

LOM3016 – Introdução à
Ciência dos Materiais



Aula 7 – Parte 1

Diagrama de Fases

Kelly Benini



Introdução

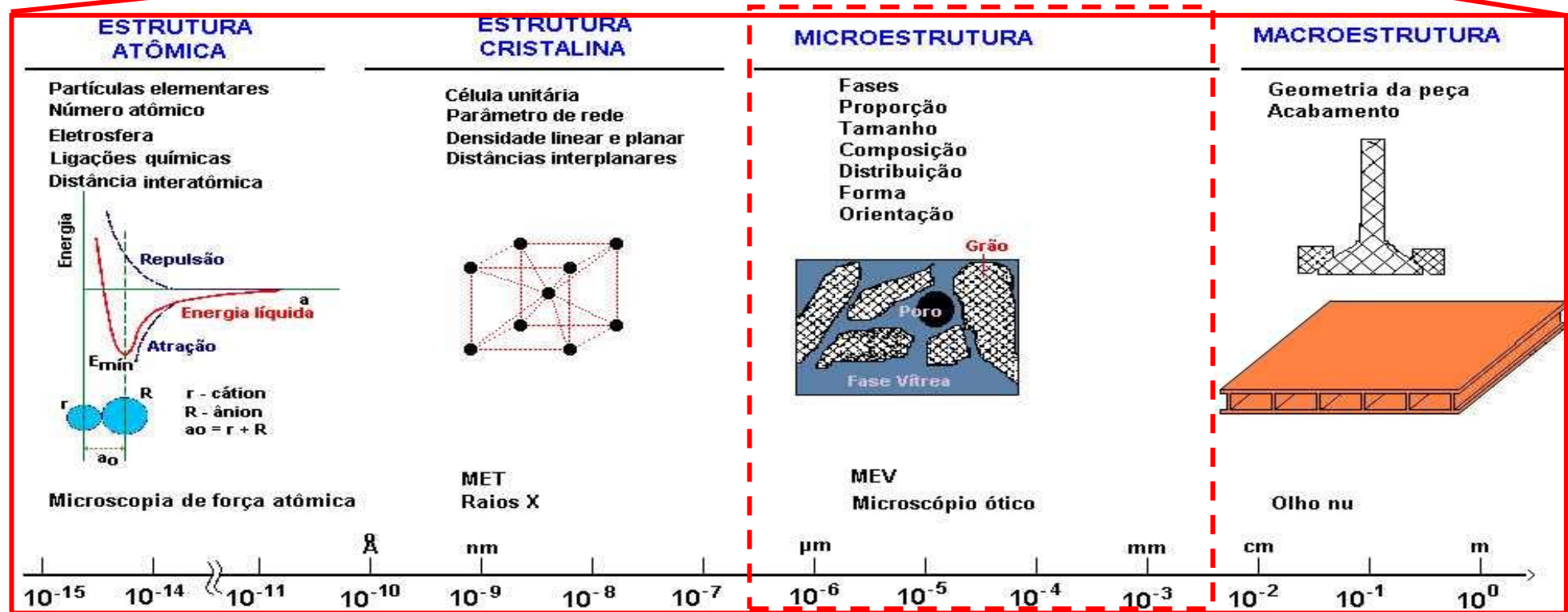
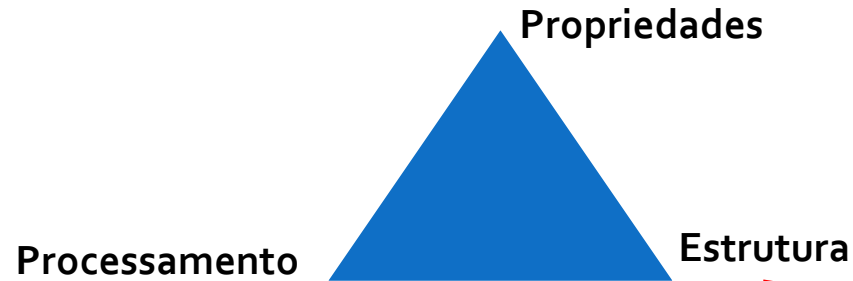
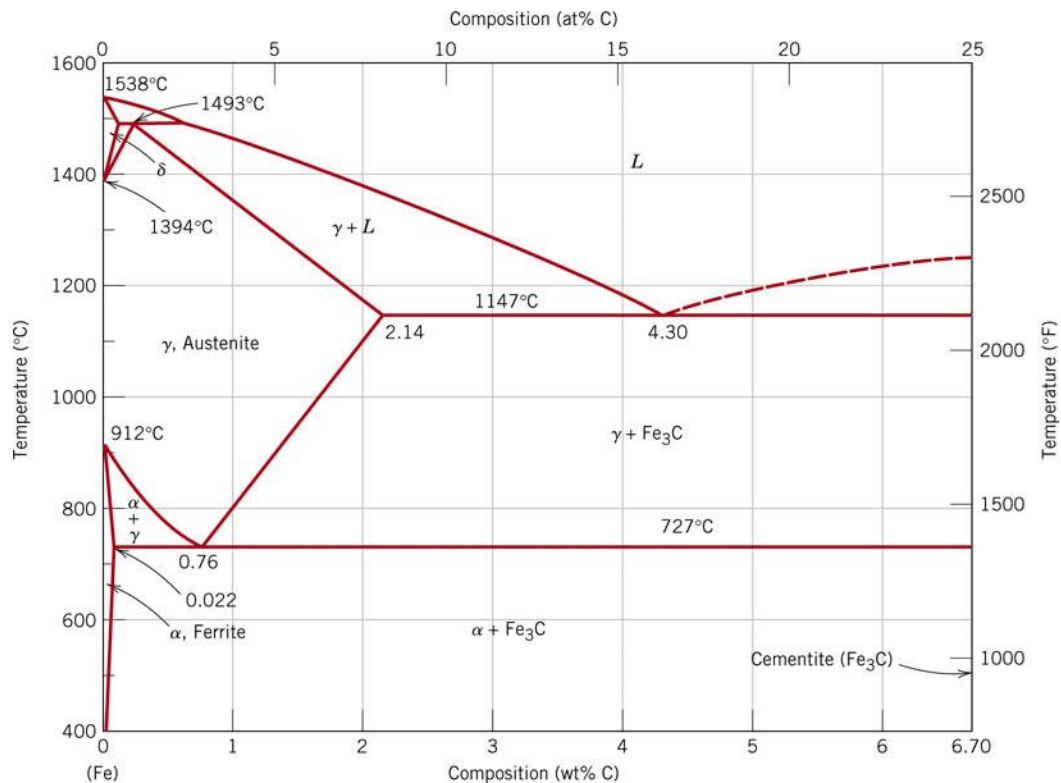


Diagrama de Fases

Definições e Conceitos

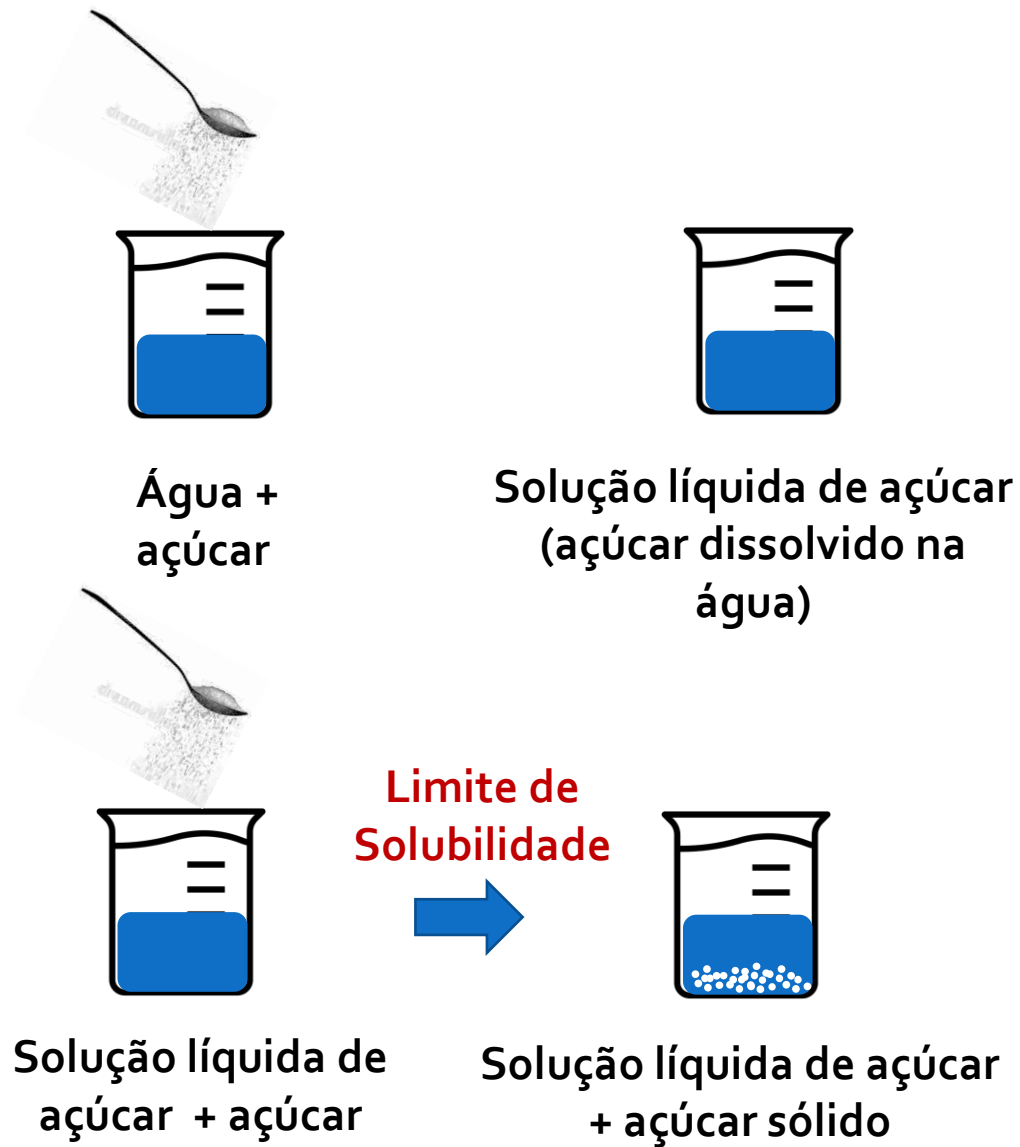


Callister, W.D. Materials Science and Engineering: An Introduction. 7 th Ed. Wiley.

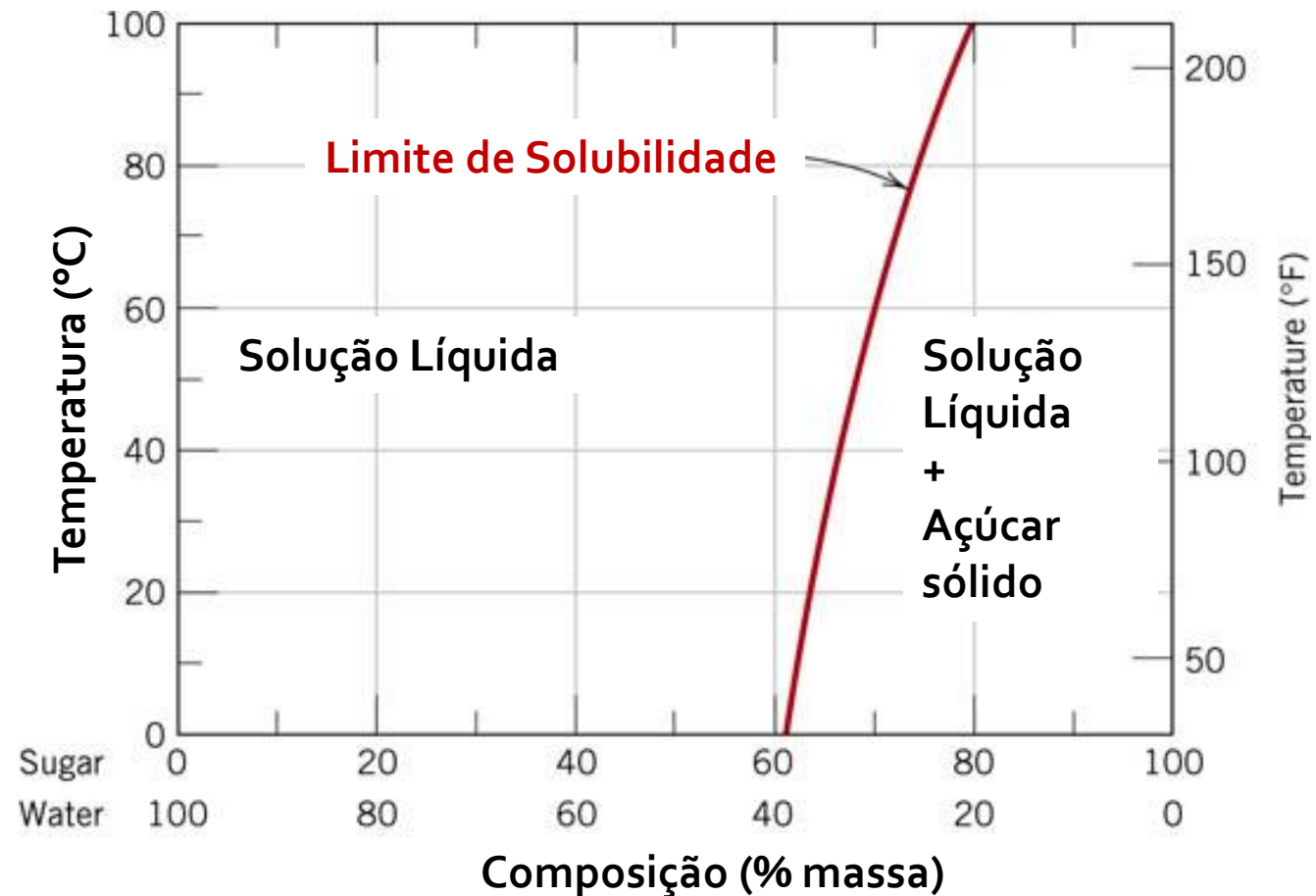
Componente – metais puros e ou compostos que compõe um sistema

Sistema – série de possíveis ligas compostas pelos mesmos componentes (Sistema Ferro-Carbono)

Definições e Conceitos

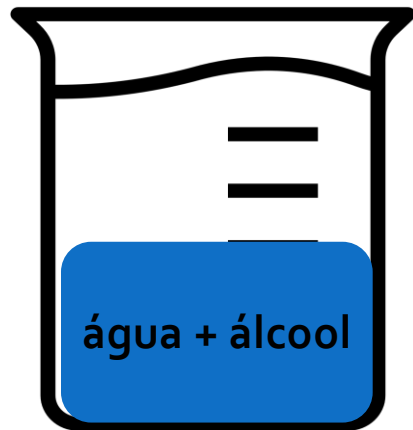


Limite de Solubilidade – concentração máxima de átomos de soluto que pode se dissolver no solvente para formar uma solução sólida



Definições e Conceito

Fases – uma porção homogênea do sistema que possui características físicas e químicas uniformes



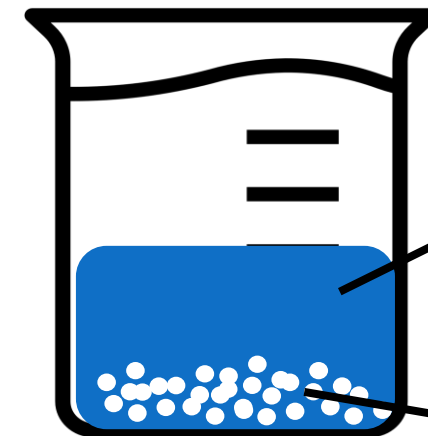
1 fase

Os componentes se misturam completamente



2 fases

Os componentes não se misturam

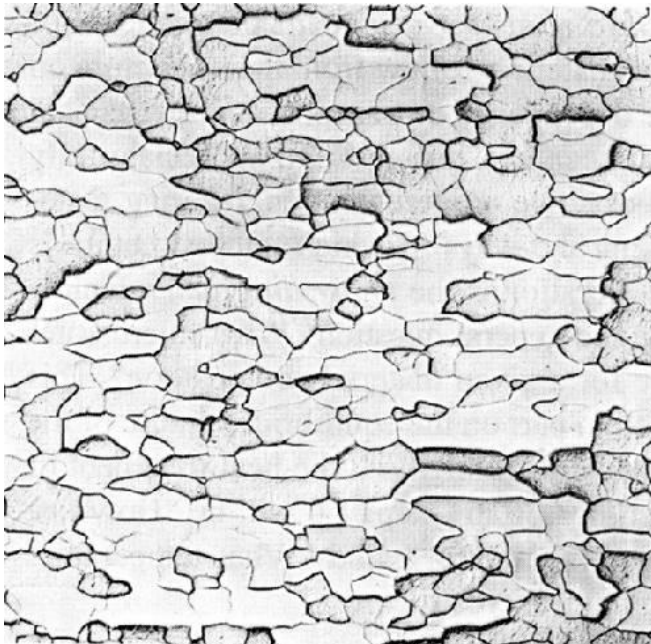


2 fases

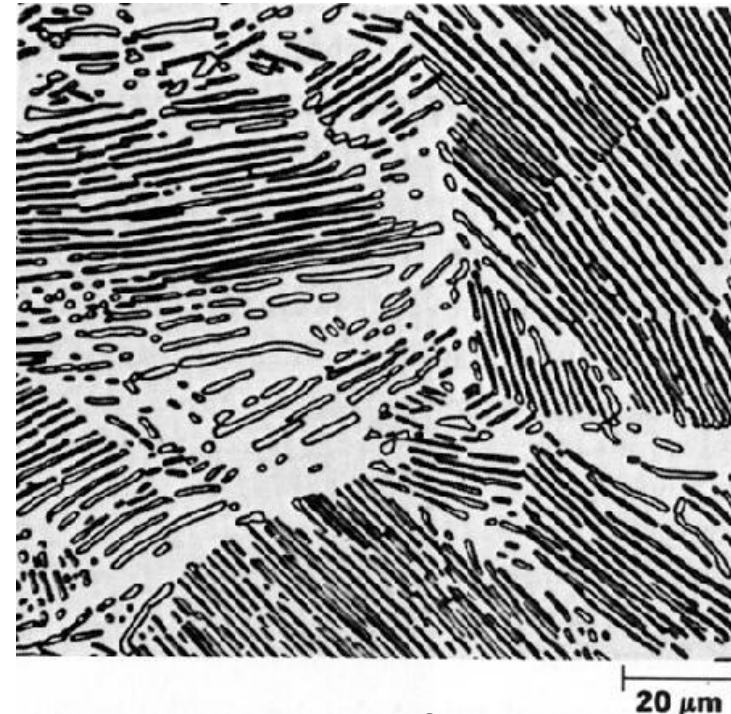
Os componentes se misturam parcialmente

Definições e Conceitos

Microestrutura – compreende o estudo das fases presentes em um material. Essas são avaliadas quanto a sua natureza, composição, quantidade, tamanho, forma, distribuição e orientação



Microestrutura de uma única fase de um molibdênio puro, com muitos grãos de composição uniforme (200x).



Microestrutura de duas fases da perlita (aço com 0,8% de C), apresenta camadas alternada de ferrita e cementita (500x).

Definições e Conceitos



Equilíbrio – descrito em termos de Energia livre (grandeza termodinâmica) que é função da energia interna do sistema e também da aleatoriedade ou 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 consequência mudanças para outro estado (mudança entropia)

Definições e Conceitos

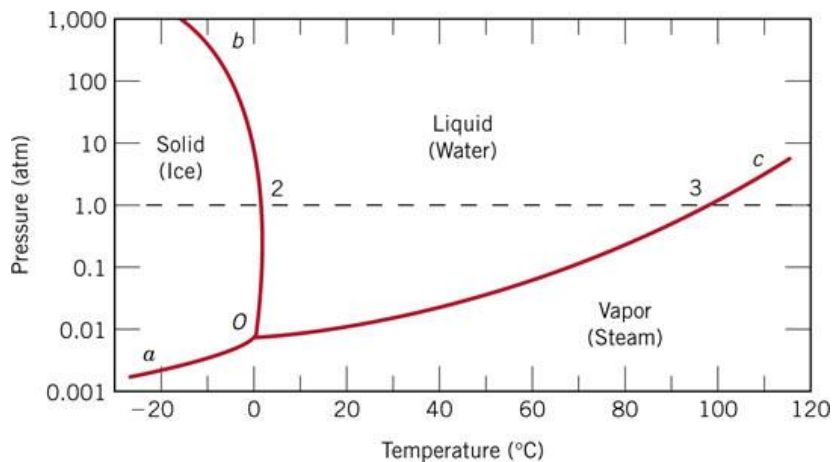


Equilíbrio de Fases – refere ao equilíbrio em sistemas que possui mais de uma fase. As características das fases são constantes em relação ao tempo

Diagrama de Fases

Também chamado de **Diagrama de Equilíbrio** é formado a partir da combinação de parâmetros tais como **temperatura**, **pressão** e **composição** e fornece muitas informações sobre as fases presentes.

