$W_{\alpha'} = \frac{0,76 - C'_0}{0,76 - 0,022}$$



# Cálculo das quantidades relativas

## Hipoeutetóide

As quantidades relativas de  $\alpha$  total e cementsita – linha de amarração que se estende ao longo da totalidade do campo das fases  $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ .



$$W_{\alpha} = W_{\alpha e} + W_{\alpha'}$$

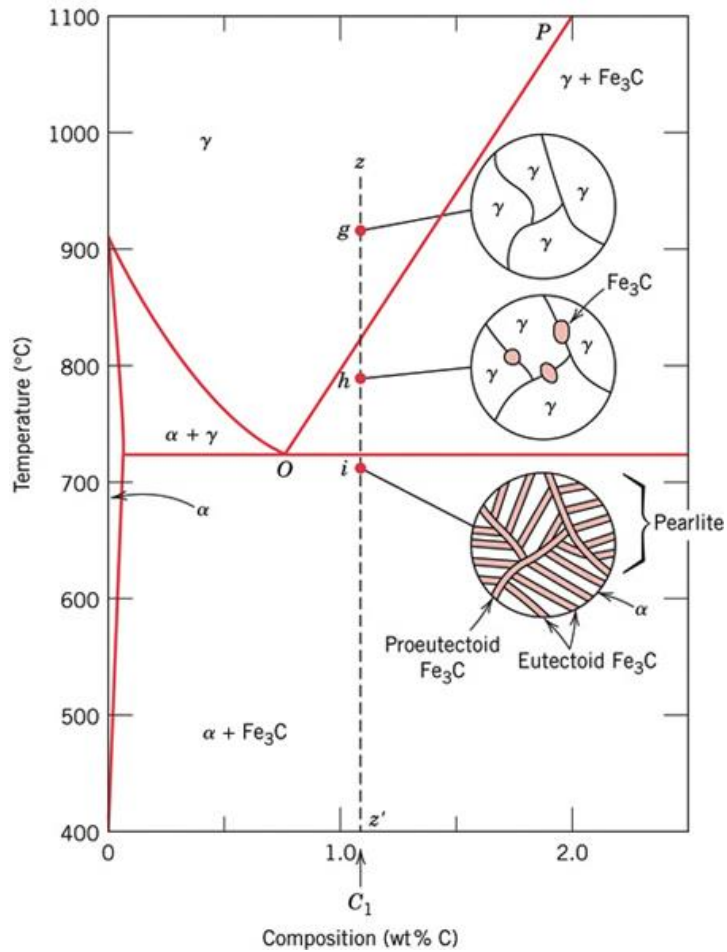
$$W_{\text{Fe}_3\text{C}} = \frac{C'_0 - 0,022}{6,70 - 0,022}$$

