



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

DIAGRAMAS DE FASES

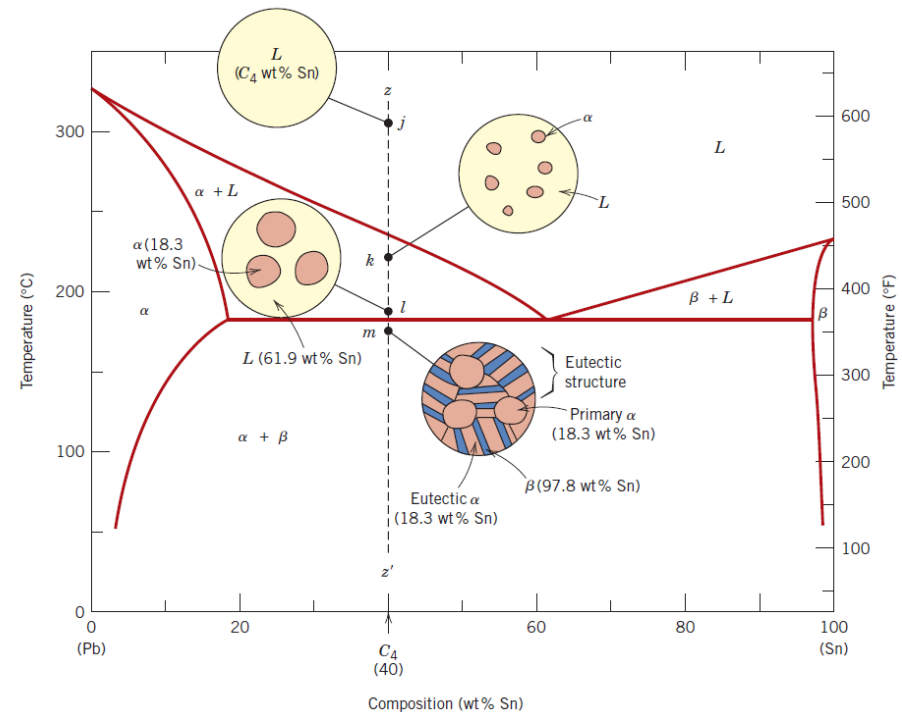
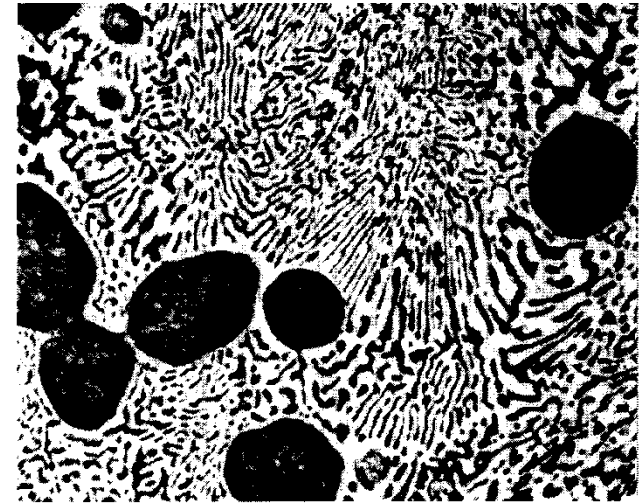
PMT 3100 - Introdução à Ciência dos Materiais para Engenharia
2º semestre de 2014

Roteiro da aula

- Importância do tema, aplicações.
- Definições : componente, sistema, fase, tipos de equilíbrios.
 - Limite de solubilidade
- Sistemas com um único componente
- Sistemas binários
 - Regra da alavanca
 - Transformações : eutética, eutetóide
- Desenvolvimento de estruturas em sistemas binários
 - em condições de equilíbrio
 - em sistemas com eutéticos
- Diagrama de fases Fe-C
 - Diagrama de fases Fe-Fe₃C
 - Microestruturas eutetóides
 - Microestruturas hipoeutetóides

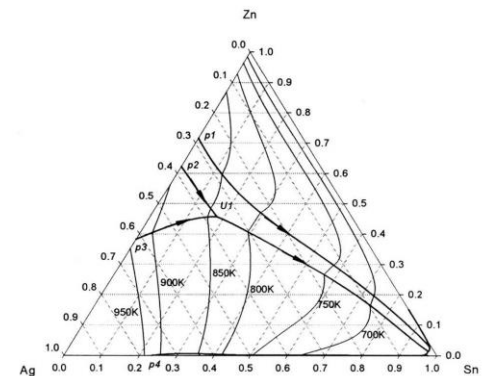
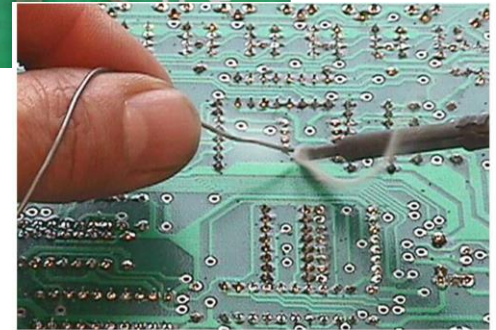
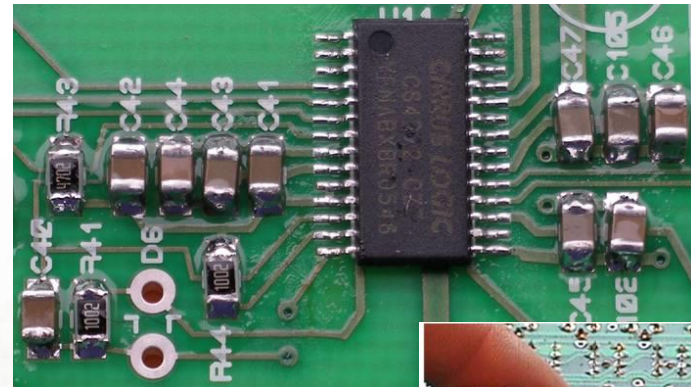
Por que estudar diagramas de fases?

- 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.*
- A **MICROESTRUTURA** dos materiais pode ser relacionada diretamente com o diagrama de fases.
- Existe uma relação direta entre as **propriedades** dos materiais e as suas **microestruturas**.



Aplicações:

- peças fundidas como blocos de motores, soldagem branda para aplicação em eletrônica, etc...



Definições (I):

- **COMPONENTES**

- São elementos químicos e/ou compostos que constituem uma fase.

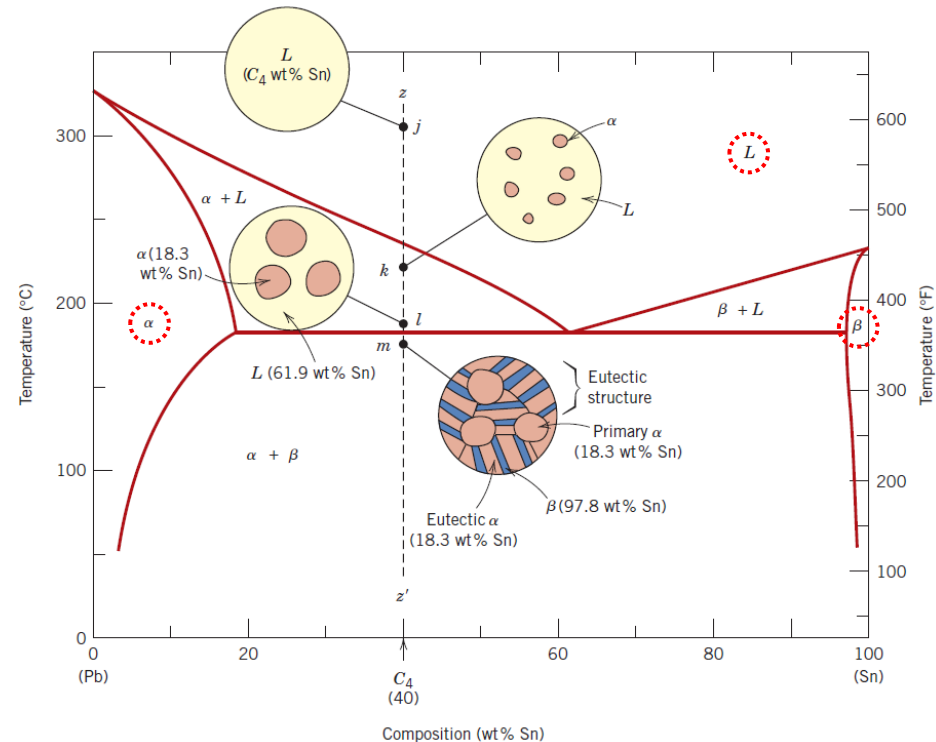
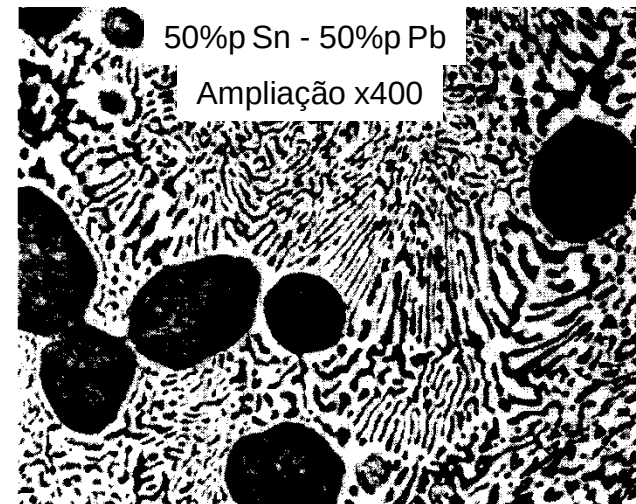
- **SISTEMA**

- **Definição 1:** quantidade de matéria com massa e identidade fixas sobre a qual dirigimos a nossa atenção. Todo o resto é chamado *vizinhança*. Exemplo: uma barra da liga ao lado, com 40% de Sn.
- **Definição 2:** série de fases possíveis formadas pelos mesmos componentes, independentemente da composição específica. Exemplo: o sistema Pb-Sn.

- **FASE**

Estado uniforme da matéria, tanto em composição química como em estado físico.

J. W. Gibbs



Exemplo de Diagrama de Fases do Sistema Pb-Sn

Definições: tipos de equilíbrio

Equilíbrio mecânico

- Parede não rígida: móvel
- Propriedade termodinâmica: pressão.

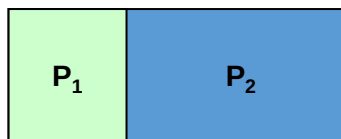
Equilíbrio térmico

- Parede diatérmica: permite o fluxo de calor
- Propriedade termodinâmica: temperatura.

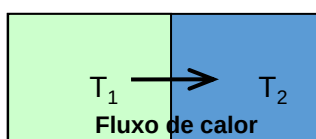
Equilíbrio de fases

- Parede permeável
- Propriedade termodinâmica: potencial químico

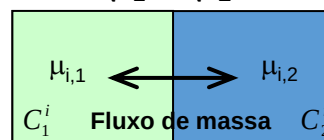
$$P_1 > P_2$$



$$T_1 > T_2$$



$$\mu_1 \neq \mu_2$$



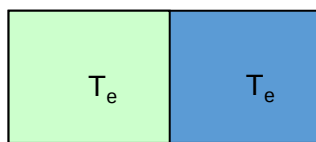
inicial

$$\mu_i = \left(\frac{\partial G}{\partial N_i} \right)_{p, T, N_j}$$

$$P_1 > P_e > P_2$$



$$T_1 > T_e > T_2$$



$$\mu_1 = \mu_e = \mu_2$$



final

Definições: equilíbrio termodinâmico

Dois sistemas estão em equilíbrio termodinâmico quando estão simultaneamente em:

1. Equilíbrio mecânico.
2. Equilíbrio térmico.
3. Equilíbrio de fases.

Sistemas com um único componente

- O equilíbrio entre duas fases num sistema monocomponente chama-se equilíbrio *univariante*.

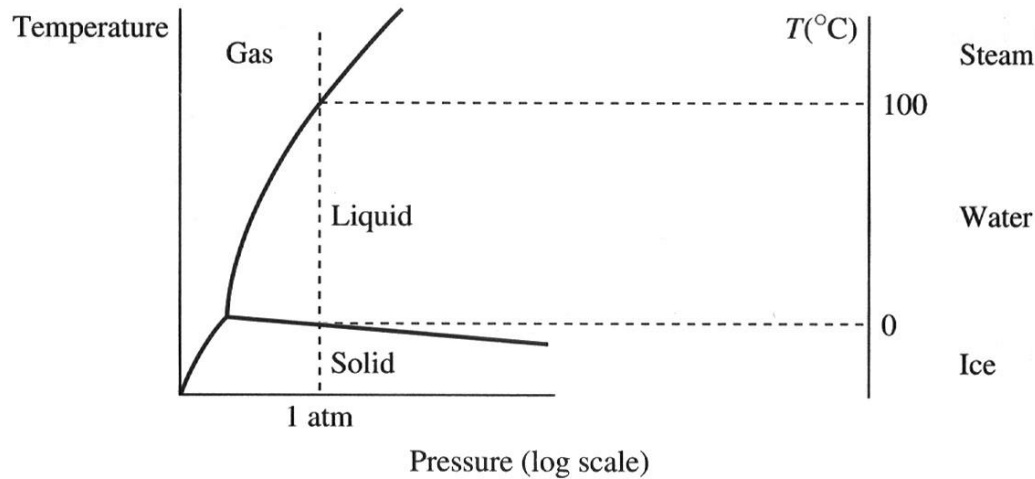


Diagrama de fases da água

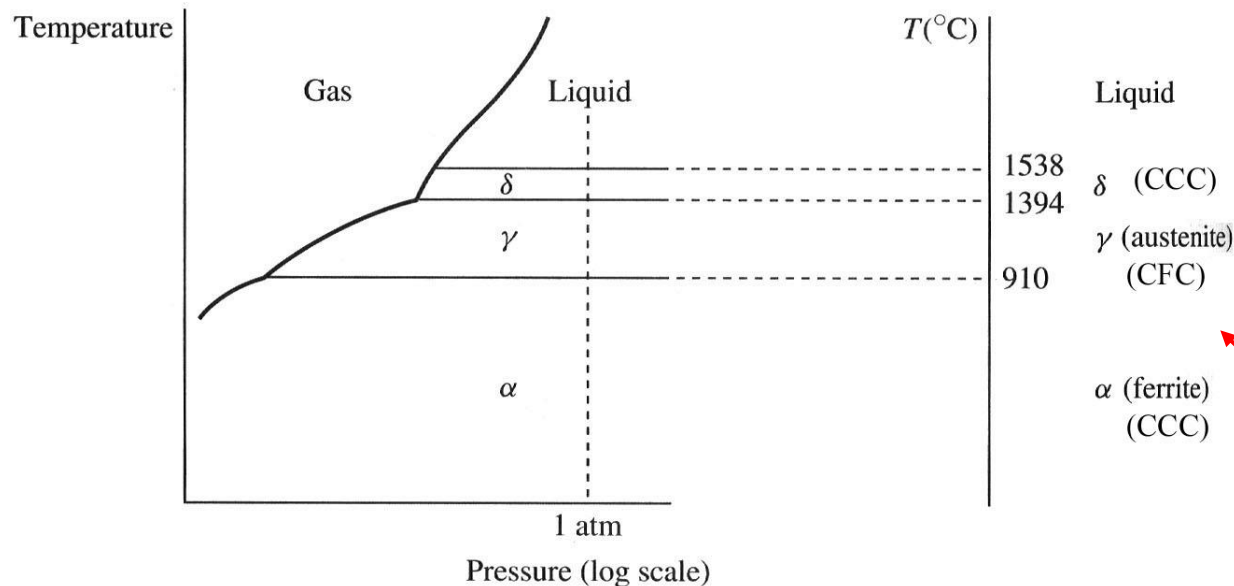


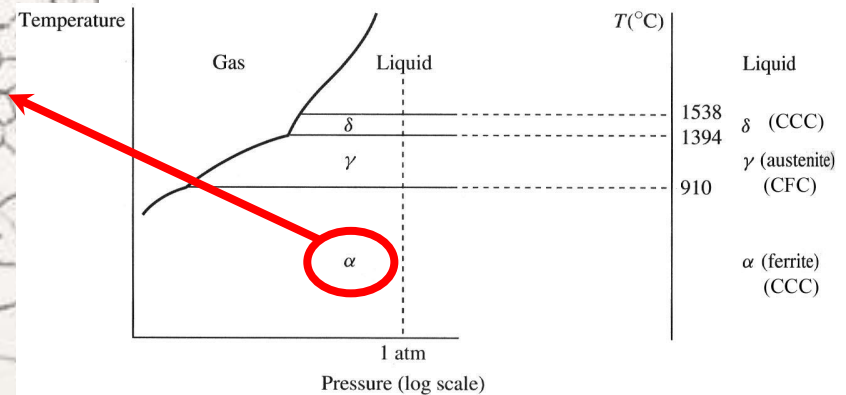
Diagrama de fases do ferro

Alotropia

(são fases diferentes)

Aço IF

Diagrama de equilíbrio de fases unário do Fe

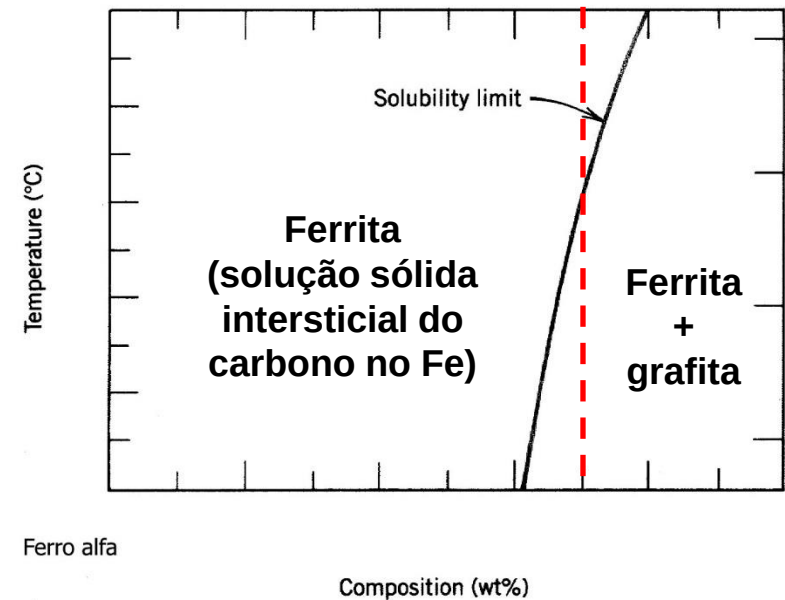
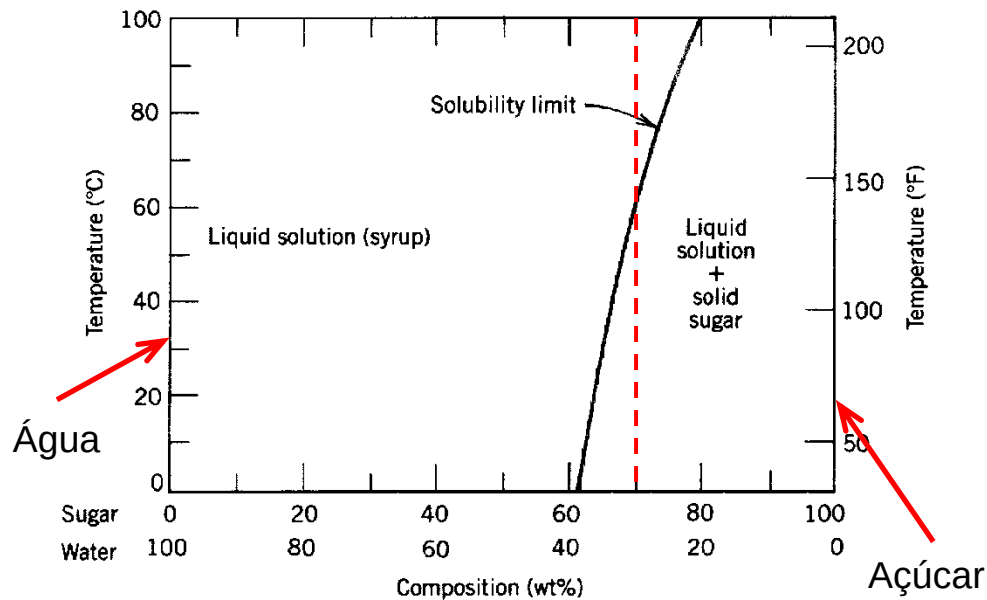


Aço	Composição química (%p)								
	C	Mn	Si	P	S	Al	Ti	Nb	N
Ti 1	0,0029	0,098	0,007	0,008	0,0074	0,055	0,0537	0,005	0,0019
Ti 2	0,0031	0,090	0,006	0,008	0,0108	0,047	0,0571	0,005	0,0022
Nb-Ti 1	0,0028	0,108	0,001	0,007	0,0096	0,034	0,0202	0,022	0,0023
Nb-Ti 2	0,0027	0,089	0,005	0,005	0,0082	0,028	0,0193	0,022	0,0035

Limite de solubilidade

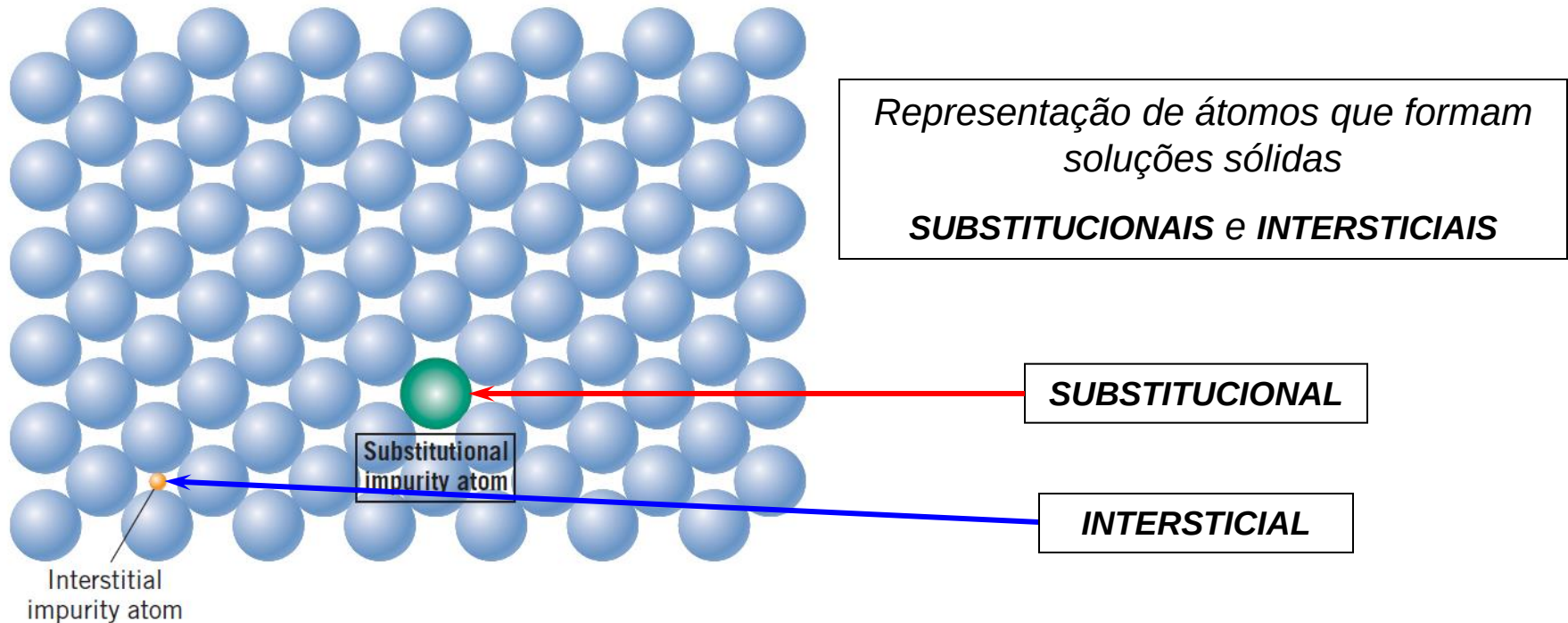
10

Concentração máxima de átomos ou moléculas de soluto que pode ser dissolvida no solvente formando uma solução



Parte do diagrama de fases Fe-C (esquemático)

Tipos de soluções sólidas (revisão)



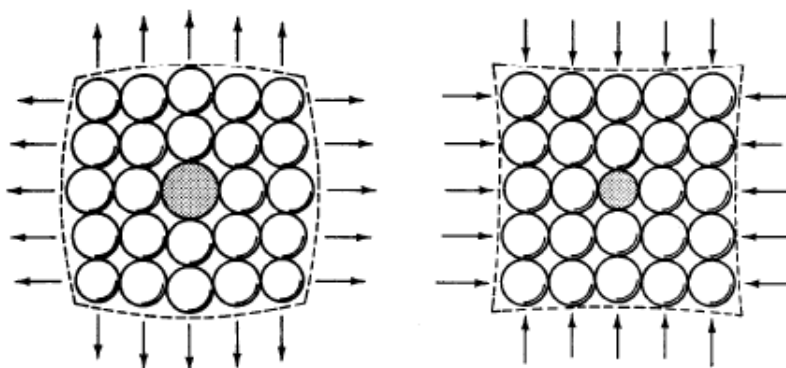
Como se forma uma solução sólida?

Resposta:

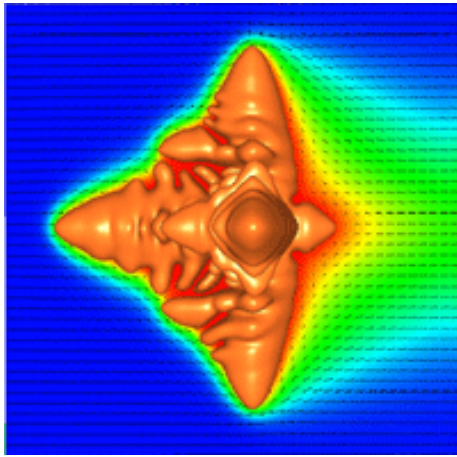
- Mistura-se os dois componentes no estado líquido e forma-se a solução sólida durante a solidificação
- Por processos que envolvam difusão no estado sólido (p.ex: “mechanical alloying”)

Regras de Hume-Rothery para solubilidade no estado sólido

