

Física dos Materiais – 4300502

1º Semestre de 2016

Instituto de Física
Universidade de São Paulo

Professor: **Luiz C. C. M. Nagamine**

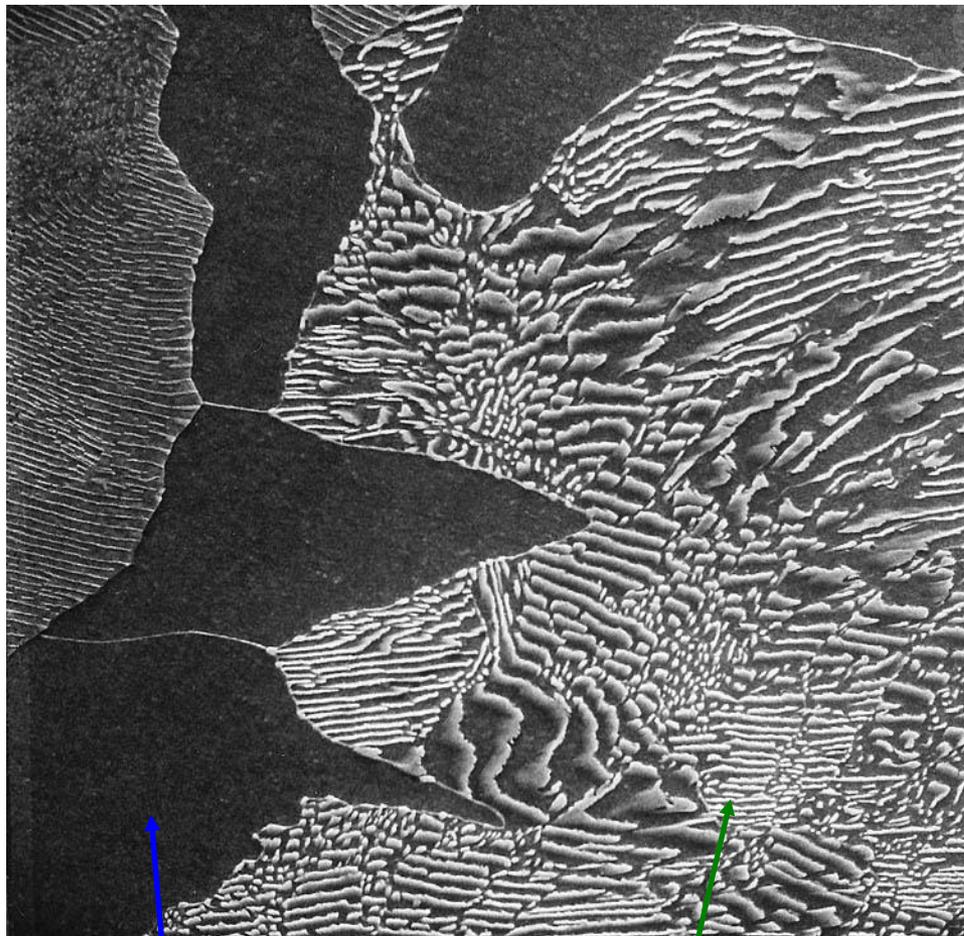
E-mail: nagamine@if.usp.br

Fone: **3091.6877**

homepage: <http://disciplinas.stoa.usp.br/course/view.php?id=10070>

Diagramas de Fases de Ligas

Aço carbono 0,44%p de C



Ferrita proeutetóide

Ferrita + Cementita

Diagramas de Fases de Ligas

Alguns conceitos básicos:

- **Solução sólida:** átomos do soluto ocupam posições intersticiais ou substitucionais na rede do solvente. A estrutura cristalina do solvente é mantida.

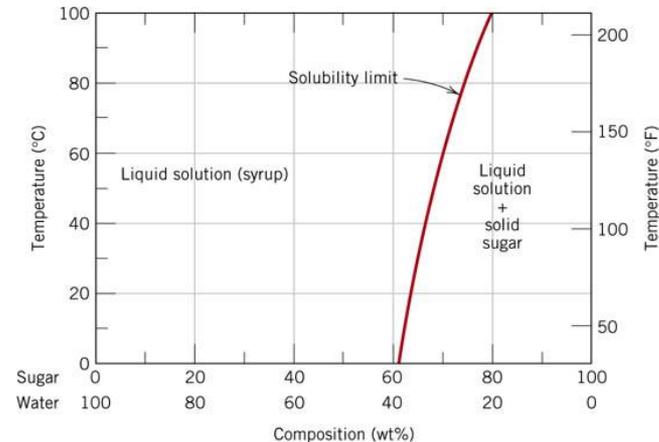
- **Limite de solubilidade:** existe uma concentração máxima de soluto que pode se dissolver no solvente para formar uma solução sólida.

- **Fases:** uma porção homogênea de um sistema que possui características físicas e químicas uniformes.

- **Misturas:** sistemas compostos de duas ou mais fases.

- **Microestrutura:** em geral os sistemas são multifásicos. A microestrutura é caracterizada pelo número de fases, suas proporções e pela maneira como elas estão distribuídas.

Solução de água e açúcar



- **Equilíbrio:** um sistema está em equilíbrio se para uma combinação de temperatura, pressão e composição, a sua energia livre é mínima. As características do sistema não mudam ao longo do tempo.

→ Equilíbrio de fases

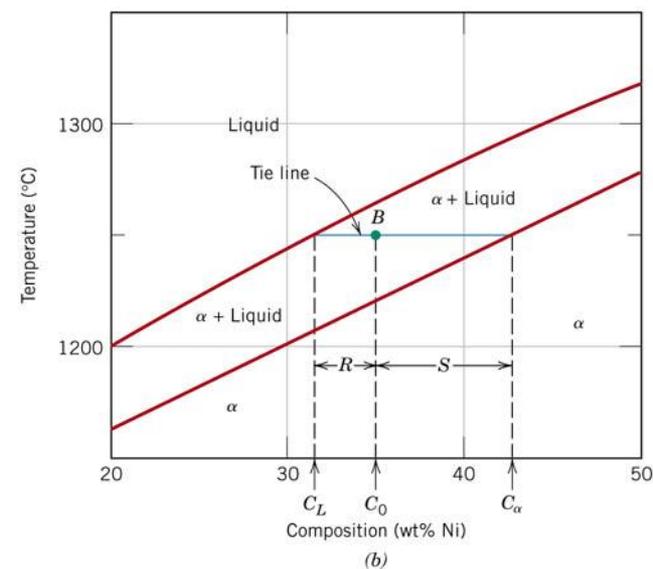
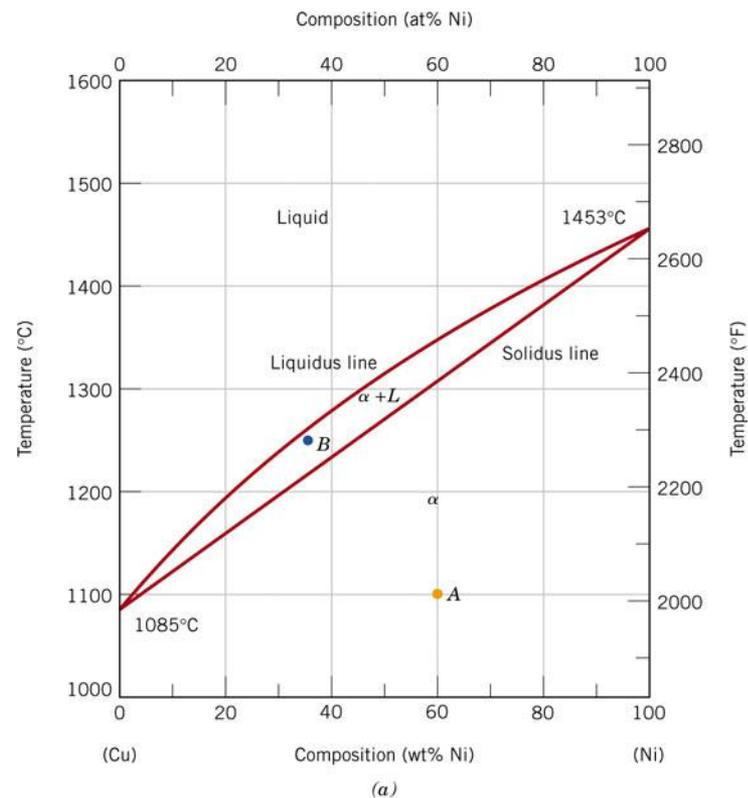
- Existem sistemas onde o estado de equilíbrio nunca é completamente atingido (taxas de variação muito lentas). Neste caso, o sistema está em um estado de não-equilíbrio ou metaestável.

Diagramas de Fases em condições de equilíbrio

Em geral, considera-se a pressão de 1 atm e o diagrama de fases estabelece as relações entre temperatura e composição.

Sistemas Isomorfos Binários
(exemplo Cu-Ni CFC-CFC)

Fases: L (líquido) e
 α (solução sólida)



Diagramas de Fases em condições de equilíbrio

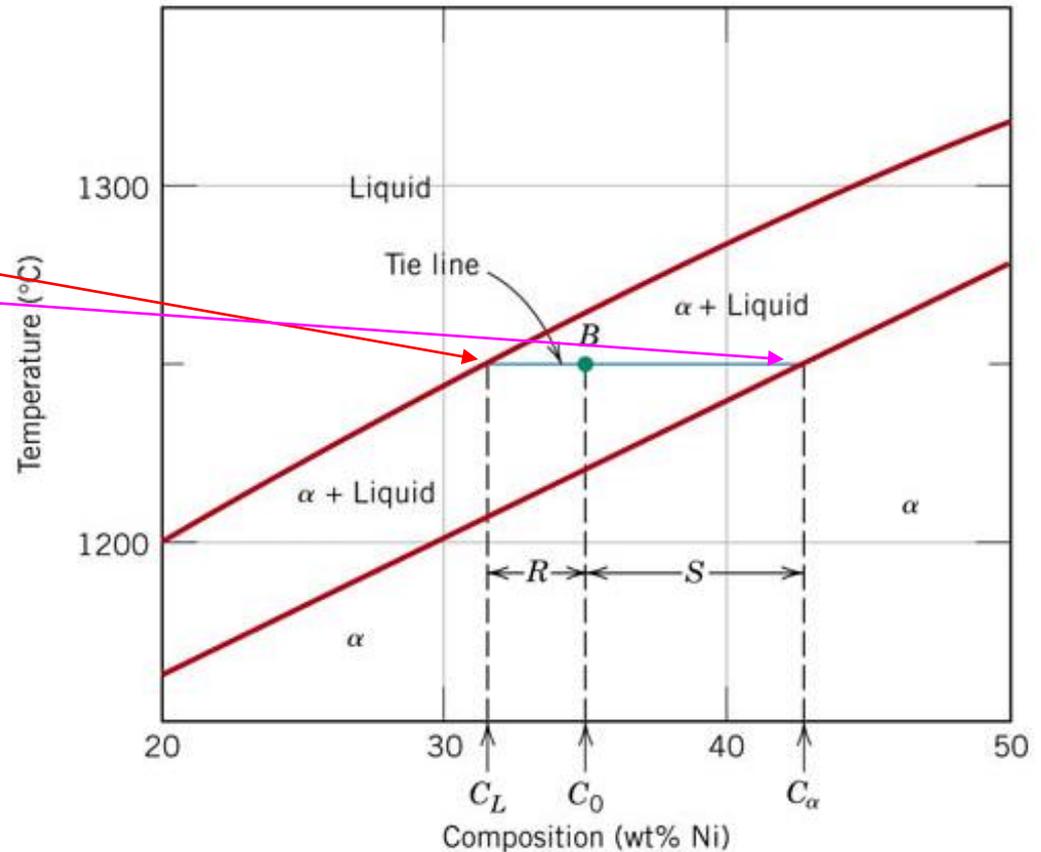
Sistemas Isomorfos Binários

Determinação das composições das fases

Para uma liga com 35% de Ni a 1250°C, traçando-se uma isoterma, temos:

Fase L com 31,5% de Ni

Fase α com 42,5% de Ni



Diagramas de Fases em condições de equilíbrio

Sistemas Isomorfos Binários

Determinação das quantidades das fases

Para uma liga com 35% de Ni a 1250°C, as frações mássicas são:

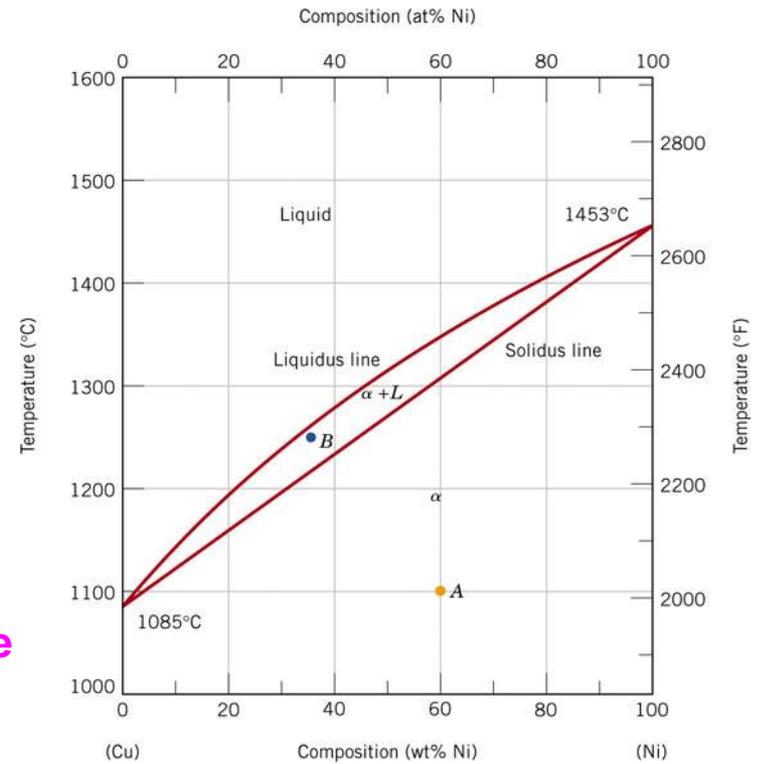
$$W_L = \frac{S}{S + R} = 0,68$$

Proporcionalidade invertida !!!

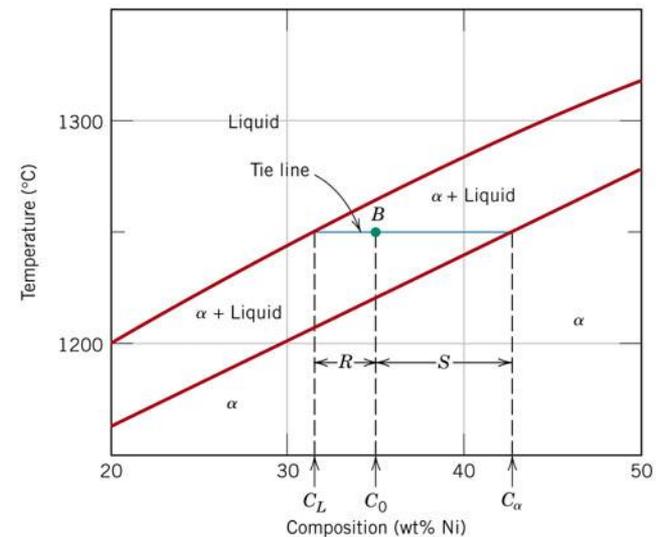
$$W_\alpha = \frac{R}{S + R} = 0,32$$

frações volumétricas:

$$V_\alpha = \frac{\frac{W_\alpha}{\rho_\alpha}}{\frac{W_\alpha}{\rho_\alpha} + \frac{W_\beta}{\rho_\beta}}$$



(a)



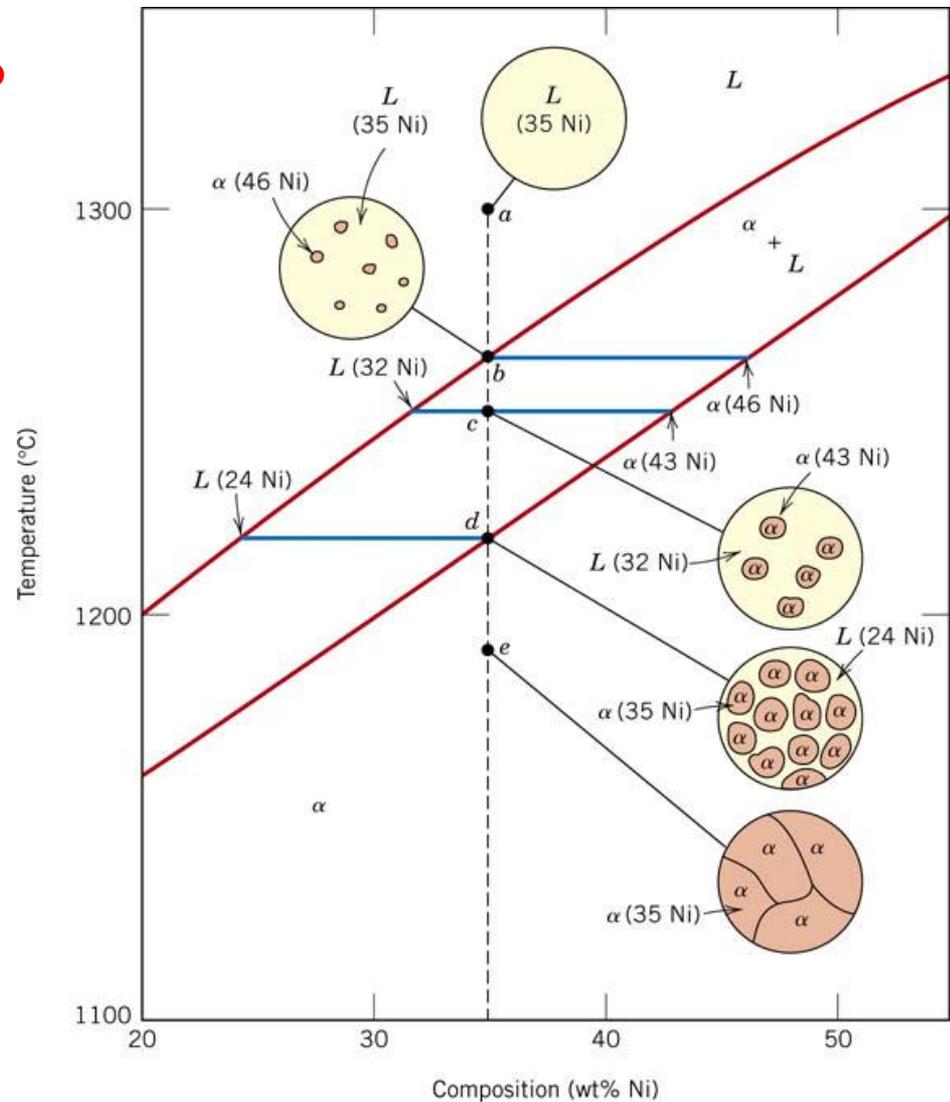
(b)

Diagramas de Fases em condições de equilíbrio

Desenvolvimento da microestrutura

Resfriamento em condições de equilíbrio

Para uma liga com 35% de Ni,
resfriando “muito lentamente”
de 1300°C a 1180°C



Diagramas de Fases em condições de equilíbrio

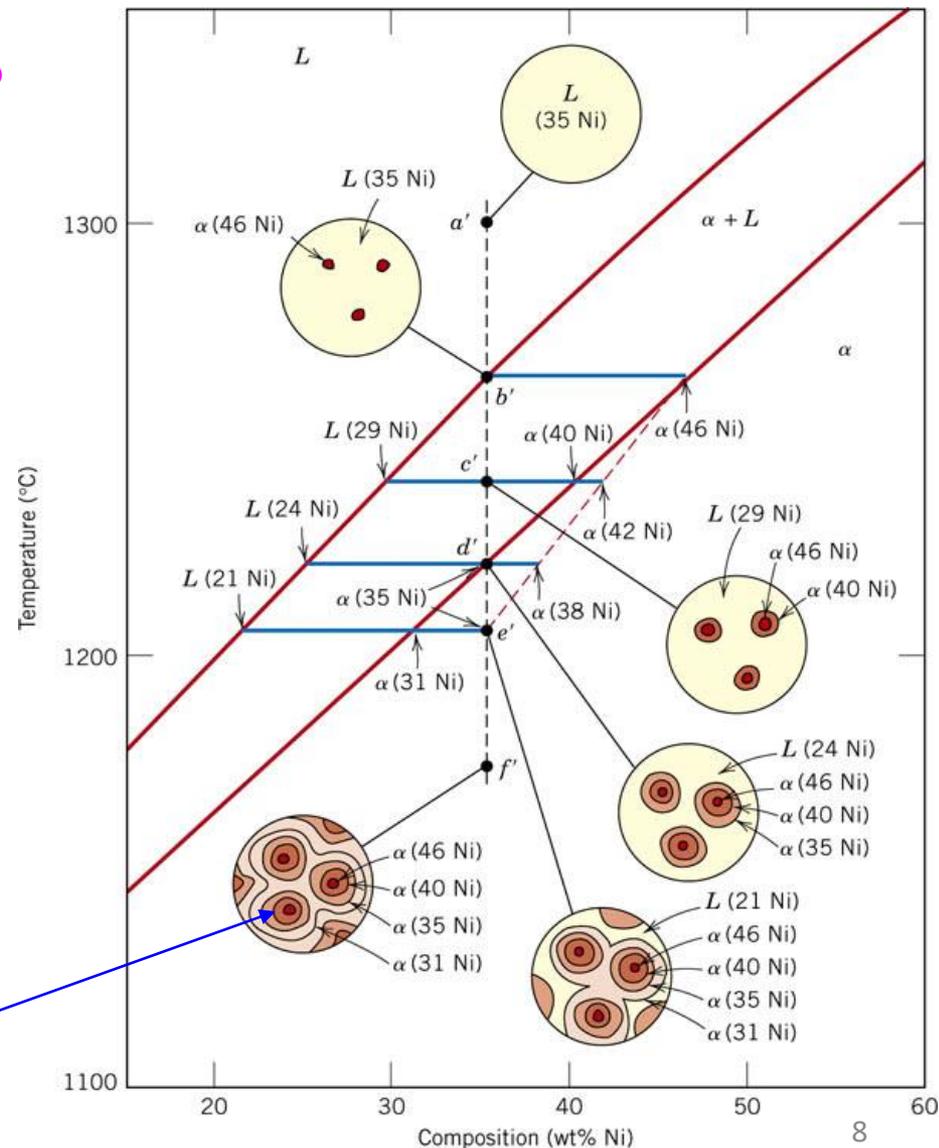
Desenvolvimento da microestrutura

Resfriamento em condições fora de equilíbrio

Para uma liga com 35% de Ni,
resfriando “rapidamente”
de 1300°C a 1180°C

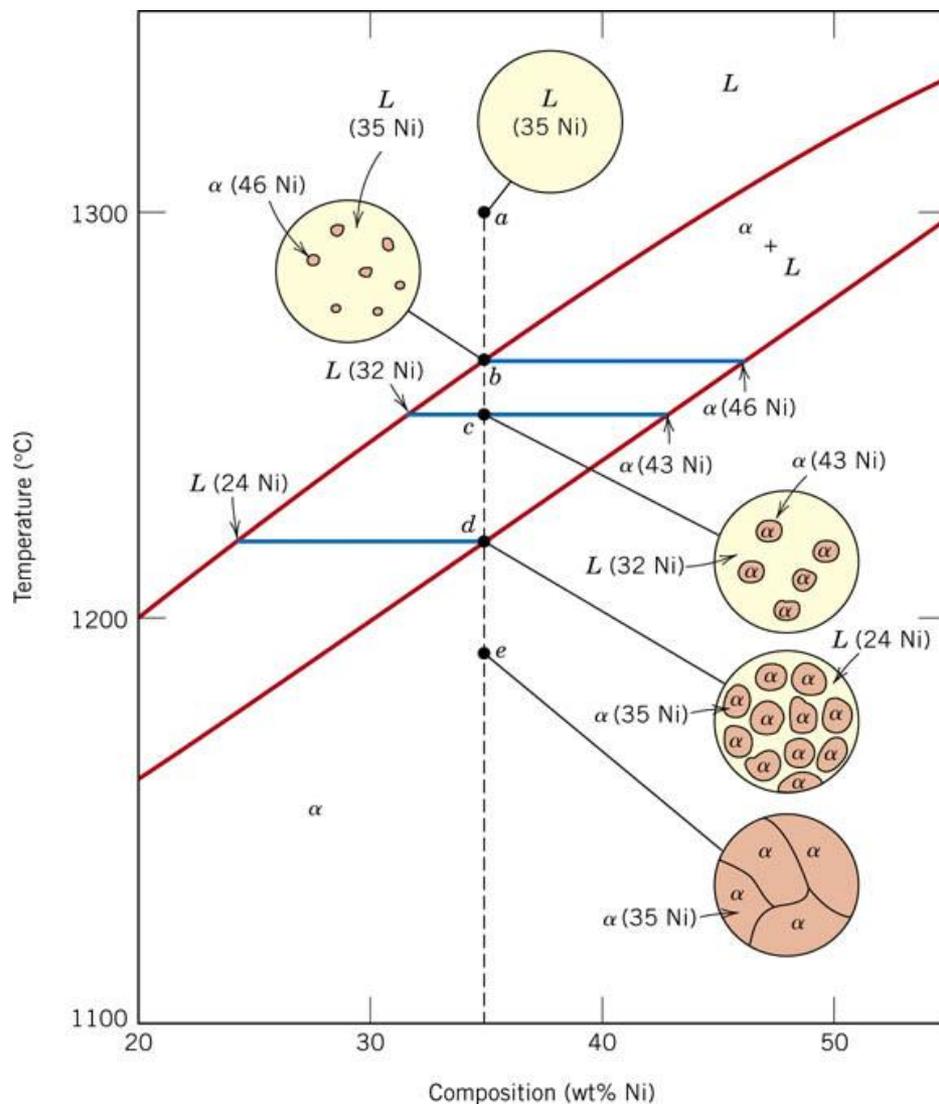
Estrutura zonada (segregação):

No centro do grão há maior concentração do elemento com maior temperatura de fusão.

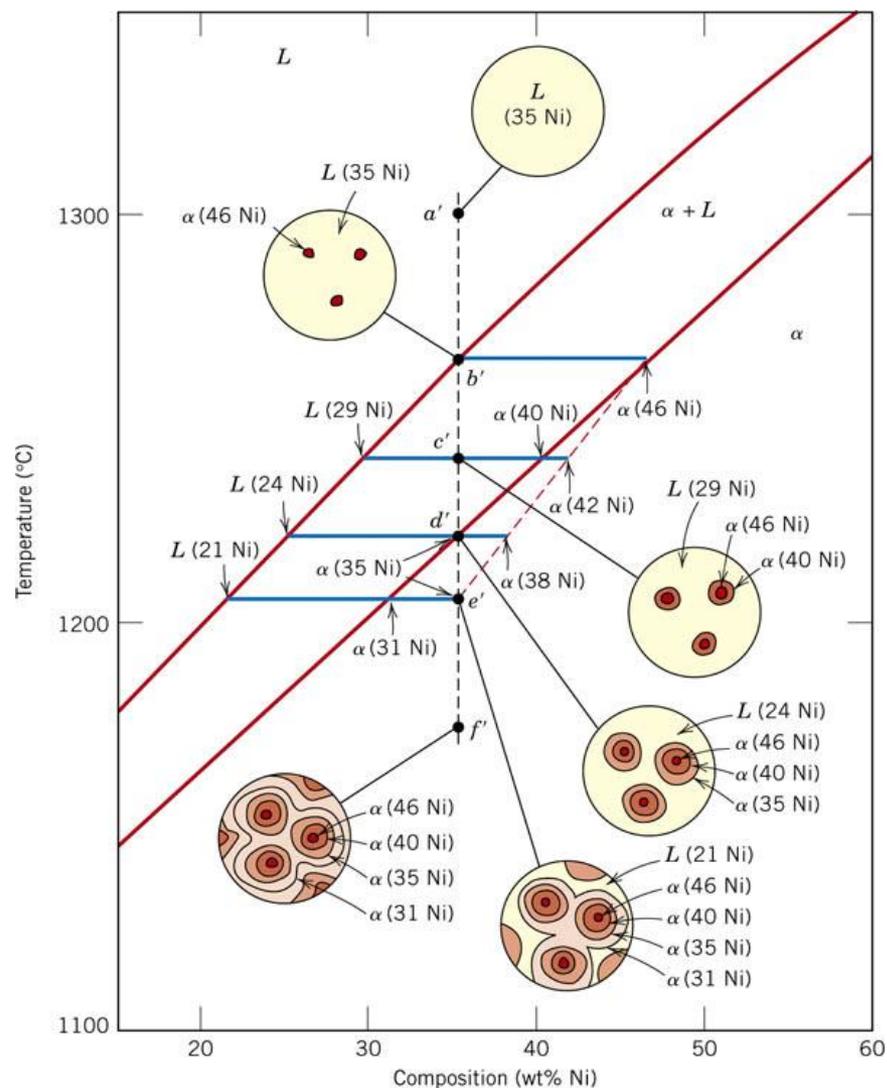


Diagramas de Fases

Desenvolvimento da microestrutura



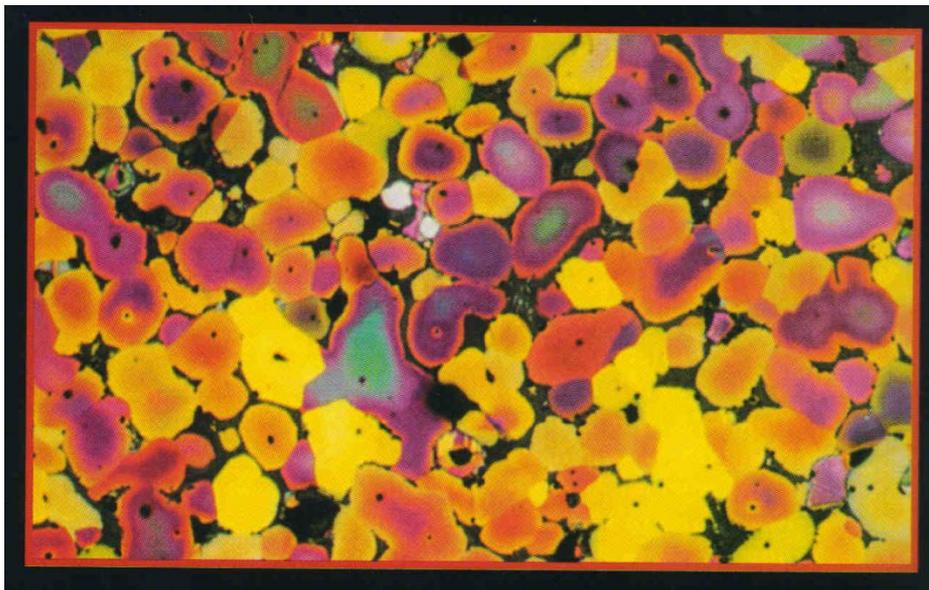
Em equilíbrio



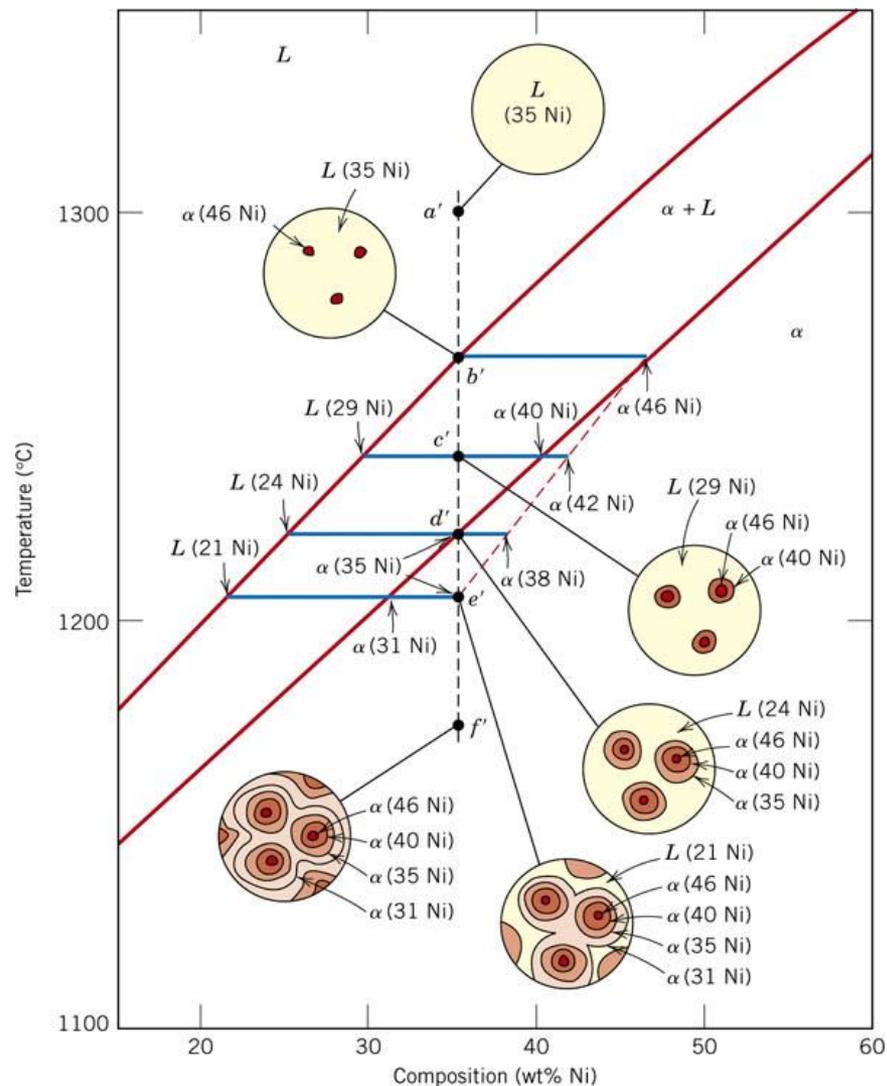
Fora do equilíbrio

Diagramas de Fases

Desenvolvimento da microestrutura



D. Fotomicrografia mostrando a microestrutura de uma liga de bronze no estado bruto de fusão que foi encontrada na Síria e que é datada do século XIX a.C. O procedimento de ataque químico revelou a “segregação dendrítica” (“*coring*” — variações de composição no interior dos grãos [Seção 9.6]) como variações na matiz da cor ao longo dos grãos. A orientação cristalográfica dos grãos também influencia a cor; os grãos com uma mesma cor possuem orientações semelhantes. Ampliação de 45 \times . (Cortesia de George F. Vander Voort, Carpenter Technology Corporation.)

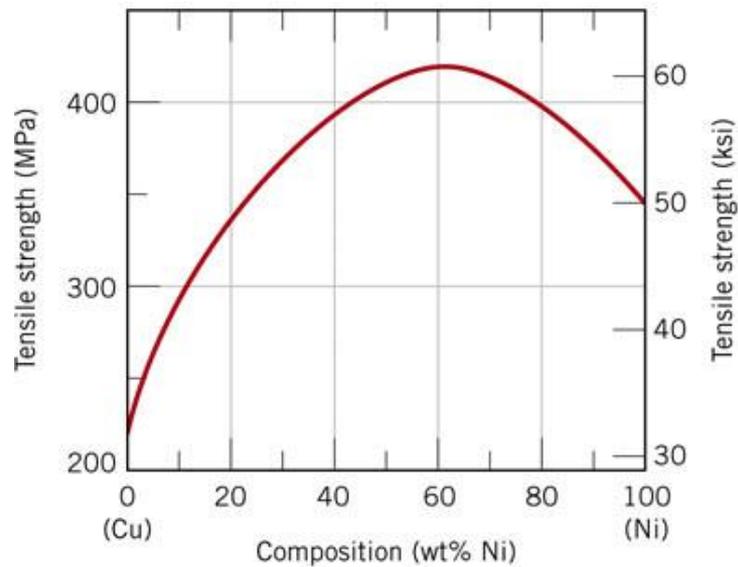


Fora do equilíbrio

Diagramas de Fases

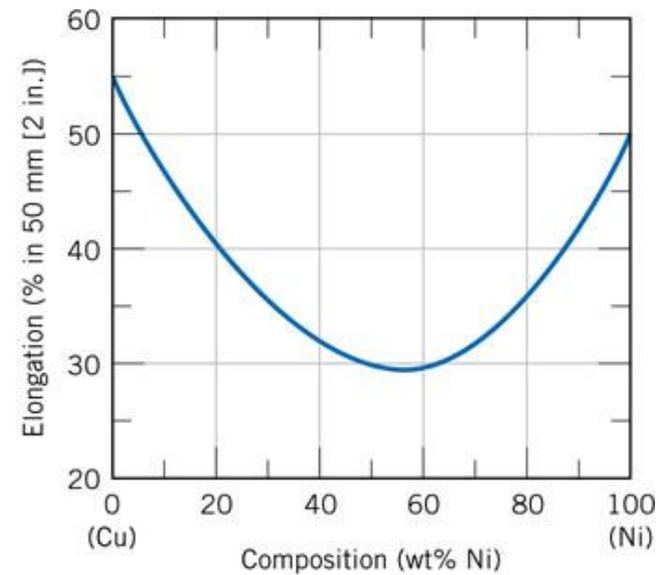
Desenvolvimento da microestrutura

Resistência e Dureza



(a)

Dutilidade



(b)

Diagramas de Fases em condições de equilíbrio

Sistemas Eutéticos Binários

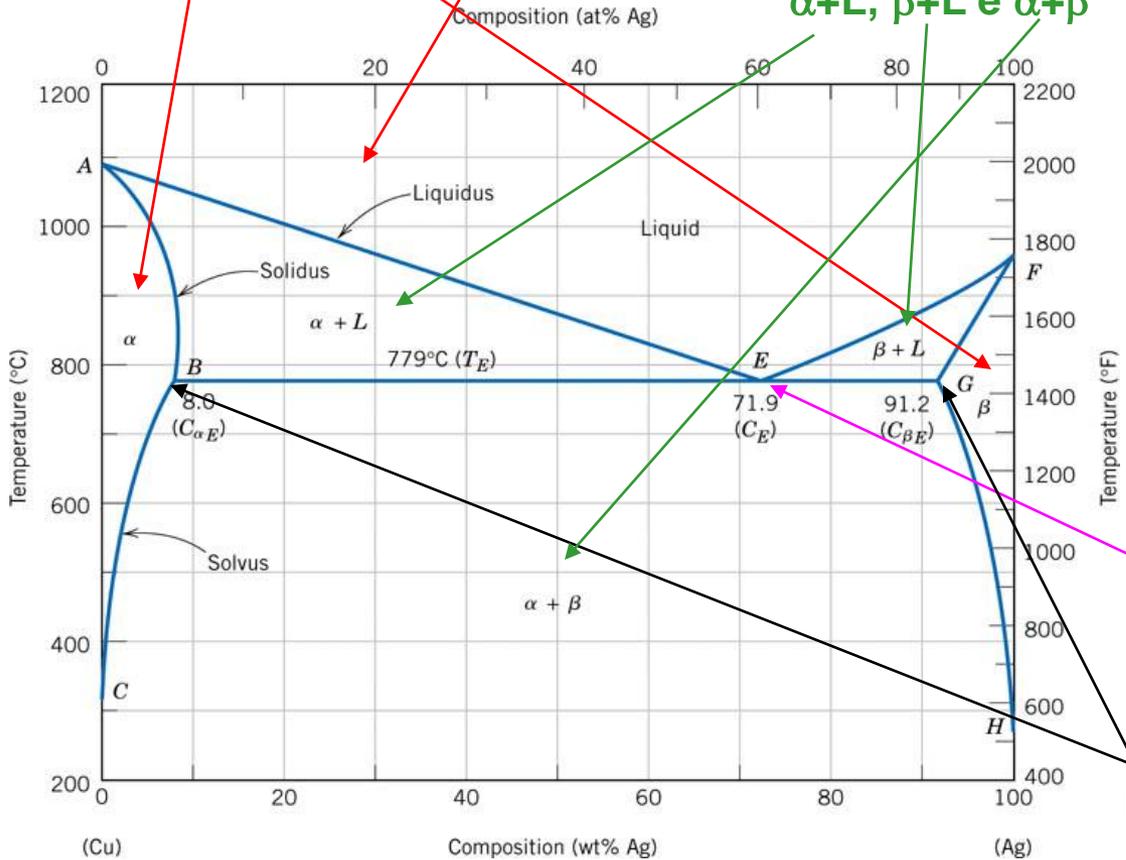
(exemplo Cu-Ag CFC-CFC)

Regiões Monofásicas: L (líquido),

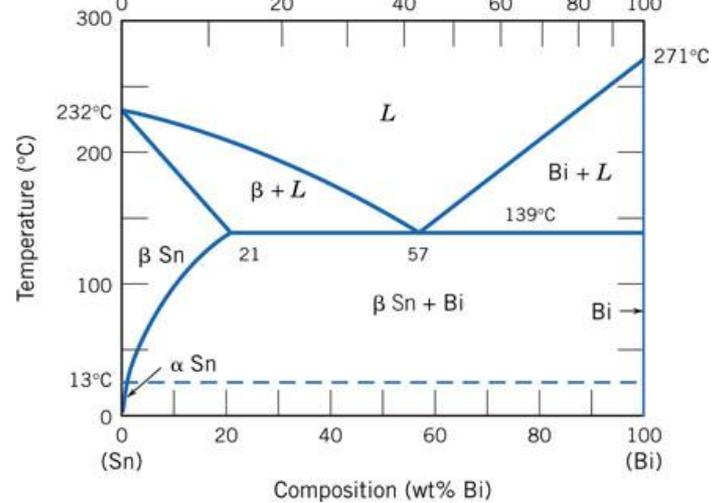
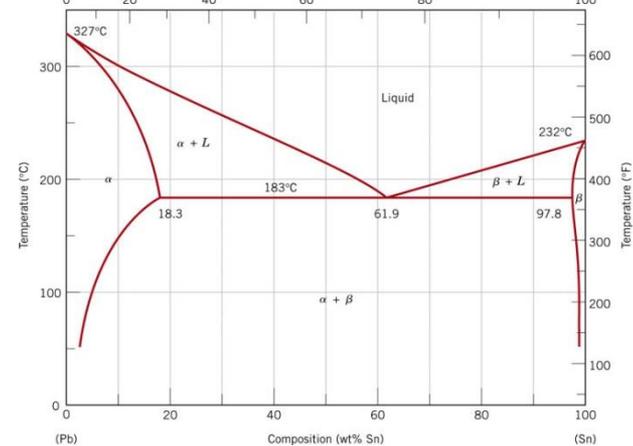
α e β (soluções sólidas)

Regiões Bifásicas:

$\alpha+L$, $\beta+L$ e $\alpha+\beta$



Sistema Pb-Sn (chumbo-estanho)



Ponto eutético

(menor temperatura em que o sistema se encontra líquido)

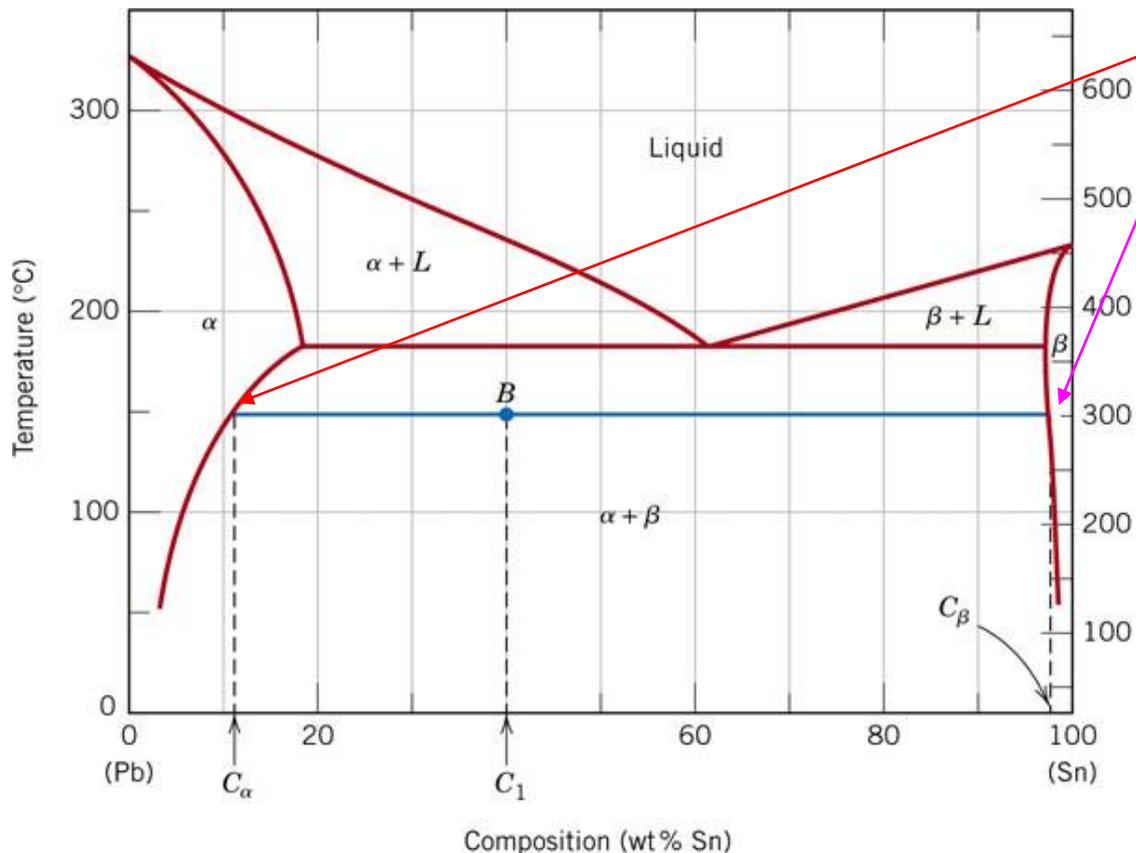
Limites de solubilidade

Diagramas de Fases em condições de equilíbrio

Sistemas Eutéticos Binários

Determinação das composições das fases

Para uma liga Sn-Pb com 40%_p de Sn a 150°C, traçando-se uma isoterma, temos:



Fase α com ~10% de Sn (CFC)

Fase β com ~98% de Sn (tetragonal)

Frações mássicas:

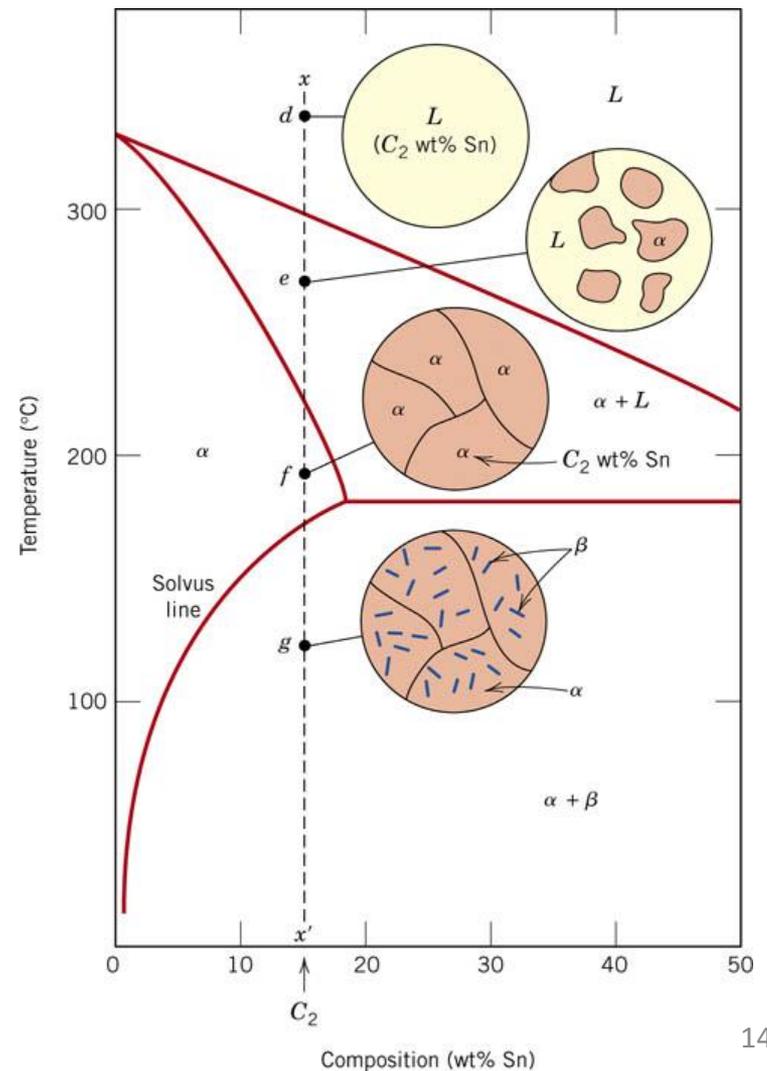
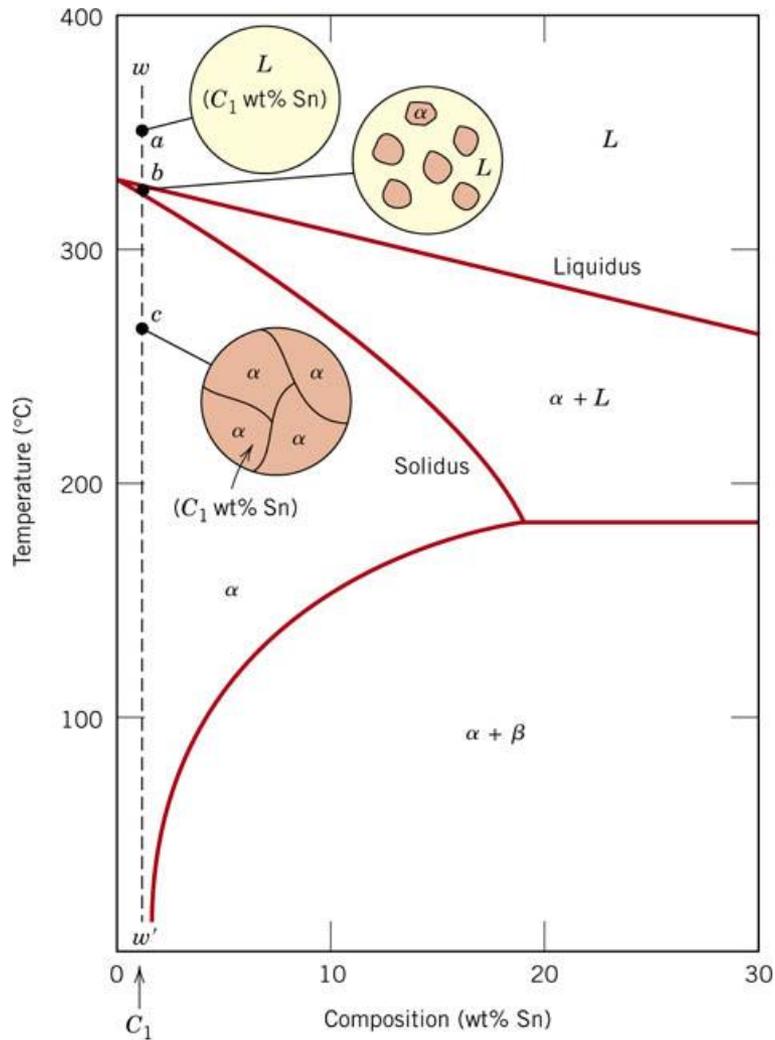
$$W_{\alpha} = \frac{R}{S + R} = \frac{98 - 40}{98 - 10} = 0,66$$

$$W_{\beta} = \frac{S}{S + R} = \frac{40 - 10}{98 - 10} = 0,34$$

Diagramas de Fases em condições de equilíbrio

Sistemas Eutéticos Binários

Desenvolvimento das microestruturas

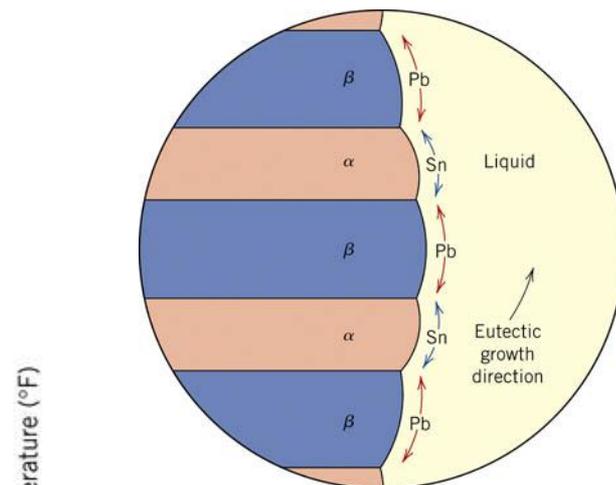
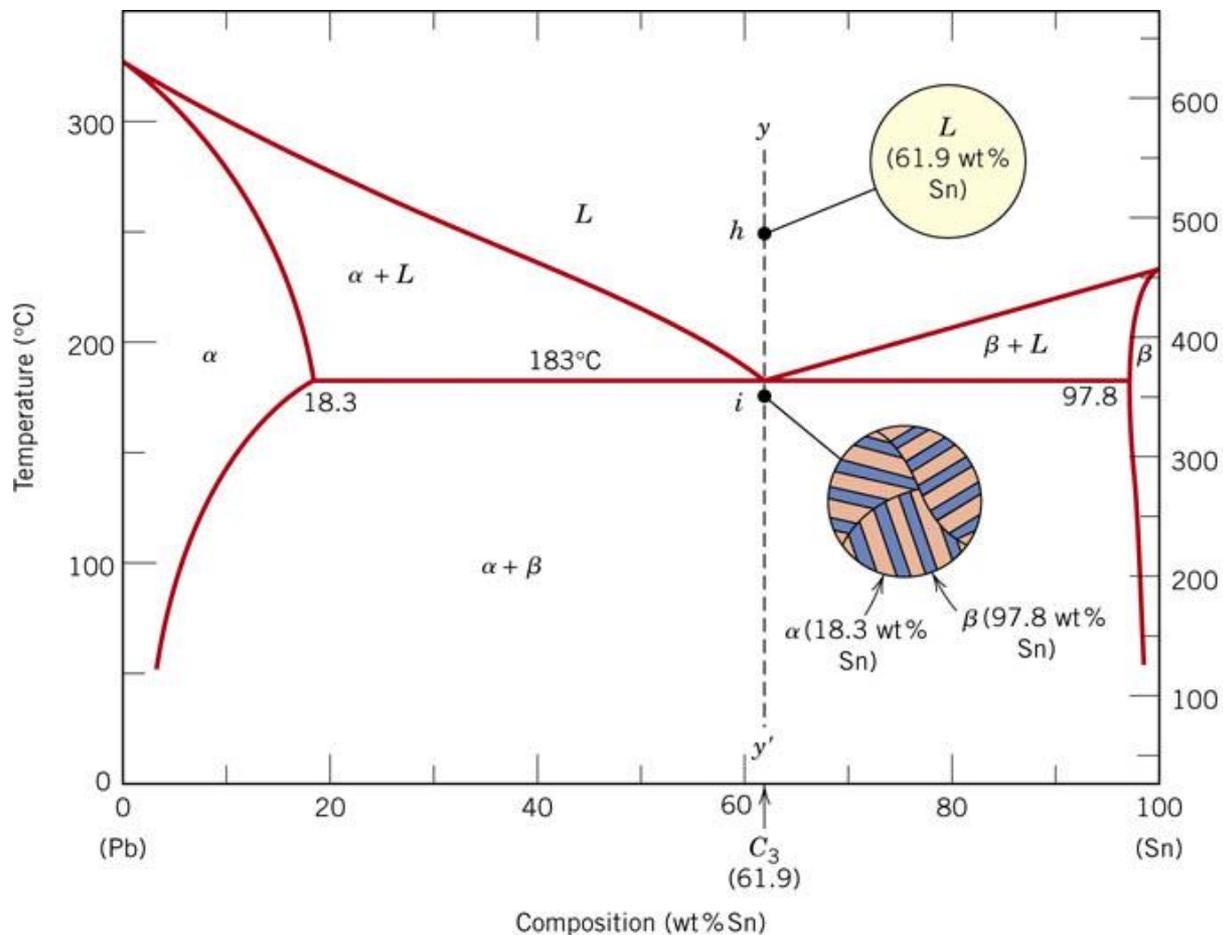


Diagramas de Fases em condições de equilíbrio

Sistemas Eutéticos Binários

Desenvolvimento das microestruturas

Composição eutética



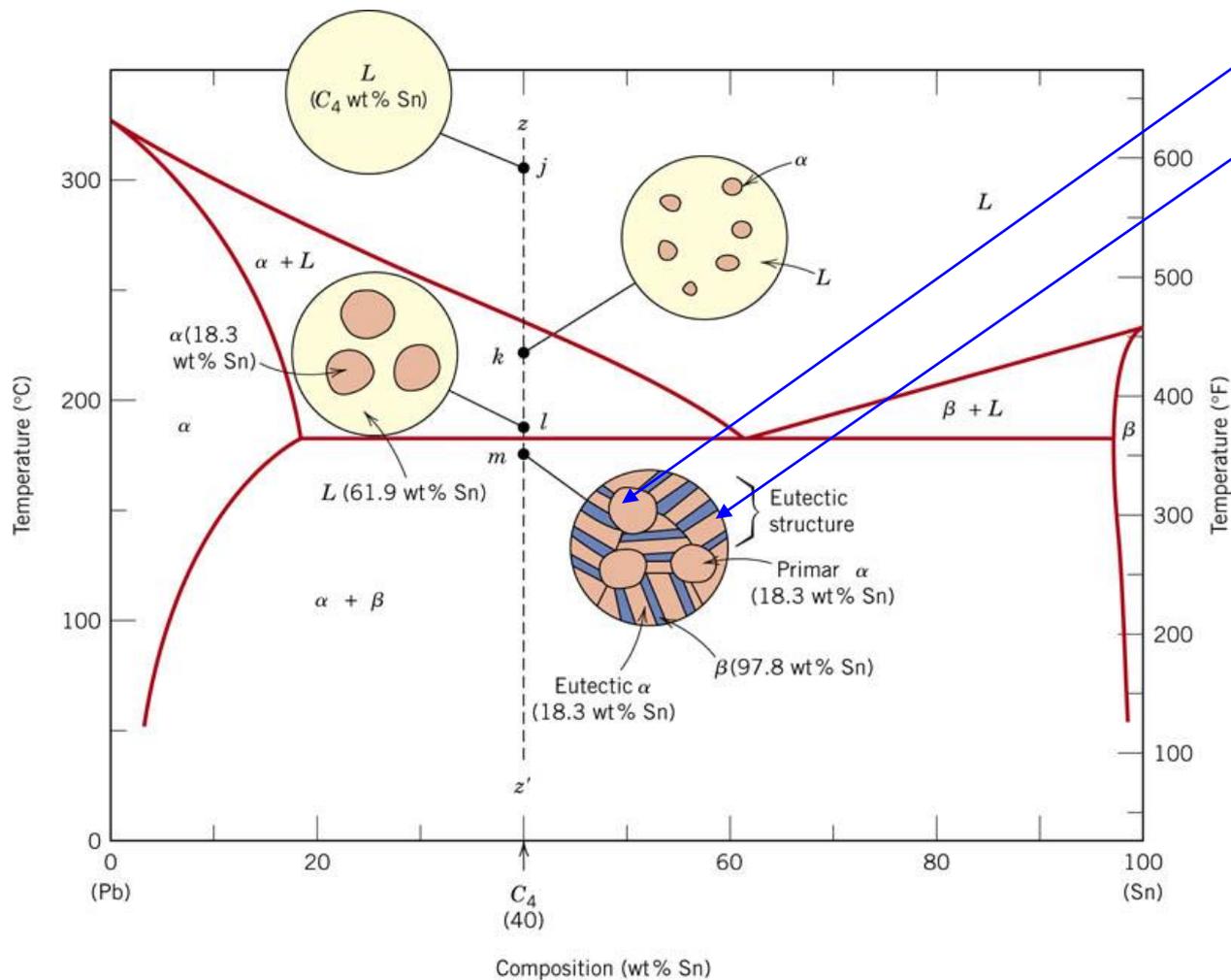
Liga Pb-Sn eutética



Diagramas de Fases em condições de equilíbrio

Sistemas Eutéticos Binários

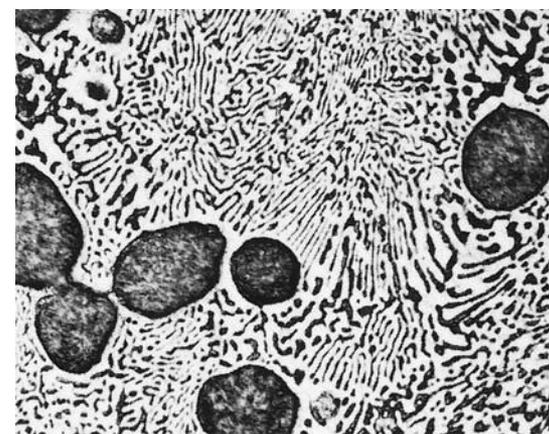
Desenvolvimento das microestruturas



Fase α primária

Fase α eutética

Liga Pb-Sn com 50%_p de Sn

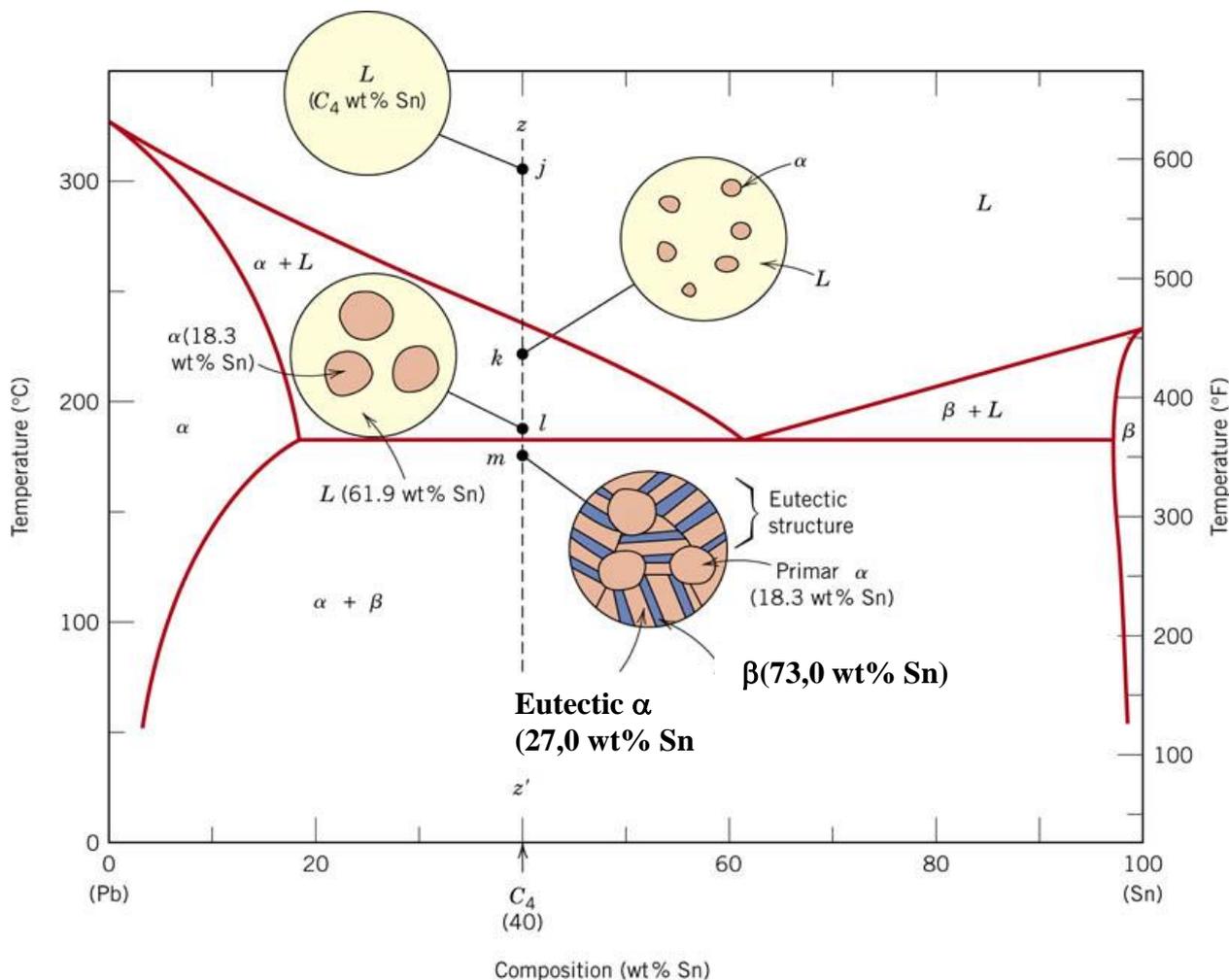


Diagramas de Fases em condições de equilíbrio

Sistemas Eutéticos Binários

Desenvolvimento das microestruturas

Liga Pb-Sn com 40%_p de Sn



Frações mássicas:

Fase α primária

$$W_{\alpha'} = \frac{61,9 - 40}{61,9 - 18,3} = 0,50$$

$$W_L = \frac{40 - 18,3}{61,9 - 18,3} = 0,50$$

Fases eutéticas

$$W_{\alpha} = \frac{97,8 - 40,0}{97,8 - 18,3} = 0,73$$

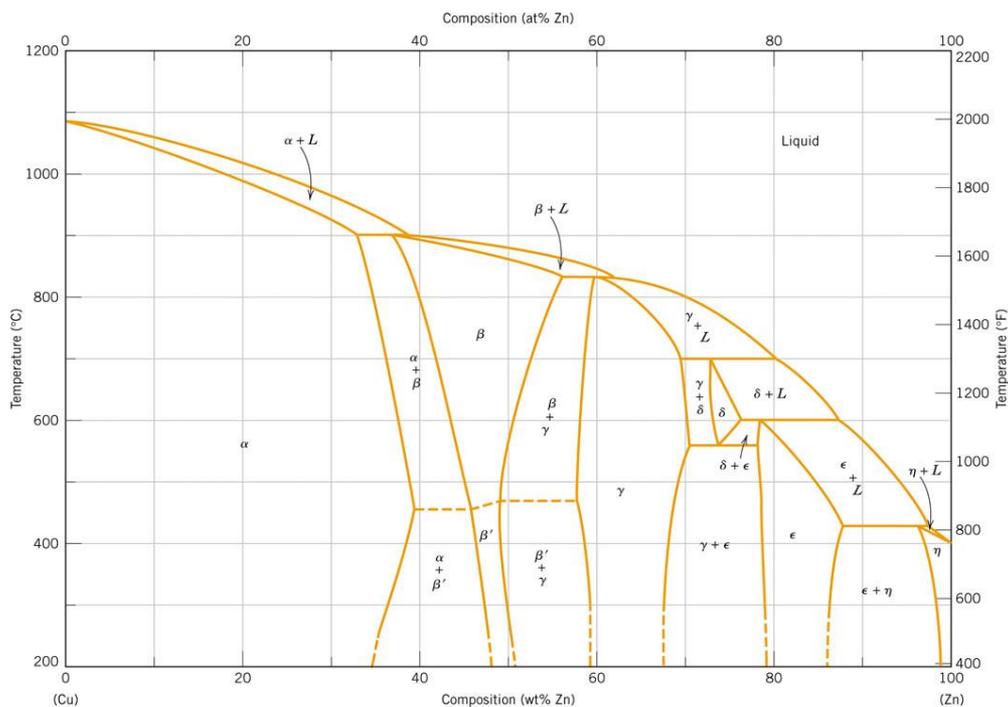
$$W_{\beta} = \frac{40,0 - 18,3}{97,8 - 18,3} = 0,27$$

Diagramas de Fases em condições de equilíbrio

Sistemas com fases ou compostos intermediários

Sistema Cu-Zn (latão)

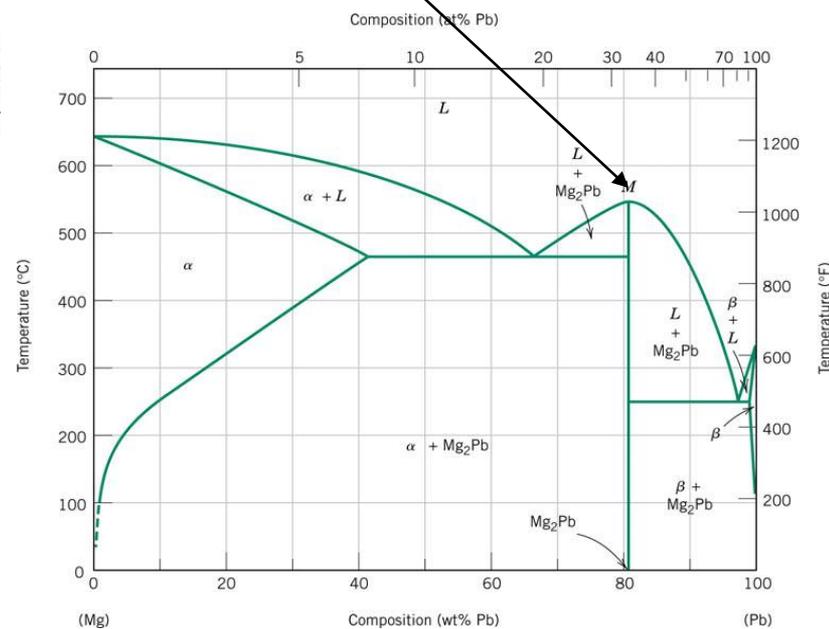
Com fases intermediárias



Sistema Mg-Pb

Com composto intermediário

Mg_2Pb (19%_p de Mg)

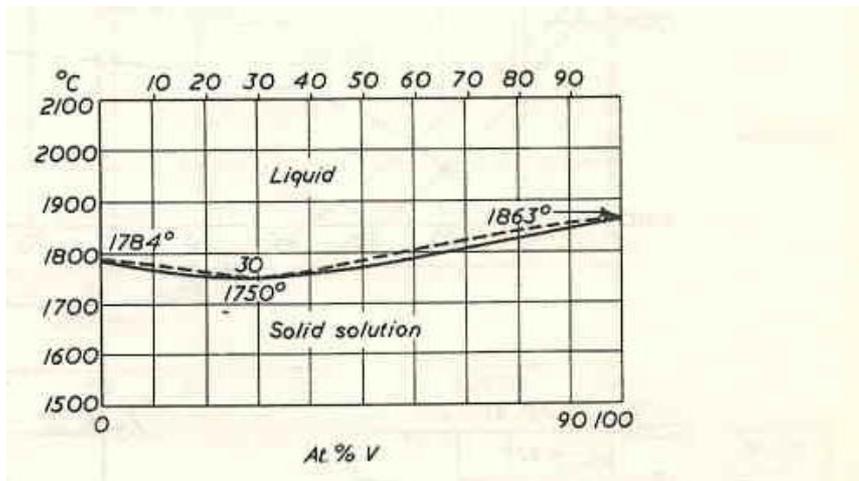


Tratar como 2 setores com eutéticos

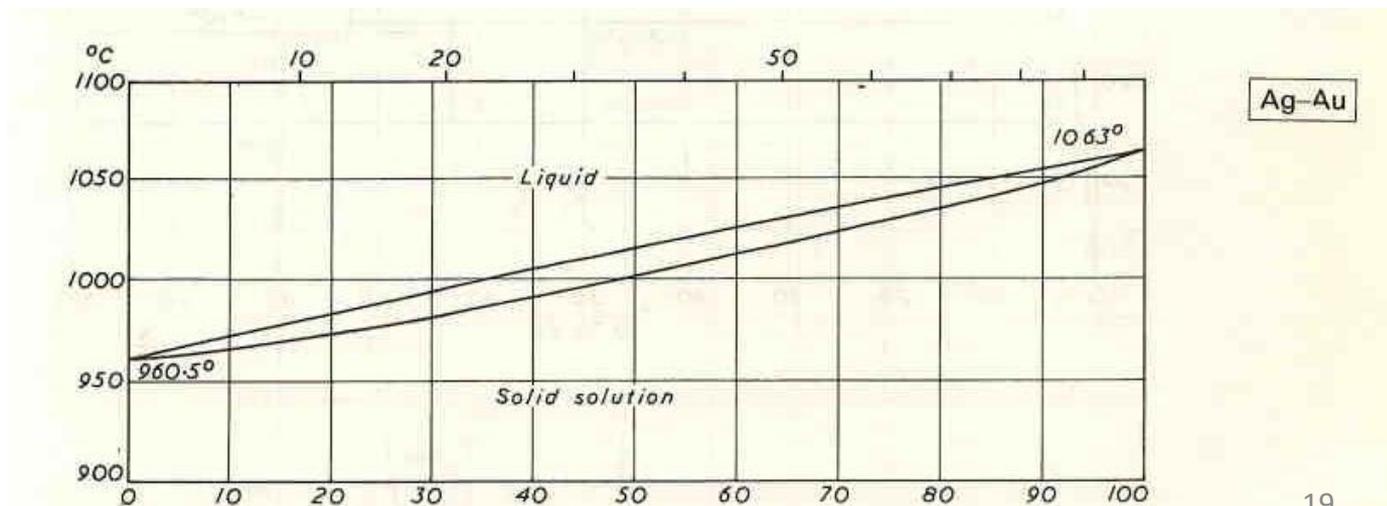
Diagramas de Fases em condições de equilíbrio

Sistemas com soluções sólidas

Sistema Cr-V



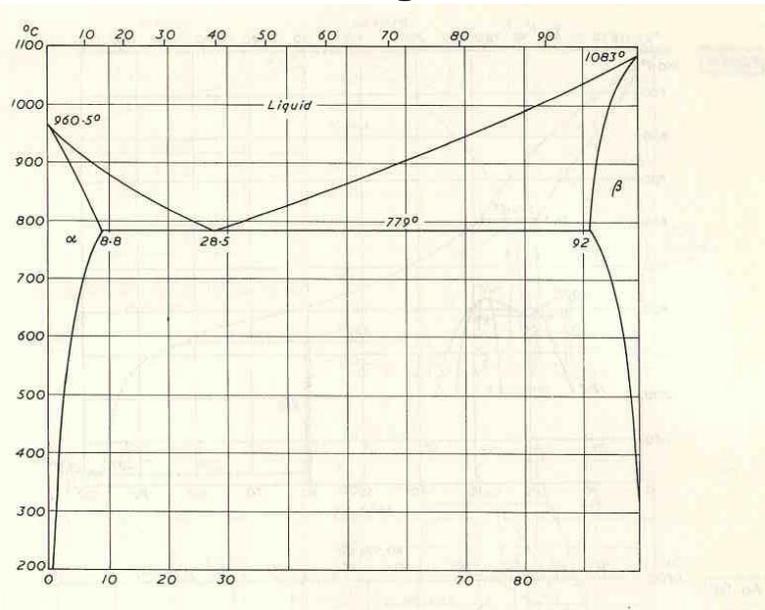
Sistema Ag-Au



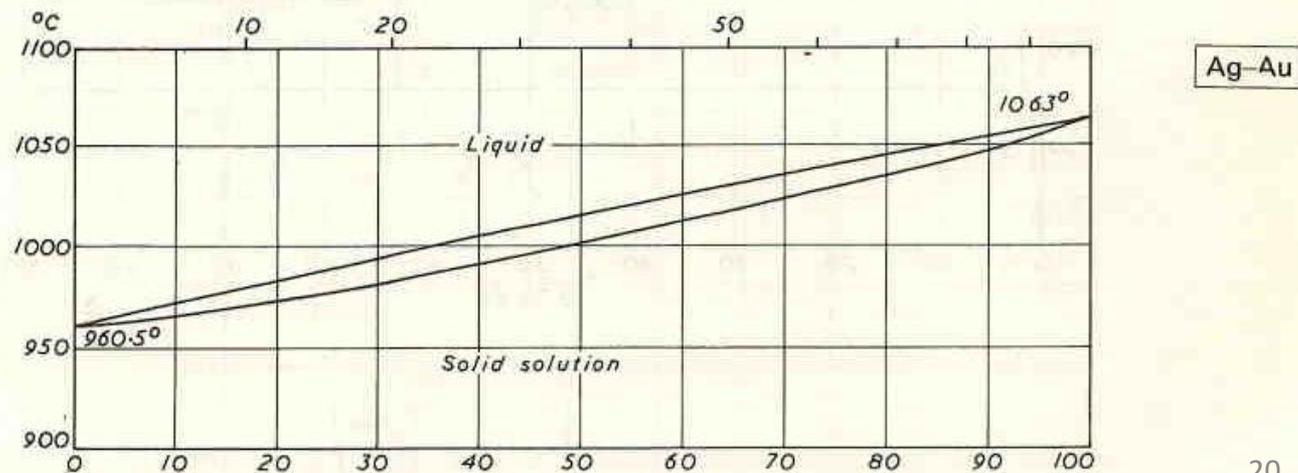
Diagramas de Fases em condições de equilíbrio

Sistemas variados

Sistema Ag-Cu



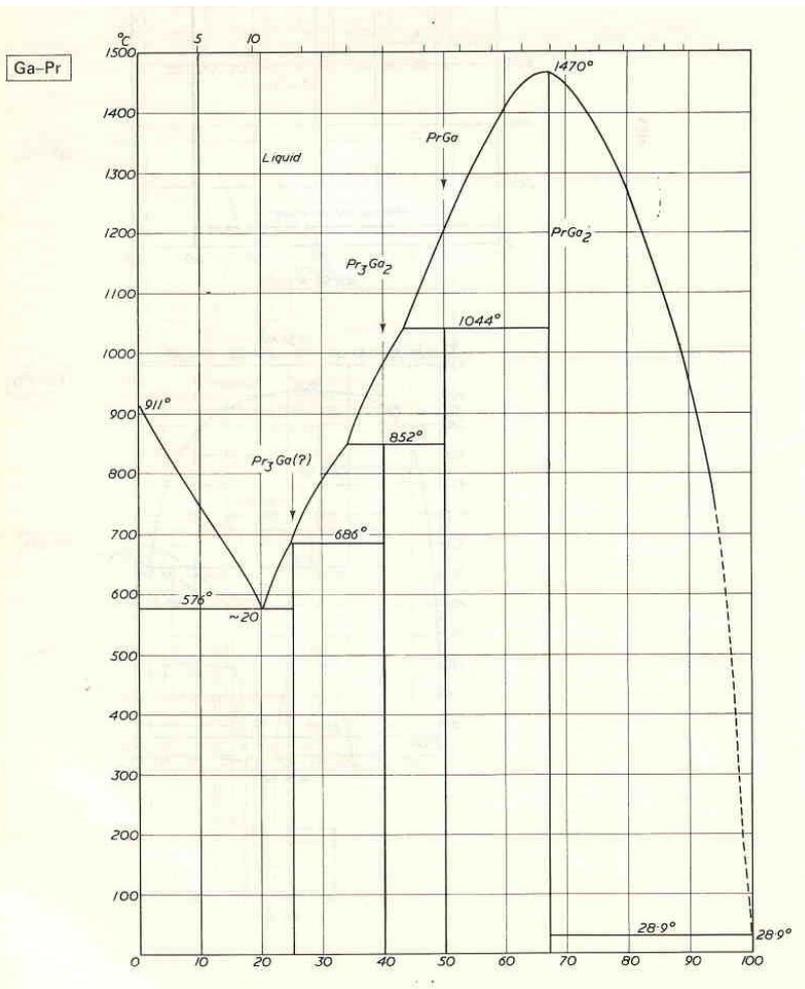
Sistema Ag-Au



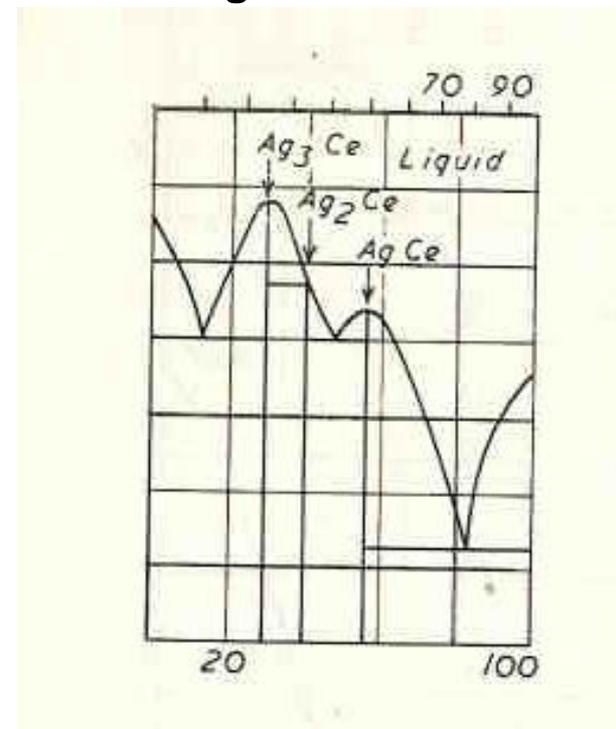
Diagramas de Fases em condições de equilíbrio

Sistemas com fases intermediárias

Sistema Ga-Pr



Sistema Ag-Ce



Sistema Pd-Ga