Diagramas Unários - Por exemplo o Diagrama de Fases da água Pressão x Temperatura



Temperatura

Diagrama de Fases

Composição

Pressão

Diagramas Binários - Por exemplo Cu-Ni, Fe-C Composição x Temperatura

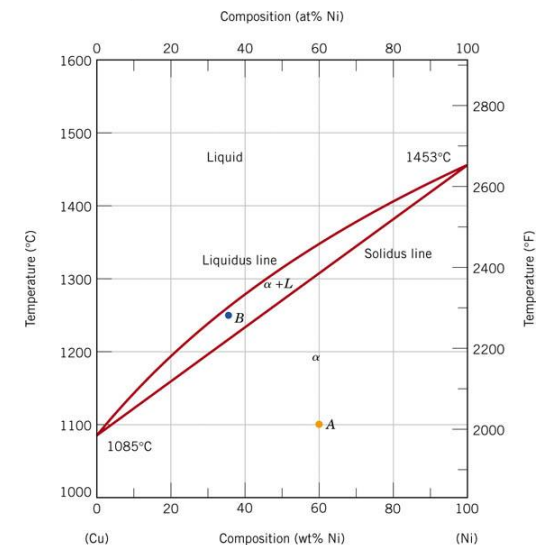


Diagrama de Fases Binários

Diagrama de solução sólida ilimitada

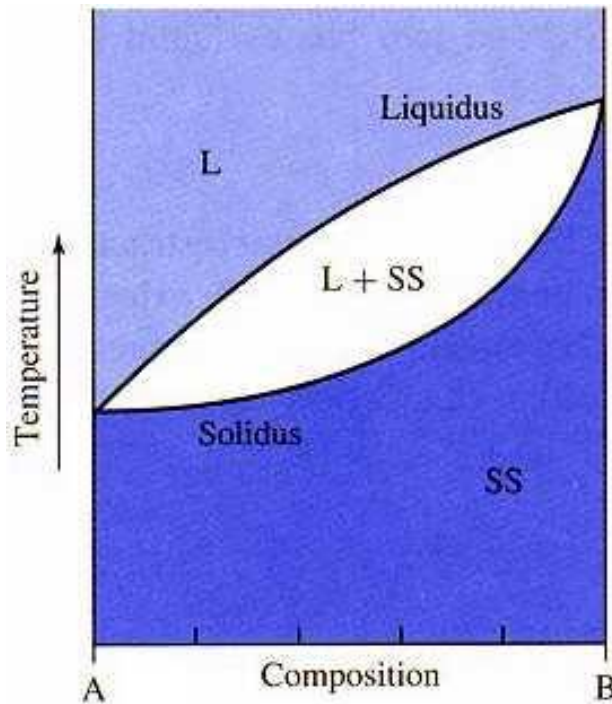


Diagrama sem solução sólida

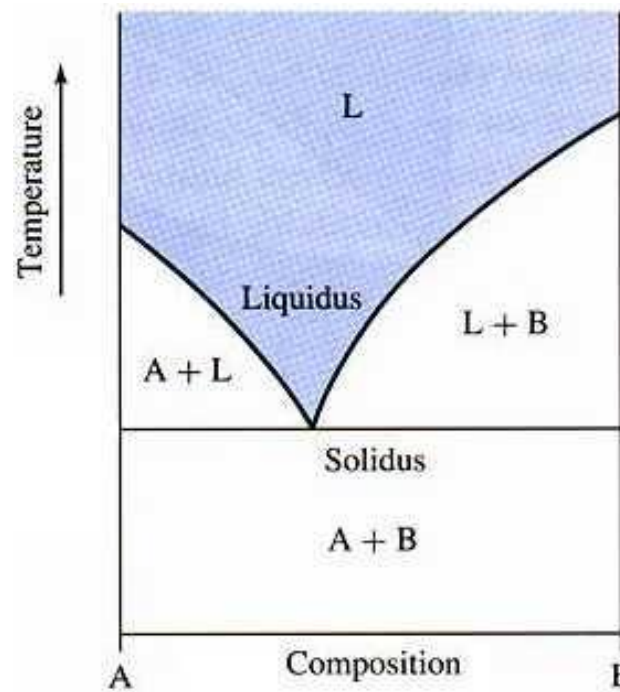
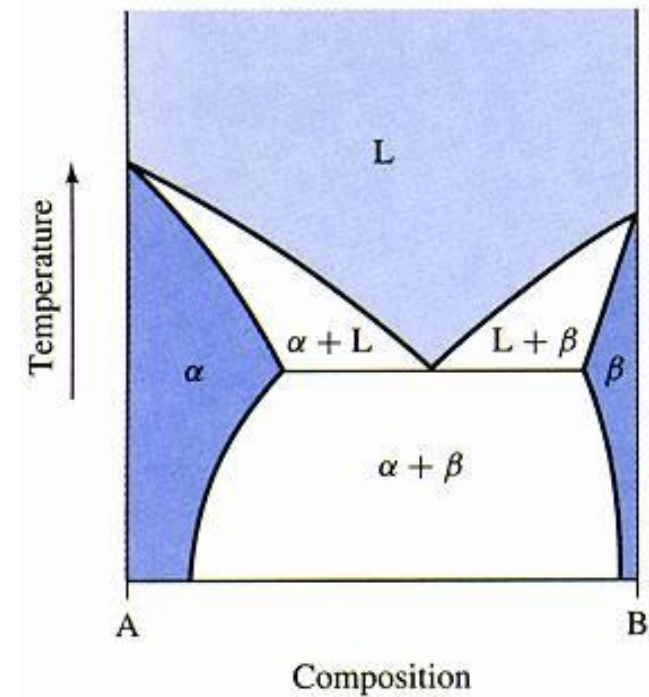
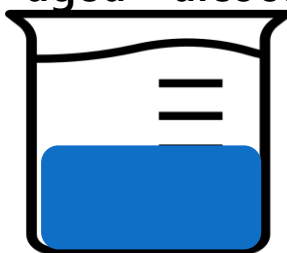


Diagrama de solução sólida limitada



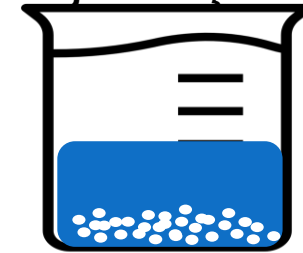
água + álcool



água + óleo



água + açúcar



Analogia

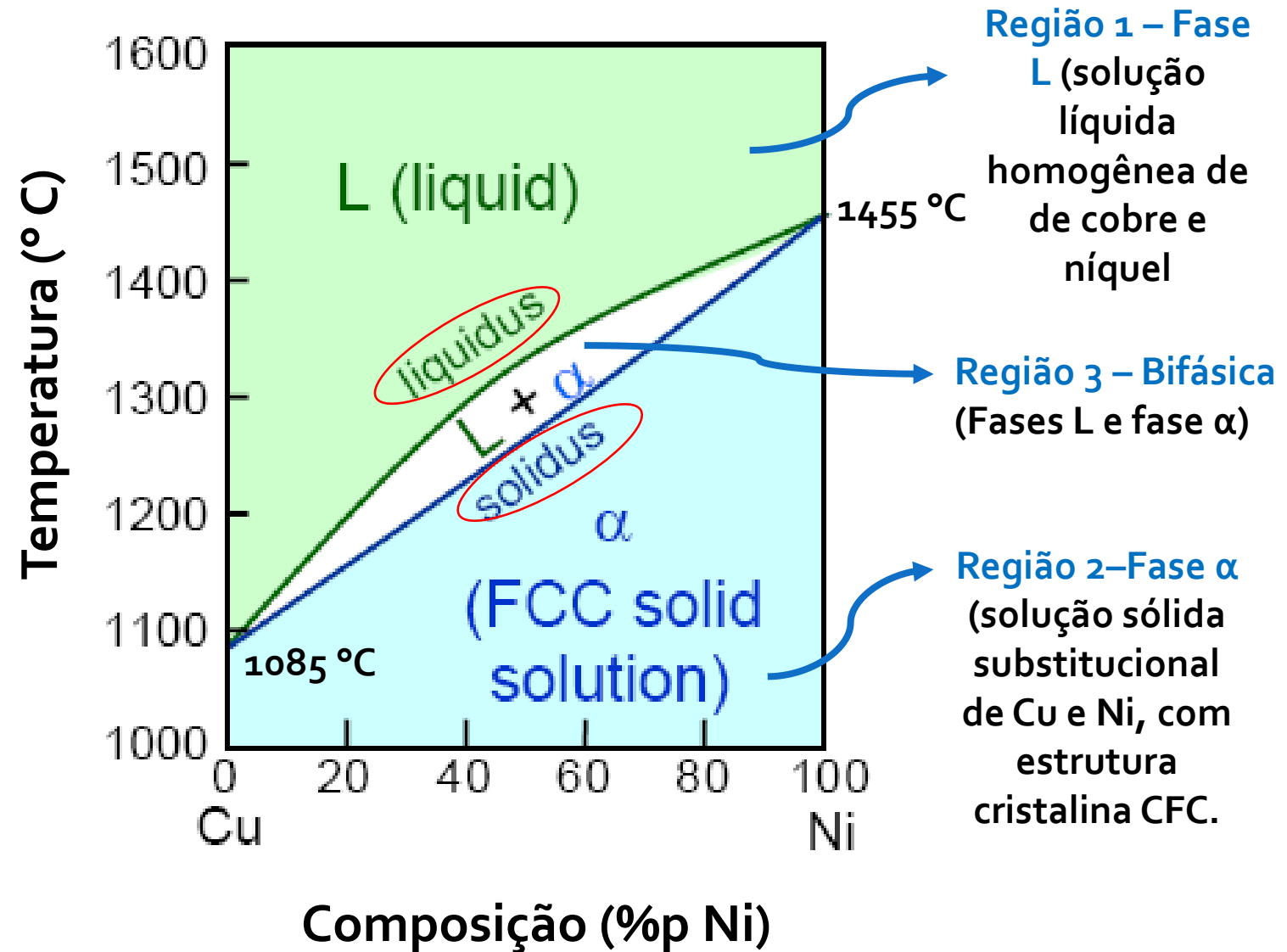
Diagrama de Solução Sólida Ilimitada

Sistema cobre-níquel: exemplo de um sistema isomorfo binário

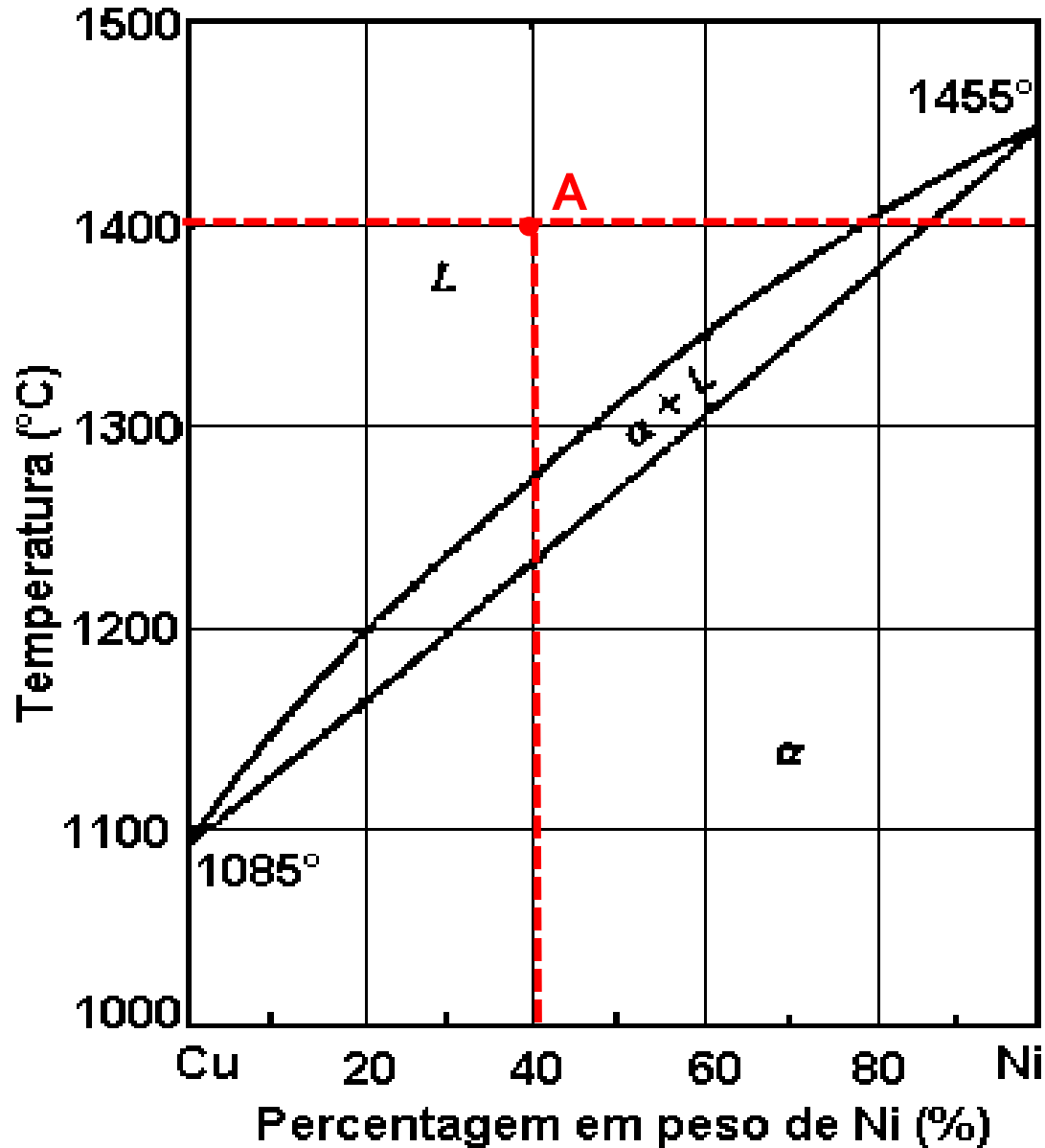
Sistema Isomorfo: completa solubilidade dos dois componentes (Cu e Ni) nos estados líquidos e sólidos

Cu e Ni formam solução sólida substitucional (fase α) - mesma estrutura Cristalina (CFC), raios atômicos e eletronegatividade praticamente idênticos, valência semelhante

(Aula 5 – ver slides 12 a 14)



Interpretação do Diagrama de Fases



Ponto A - T 1400°C - 40%Ni 60%Cu

Fases Presentes: { L

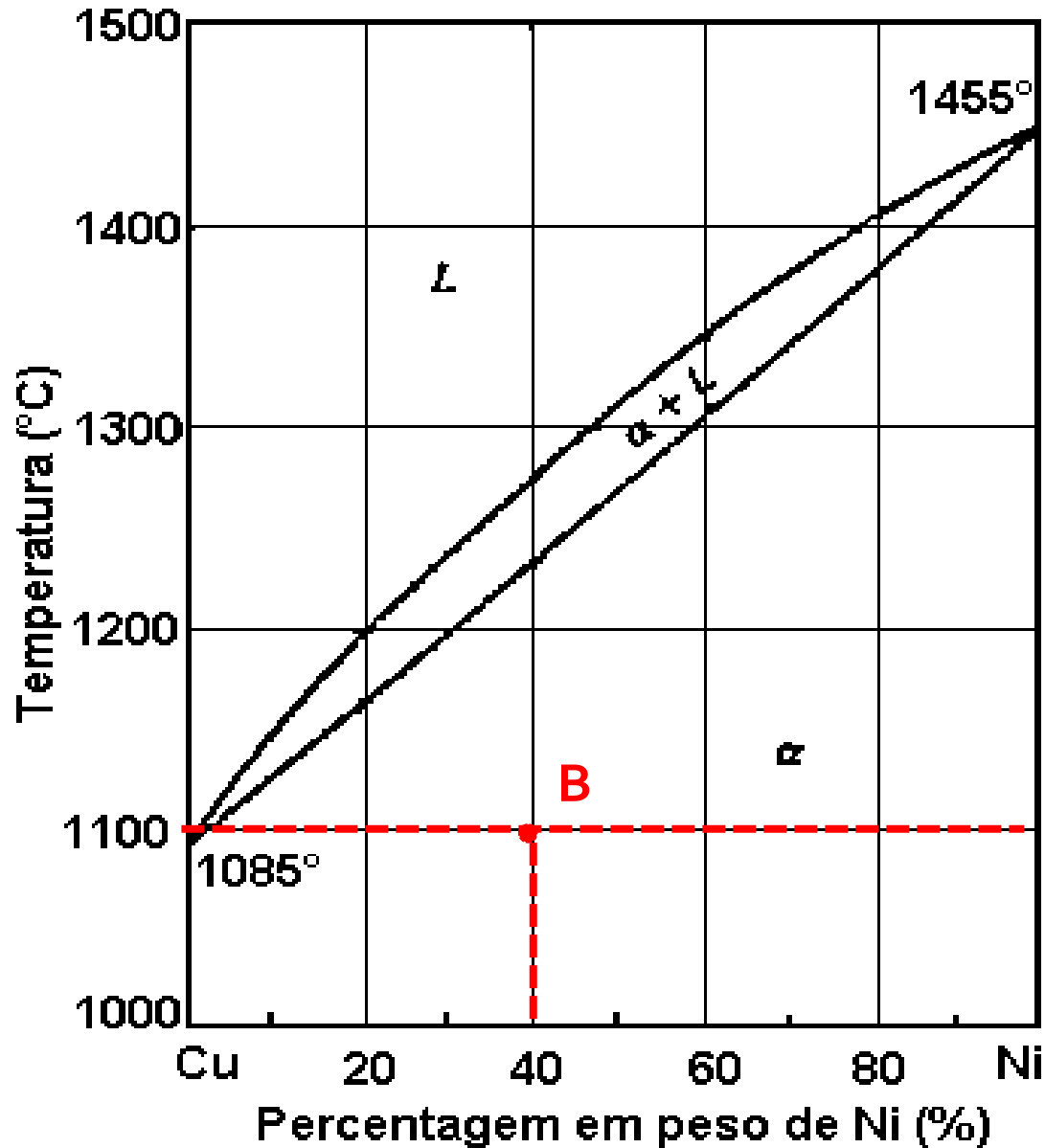
Composição das Fases:

L → 40% Ni e 60% Cu

Proporção das Fases:

100 % de L

Interpretação do Diagrama de Fases



Ponto B - T 185°C - 40%Ni 60%Cu

Fases Presentes: { α

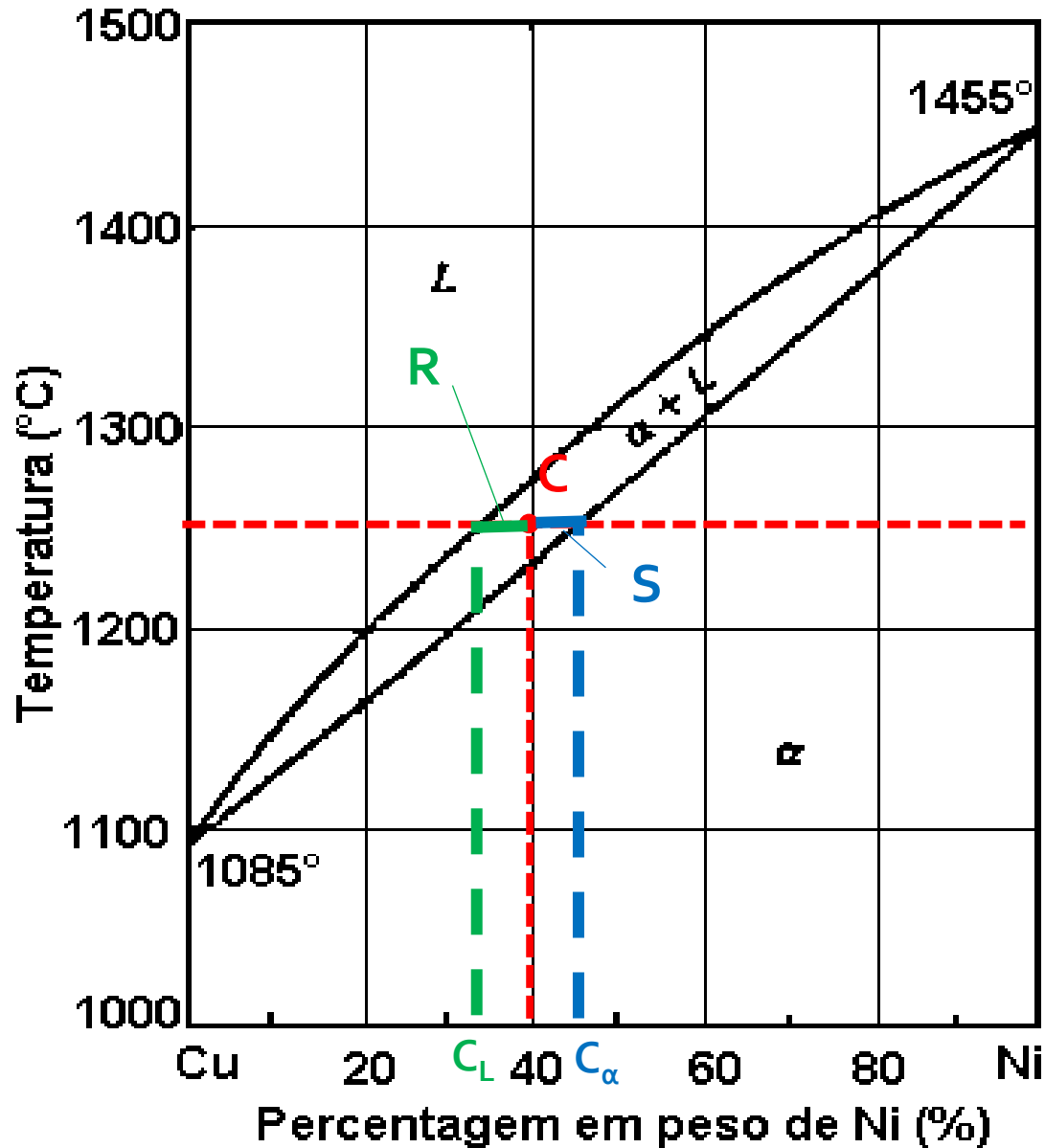
Composição das Fases:

α → 40% Ni e 60% Cu

Proporção das Fases:

100 % de α

Interpretação do Diagrama de Fases



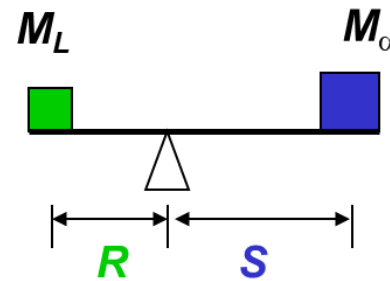
Ponto C - T 1260°C - 40%Ni 60%Cu

Fases Presentes: **Composição das Fases:**

$\left\{ \begin{array}{l} L \rightarrow 33\% \text{ Ni e } 77\% \text{ Cu} \\ \alpha \rightarrow 43\% \text{ Ni e } 57\% \text{ Cu} \end{array} \right.$

Proporção das Fases:

Regra da Alavanca



$$M_\alpha \cdot S = M_L \cdot R$$

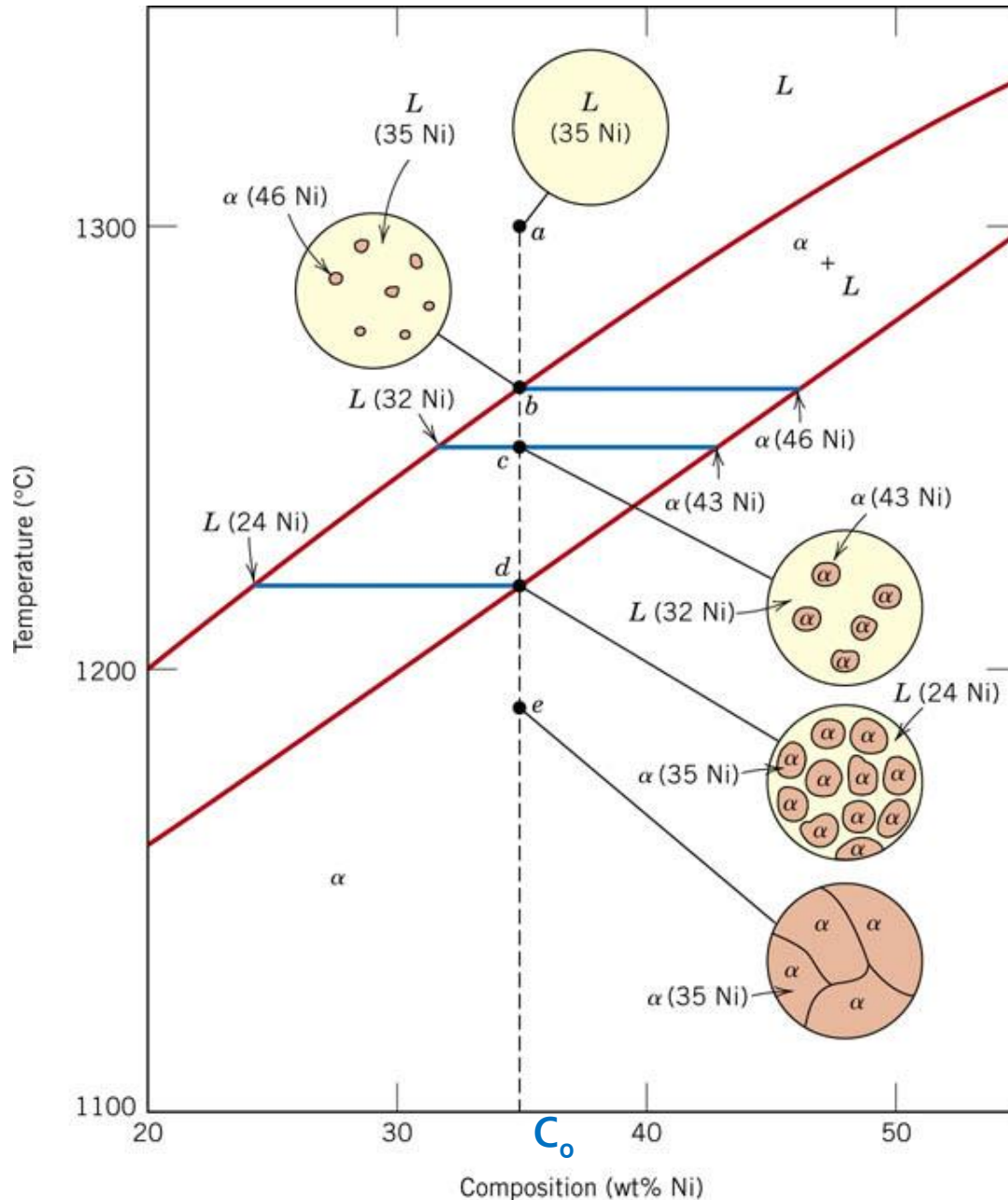
$$W_L = \frac{M_L}{M_L + M_\alpha} = \frac{S}{R + S} = \frac{C_\alpha - C_0}{C_\alpha - C_L}$$

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

$$W_L = \% L = \frac{43-40}{43-33} * 100 = 30\%$$

$$W_\alpha = \% \alpha = \frac{40-33}{43-33} * 100 = 70\%$$

Desenvolvimento de Microestruturas em Ligas Isomorfas



Resfriamento no Equilíbrio

Liga com composição Inicial $C_0 = 35\% \text{ Ni}$ e $65\% \text{ Cu}$

• $1300 \text{ }^\circ\text{C}$ no **ponto a** – a liga é totalmente líquida

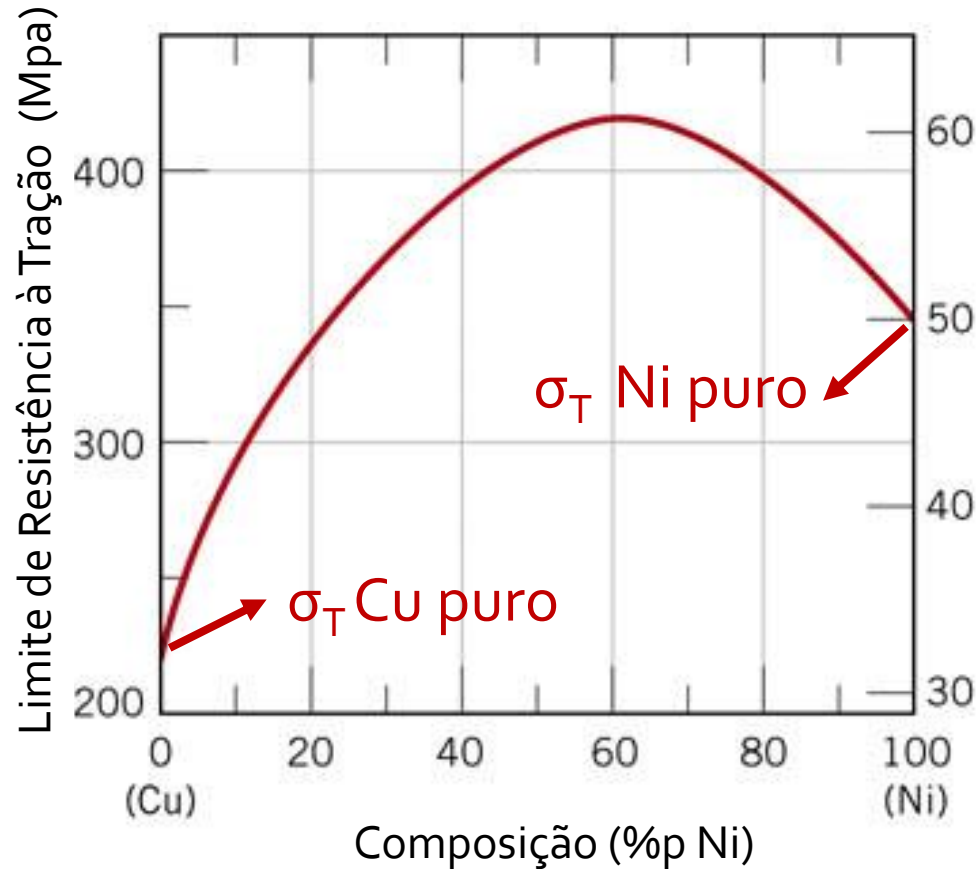
$1260 \text{ }^\circ\text{C}$ no **ponto b** – primeiro sólido começa a se formar com a composição especificada pela linha de amarração

$1250 \text{ }^\circ\text{C}$ no **ponto c** – tem se as fases líquida ($32\% \text{ Ni}$ e $68\% \text{ Cu}$) e α ($43\% \text{ Ni}$ e $57\% \text{ Cu}$)

$1220 \text{ }^\circ\text{C}$ no **ponto d** – processo de solidificação virtualmente concluído

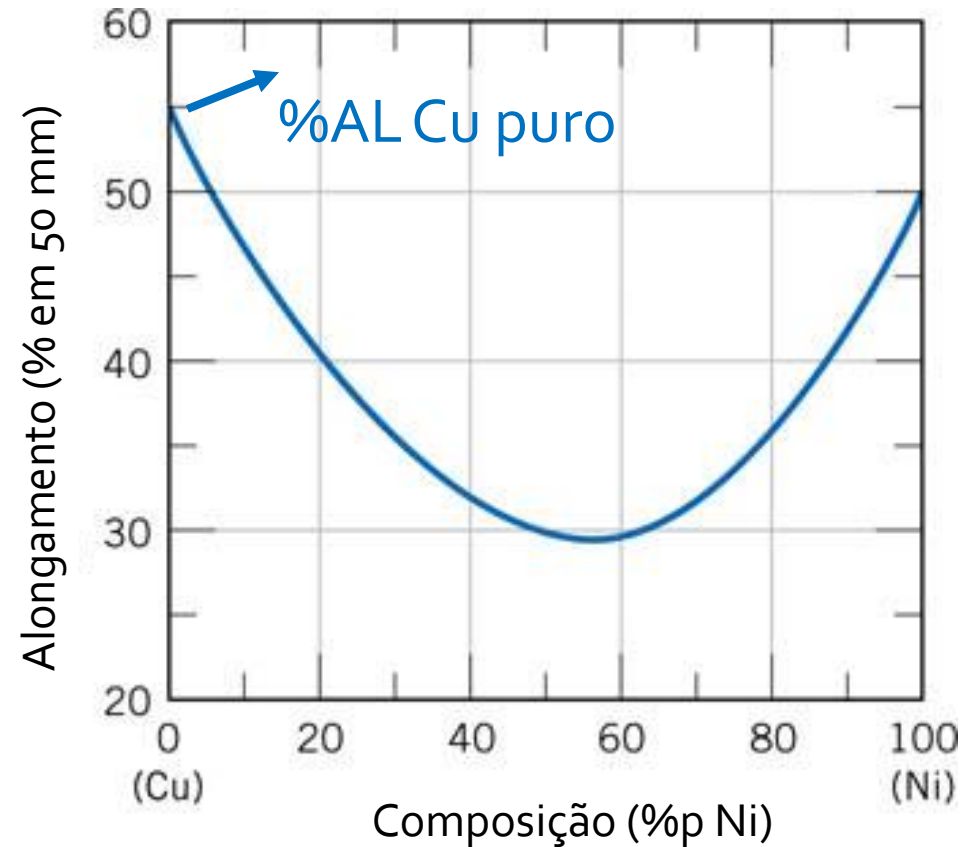
$1186 \text{ }^\circ\text{C}$ no **ponto e** – o resto do líquido se solidifica e o produto final é uma solução sólida policristalina da fase α

Propriedades Mecânicas de Ligas Isomorfas



(a)

Limite de resistência à tração em função da composição



(b)

Ductilidade em função da composição

REFERÊNCIAS E BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- CALLISTER JR., W. D; RETHWISCH, D.G.. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Um introdução**, 8ª ed, Rio de Janeiro: LTC, 2015. [Capítulo 9](#)
- CALLISTER JR, W.D. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 7 th Ed. Wiley.
- VAN VLACK, H. L. **Princípios de Ciência dos Materiais**, São Paulo: Cengage Learning, 2008. [Capítulo 9](#)
- SHACKELFORD, J.F. **Introduction to materials science for engineers**. 6th ed. [Capítulo 9](#)



***Muito
obrigada!***

LOM3016 – Introdução à
Ciência dos Materiais



Aula 7 – Parte 2

Diagrama de Fases

Kelly Benini

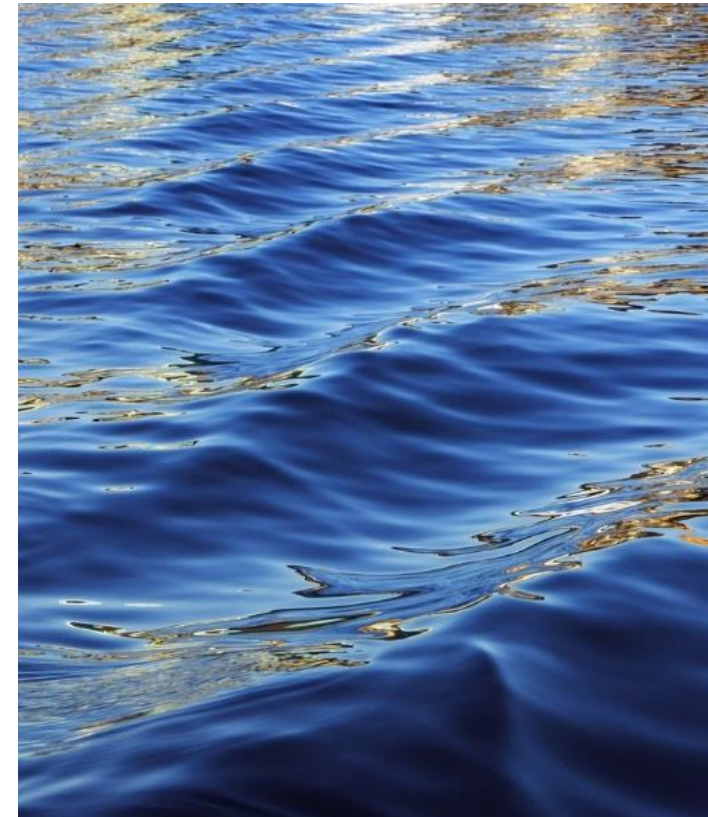


Diagrama de Fases Binários

Diagrama de solução sólida ilimitada

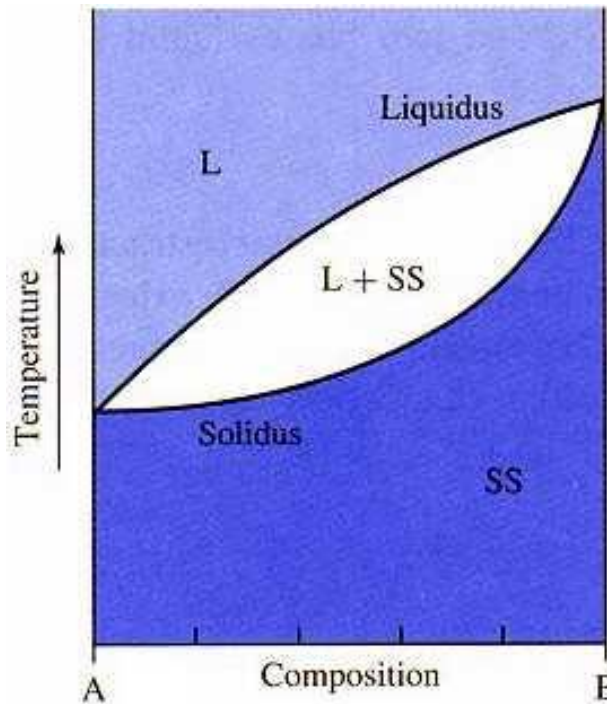


Diagrama sem solução sólida

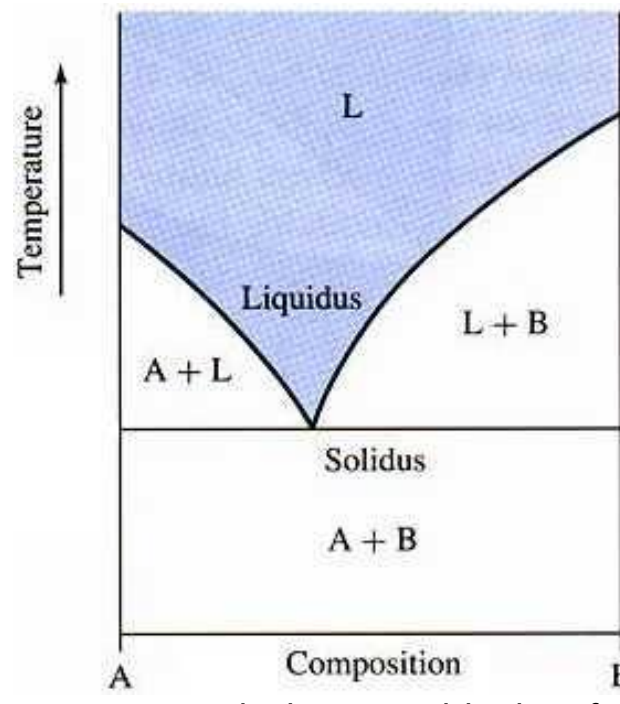
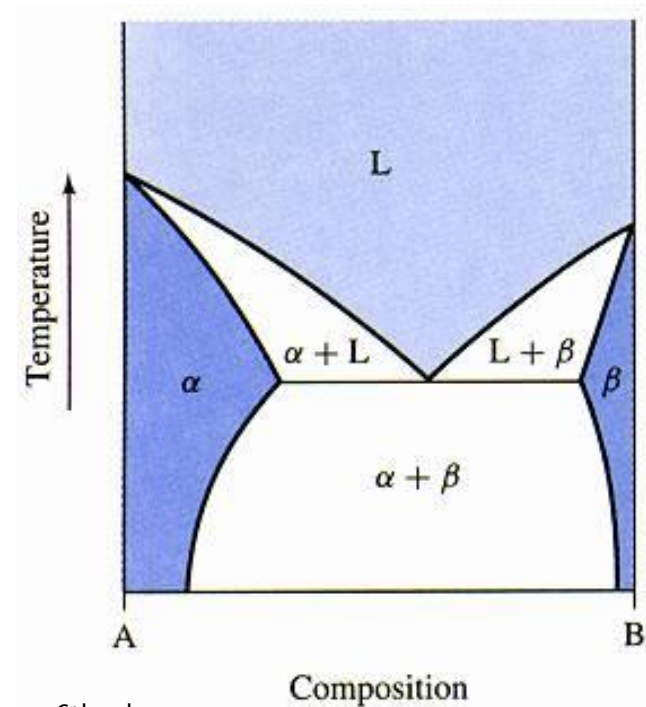


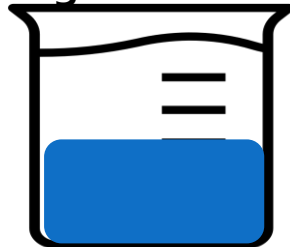
Diagrama de solução sólida limitada



SHACKELFORD, J.F. Introduction to materials science for engineers. 6th ed.

Analogia

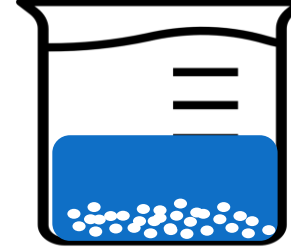
água + álcool



água + óleo



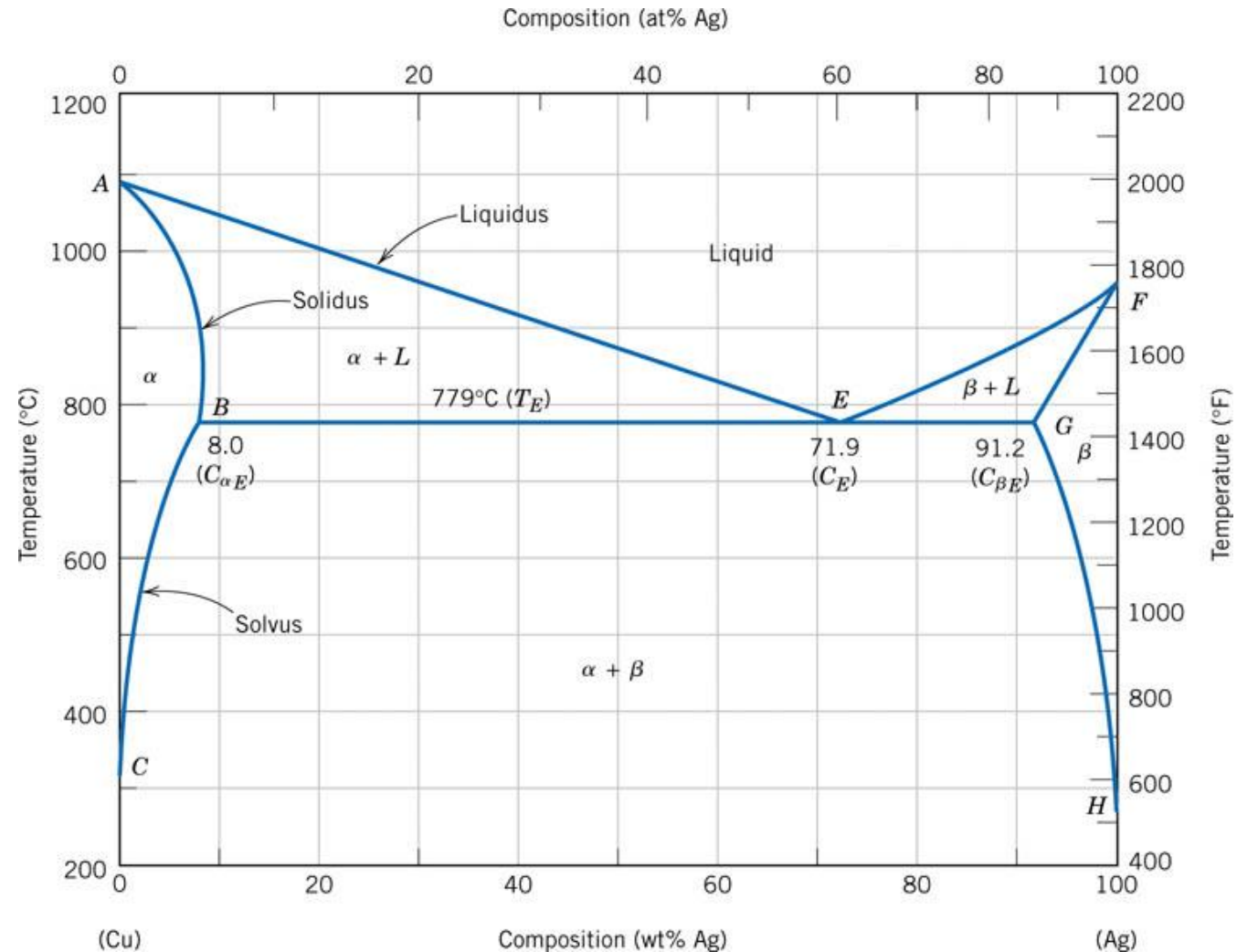
água + açúcar



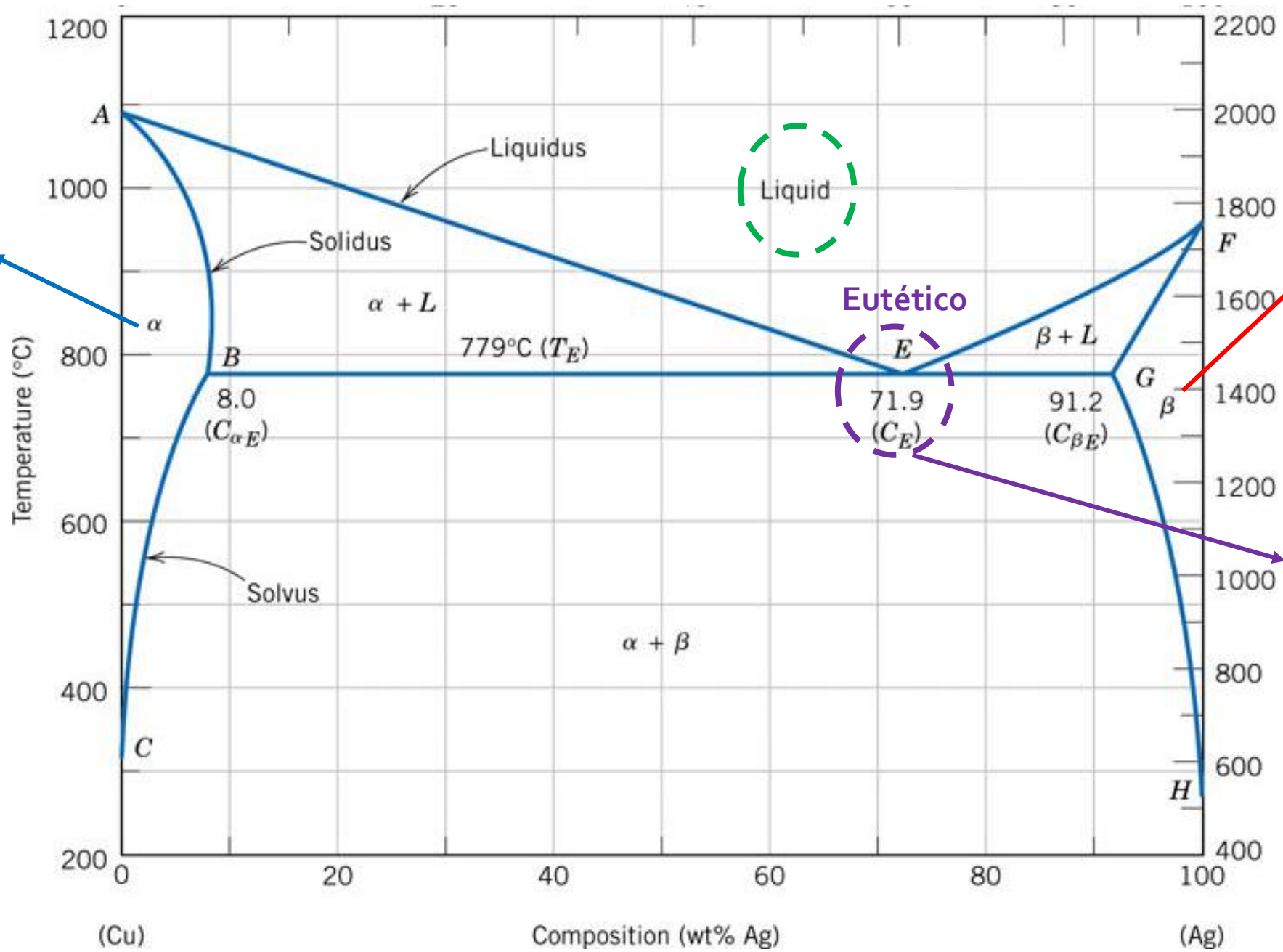
Sistemas Eutéticos Binários

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

Exemplo para um
Diagrama de solução
sólida limitada



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



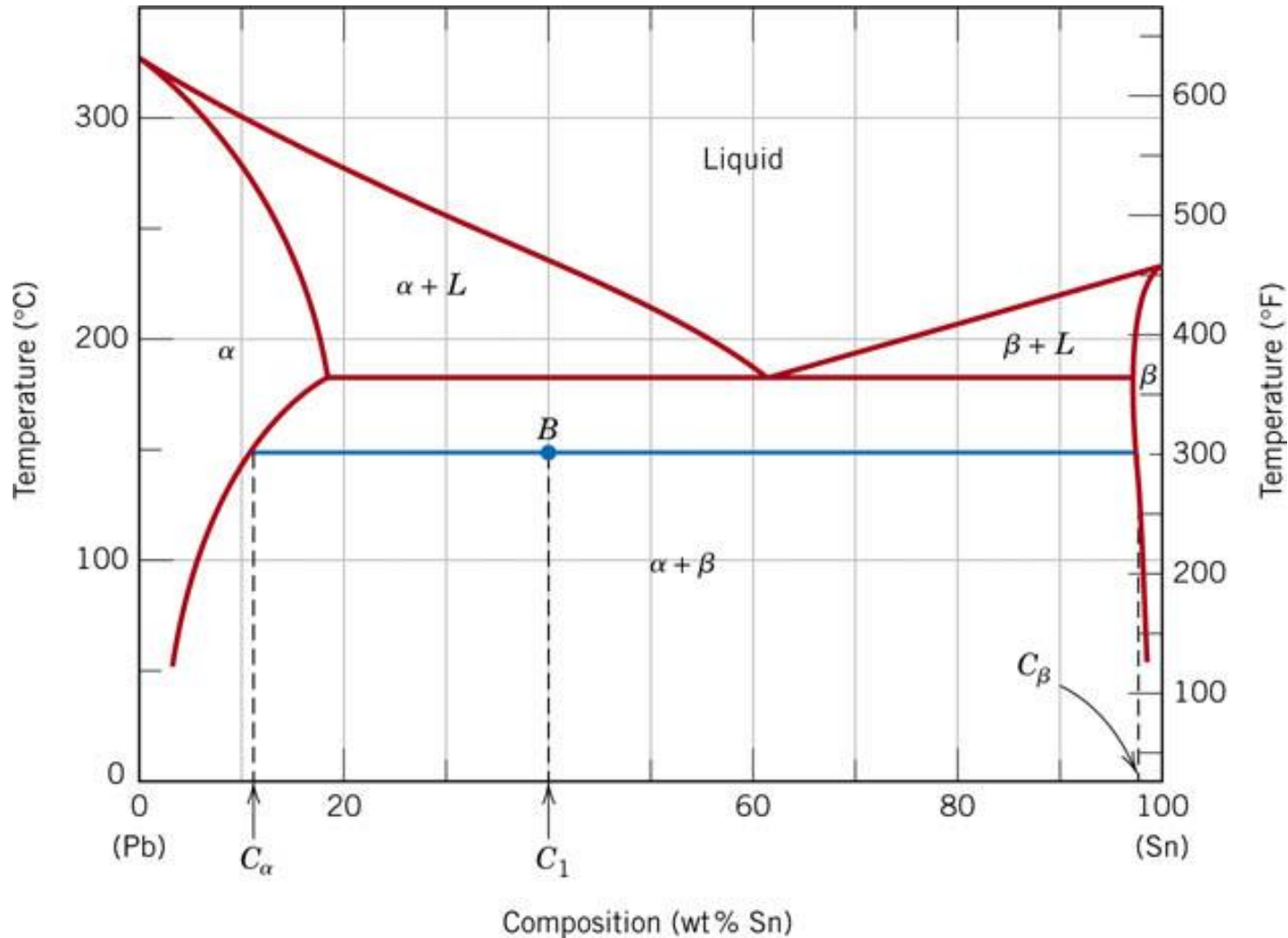
β = solução sólida rica em prata, cobre é o soluto

Eutético

T_E = temperatura eutética, menor temperatura em que há líquido
 C_E = composição eutética

Sistemas Eutéticos Binários

Sistema Pb-Sn



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

Fases presentes:

$\alpha + \beta$

Composição das fases:

$C_\alpha = 11\%$ Sn e 89%p de Pb (solução sólida α)

$C_\beta = 98\%$ Sn e 2%p de Pb (solução sólida β)

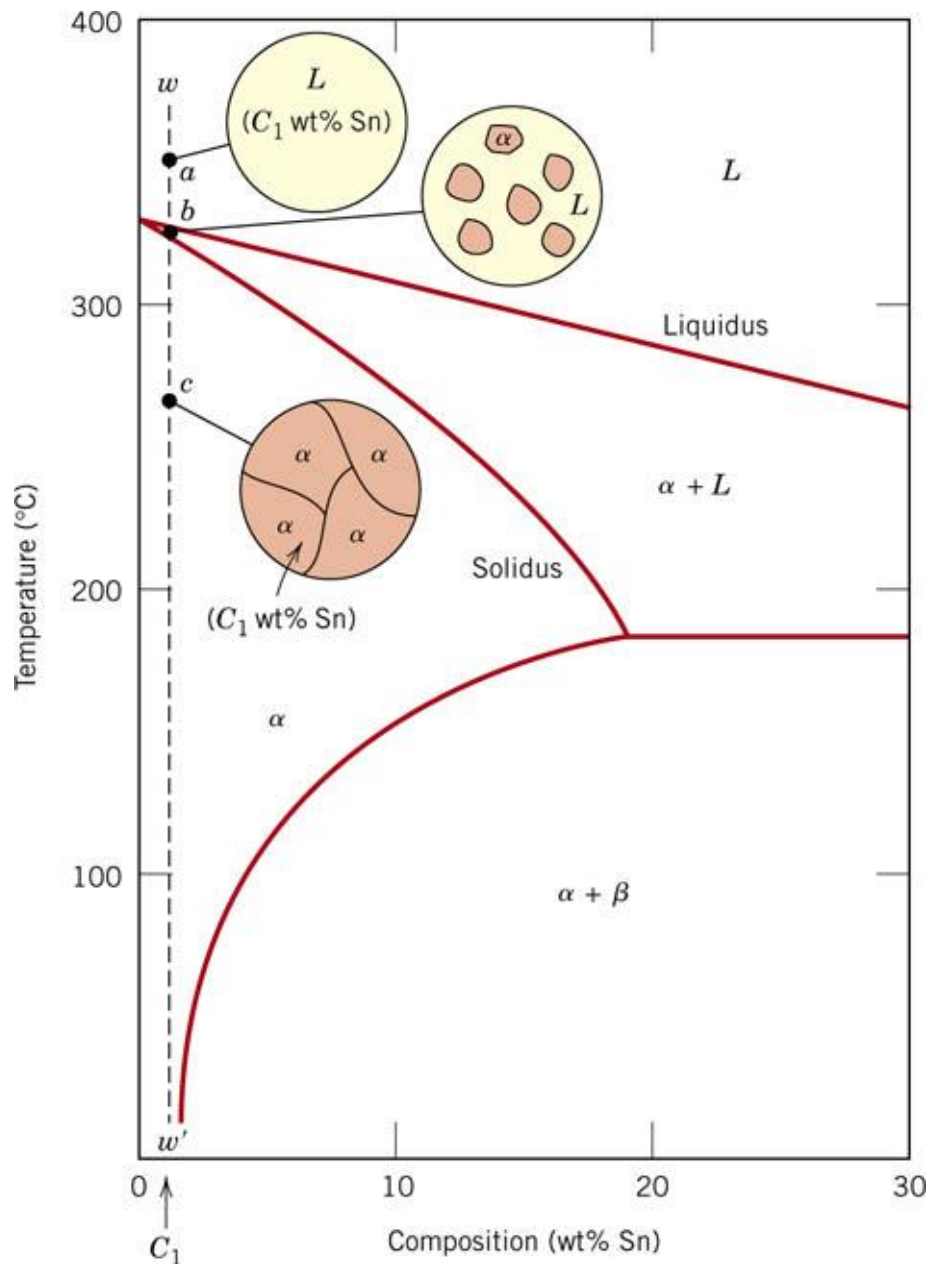
Quantidade relativa de cada fase:

Regra da Alavanca

$$\% \alpha = \frac{98-40}{98-11} * 100 = 67\%$$

$$\% \beta = \frac{40-11}{98-11} * 100 = 33\%$$

Desenvolvimento de Microestruturas em Ligas Eutéticas



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

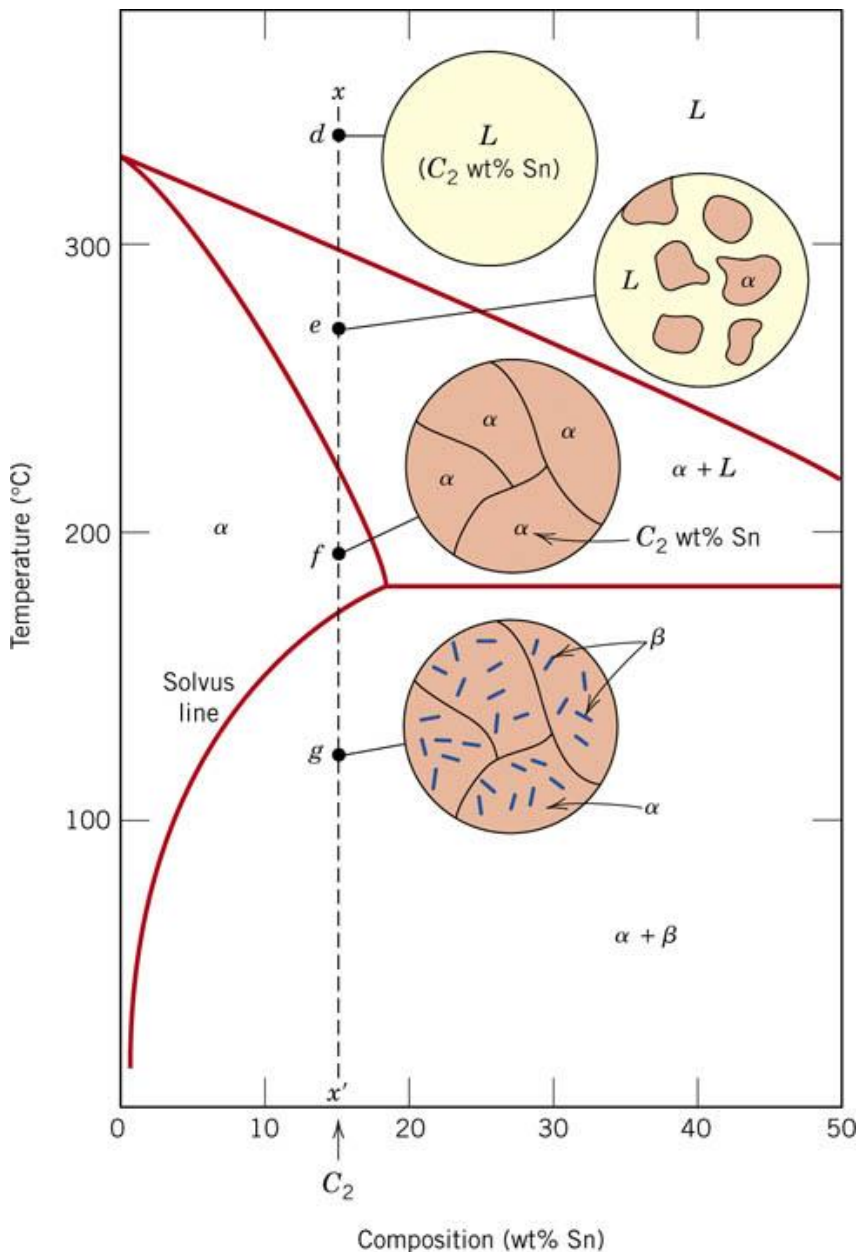
Para a liga chumbo-estanho inclui as ligas ricas em chumbo que contêm entre 0 e 2%p Sn (solução sólida da fase α) e entre 99%p Sn e o estanho puro para a fase β

A liga permanece líquida até que atinge a linha liquidus e o 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 de Microestruturas em Ligas Eutéticas



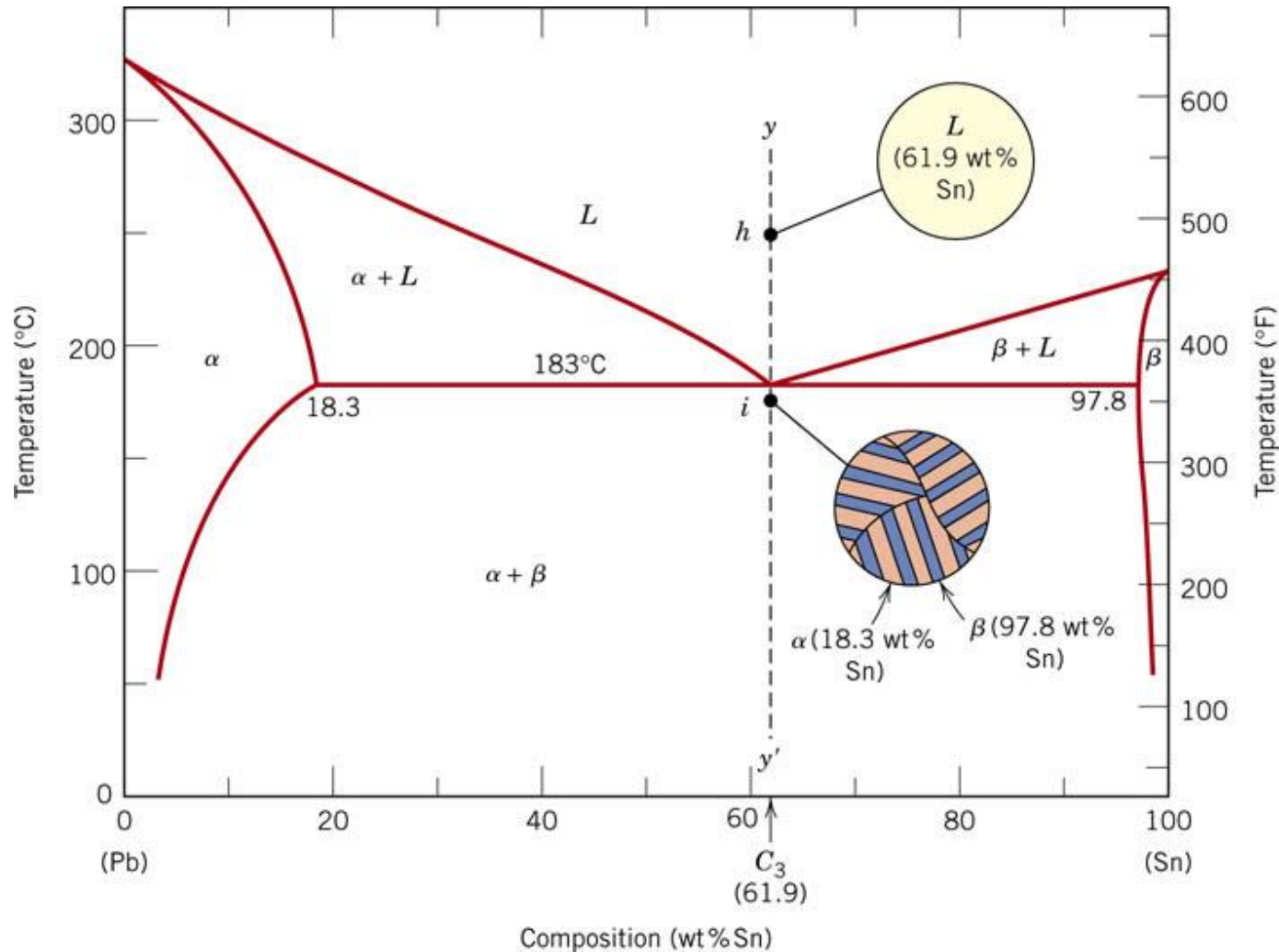
Composições que se encontram na faixa entre o limite de solubilidade à temperatura ambiente e a solubilidade máxima na temperatura do eutético

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 de Microestruturas em Ligas Eutéticas



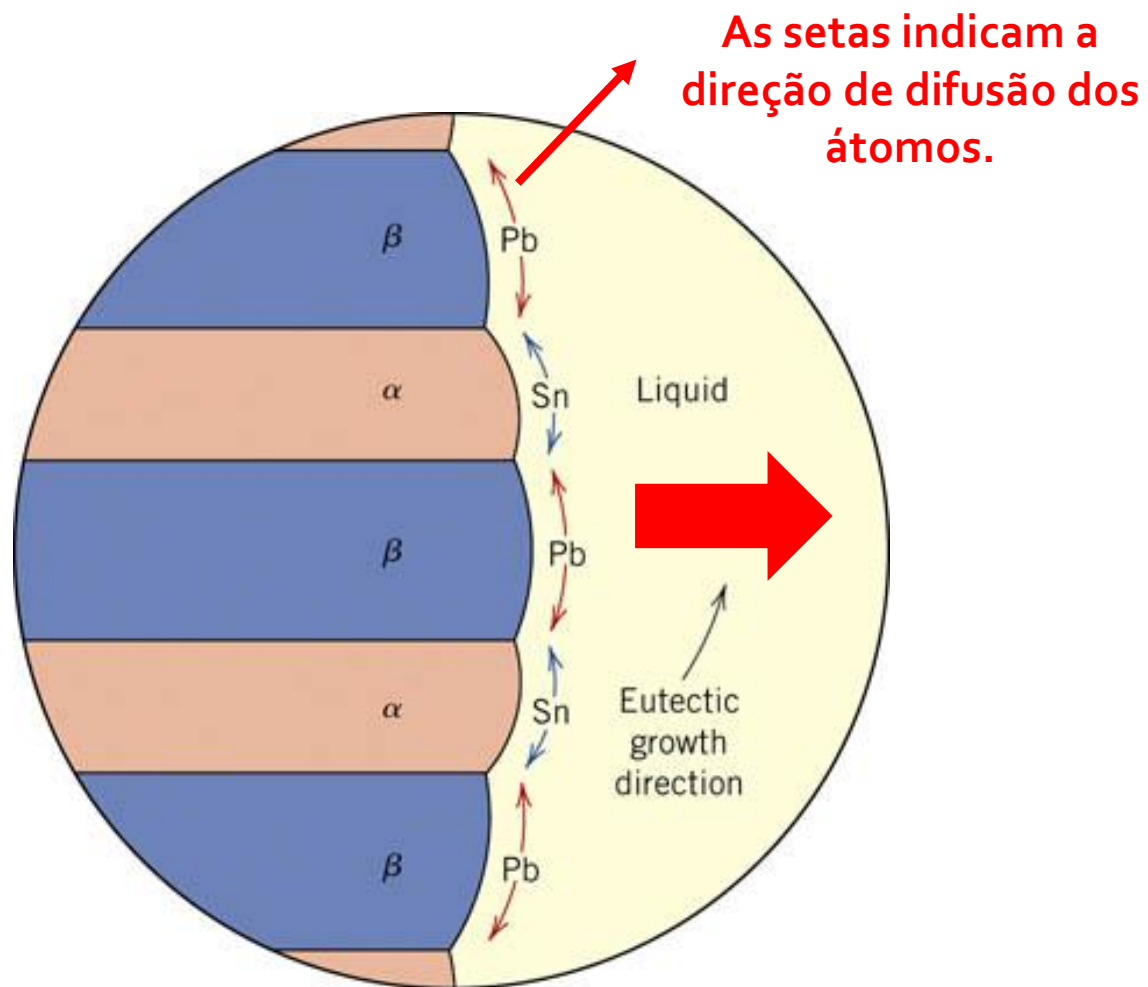
Solidificação da Composição Eutética

- 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

REAÇÃO EUTÉTICA



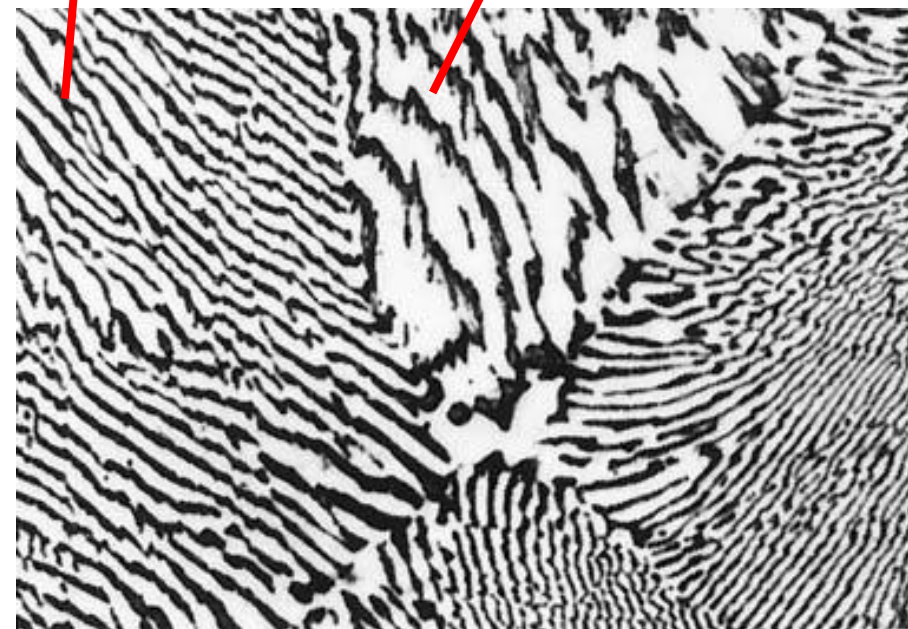
Desenvolvimento de Microestruturas em Ligas Eutéticas



Representação esquemática da formação da estrutura eutética formada pelas lamelas das fases α e β para o sistema chumbo-estanho.

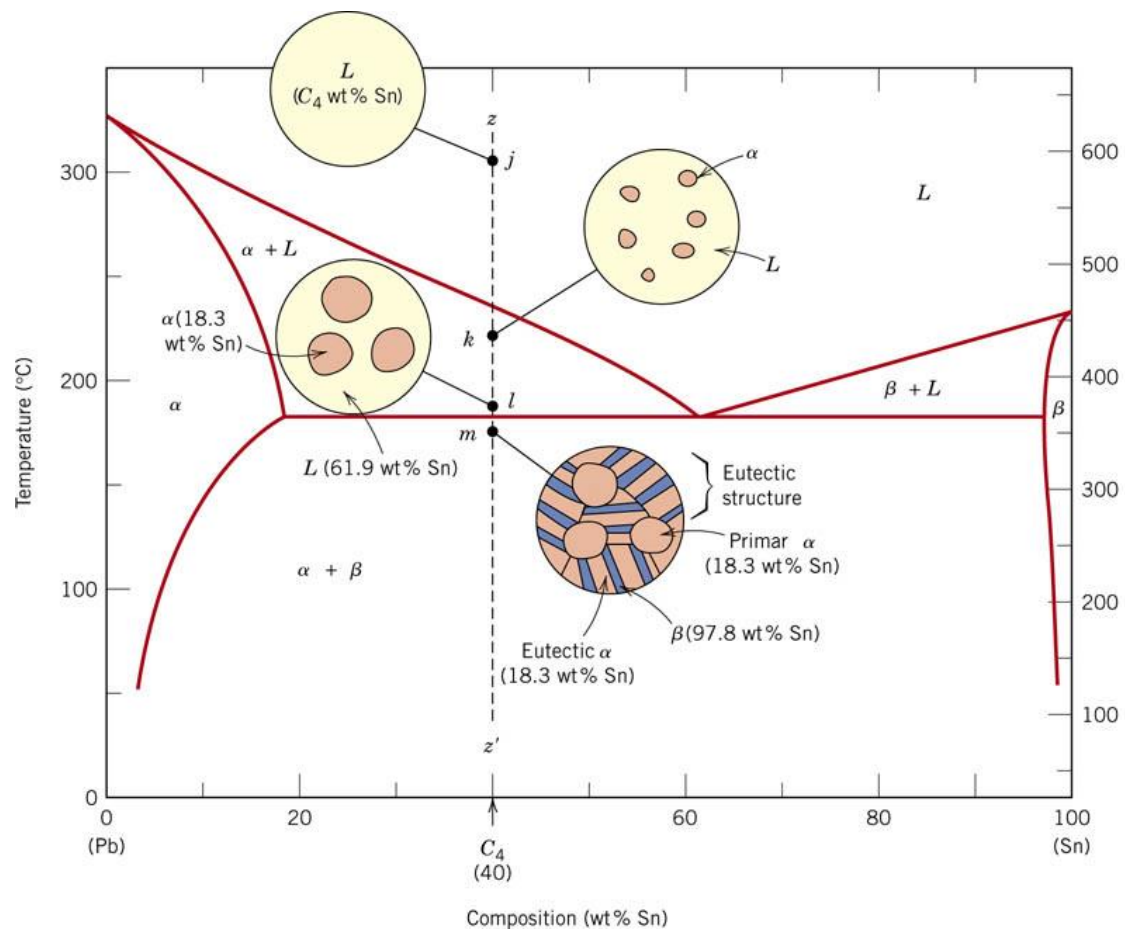
Fase α rica em chumbo (camadas escuras)

Fase β rica em estanho (camadas claras)



Fotomicrografia mostrando a microestrutura de uma liga **Pb-Sn** com a composição eutética. Essa microestrutura consiste em camadas alternadas da **fase α** e da **fase β** .

Desenvolvimento de Microestruturas 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 (L) estão presentes

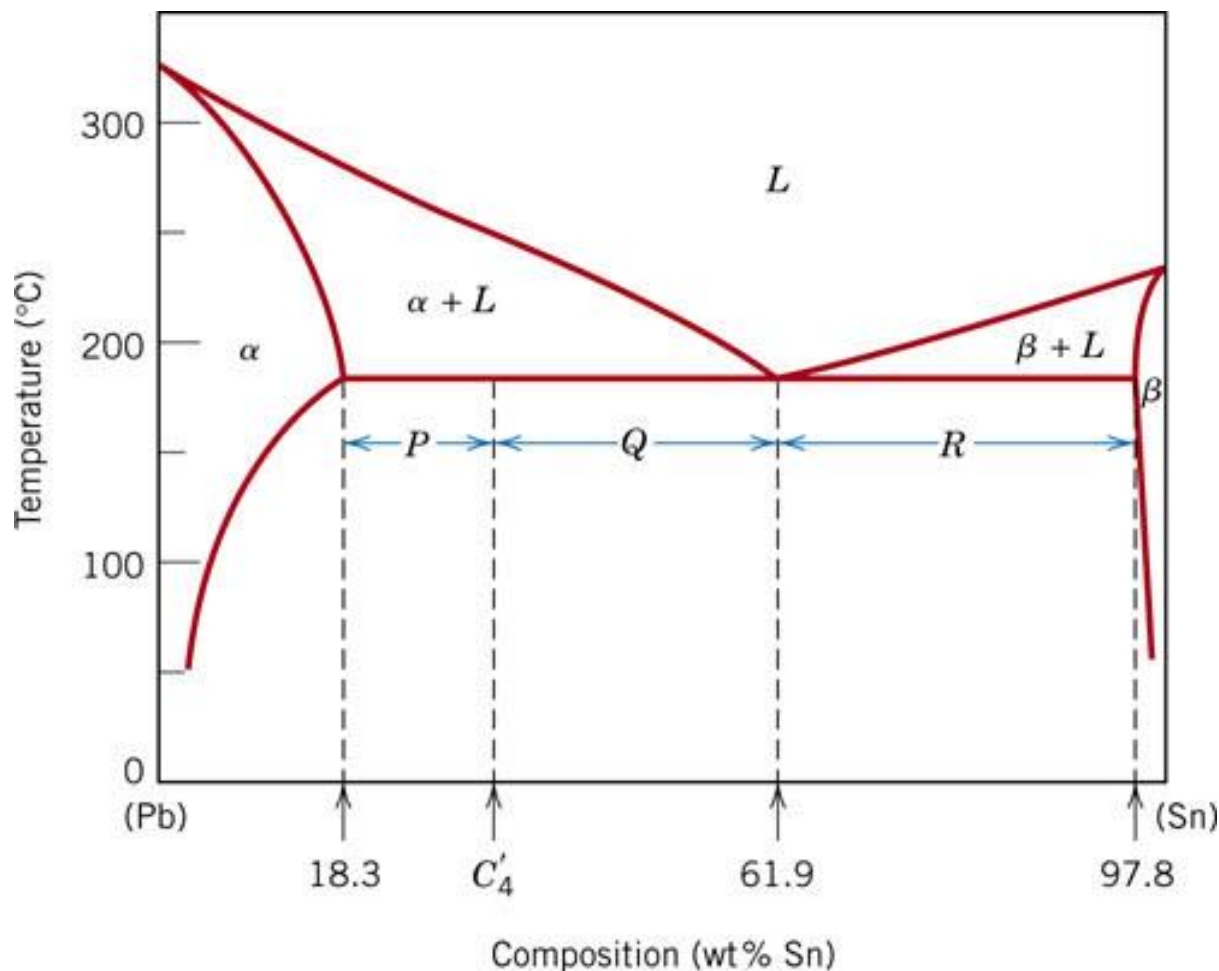
Após o cruzamento da isoterma eutética a fase líquida (L) que possui a composição do eutético se transformará na estrutura do eutético

A fase α estará presente tanto no eutético quanto naquela fase que se formou em $\alpha + L$, assim tem-se α eutética (que reside no eutético) e α primária (se formou antes da isoterma eutética)



Desenvolvimento de Microestruturas em Ligas Eutéticas

Sistema Pb-Sn



Considerando uma liga com composição C_4 em uma temperatura imediatamente abaixo da isoterma eutética

Quantidade relativa de cada fase:

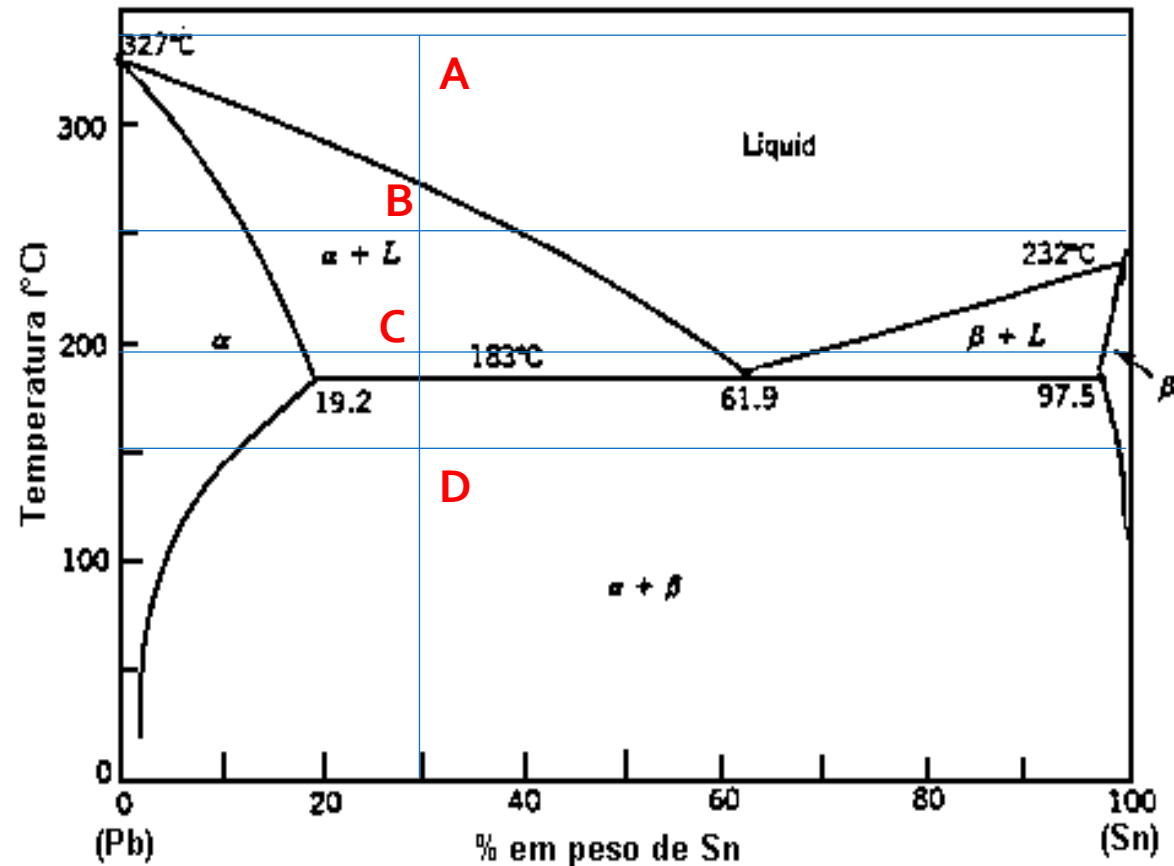
$$\% \alpha \text{ eutético} = \frac{C_4 - 18,3}{61,9 - 18,3} * 100$$

$$\% \alpha \text{ primário} = \frac{61,9 - C_4}{61,9 - 18,3} * 100$$

$$\% \beta = \frac{C_4 - 18,3}{97,8 - 18,3} * 100$$

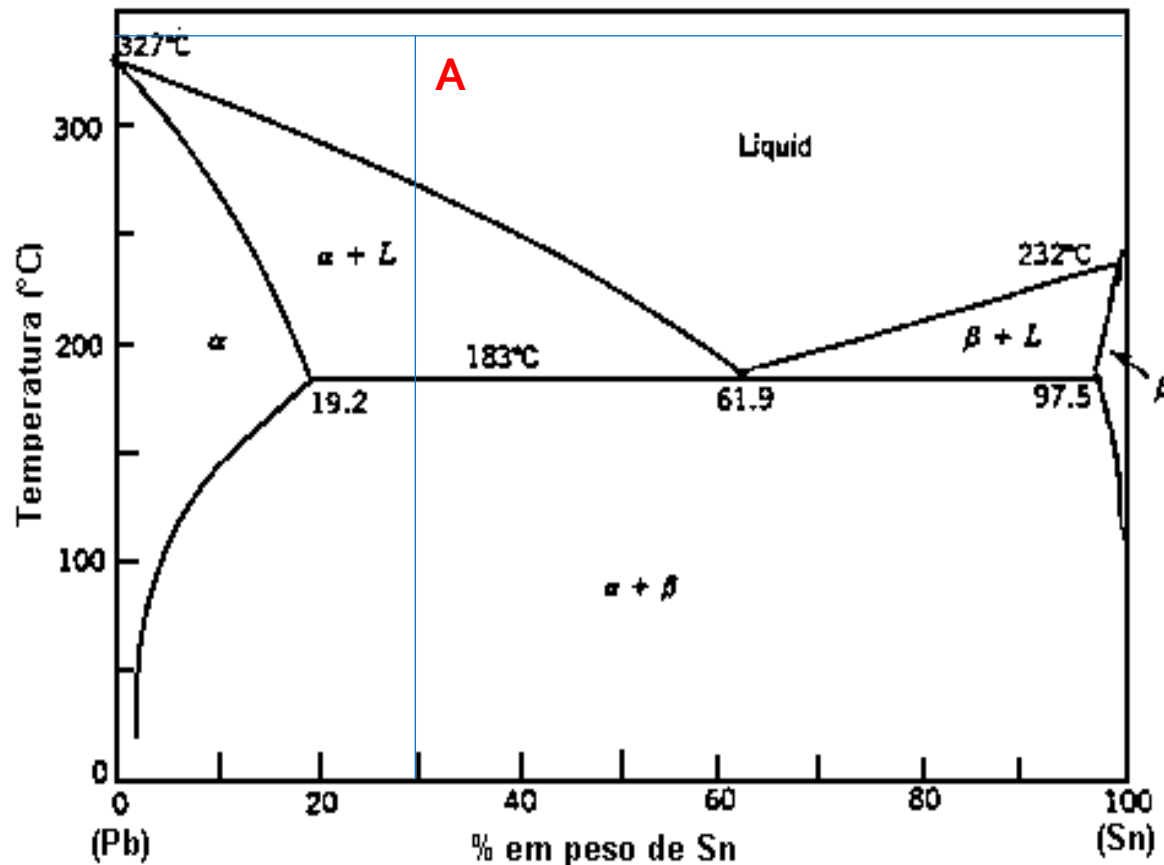
Tarefa

Para uma liga 30SnPb determine as fases presentes, proporção e composição de cada fase para as temperaturas de 340°C (A), 250°C (B), 190°C (C) e 150°C (D). Qual a proporção de α primário e α eutético?



Tarefa

Para uma liga 30SnPb determine as fases presentes, proporção e composição de cada fase para as temperaturas de 340°C (A), 250°C (B), 190°C (C) e 150°C (D). Qual a proporção de α primário e α eutético?



A - 320°C

Fases Presentes: L

Proporção das Fases :

% L = 100% líquido

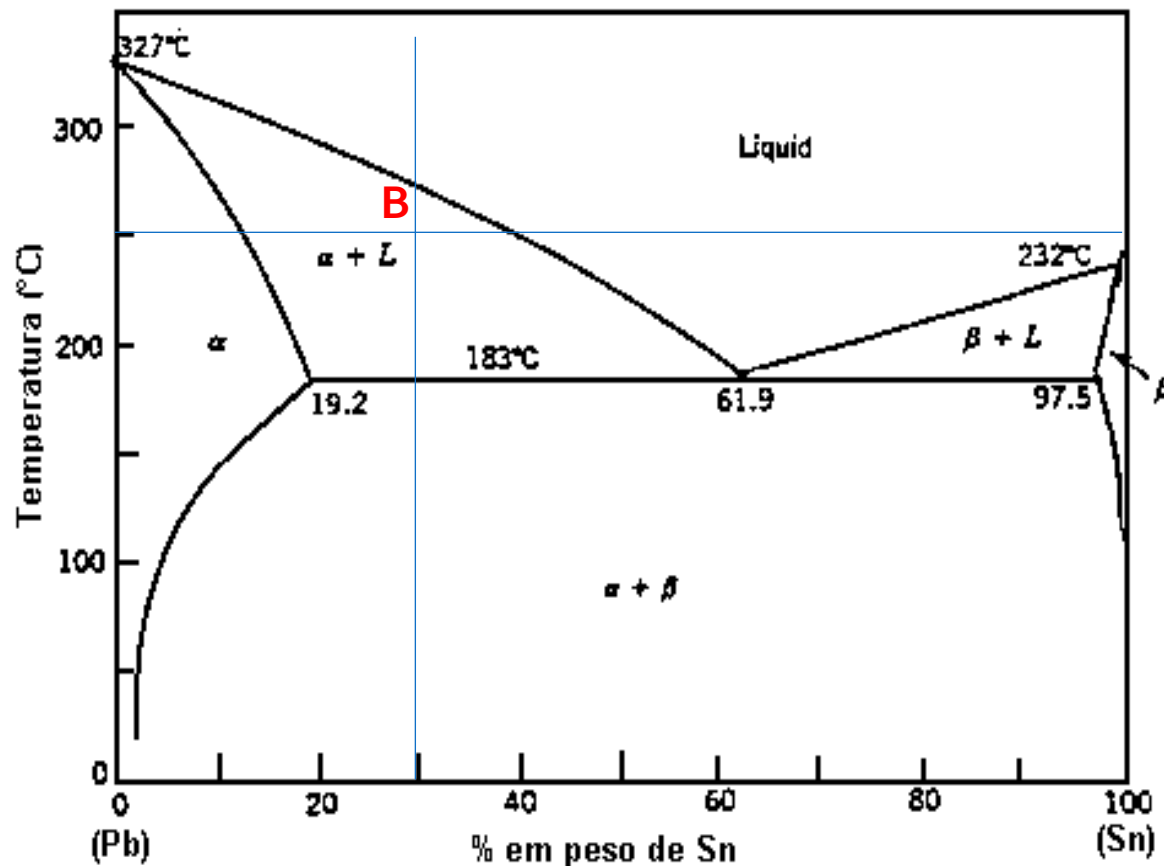
Composição das Fases:

L → 30% Sn e 70% Pb

Tarefa



Para uma liga 30SnPb determine as fases presentes, proporção e composição de cada fase para as temperaturas de 340°C (A), 250°C (B), 190°C (C) e 150°C (D). Qual a proporção de α primário e α eutético?



B - 250°C

Fases Presentes: L e α

Proporção das Fases:

$$\left\{ \begin{array}{l} \% L = \frac{30-12}{40-12} * 100 = 64,3\% \\ \% \alpha = \frac{40-30}{40-12} * 100 = 35,7\% \end{array} \right.$$

Composição das Fases:

L → 40% Sn e 60% Pb

α → 12% Sn e 88% Pb

Tarefa



Para uma liga 30SnPb determine as fases presentes, proporção e composição de cada fase para as temperaturas de 340°C (A), 250°C (B), 190°C (C) e 150°C (D). Qual a proporção de α primário e α eutético?



C - 190°C

Fases Presentes: L e α

Proporção das Fases:

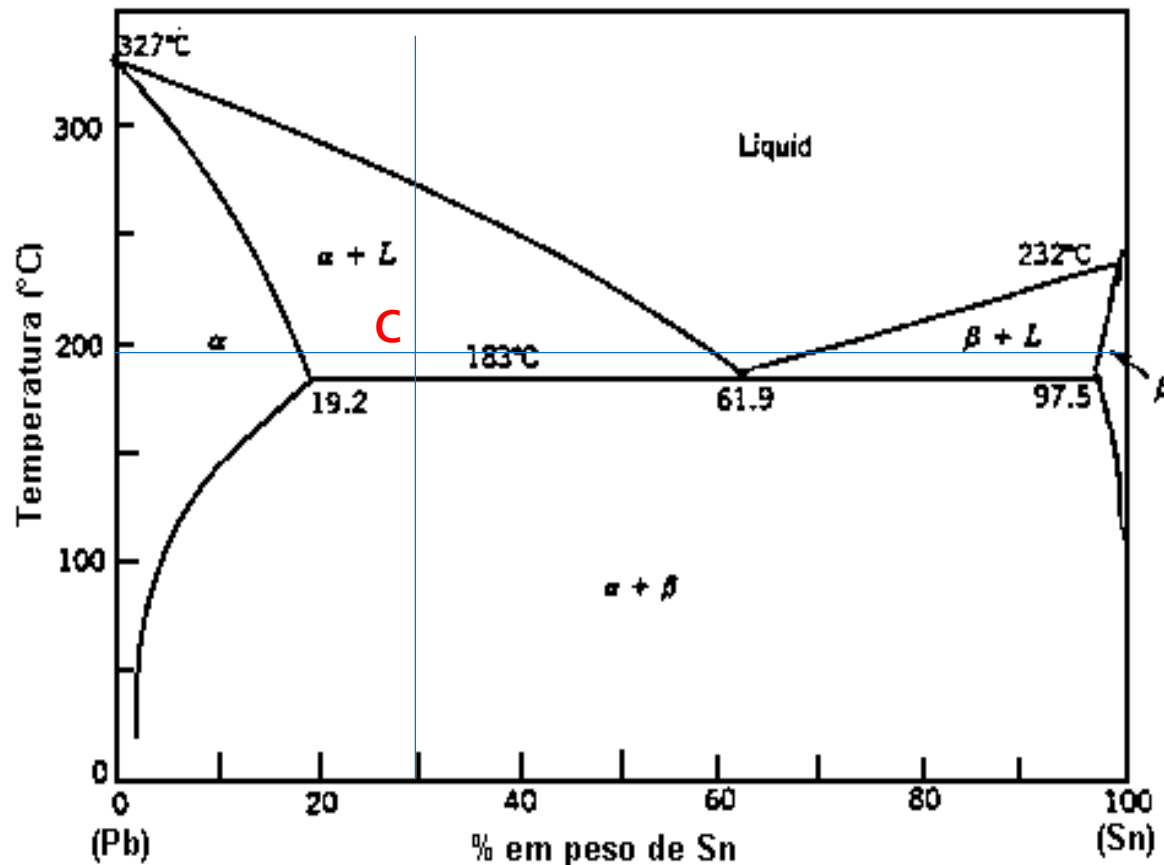
$$\% L = \frac{30-19}{60-19} * 100 = 26,8\%$$

$$\% \alpha = \frac{60-30}{60-19} * 100 = 73,2\%$$

Composição das Fases:

L → 60% Sn e 40% Pb

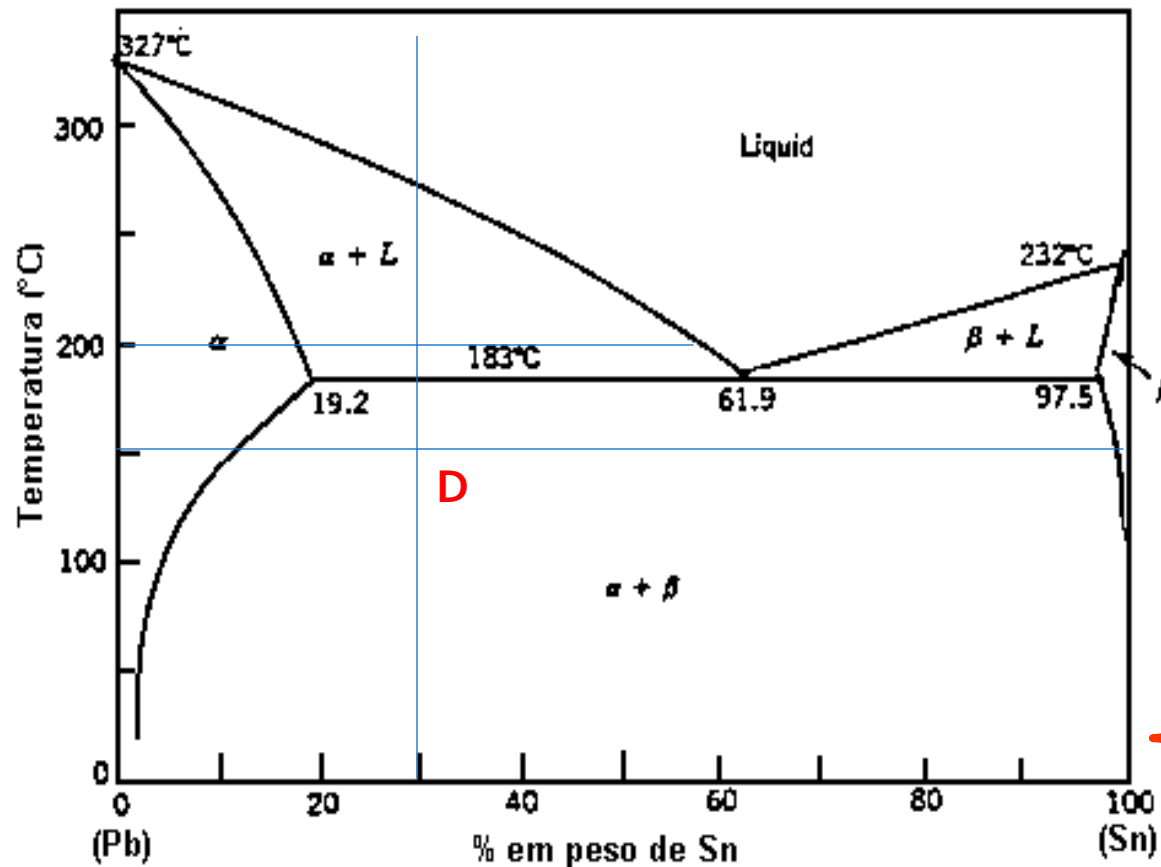
α → 19% Sn e 81% Pb



Tarefa



Para uma liga 30SnPb determine as fases presentes, proporção e composição de cada fase para as temperaturas de 340°C (A), 250°C (B), 190°C (C) e 150°C (D). Qual a proporção de α primário e α eutético?



D - 180°C

Fases Presentes: α e β

Proporção das Fases:

$$\% \alpha = \frac{98-30}{98-17} * 100 = 84\%$$

$$\% \beta = \frac{30-17}{98-17} * 100 = 16\%$$

Composição das Fases:

α \rightarrow 17% Sn e 83% Pb

β \rightarrow 98% Sn e 2% Pb

Proporção das Fases:

$$\% \alpha \text{ primário} = \frac{61,9-30}{61,9-19,2} * 100 = 74,7\%$$

$$\% \alpha \text{ eutético} = \frac{30-19,2}{61,9-19,2} * 100 = 25,3\%$$

LOM3016 – Introdução à
Ciência dos Materiais



Aula 7 – Parte 3 Diagrama de Fases

Kelly Benini

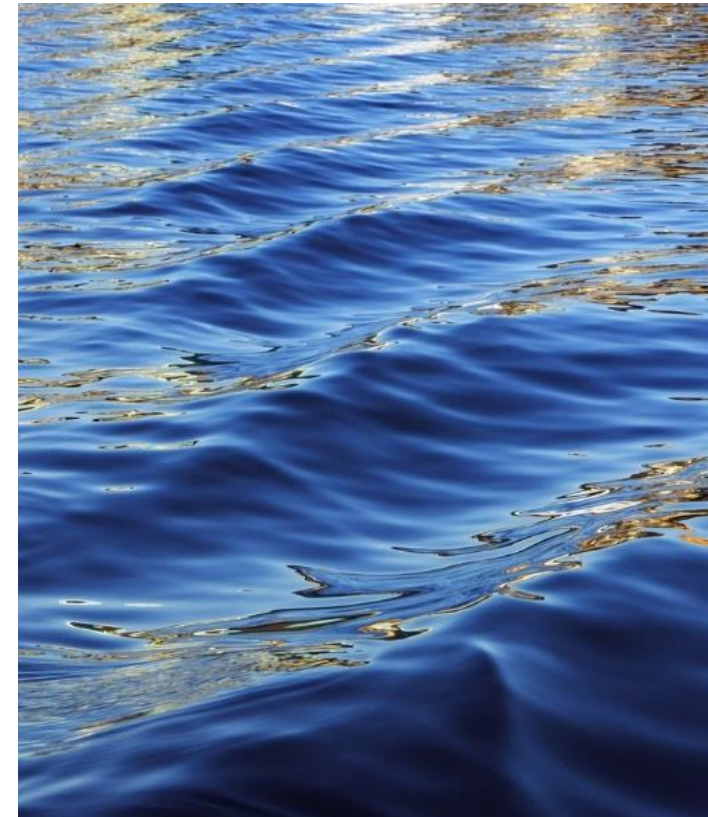


Diagrama de Fases Binários

Diagrama de solução sólida ilimitada

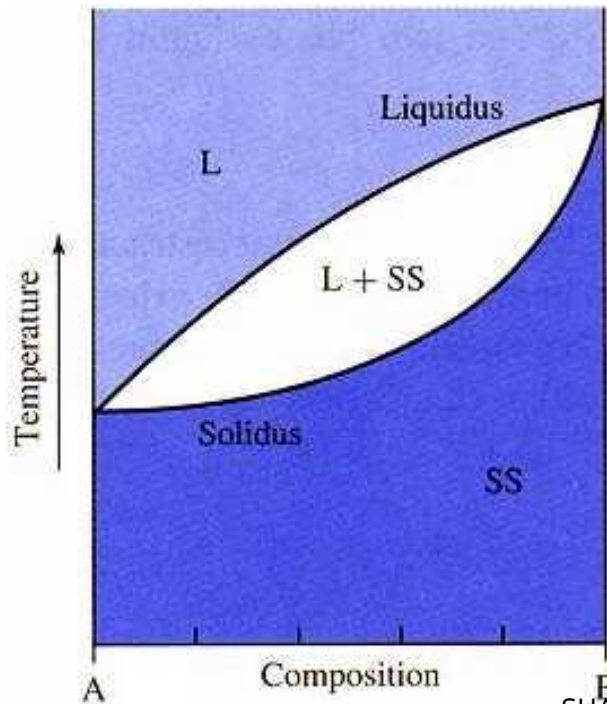


Diagrama sem solução sólida

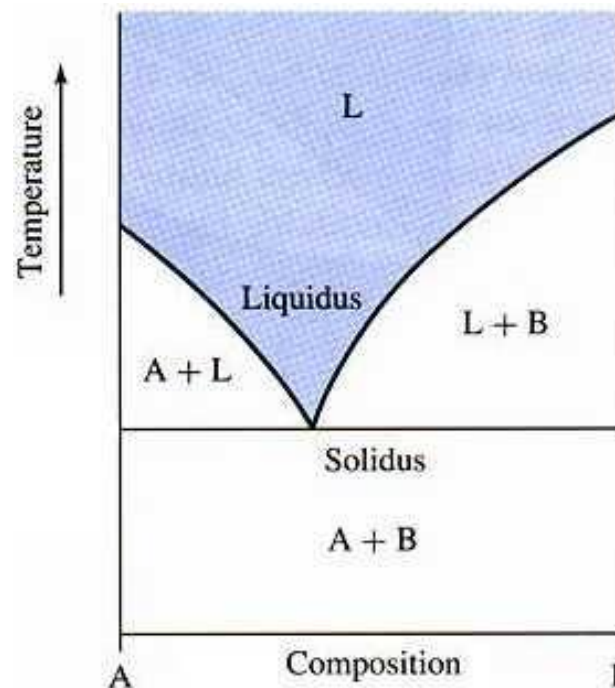
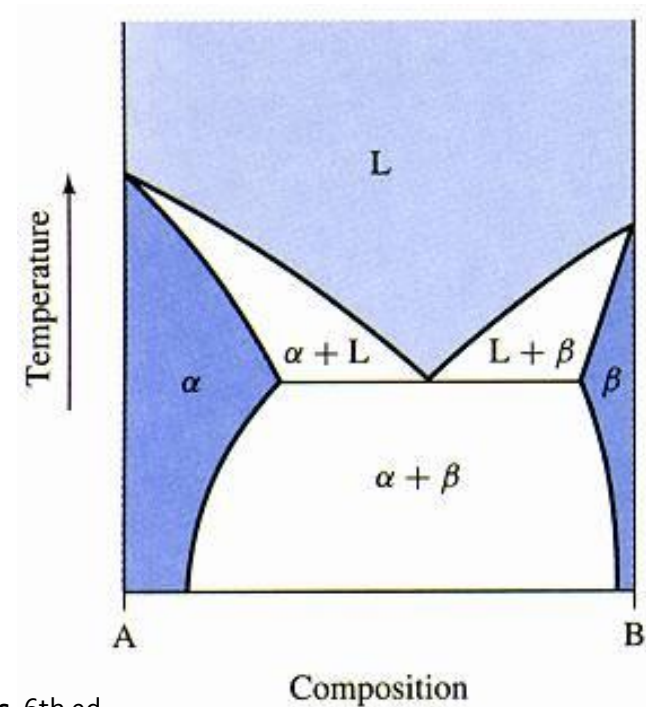


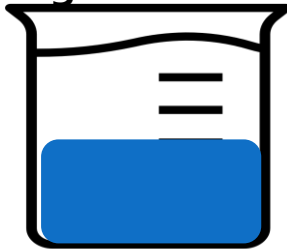
Diagrama de solução sólida limitada



SHACKELFORD, J.F. Introduction to materials science for engineers. 6th ed.

Analogia

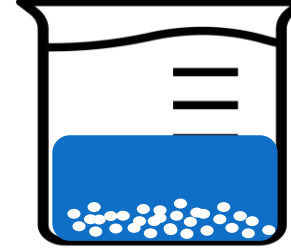
água + álcool



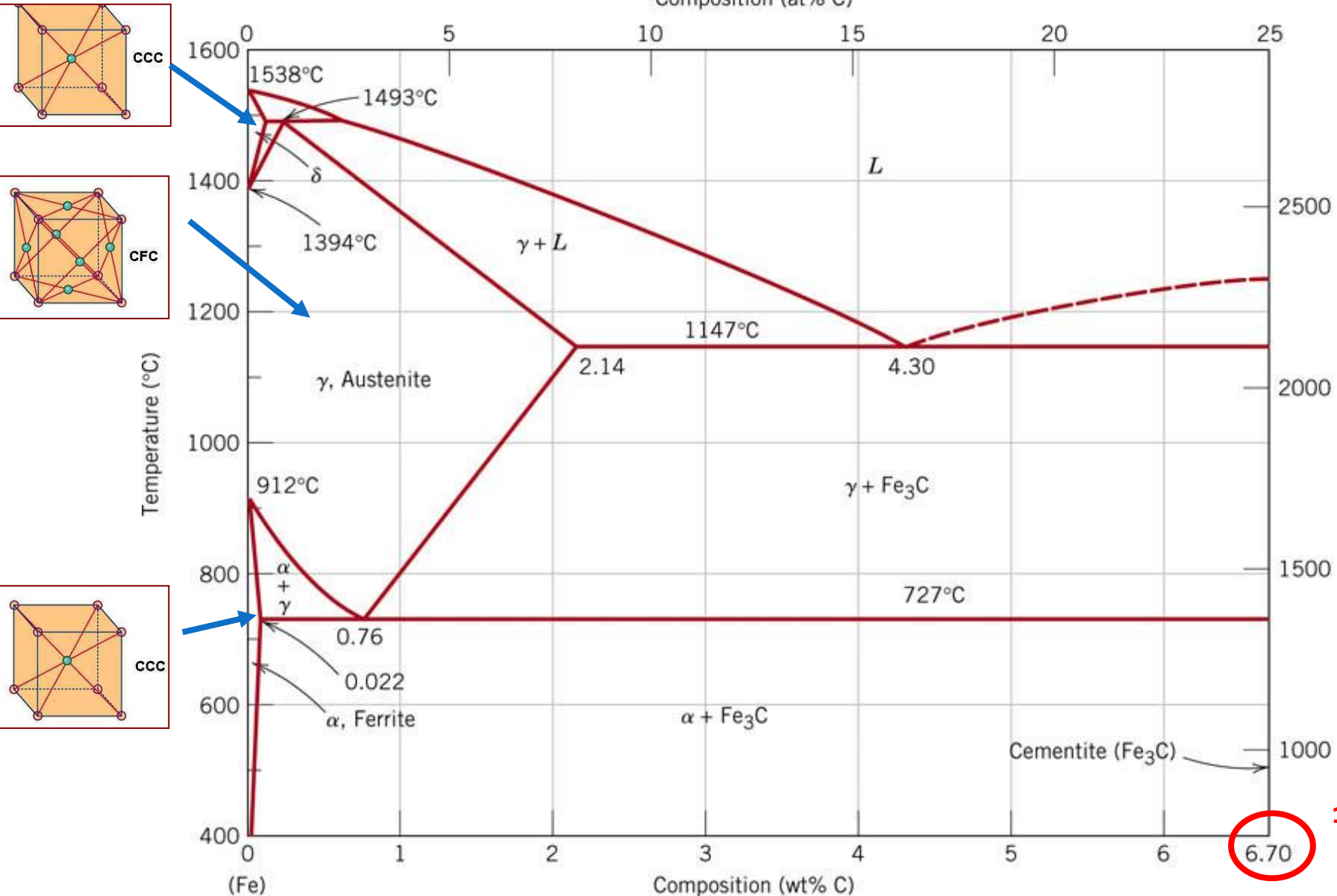
água + óleo



água + açúcar



Sistema Fe-C



1 – Diagrama Fe-C x Fe-Fe₃C

2 – Alotropia do Fe:

Ferrita (ferro α) – CCC

Austenita (ferro γ) – CFC

Ferrita (ferro δ) - CCC

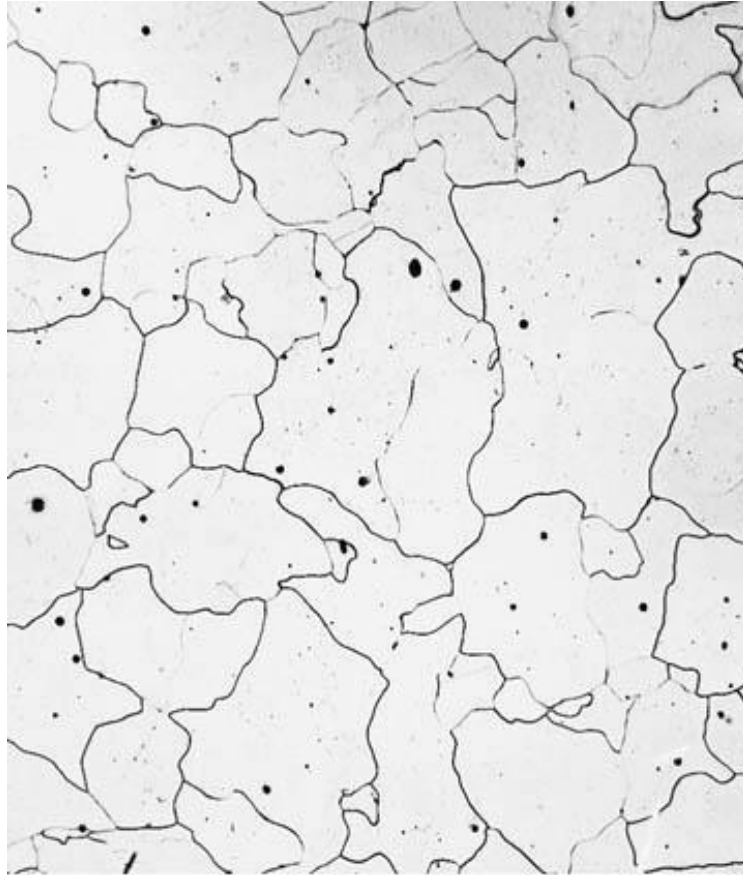
O espaço intersticial na rede do Fe_{CFC} é maior que no Fe_{CCC}, assim pode-se acomodar mais C no Fe_{CFC} (limite de solubilidade maior).

As soluções sólidas são relativamente moles e dúcteis, mas mais fortes que o Fe puro devido ao reforço na resistência pelo reforço de C.

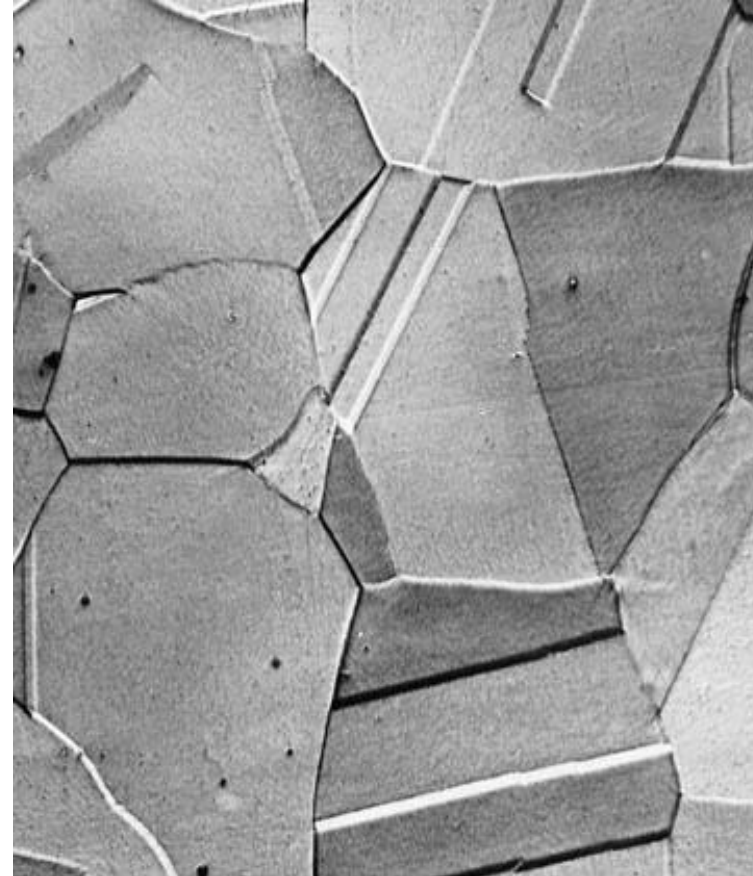
100% de Fe₃C
(Cementita)

Sistema Fe-C

Relativamente macia, torna-se magnética abaixo de 768 °C



Fotomicrografia da **Ferrita α**
(Ampliação de 90 x)



Fotomicrografia da **Austenita**
(Ampliação de 325x)

Solubilidade 100 x maior que a ferrita, não é magnética

Sistema Fe-C

Cementita (Fe_3C)

Forma-se quando o limite de solubilidade para o carbono na ferrita α é excedido abaixo de 727°C ;

Também coexiste com a austenita entre 727 e 1147°C

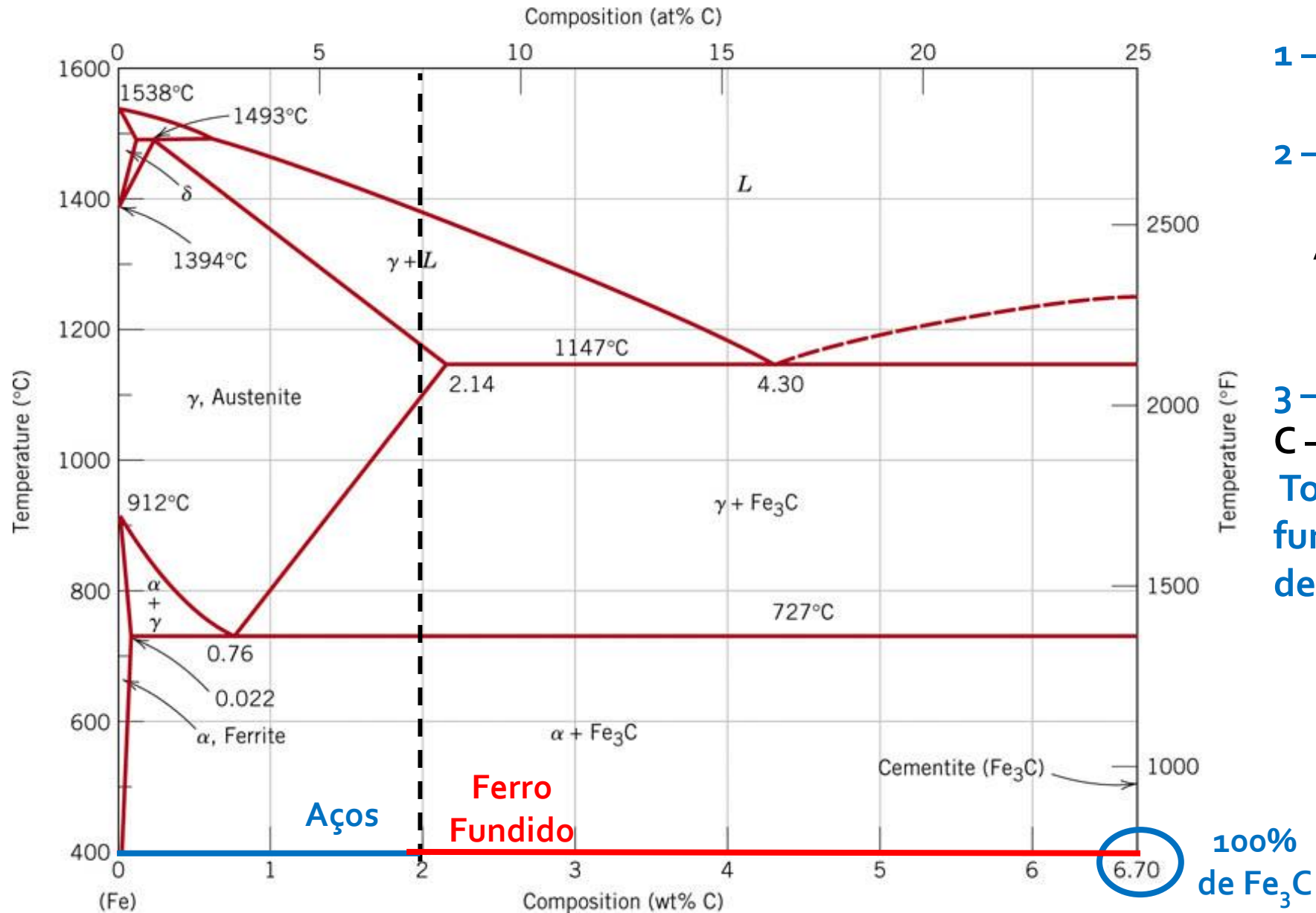
É muito dura e frágil

Abaixa a tenacidade metal (menor energia de impacto) e aumenta a resistência a tração

Cristaliza no sistema ortorrômbico (com 12 átomos de Fe e 4 de C por célula unitária)

É um composto intermetálico metaestável, embora a velocidade de decomposição em ferro α e C seja muito lenta

Diagrama Fe-Fe₃C



1 – Diagrama Fe-C x Fe-Fe₃C

2 – Alotropia do Fe:
 Ferrita (ferro α) – CCC
 Austenita (ferro γ) – CFC
 Ferrita (ferro δ) – CCC

3 – Acima de 6,7 % até 100% C – grafita pura
 Todos os aços e ferros e fundidos apresentam menos de 6,7% de C.

Diagrama Fe-Fe₃C



Ligas Metálicas

Fe-C
Ferrosas

Não ferrosas

Aços (C < 1,4% p)

Ferros Fundidos
2,14 < C < 4,5% p

Ligas de Cobre,
Alumínio,
Magnésio
e Titânio

Baixa Liga

Alta liga

Ferro Cinzento

Ferro Branco

Ferro dúctil
(nodular)

Baixo teor de Carbono
C < 0,25%p

Médio teor de carbono
0,25 < C < 0,60%p

Alto teor de carbono
0,60 < C < 1,4%p

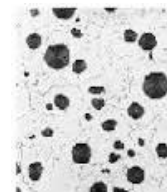
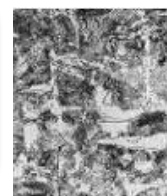
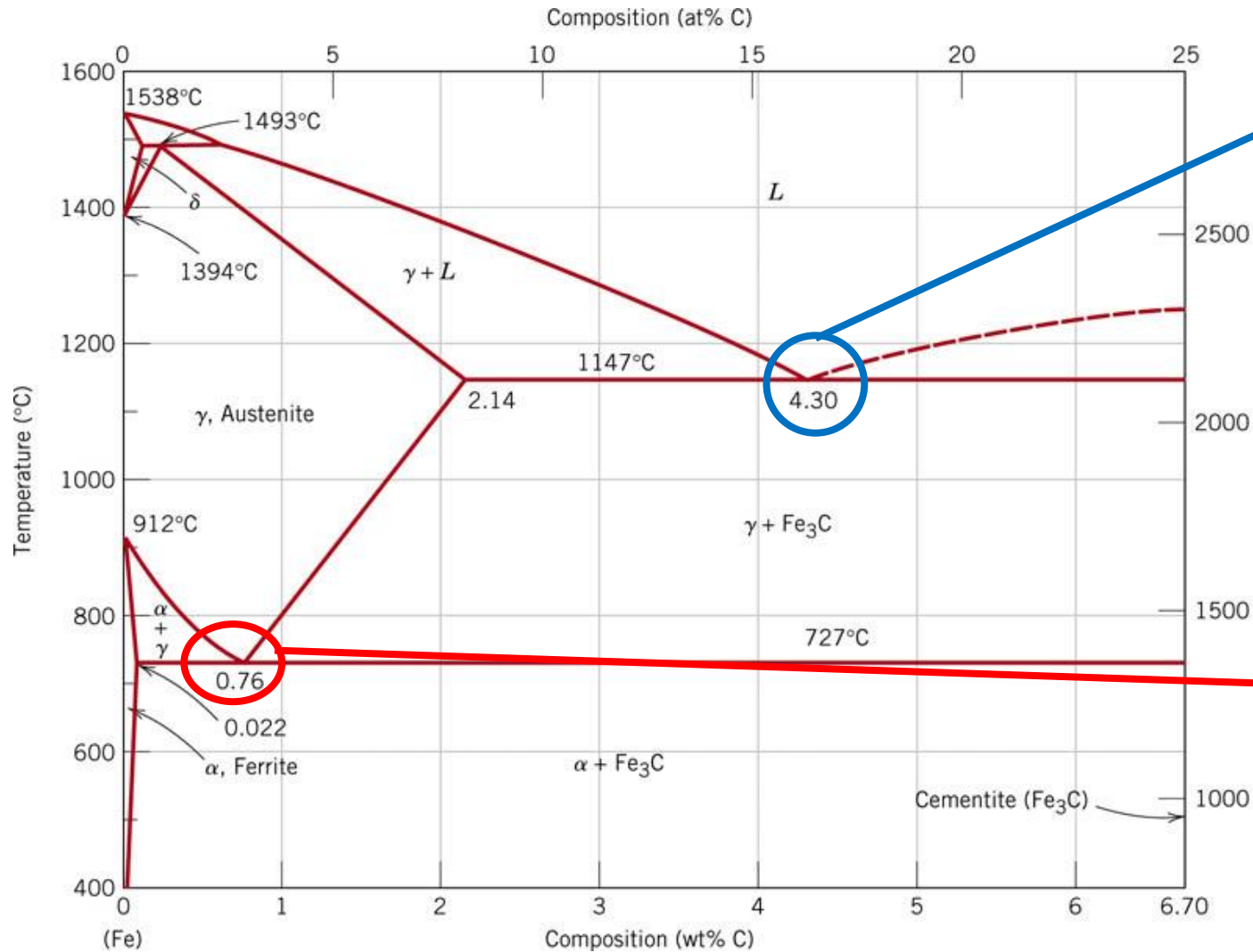


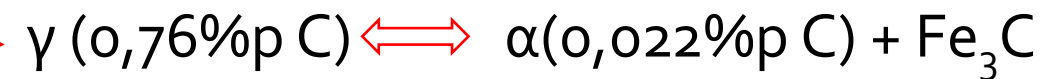
Diagrama Fe-Fe₃C – Regiões Bifásicas



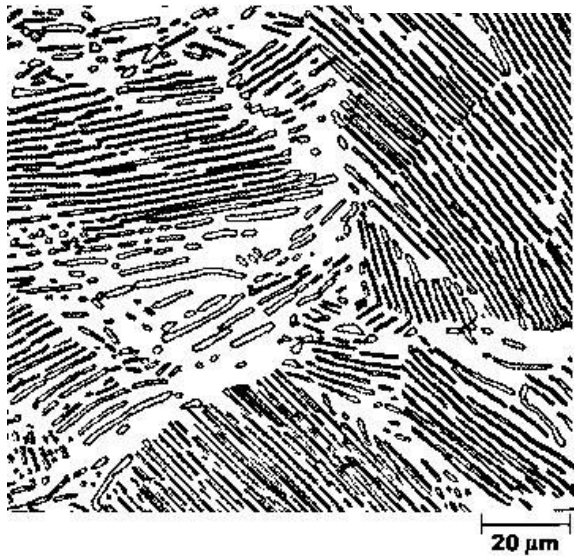
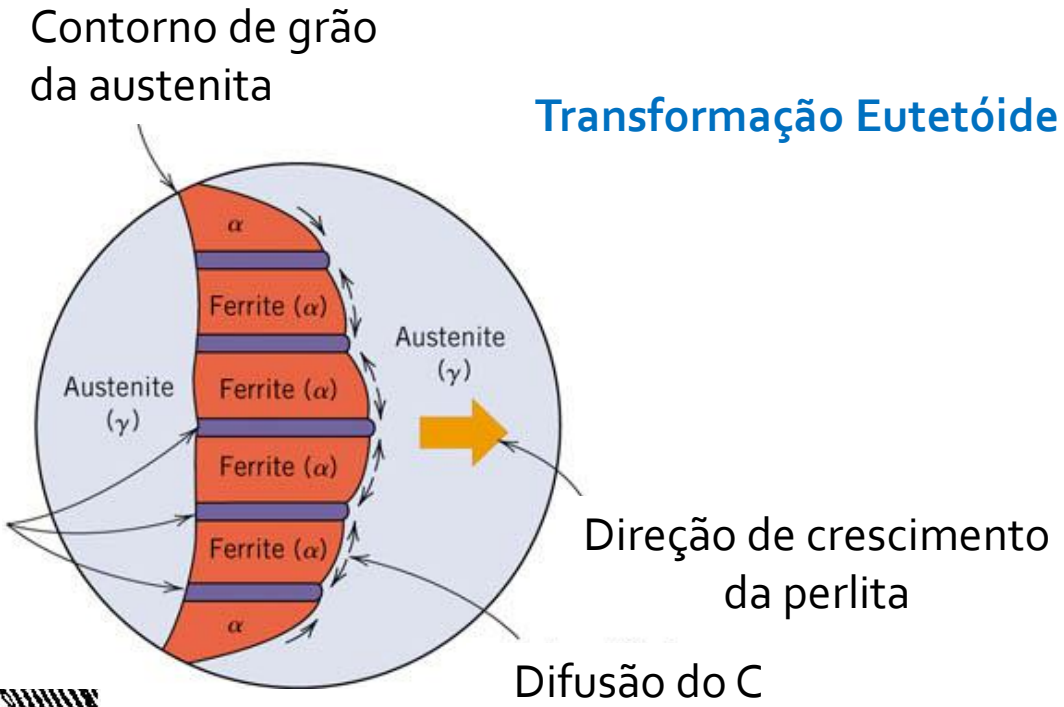
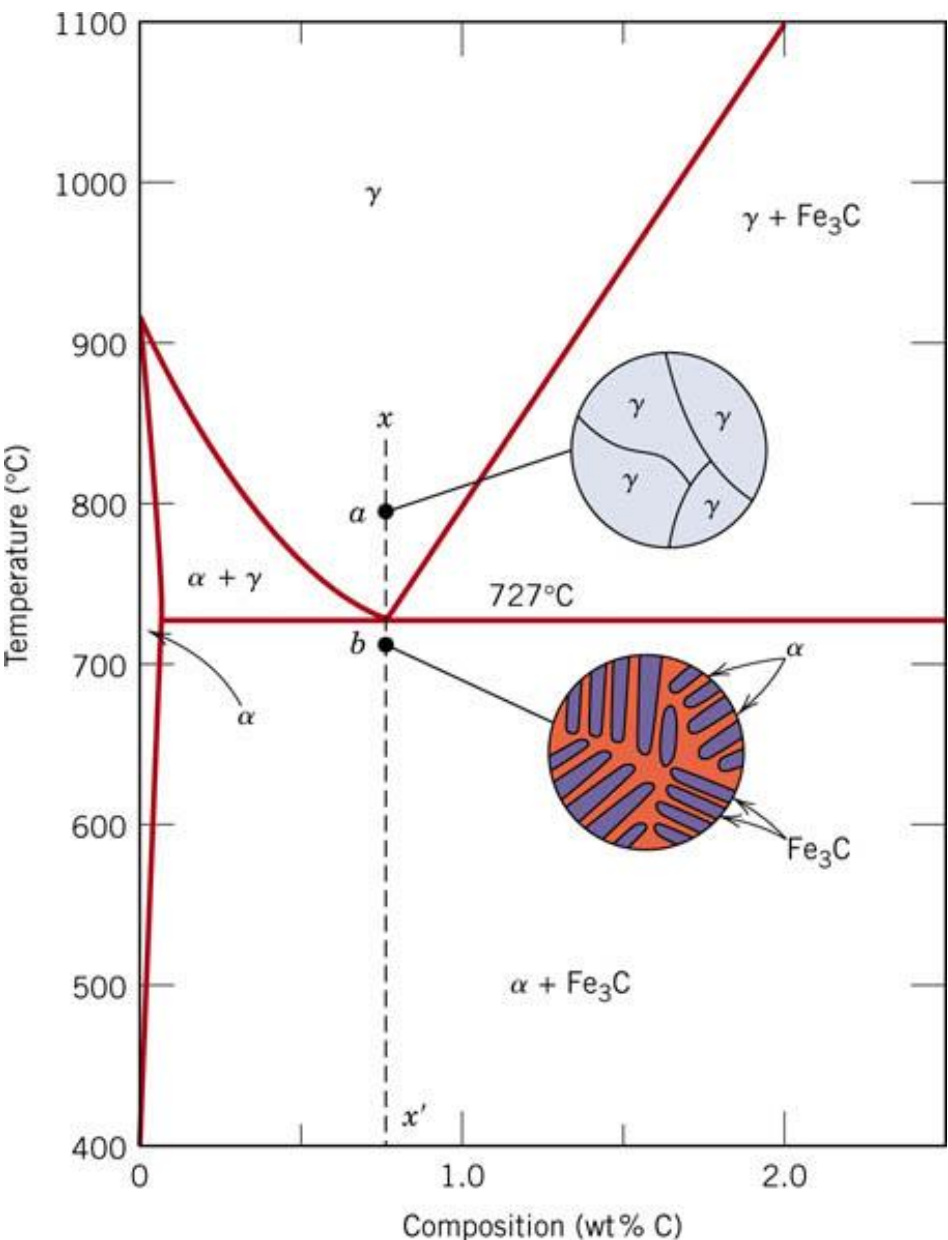
Reação Eutética



Reação Eutetóide

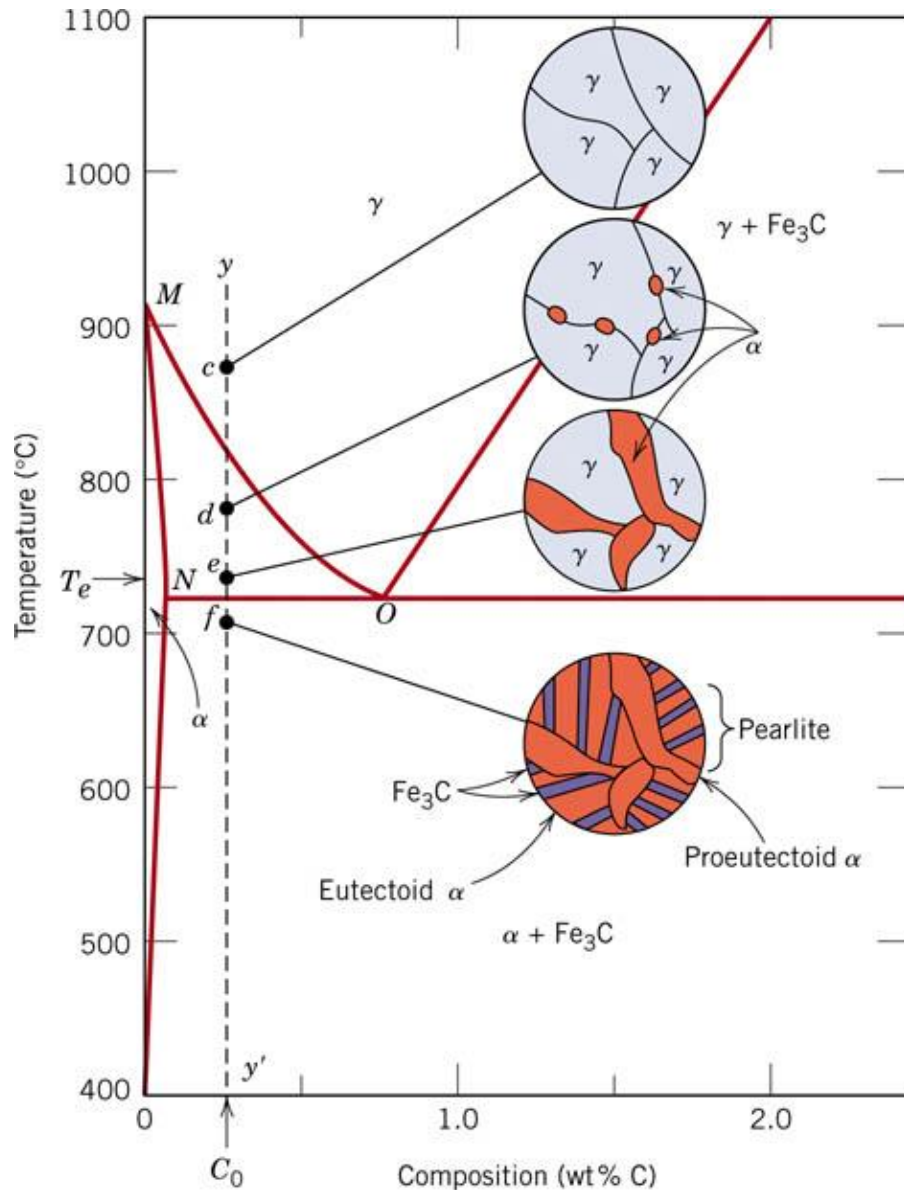


Desenvolvimento da Microestrutura em ligas FeC

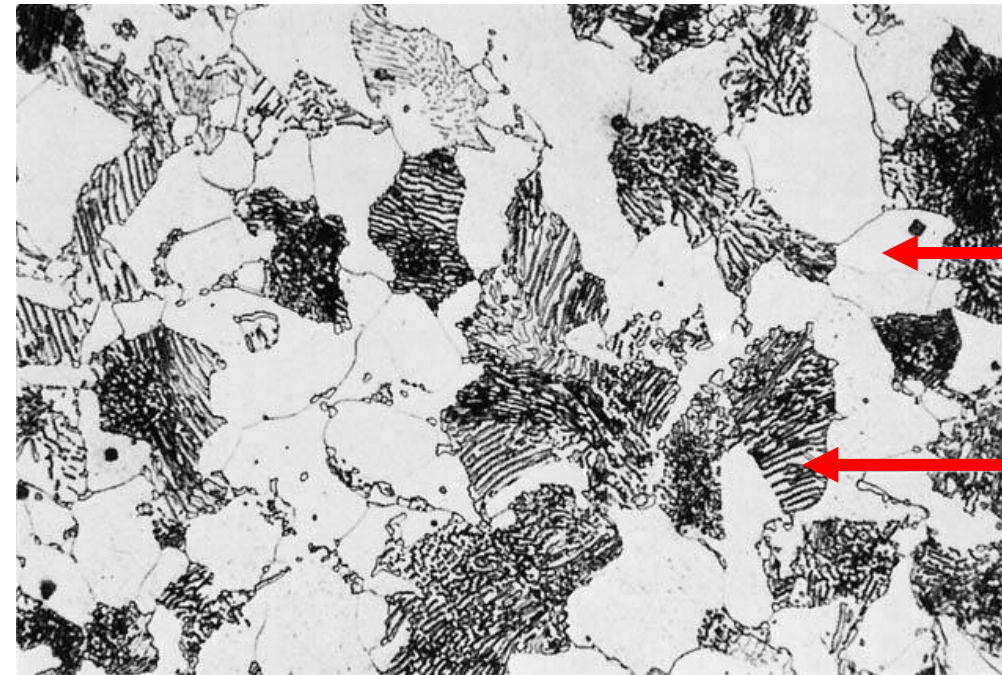


Perlita: formada nos aços eutetóides abaixo da temperatura do eutetóide composta por camadas alternadas de lamelas de ferrita e cementita é conhecida por perlita, pois quando vista ao microscópio possui uma aparência que lembra madrepérola

Desenvolvimento da Microestrutura em ligas FeC



Ligas Hipoeutetóide

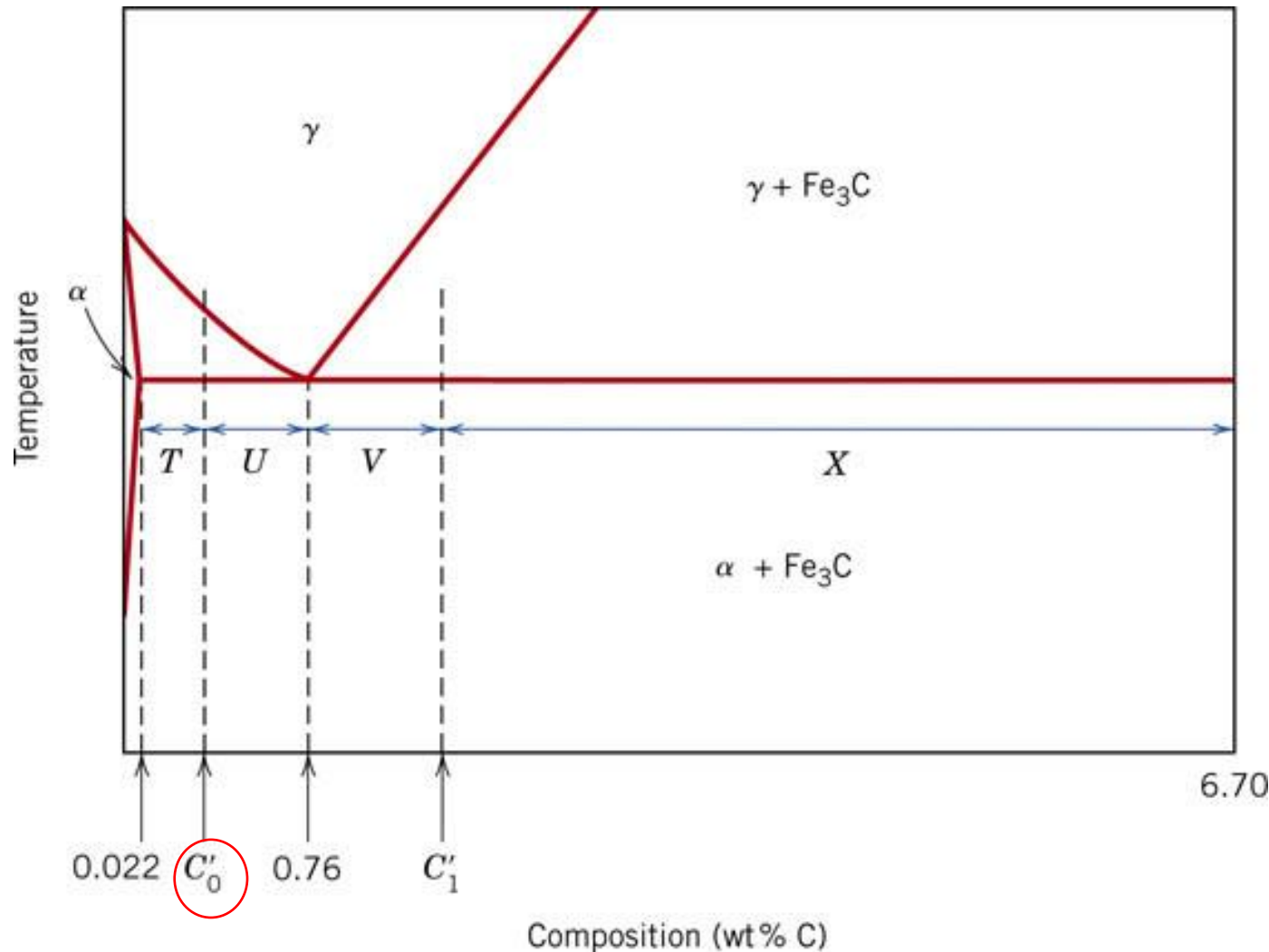


Fotomicrografia de aço com 0,38% p C com microestrutura composta por perlita e ferrita proeutetóide. Ampliação de 635 x.

Ferrita
Proeutetóide

Perlita

Desenvolvimento da Microestrutura em ligas FeC



Quantidades de α proeutetóide e de perlita

Considerando uma liga de composição C_0

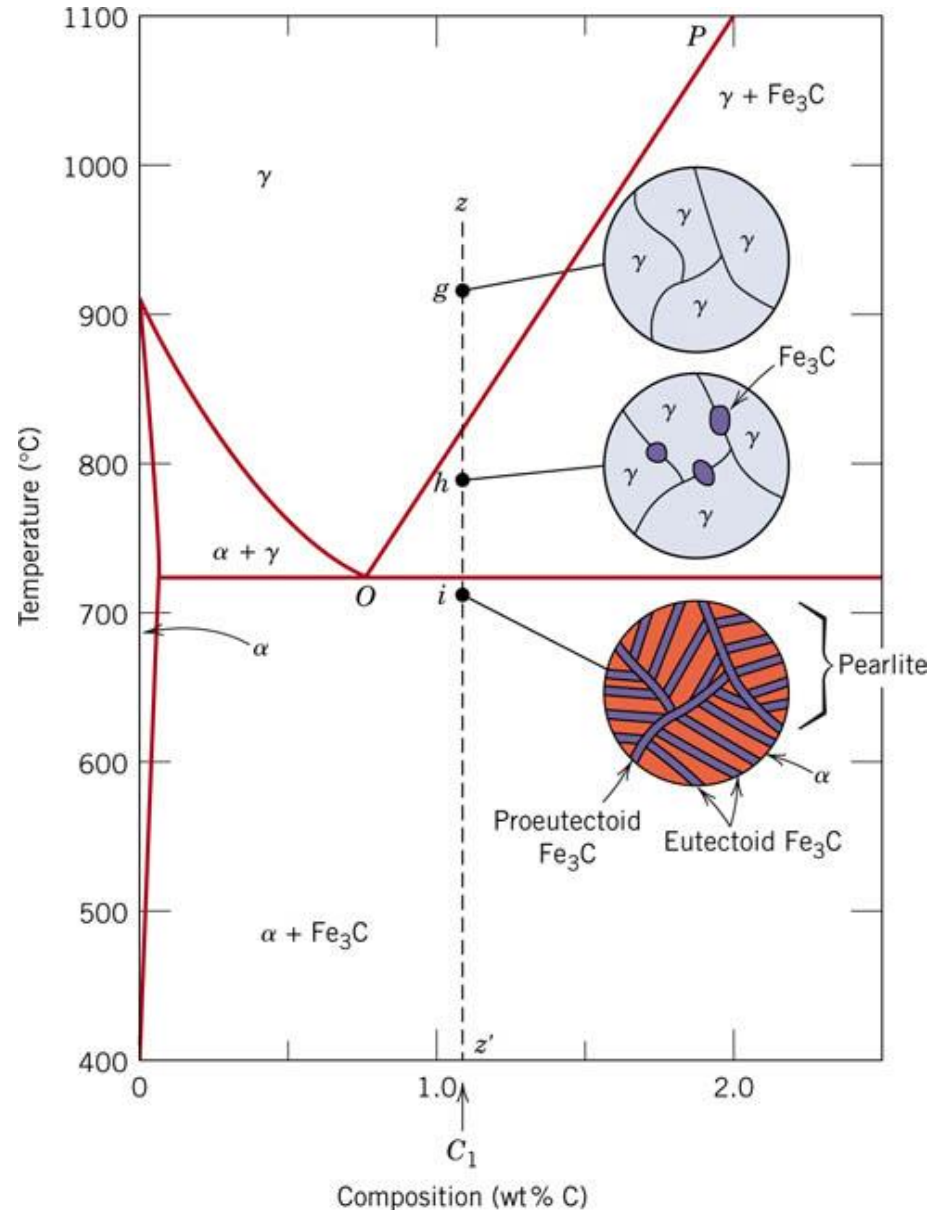
$$\% \text{ perlita} = \frac{T}{T+U} * 100$$

$$\% \text{ perlita} = \frac{C_0 - 0,022}{0,76 - 0,022} * 100$$

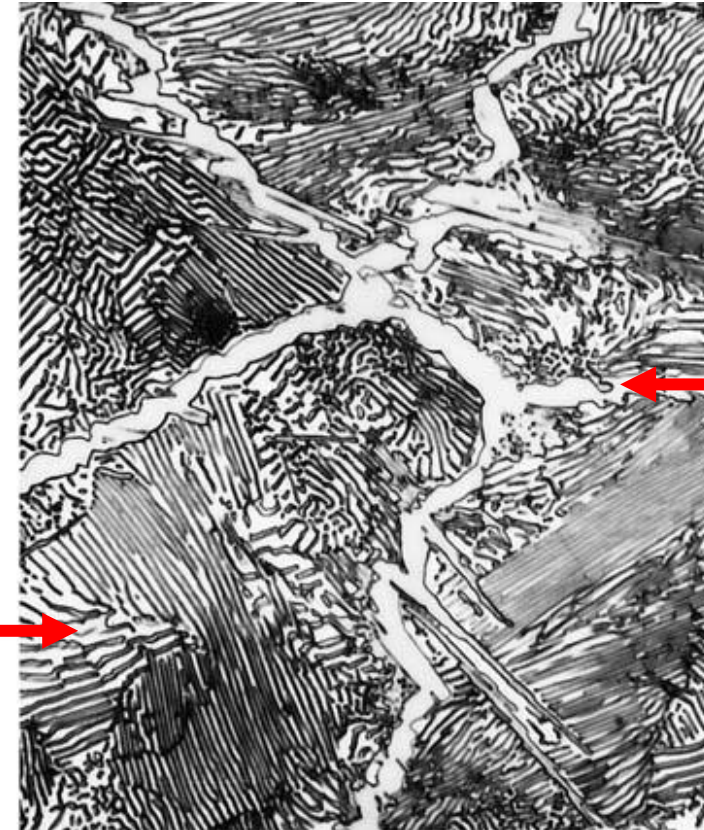
$$\% \alpha \text{ proeutetóide} = \frac{U}{T+U} * 100$$

$$\% \alpha \text{ proeutetóide} = \frac{0,76 - C_0}{0,76 - 0,022} * 100$$

Desenvolvimento da Microestrutura em ligas FeC



Ligas Hipereutetóide

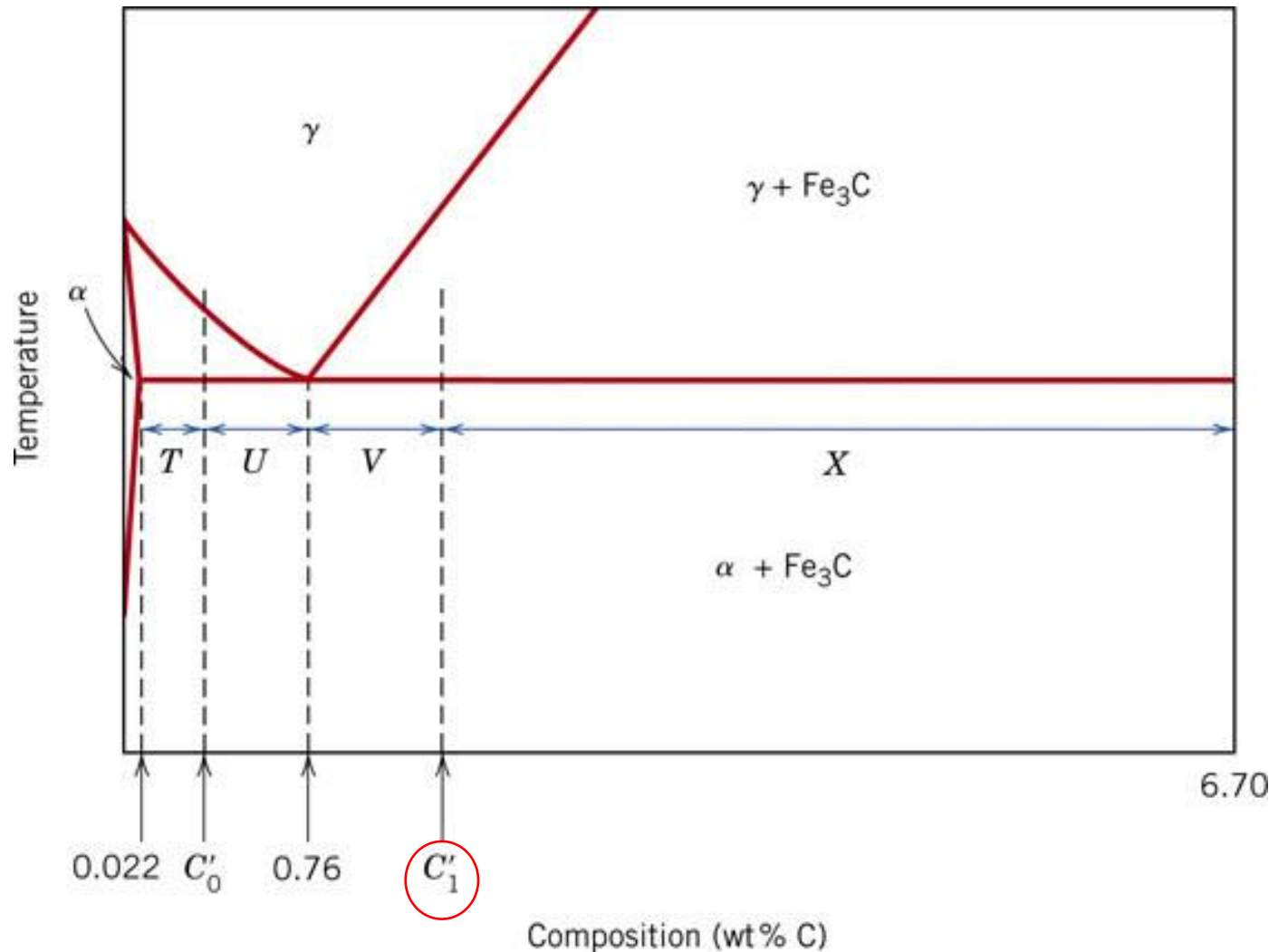


Perlita

Cementita Proeutetóide

Fotomicrografia de aço com 1,4%p C com microestrutura composta por uma rede de cementita proeutetóide branca que envolve a perlita. Ampliação de 1000 x.

Desenvolvimento da Microestrutura em ligas FeC



Quantidades relativas dos microconstituintes perlita e Fe_3C

Considerando uma liga de composição C_1

$$\% \text{ perlita} = \frac{X}{V+X} * 100$$

$$\% \text{ perlita} = \frac{6,70 - C_1}{6,70 - 0,76} * 100$$

$$\% Fe_3C \text{ proeutetóide} = \frac{V}{V+X} * 100$$

$$\% Fe_3C \text{ proeutetóide} = \frac{C_1 - 0,76}{6,70 - 0,76} * 100$$

Tarefa

Para uma liga com 99,65%p Fe-0,35%p C (no Diagrama considere $C_0 = 0,35\% \text{p C}$) em uma temperatura imediatamente abaixo da eutetóide, determine:

a- As frações das fases ferrita total e cementita.

b – As frações de ferrita proeutetóide e perlita.

c – A fração total de ferrita eutetóide.

No ponto indicado tem-se presente as fases perlita (α eutetóide + cementita) e α proeutetóide

a – α total = (α eutetóide + α proeutetóide)

Aplica-se a Regra da Alavanca ao longo da linha de amarração da região $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$

$$\% \alpha \text{ total} = \frac{6,7 - 0,35}{6,7 - 0,022} * 100 \% = 95\%$$

$$\% \text{ cementita} = \frac{0,35 - 0,22}{6,7 - 0,022} * 100 \% = 5\%$$

b – *Aplica-se a Regra da Alavanca ao longo da linha de amarração que se estende apenas até a composição eutetóide*

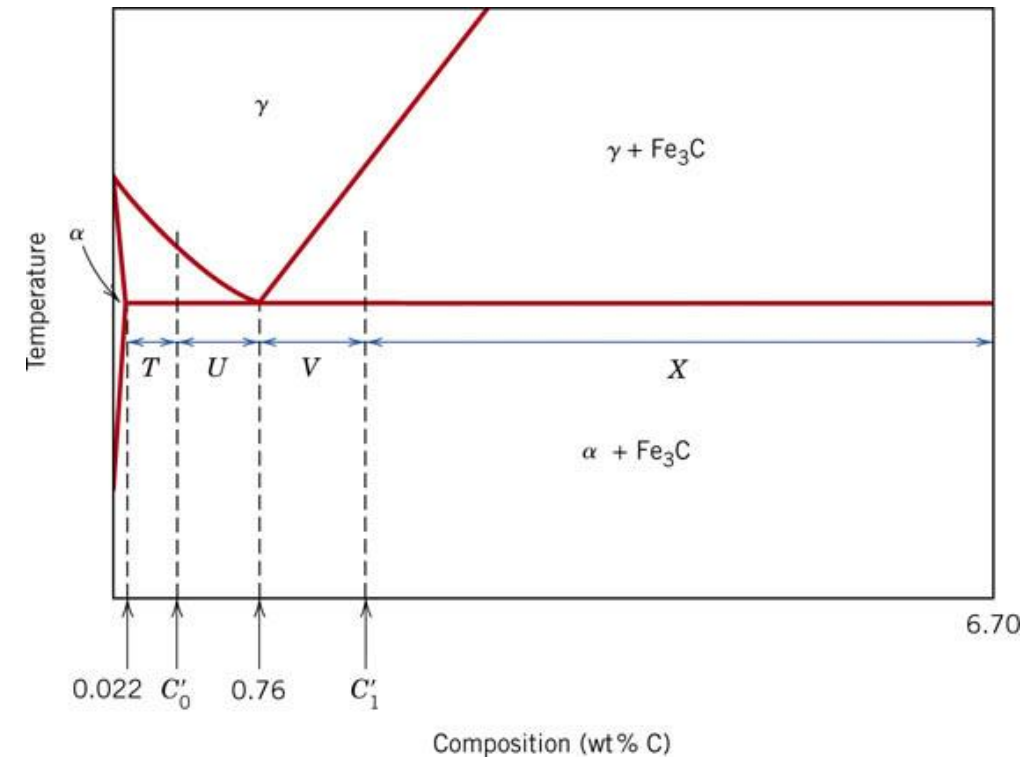
$$\% \text{ perlita} = \frac{0,35 - 0,022}{0,76 - 0,022} * 100 = 44\%$$

$$\% \alpha \text{ proeutetóide} = \frac{0,76 - 0,35}{0,76 - 0,022} * 100 = 56\%$$

c – α total = (α eutetóide + α proeutetóide)

$\% \alpha$ eutetóide = $\% \alpha$ total - $\% \alpha$ proeutetóide

$\% \alpha$ eutetóide = $95 - 56 = 39\%$



REFERÊNCIAS E BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- CALLISTER JR., W. D; RETHWISCH, D.G.. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Um introdução**, 8ª ed, Rio de Janeiro: LTC, 2015. [Capítulo 9](#)
- CALLISTER JR, W.D. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 7 th Ed. Wiley.
- VAN VLACK, H. L. **Princípios de Ciência dos Materiais**, São Paulo: Cengage Learning, 2008. [Capítulo 9](#)
- SHACKELFORD, J.F. **Introduction to materials science for engineers**. 6th ed. [Capítulo 9](#)



***Muito
obrigada!***