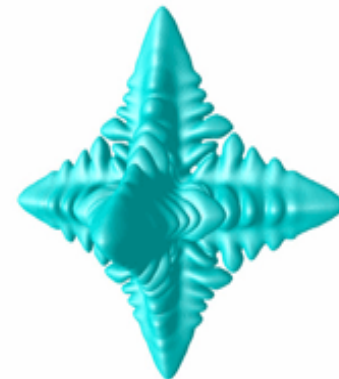
- **Regra 1**: solução sólida substitucional ilimitada ocorre quando a diferença entre os raios atômicos dos componentes for menor que 15%. Se for maior que este valor, a solubilidade é limitada.
- **Regra 2**: uma solução sólida com solubilidade extensa é mais provável quando os dois componentes devem ter a mesma estrutura cristalina.
- **Regra 3**: um componente (A) dissolve mais um outro componente (B) com valência maior que (A), do que com valência menor que (A). O ideal é que os dois tenham a mesma valência.
- **Regra 4**: quanto menor a diferença de eletronegatividade entre os dois componentes, maior a possibilidade de formar solução sólida extensa.



$$Mismatch = \left(\frac{r_{solute} - r_{solvent}}{r_{solvent}} \right) \times 100 \leq 15\%$$



Tipos de diagramas de fase



Dendrita

Diagramas de equilíbrio de fase isomorfos

14

- Num sistema binário isomorfo, os dois componentes são *completamente solúveis* um no outro.