$$W_{\alpha} = \frac{6,70 - C'_0}{6,70 - 0,022}$$



# Desenvolvimento das microestruturas em ligas Fe-C

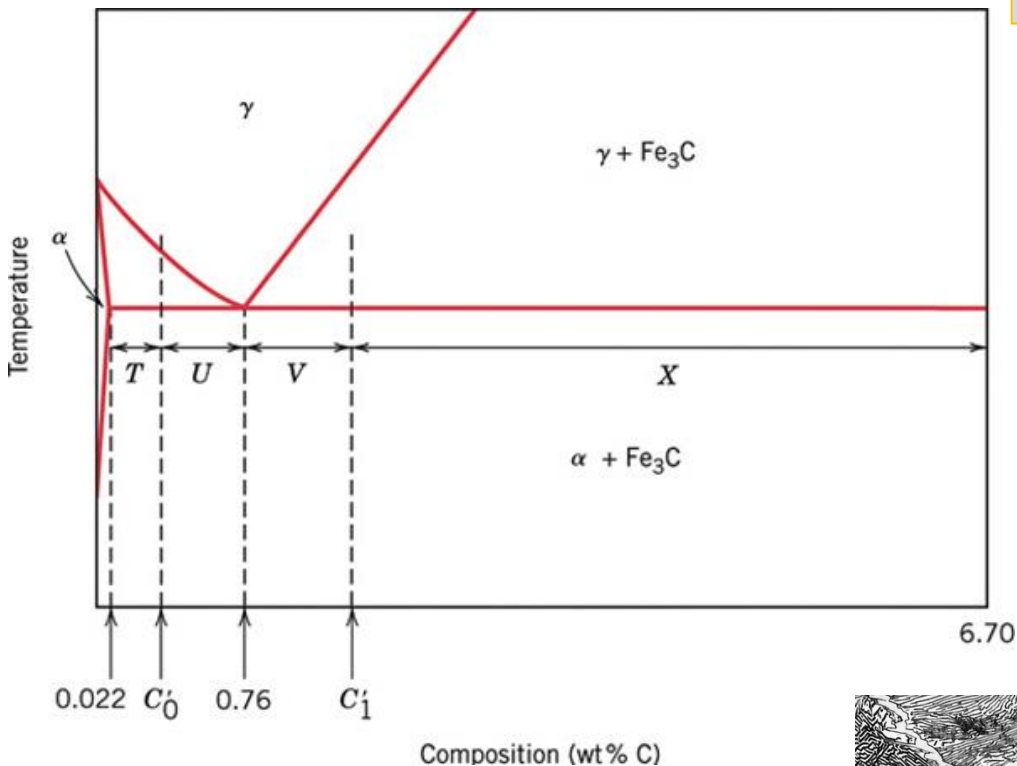
## Ligas hipereutetóides





# Cálculo das quantidades relativas Hipereutetóide

As quantidades relativas de Fe<sub>3</sub>C e de perlita – linha de amarração se estende de 0,76 a 6,70%pC.



$$W_P = \frac{X}{V + X}$$

$$W_P = \frac{6,70 - C_1}{6,70 - 0,76}$$

$$W_{Fe_3C} = \frac{V}{V + X}$$

$$W_{Fe_3C} = \frac{C_1' - 0,76}{6,70 - 0,76}$$

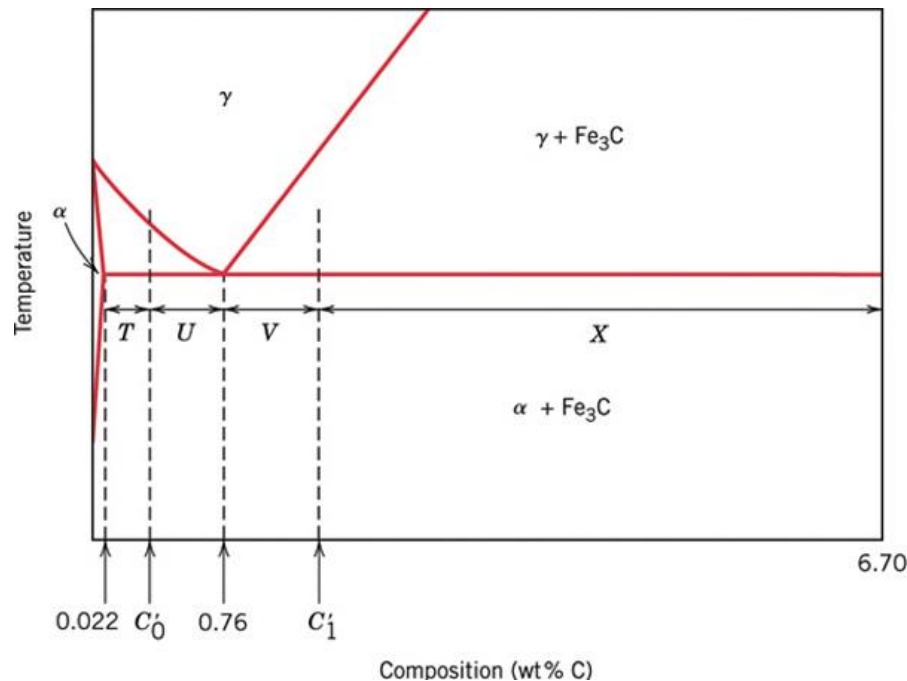




# Exemplo: Determinação das quantidades relativas dos microconstituintes Ferrita, Cementita e Perlita

Para uma liga com 0,35%pC em uma temperatura imediatamente abaixo da eutetóide, determine o seguinte:

- As frações das fases ferrita total e cementita total
- As frações de ferrita proeutetóide e perlita
- A fração de ferrita eutetóide

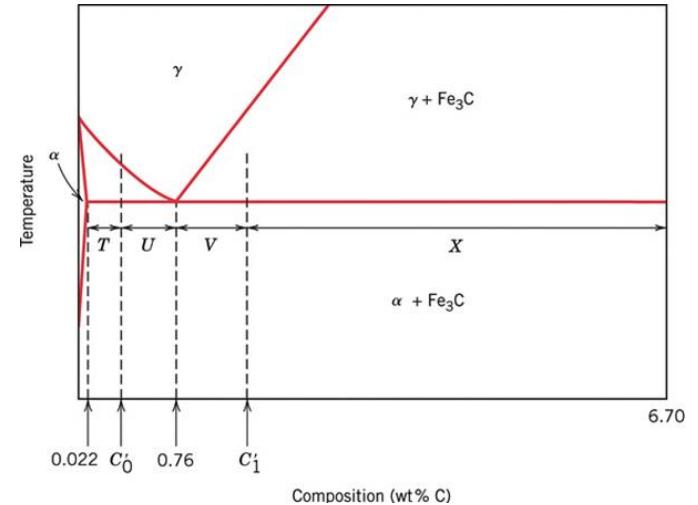




# Exemplo: Determinação das quantidades relativas dos microconstituintes Ferrita, Cementita e Perlita

Para uma liga com 0,35%pC em uma temperatura imediatamente abaixo da eutetóide, determine o seguinte:

- As frações das fases ferrita total e cementita total
- As frações de ferrita proeutetóide e perlita
- A fração de ferrita eutetóide



## RESOLUÇÃO

- Emprego de uma linha de amarração que se estende ao longo de todo o campo das fases  $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$

$$W_{\alpha} = \frac{X+V+U}{X+V+U+T} = \frac{6,7-0,35}{6,7-0,022} = 0,95 \quad W_{\text{Fe}_3\text{C}} = \frac{T}{X+V+U+T} = \frac{0,35-0,022}{6,7-0,022} = 0,05$$

- Emprego de uma linha que se estende apenas até a composição eutetóide.

$$W_{\alpha'} = \frac{U}{T+U} \quad W_{\alpha'} = \frac{0,76 - 0,35}{0,76 - 0,022} = 0,56$$

$$W_P = \frac{T}{T+U} \quad W_P = \frac{0,35 - 0,022}{0,76 - 0,022} = 0,44$$

c) Toda ferrita está como proeutetóide ou como eutetóide (na perlita). Portanto a soma dessas duas frações de ferrita será igual à fração total de ferrita, ou seja:

$$W_{\alpha'} + W_{\alpha e} = W_{\alpha}$$

$$W_{\alpha e} = 0,95 - 0,56 = 0,39$$



# Referências Bibliográficas

- 1) Askeland, D. R.; Phule, P. P. Ciência e engenharia dos materiais. São Paulo: CENGAGE, 2008;
- 2) Callister Jr., W. D. Fundamentos da ciência e engenharia de materiais. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2006;
- 3) Callister Jr., W. D. Ciência e engenharia de materiais. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2008;
- 4) Shackelford, J. E. Ciência dos materiais. São Paulo: Prentice Hall, 2008;
- 5) Smith, W. Hashemi, J. Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais – MacGrawHill
- 6) Colpaert, Hubertus. Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns -Editora: EDGARD BLUCHER, 2008.
- 7) PMT 2100 Introdução à Ciência dos Materiais para Engenharia EPUSP – 2012 - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais - ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO