Universidade de São Paulo

Escola de Engenharia de Lorena

Departamento de Engenharia de Materiais

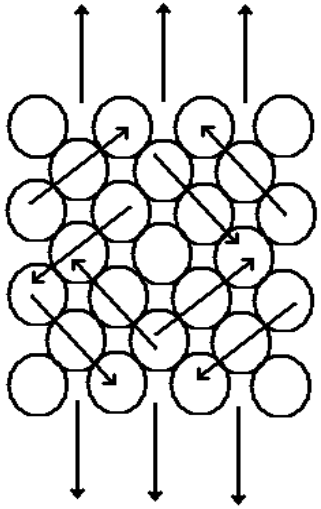
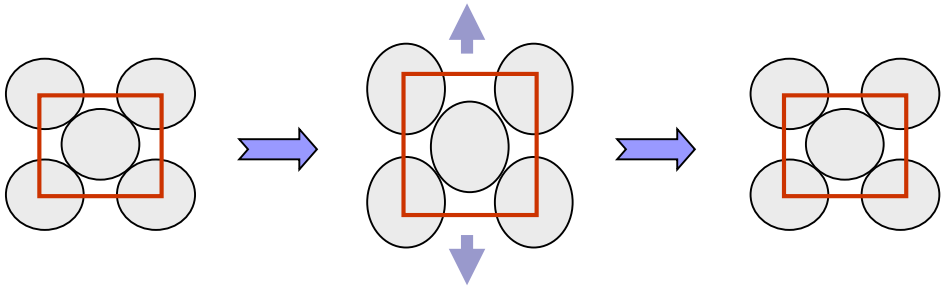


Diagrama de Fases



Introdução à Ciência dos Materiais

Prof. Dr. Cassius O.F.T. Ruchert, Professor Associado

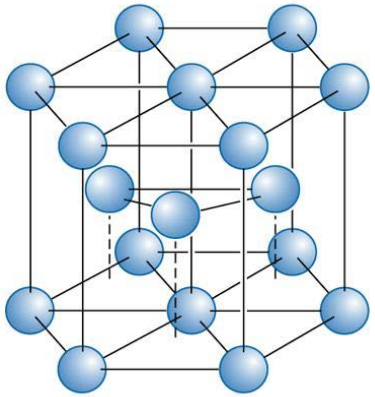
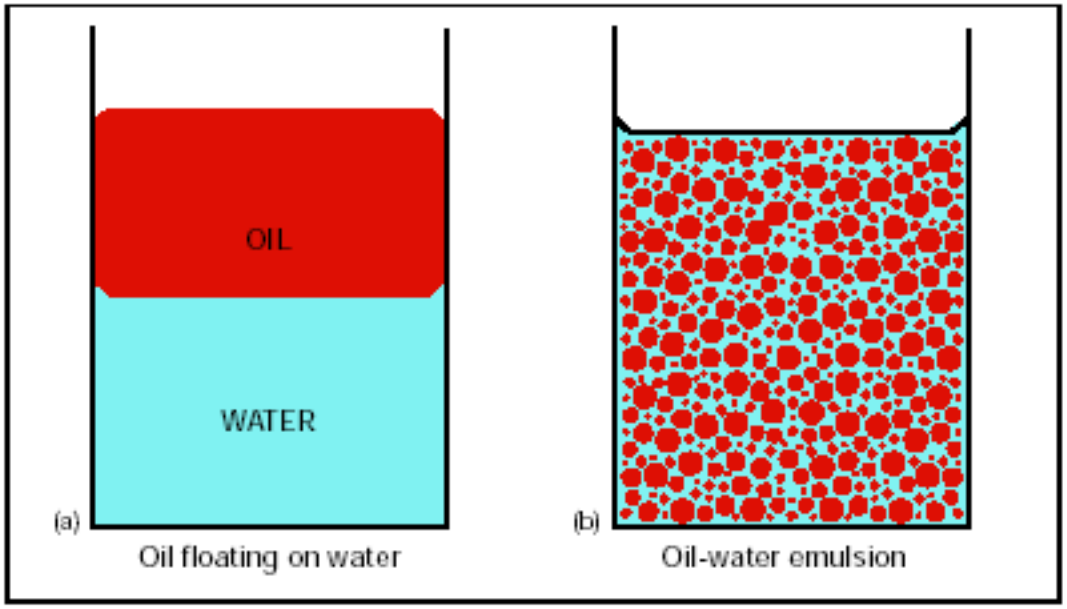


DIAGRAMA DE FASES

FASE

Uma fase pode ser definida como uma porção homogênea de um sistema que possui características físicas e/ou químicas uniformes.Se mais de uma fase estiver presente em um sistema, cada fase terá suas próprias propriedades individuais , e existirá uma fronteira separando as fases, da qual haverá uma mudança descontínua e abrupta nas características físicas e / ou químicas



Duas fases em equilíbrio (a) óleo flutuando em água (b) emulsão de água-óleo. Ambos possuem as mesmas fases mas (a) possui uma microestrutura diferente de (b)

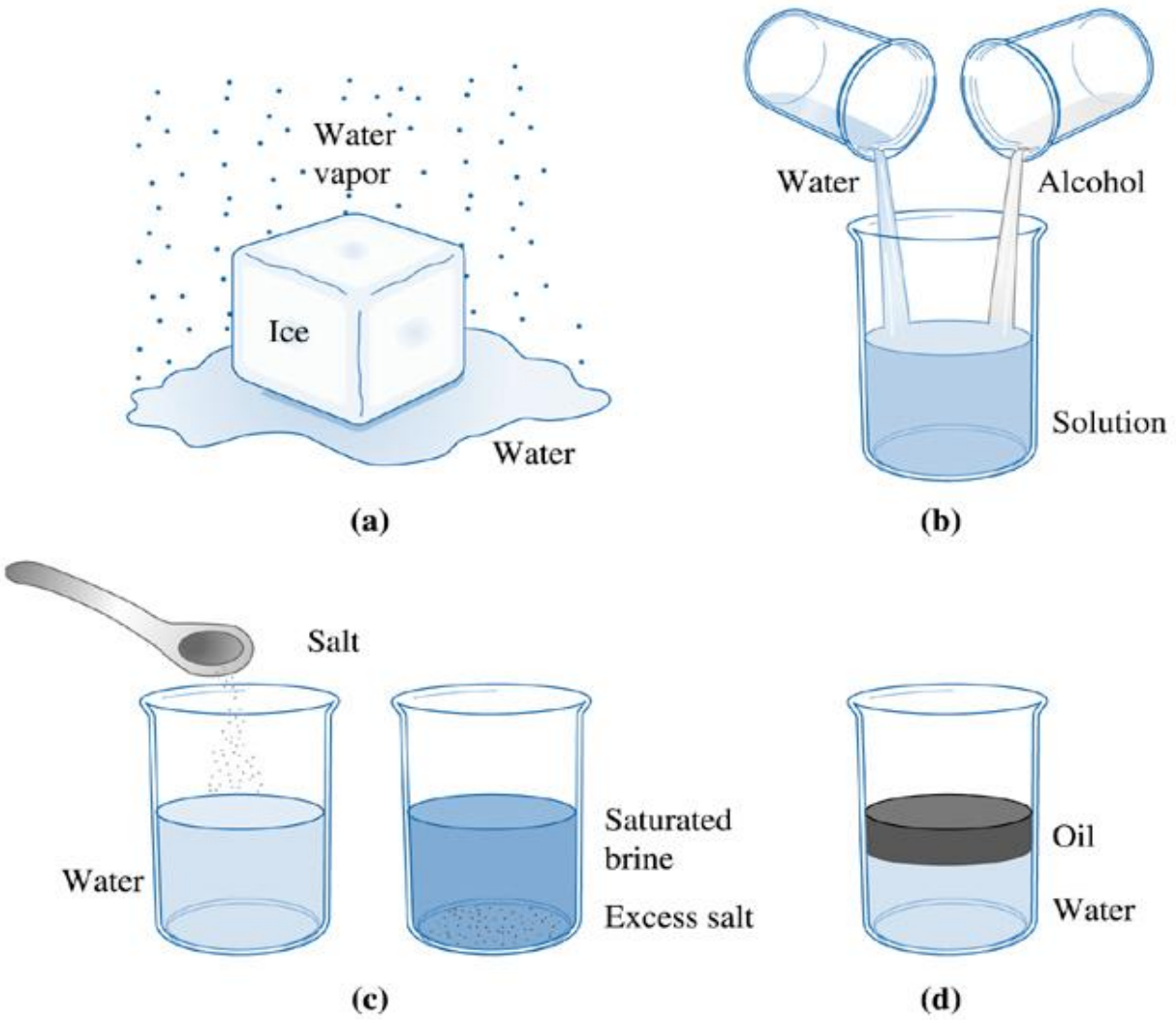
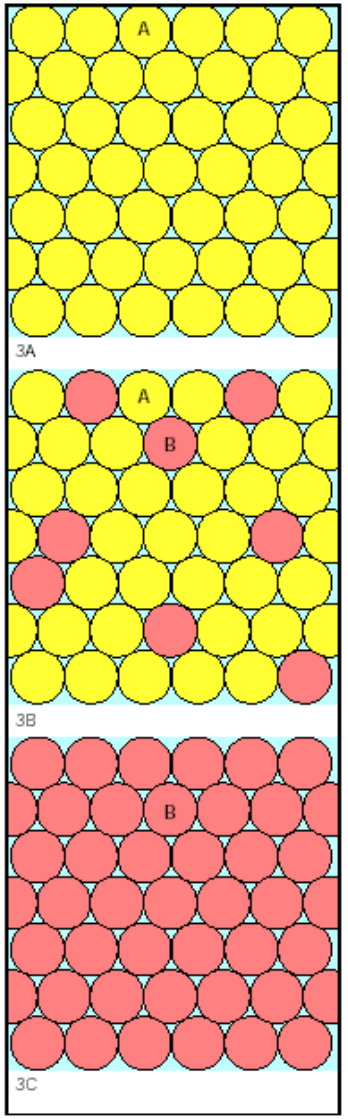


Ilustração de fases e solubilidade: (a) três formas de H_2O – gás, líquido, e sólido – cada um uma fase. (b) Água e álcool possuem solubilidade ilimitada. (c) Sal e água possuem solubilidade limitada. (d) Água e óleo virtualmente não possuem solubilidade.

SOLUÇÕES

Soluções sólidas são formadas quando átomos de soluto ocupam posições substitutivas ou intersticiais formando com o solvente uma única fase

A concentração máxima de soluto que pode se dissolver no solvente é chamado **limite de solubilidade**. A adição de soluto além desse limite resulta na formação de uma outra solução sólida ou de outro composto que possui composição diferente



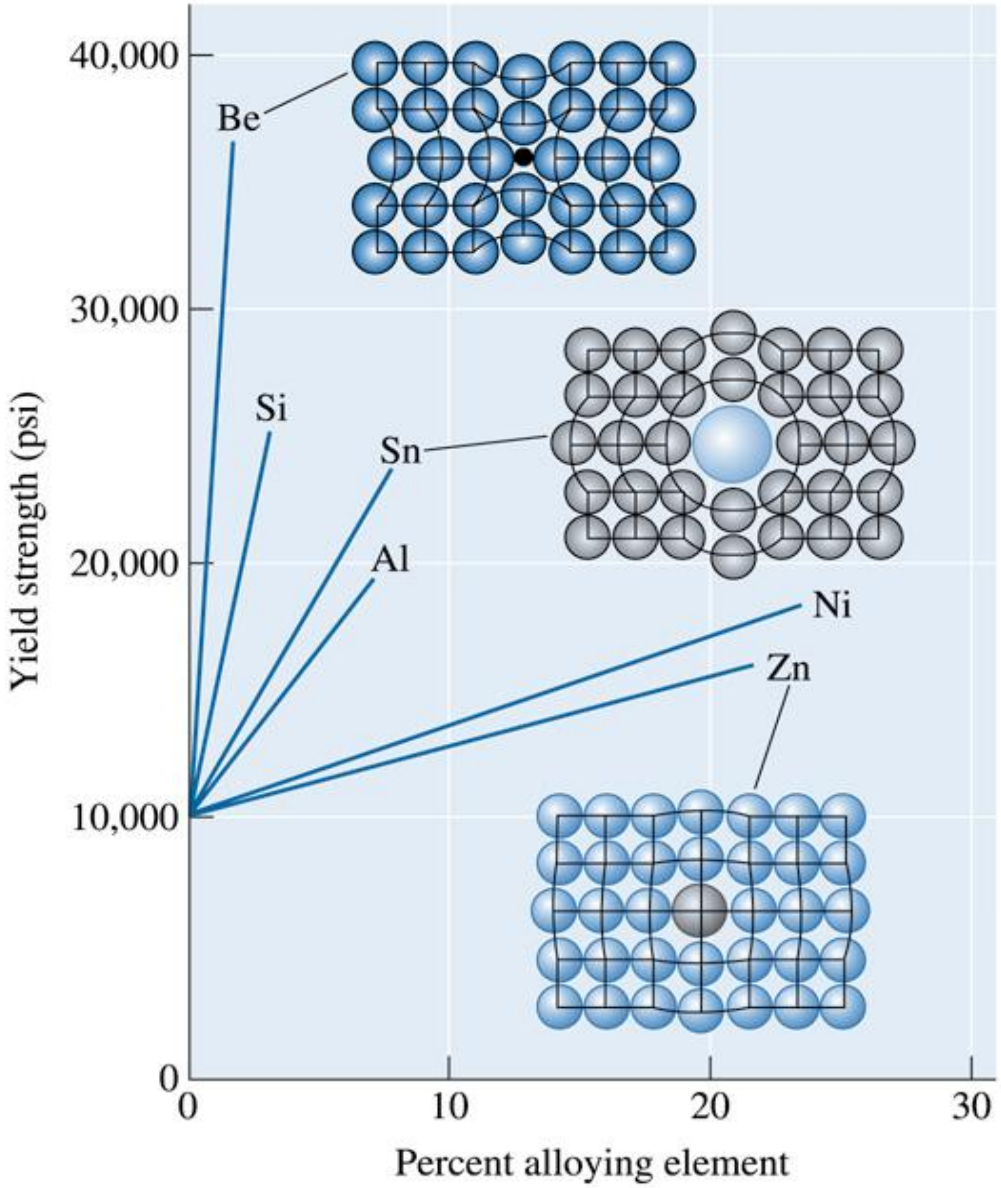
Formação de solução sólida entre dois metais. ex: ouro e prata

Mecanismos de Fortalecimento por Solução Sólida

- Fortalecimento por solução sólida – Aumento da resistência de um material metálico por meio da formação de solução sólida.

- Fortalecimento por dispersão – Fortalecimento, geralmente utilizado em materiais metálicos pela formação de dispersóides ultra-finos de segunda fase.

Dois Fatores de Aumento de Resistência por Solução Sólida



©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

Efeitos de diferentes elementos de liga no limite de escoamento do cobre. Átomos de níquel e zinco são praticamente do mesmo tamanho dos átomos de cobre (tenciona pouco a matriz), mas os átomos de berílio e de titânio são muito diferentes dos átomos de cobre. Aumentando a diferença do ***tamanho atômico*** e o ***percentual de elemento de liga*** ocorre um aumento da resistência por solução sólida.

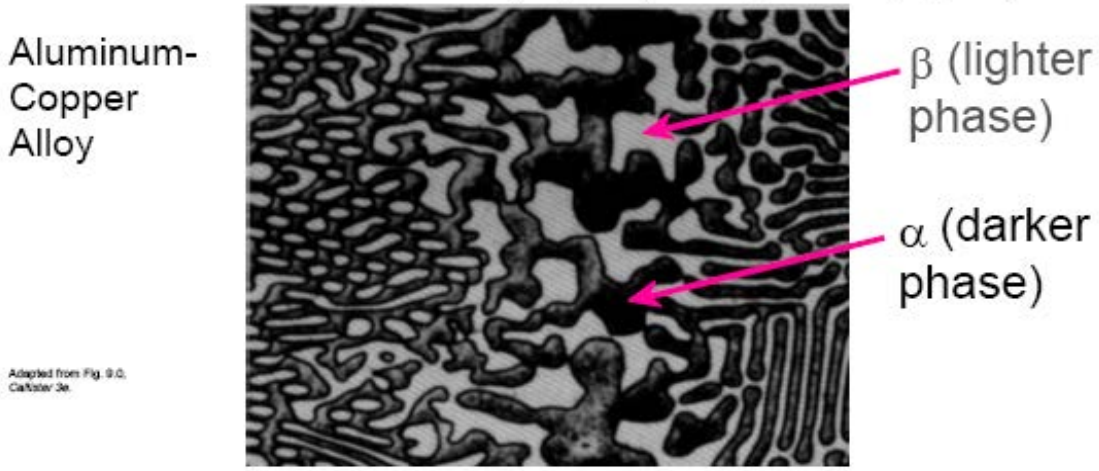
EQUILÍBRIO DE FASES

Energia livre (grandeza termodinâmica) é uma função da energia interna de um sistema e também da desordem dos átomos ou moléculas (entropia=desordem)

Um sistema está em **equilíbrio** se a sua **energia livre** se encontra em um valor mínimo, isso significa que as características do sistema não mudam ao longo do tempo. O sistema é estável.

Alterações na temperatura, pressão ou composição resultará em aumento da energia livre e por conseqüência mudanças para outro estado (mudança entropia)

O **equilíbrio de fases** se refere ao equilíbrio em sistemas que possui mais de uma fase. As características das fases são constantes em relação ao tempo



DIAGRAMAS DE FASES

• Muitas das informações sobre o controle da microestrutura ou da estrutura de fases de um sistema de ligas são mostrados no chamado diagrama de fases

• Diagramas de fases são úteis para prever as transformações de fases e as microestruturas resultantes

• Representam as relações entre a temperatura e as composições, e as quantidades de cada fase em *condições de equilíbrio*.

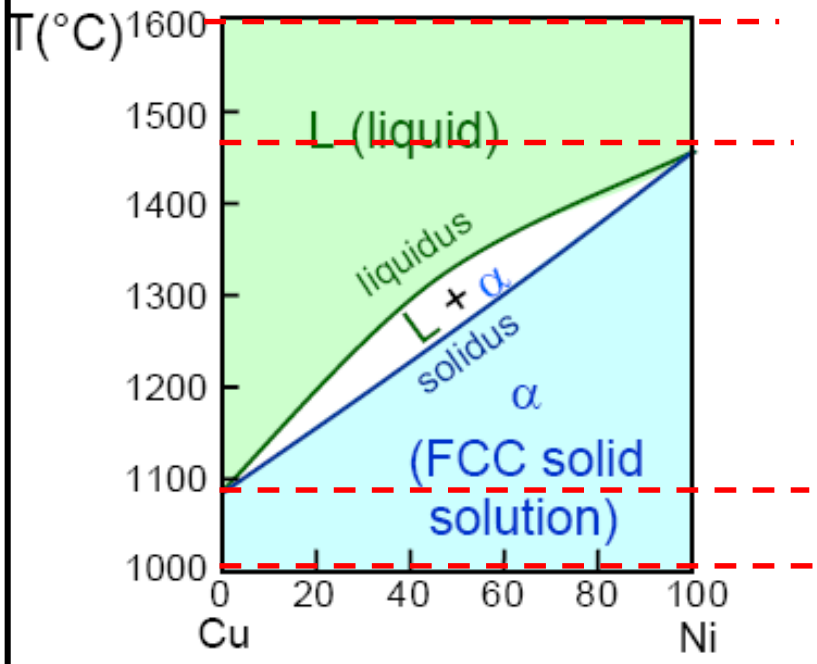
Diagrama de fase para um sistema Cu-Ni

Duas fases:
• L (líquido)
• α (solução sólida)

• Isomorfo: completa solubilidade dos dois componentes

Parâmetro invariável: (P=1 atm)

Parâmetros Variáveis
• Temperatura
• Composição



Interpretação do Diagrama de Fases

Para um *sistema binário* com composição e temperatura conhecidas e que se encontra em *estado de equilíbrio*, pelo menos 3 informações estão disponíveis:

(1) As fases que estão presentes

(2) As composições dessas fases

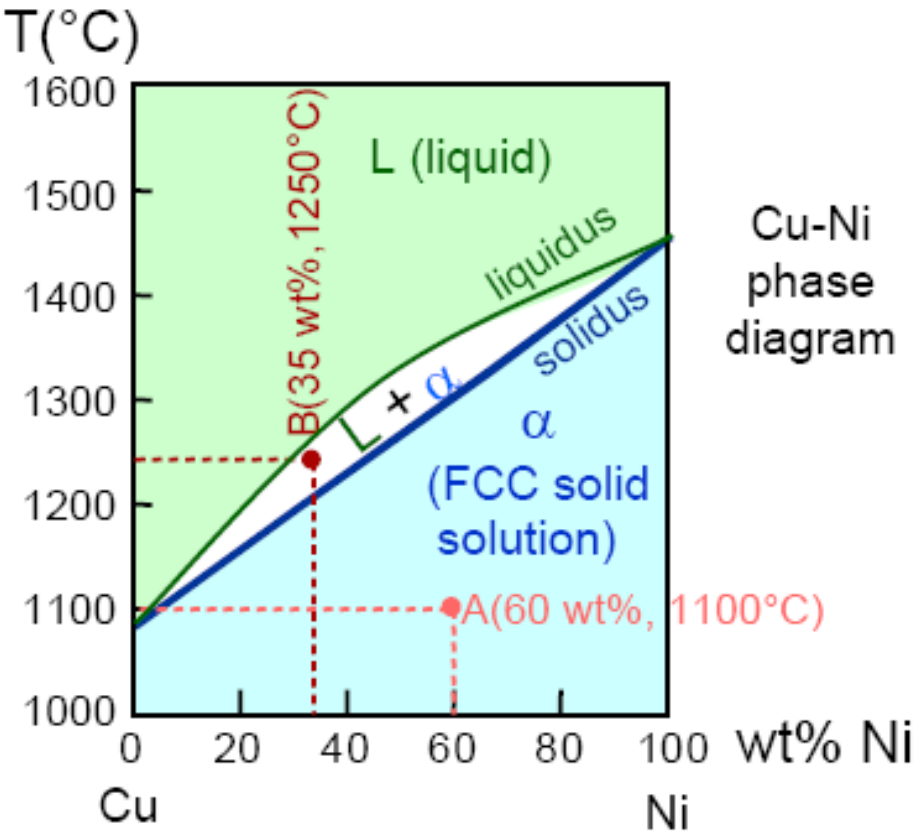
(3) As porcentagens (frações) das fases

FASES PRESENTES

Para o estabelecimento de quais fases estão presentes precisa-se apenas localizar o ponto temperatura-composição no diagrama de fases e observar com qual(is) fase(s) o campo de fases correspondente está identificado.

A: 60% WT , 1100º C
1 fase : α

B: 35% WT, 1250º C
2 fases: L + α



DETERMINAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES DAS FASES

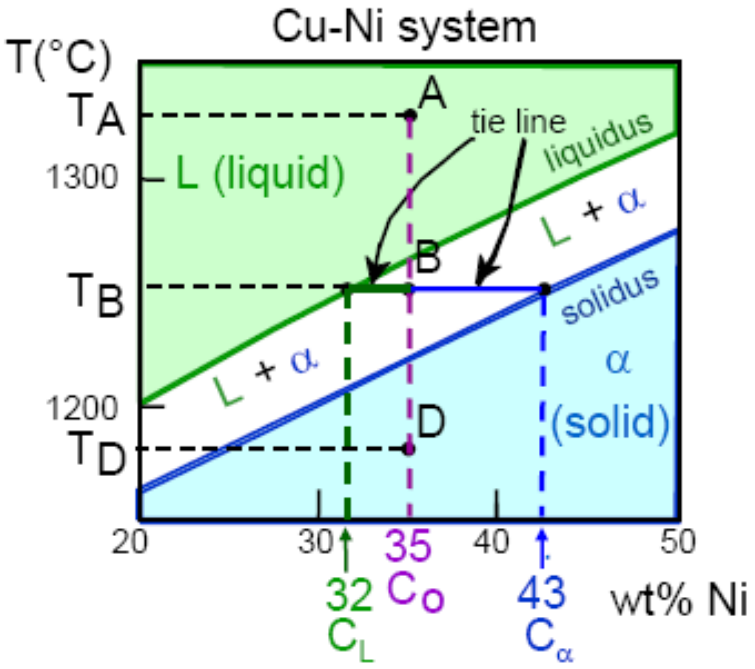
• Se apenas uma fase está presente a composição dessa fase é simplesmente a mesma da composição global da liga

• Para uma liga que possui composição e temperatura localizadas em uma região bifásica é utilizado o seguinte procedimento:

1. Constrói-se uma linha de amarração através da região bifásica à temperatura da liga

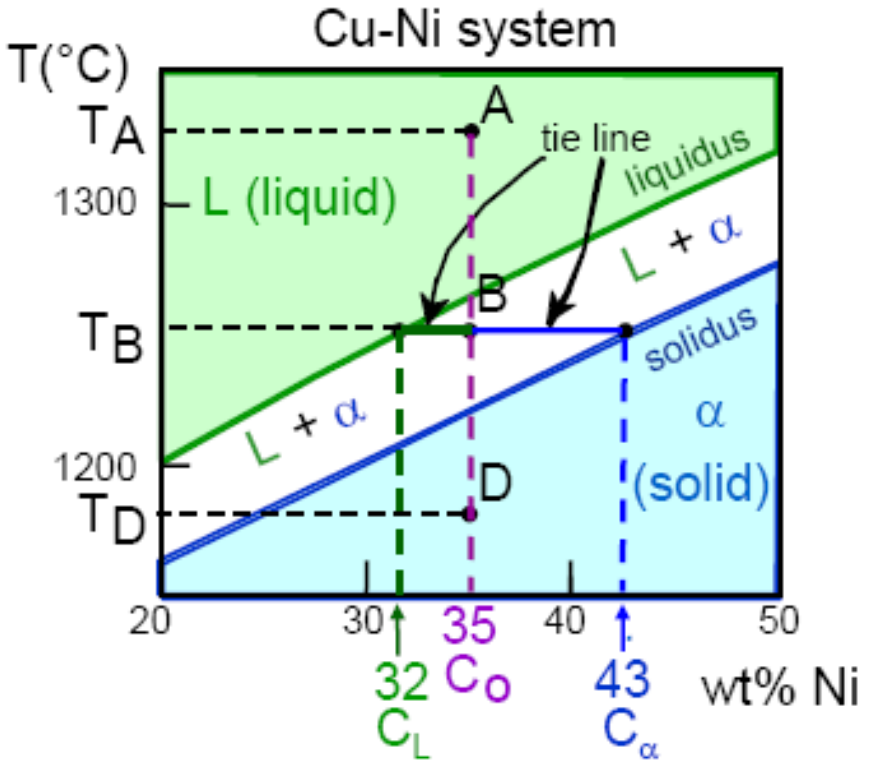
2. Anotam-se as intersecções da linha de amarração com as fronteiras entre as fases em ambos os lados

3. Traçam-se linhas perpendiculares à linha de amarração a partir dessas intersecções até o eixo horizontal das composições, onde cada uma das respectivas fases pode ser lida:



DETERMINAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES DAS FASES

No exemplo do sistema Cu - Ni tem–se :



Composição: C_O = 35% Ni

Em T_A:
Somente líquido
$C_L = C_O$

Em T_D:
Somente sólido
$C_\alpha = C_O$

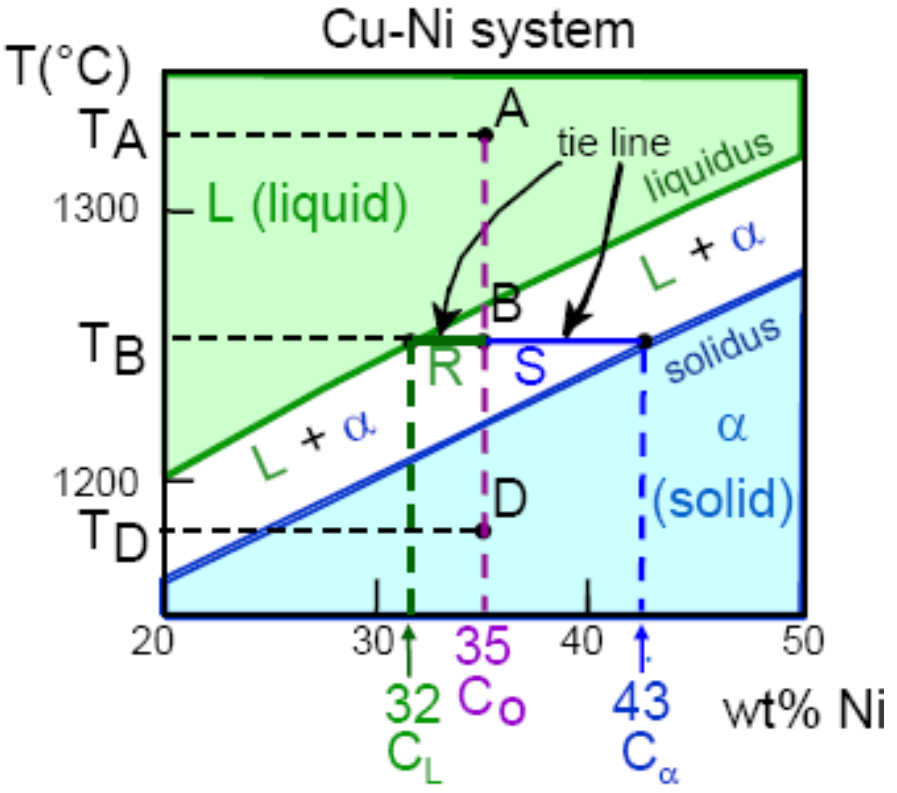
Em T_B:
$C_L = C_{liquido}$ = 32%Ni
$C_\alpha = C_{solido}$ = 43%Ni

DETERMINAÇÃO DAS QUANTIDADES DAS FASES

•Para uma região monofásica a liga é composta inteiramente por aquela fase, ou seja percentual de 100% da fase

•Para regiões em que a composição e temperatura estão dentro de uma região bifásica é utilizado o seguinte procedimento (Regra da alavanca):

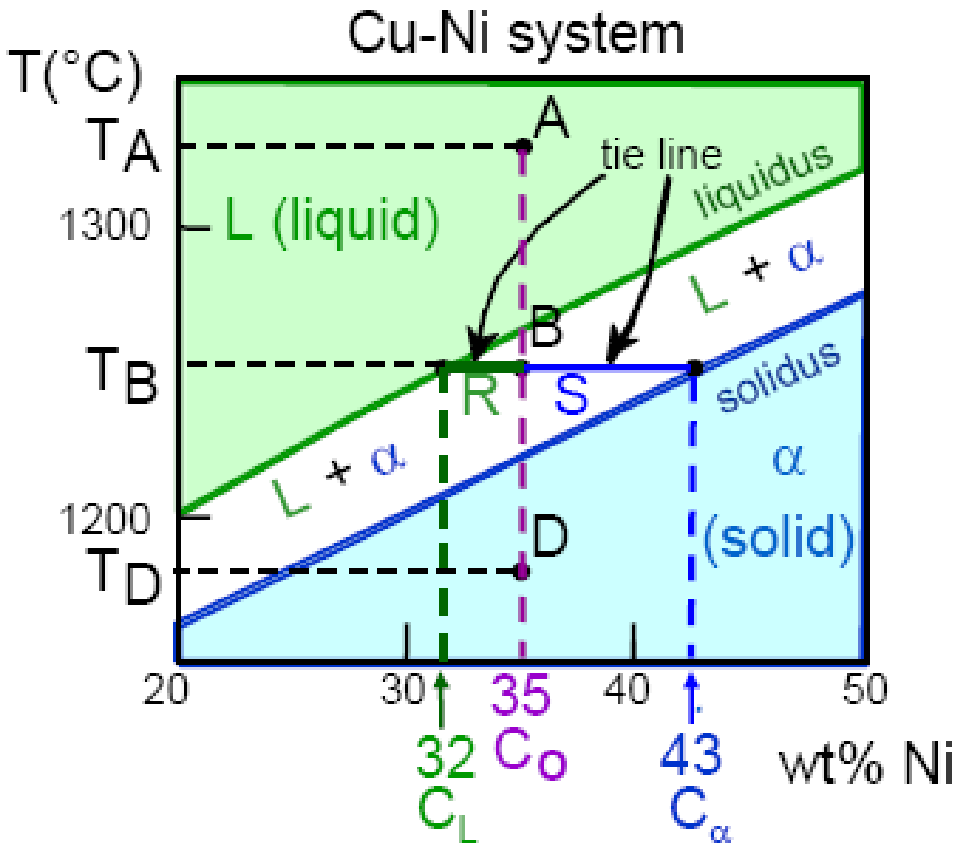
1. A linha de amarração é construída através da região bifásica na temperatura da liga
2. A composição global da liga (C_o) é localizada sobre a linha de amarração.
3. A fração de uma fase é calculada tomando-se o comprimento da linha de amarração desde a composição global da liga (C_o) até a fronteira com a outra fase e divide-se pelo comprimento total da linha de amarração
4. A fração da outra fase é determinada de maneira semelhante



DETERMINAÇÃO DAS QUANTIDADES DAS FASES

No emprego da regra da alavanca (alavanca invertida), os comprimentos dos segmentos podem ser determinados pela medição direta usando-se régua com escala linear ou através da subtração da composições.

Em um sistema Cu-Ni por exemplo:



Composição global: C_O = 35% Ni

Em TA : somente líquido
W_L = 100% , W_α =0

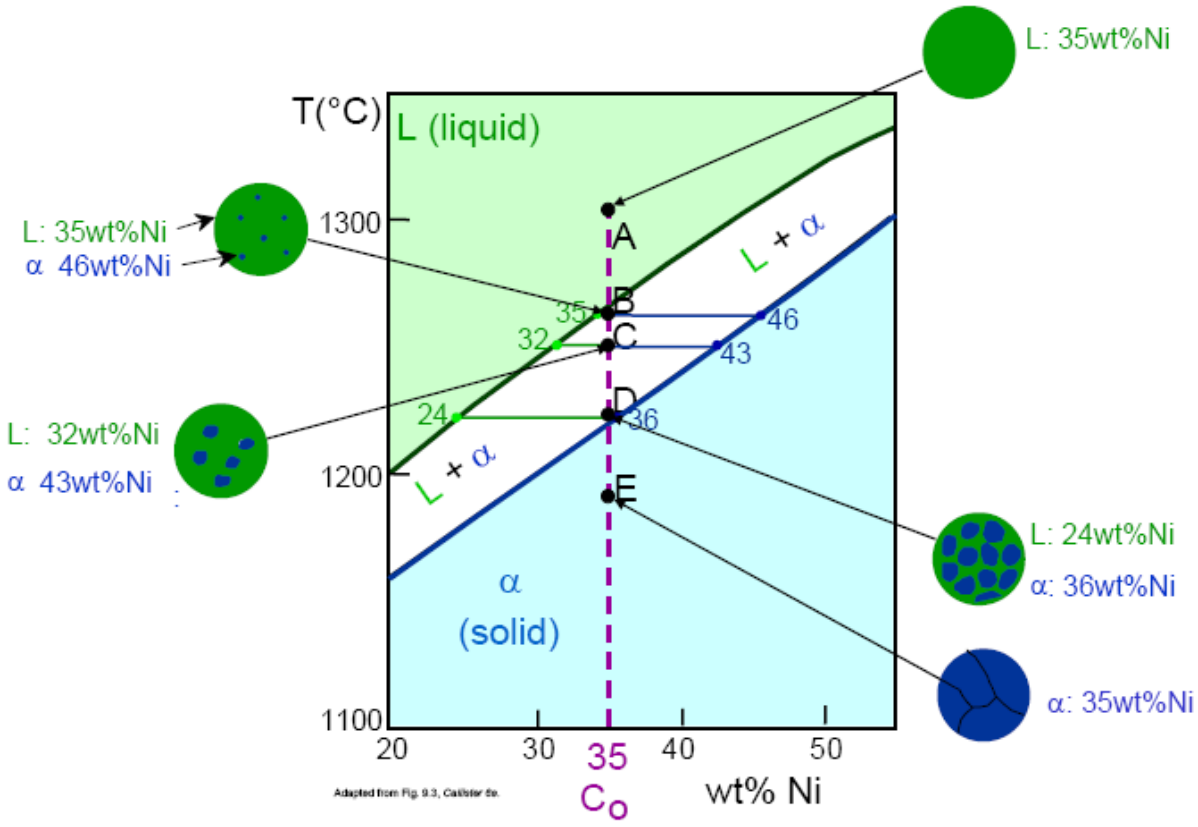
Em TD: somente sólido
W_α = 100%, W_L=0

Em TB: regra da alavanca

$$W_L = \frac{S}{R+S} = \frac{43-35}{43-32} = 73\ \text{wt\%}$$

$$W_\alpha = \frac{R}{R+S} = 27\ \text{wt\%}$$

Desenvolvimento da Microestrutura em Ligas Isomorfas



A: completamente líquida

B: linha liquidus - primeiro sólido α começa a se formar

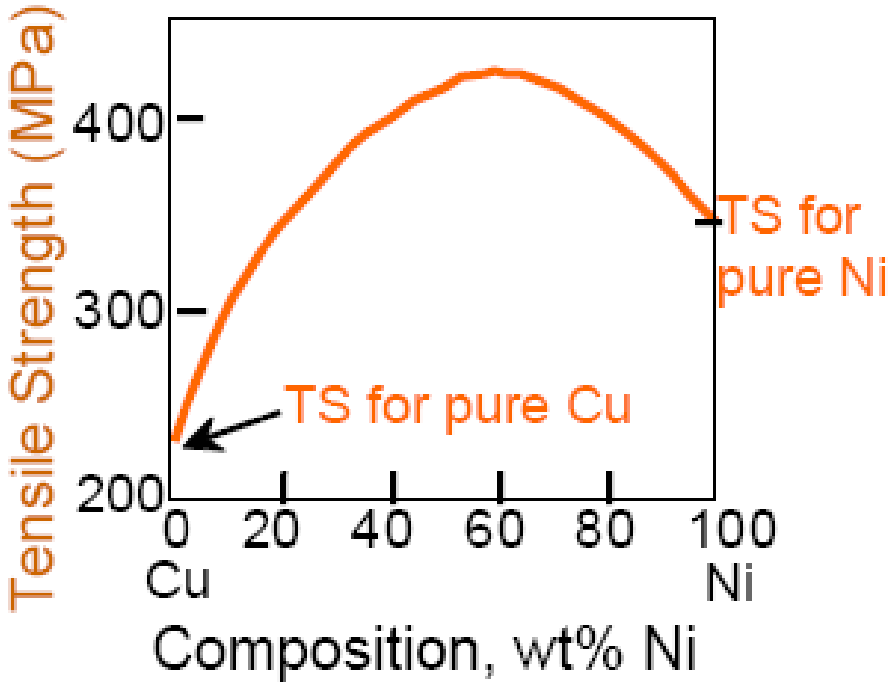
C: fases líquida e α

D: linha solidus - termina o processo de solidificação, fração mínima de líquido

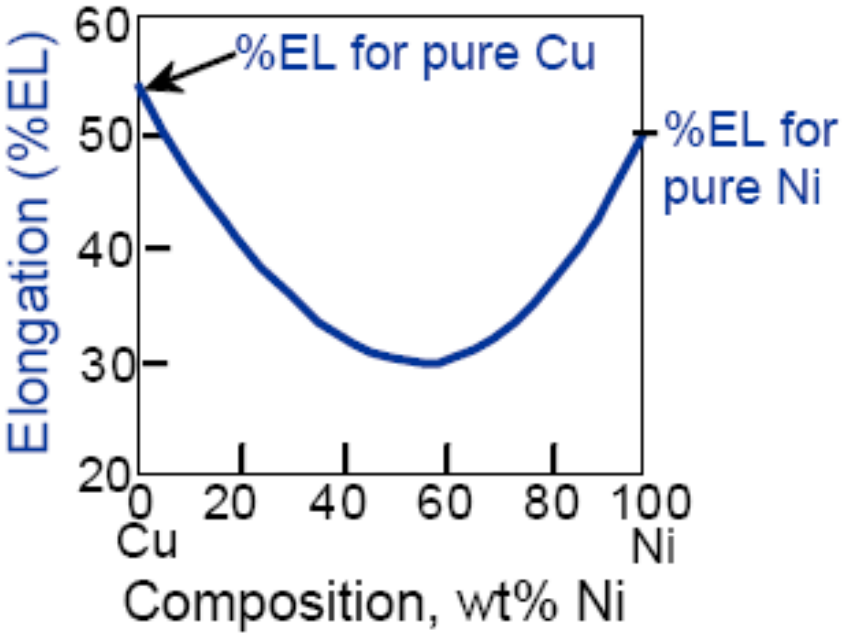
E: Resto da fase líquida se solidifica, completamente fase α

Propriedades mecânicas de ligas isomorfas

Cada componente experimentará um aumento de resistência por formação de solução sólida ou um aumento na resistência e dureza por adições de outros componentes.



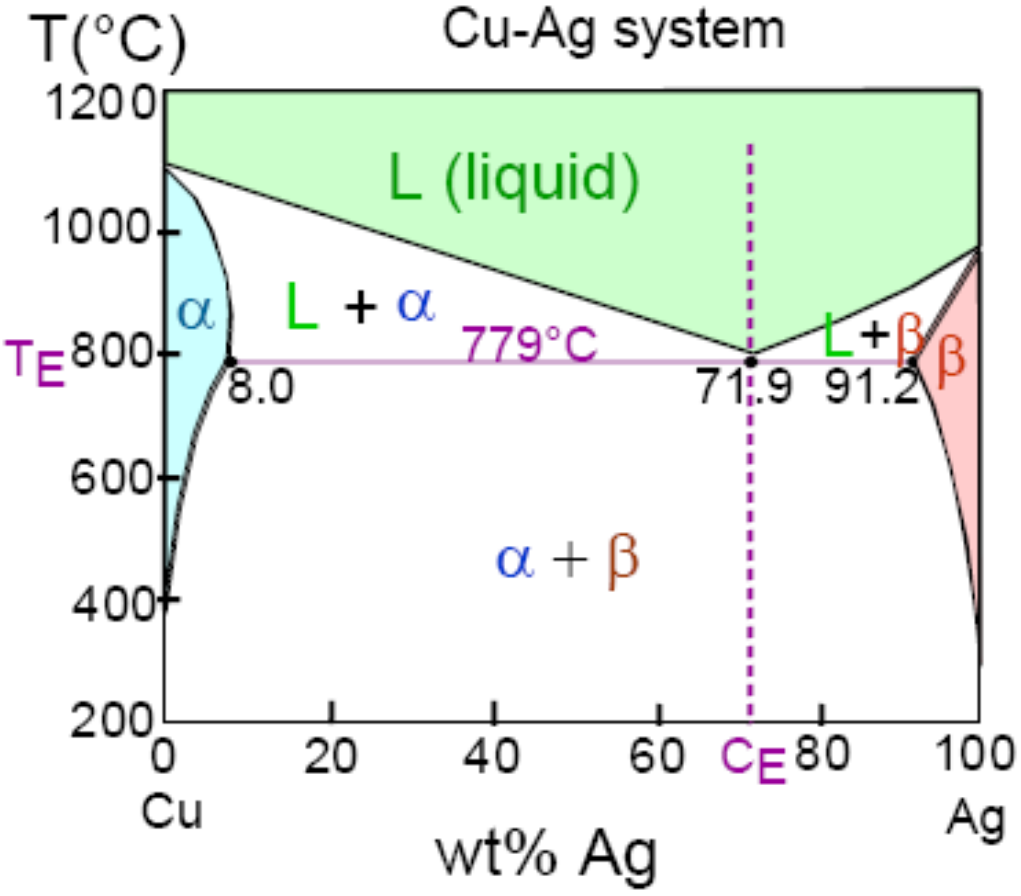
Limite de resistência à tração em função da composição



Ductilidade em função da composição

Sistemas Eutéticos |Binários

Sistema cobre-prata: diagrama de fases é conhecido como diagrama de fases eutético binário



Três regiões monofásicas distintas:

•α =solução sólida rica em cobre, prata é o componente soluto

• β=solução sólida rica em prata, cobre é o soluto

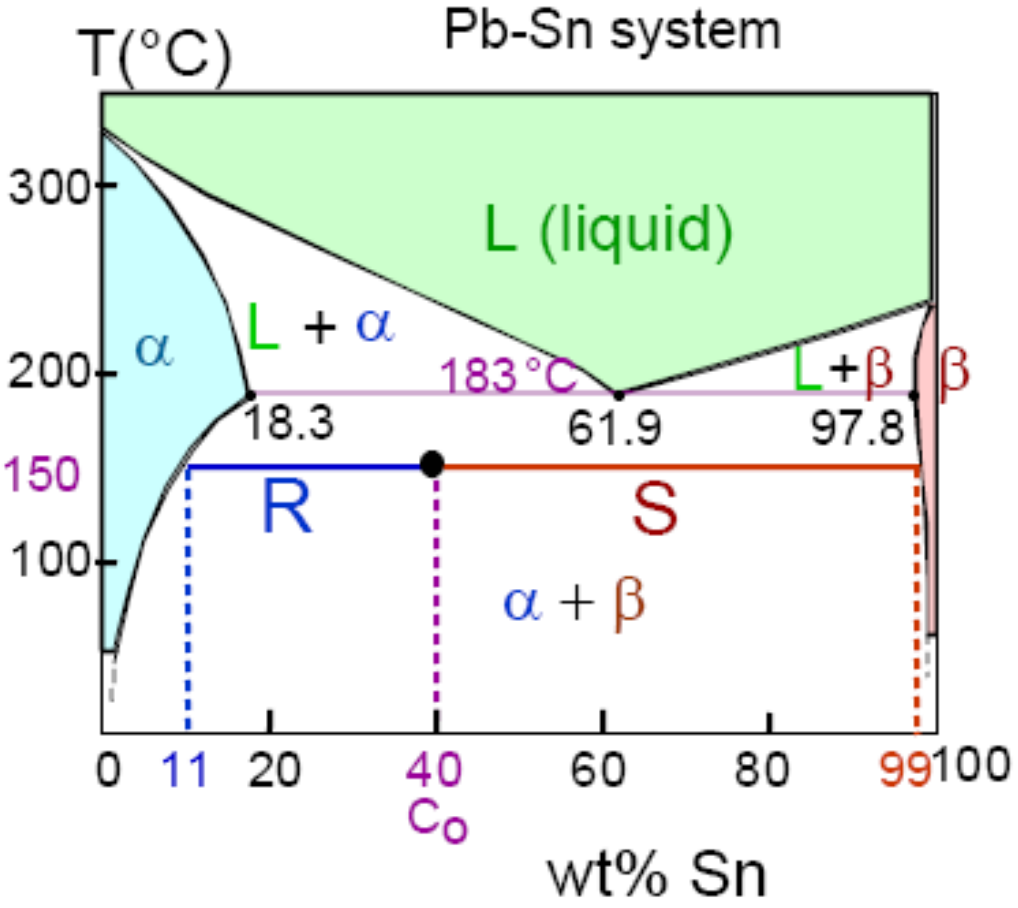
•Líquida

T_E = temperatura eutética, menor temperatura em que há líquido

C_E = composição eutética

Exemplo de sistema binário eutético

- Sistema Pb-Sn



Considerando uma liga 40% Sn – 60% Pb à 150ºC:

Fases presentes:

α + β

Composição das fases:

C_{α} = 11% Sn (solução solida α)

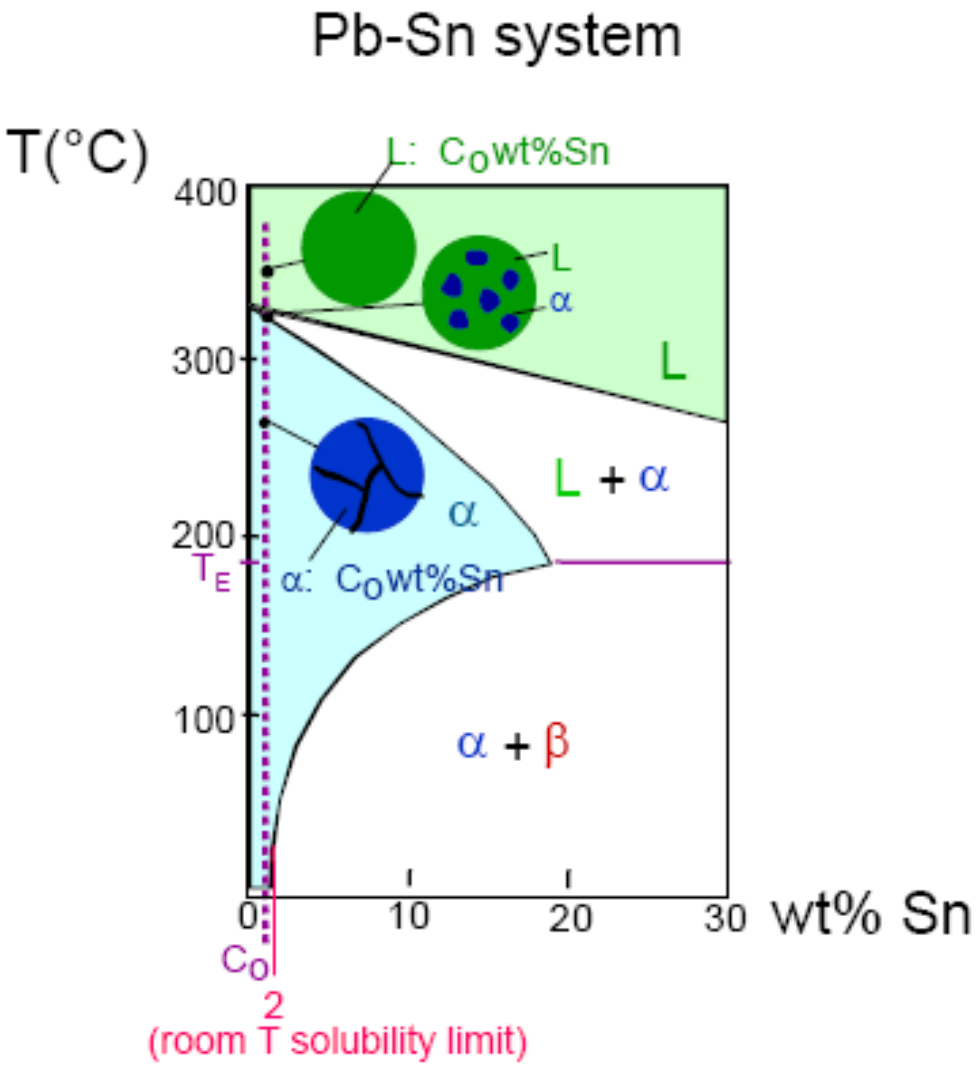
C_{β} = 99% Sn (solução solida β)

Quantidade relativa de cada fase:

$$W\alpha = \frac{99-40}{99-11} = \frac{59}{88} = 67 \quad WT\%$$

$$W\beta = \frac{40-11}{99-11} = \frac{29}{88} = 33 \quad WT\%$$

Desenvolvimento da microestrutura em ligas eutéticas



Composições que variam entre a de um componente puro e a solubilidade sólida máxima para aquele componente à temperatura ambiente

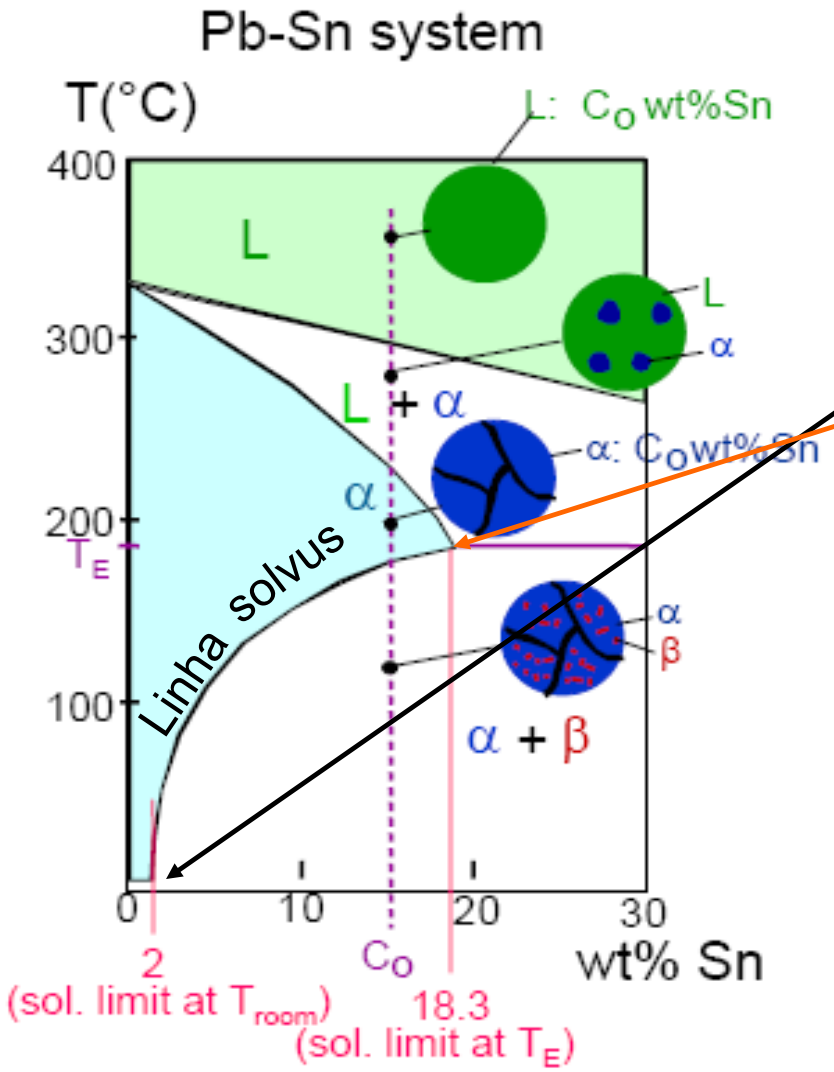
- O resfriamento corresponde a um deslocamento vertical para baixo na linha tracejada

- A liga permanece líquida até que atinge a linha liquidus e sólido α começa a se formar

- Com o prosseguimento do resfriamento mais sólido α começa a se formar

- Solidificação atinge o término quando cruza a linha solidus

Desenvolvimento da microestrutura em ligas eutéticas



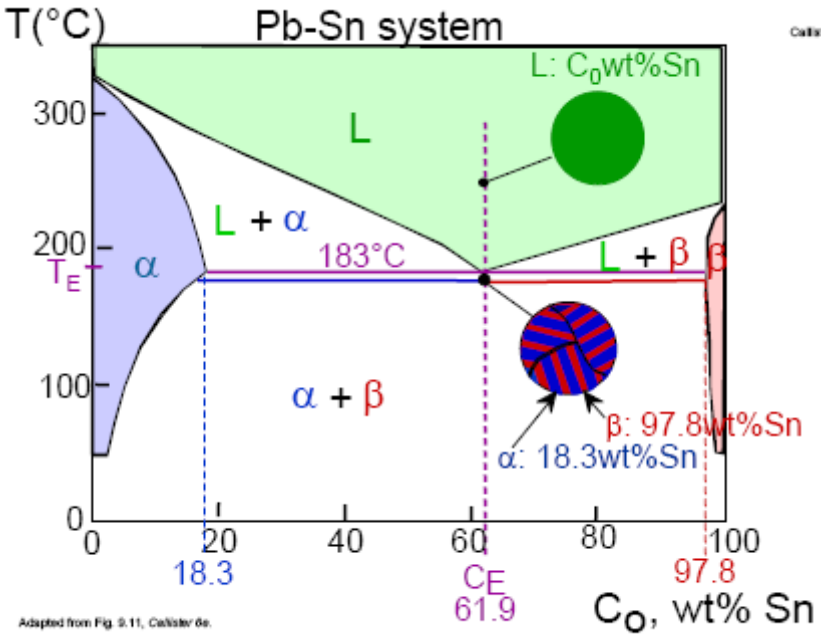
Composições que se encontram na faixa entre o limite de solubilidade à temperatura ambiente e a solubilidade máxima na temperatura do eutético

- Na descida até a intersecção com a linha solvus as alterações que ocorrem são semelhantes ao caso anterior

- Acima da intersecção com a linha solvus a microestrutura consiste em grãos da fase α

- Com o cruzamento da linha solvus a solubilidade da fase α é excedida, o que resulta na formação de pequenas partículas de fase β

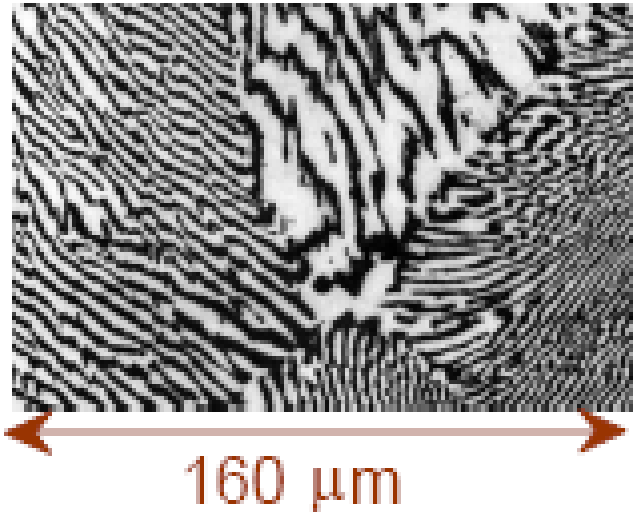
Desenvolvimento da microestrutura em ligas eutéticas



Solidificação da composição eutética

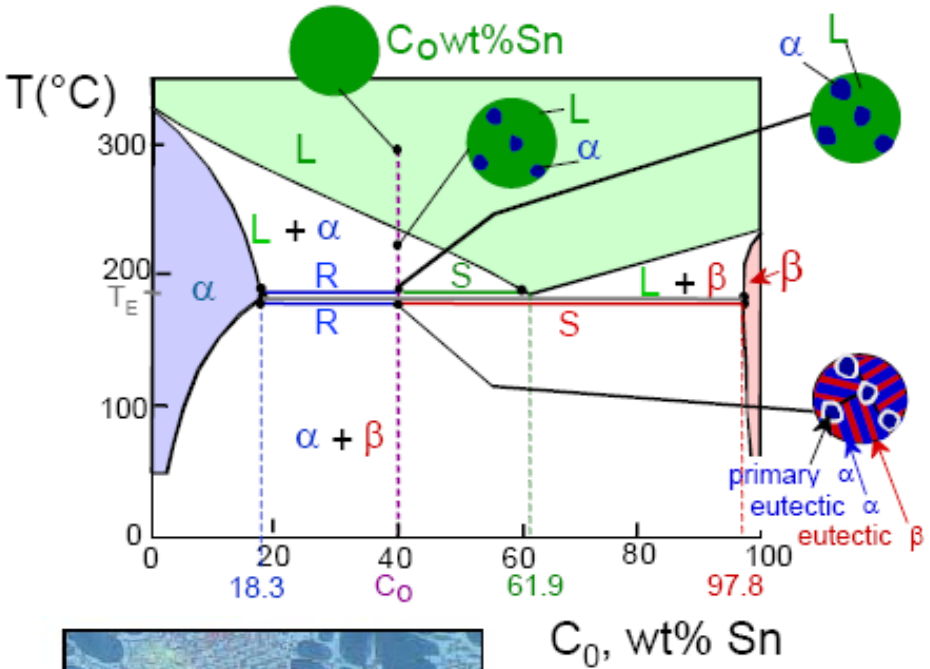
- Na medida que a liga é resfriada nenhuma alteração ocorre até a temperatura do eutético (183°C)

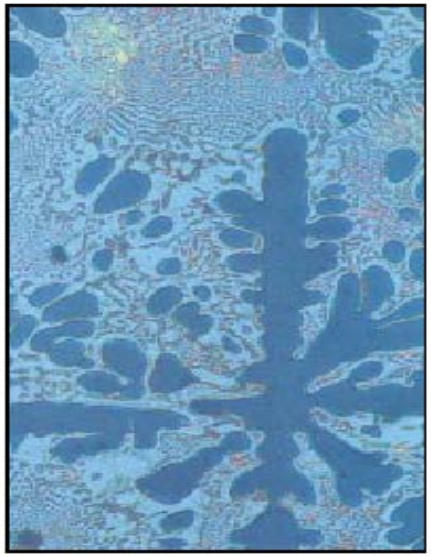
- Ao cruzar a isoterma eutética o líquido se transforma nas duas fases: α e β



Fotomicrografia mostrando a microestrutura de uma liga chumbo-estanho com a composição eutética

Desenvolvimento da microestrutura em ligas eutéticas





Microestrutura de uma liga Ag-Cu mostrando **α eutética** e **α primária**

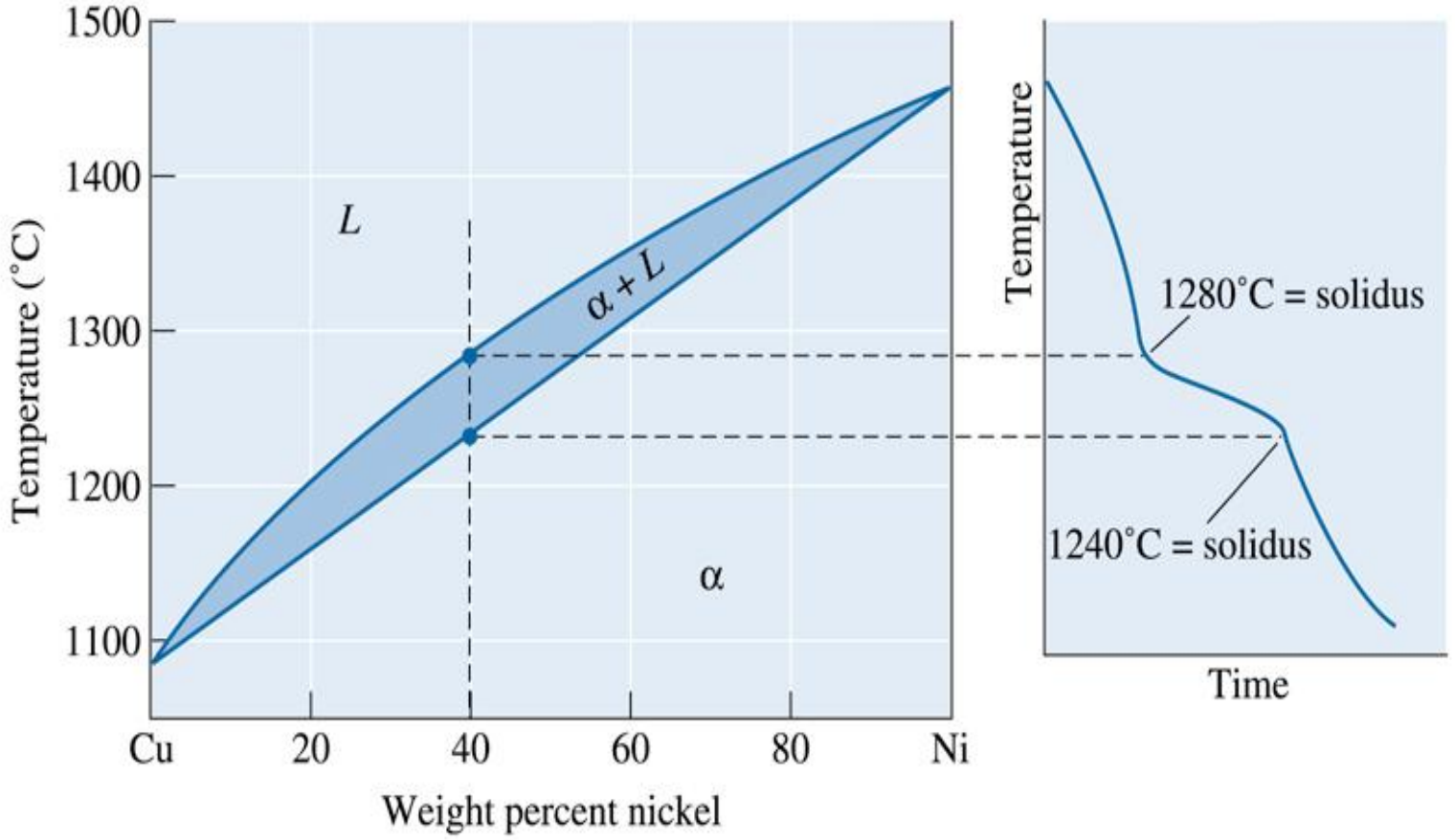
Composições que não são aquelas para o eutético e que quando resfriadas cruzam a isoterma eutética

- Antes do cruzamento da isoterma eutética as fases α e líquida estão presentes

- Após o cruzamento da isoterma eutética a fase líquida que possui a composição do eutético se transformará na estrutura do eutético

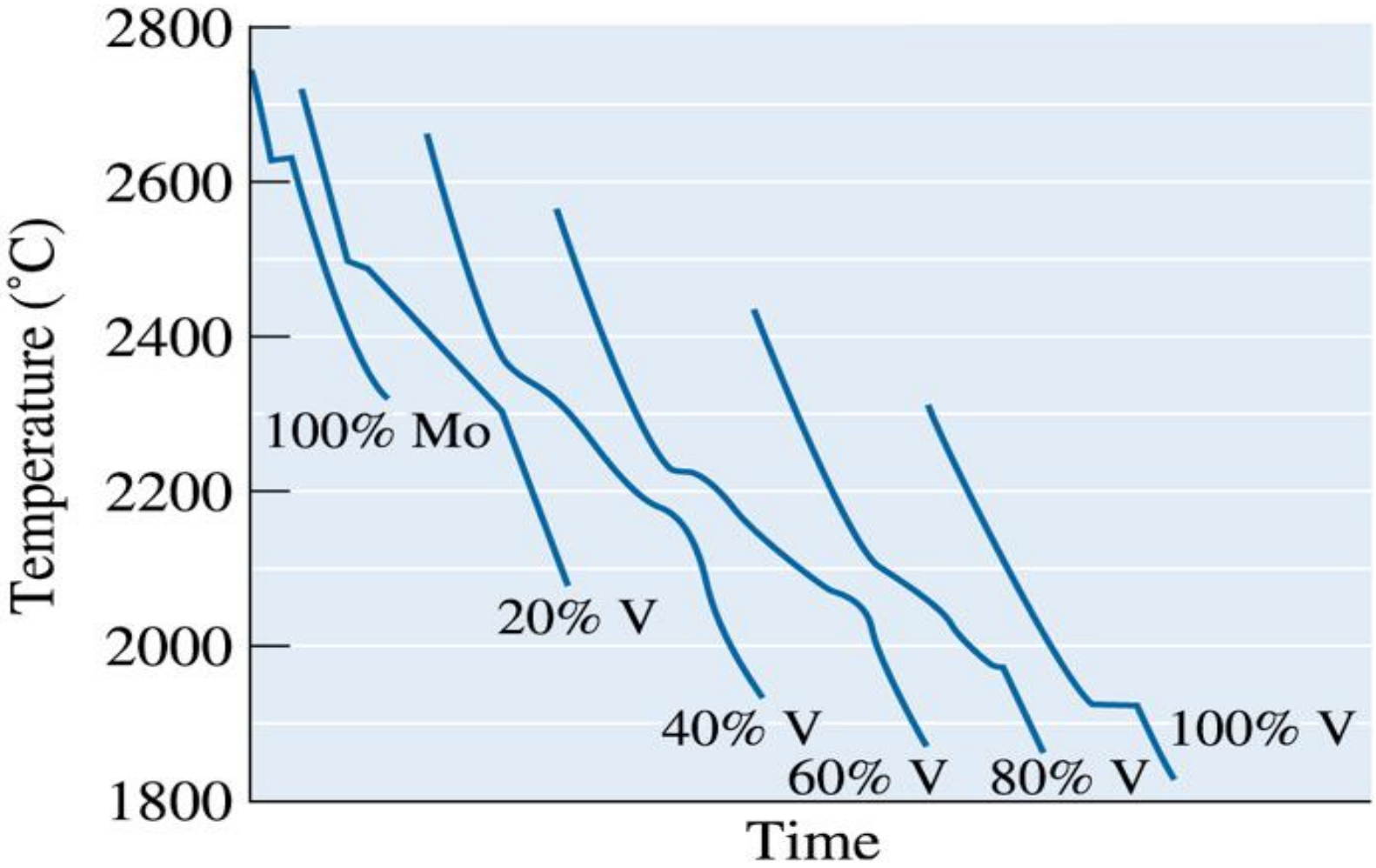
- A fase α estará presente tanto no eutético quanto naquela fase que se formou em α +L, assim dá-se o nome de **α eutética** àquela que reside no eutético e **α primária** aquela que se formou antes da isoterma eutética

ESQUEMA DE CONSTRUÇÃO DO DIAGRAMA DE FASES



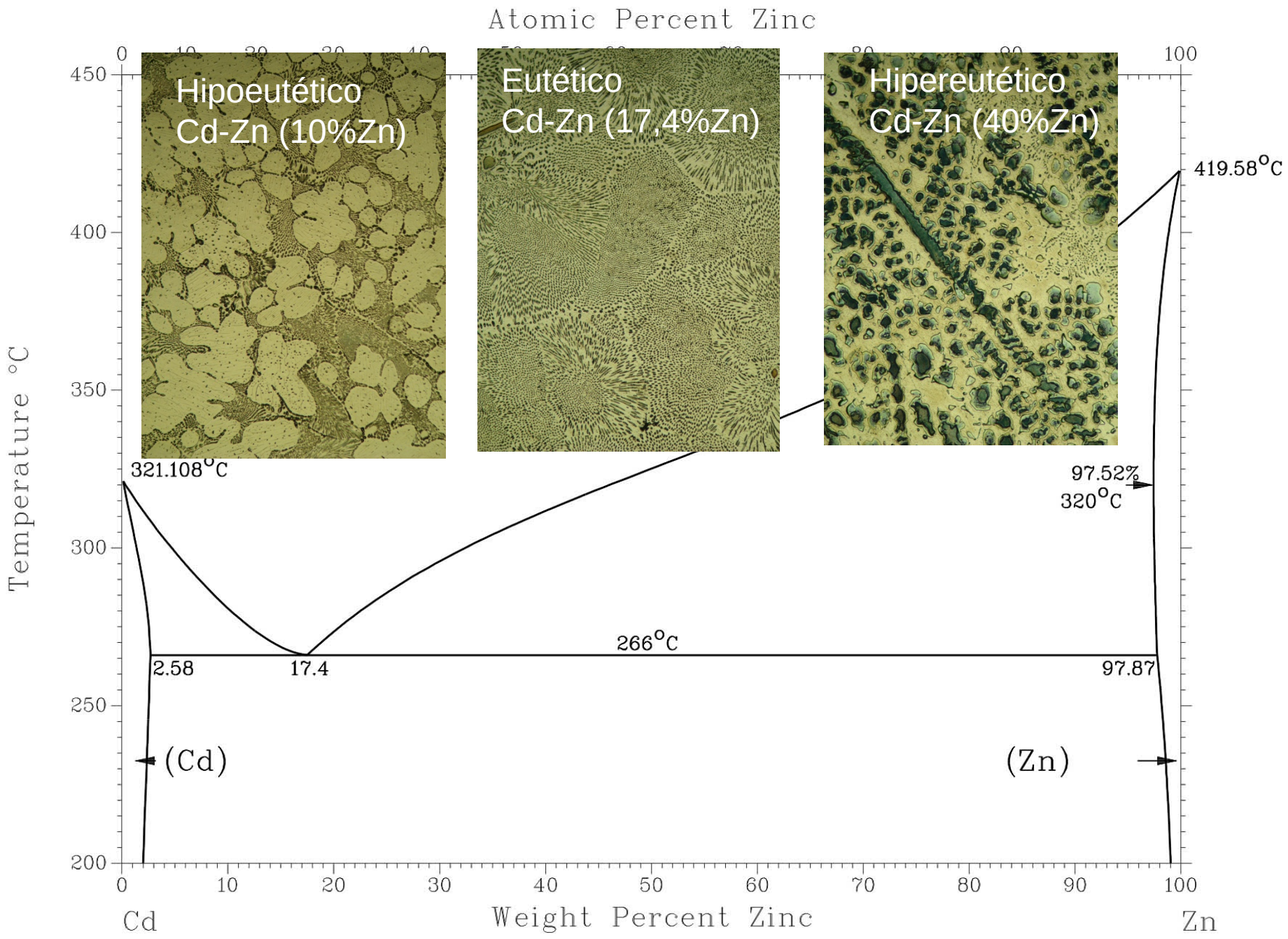
©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

Curva de resfriamento para uma liga isomorfa durante a solidificação. Assume-se que a taxa de resfriamento são pequenas para permitir equilíbrio térmico da liga. As mudanças de inflexão mostradas na curva de resfriamento indicam as temperaturas de líquido e sólido, que neste caso refere-se a liga Cu-Ni com 40% de Ni.



©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

Seis curvas de resfriamento para diversos percentuais da liga Mo-V levantadas para a construção do diagrama de fases.


Atomic Percent Zinc
Hipoeutético
Cd-Zn (10%Zn)
Eutético
Cd-Zn (17,4%Zn)
Hipereutético
Cd-Zn (40%Zn)
419.58°C
321.108°C
97.52%
320°C
266°C
2.58
17.4
97.87
(Cd)
(Zn)
Temperature °C
Weight Percent Zinc
Cd
Zn

https://www.youtube.com/watch?v=ELL4uTEaBVM



https://www.youtube.com/watch?v=iEPxgjZwUkk



https://www.youtube.com/watch?v=OYhtcvElT5Q



https://www.youtube.com/watch?v=bSE8pH3dxYw



https://www.youtube.com/watch?v=luy73_OoO7k

https://www.youtube.com/watch?v=vi-DLGcmuw

https://www.youtube.com/watch?v=BkWARJCXbIE

https://www.youtube.com/watch?v=_s82WZAhMW8

https://www.youtube.com/watch?v=MswcNYpAoI8&t=26s

https://www.youtube.com/watch?v=0euOkdPkpcg



https://www.youtube.com/watch?v=pdc95A4LZmU

https://www.youtube.com/watch?v=TLVVjzt9kvo