Regra de Hume-Rothery

Compon.	Raio atômico	Mis-match	Estrut. crist.	Valên-cia	Eletro-neg.
Ni (solvente)	0,125 nm	2,3%	CFC	2+	1,9
Cu (soluto)	0,128 nm	2,3%	CFC	1+	1,9

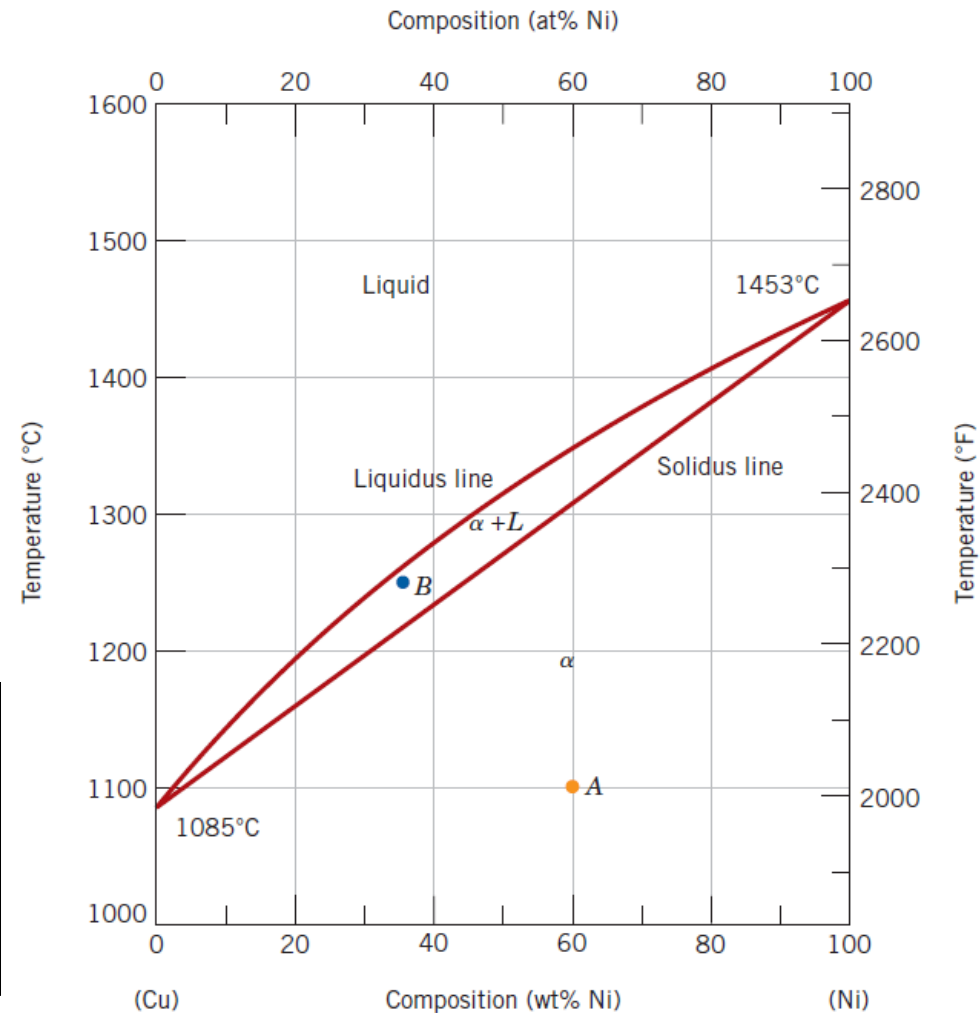
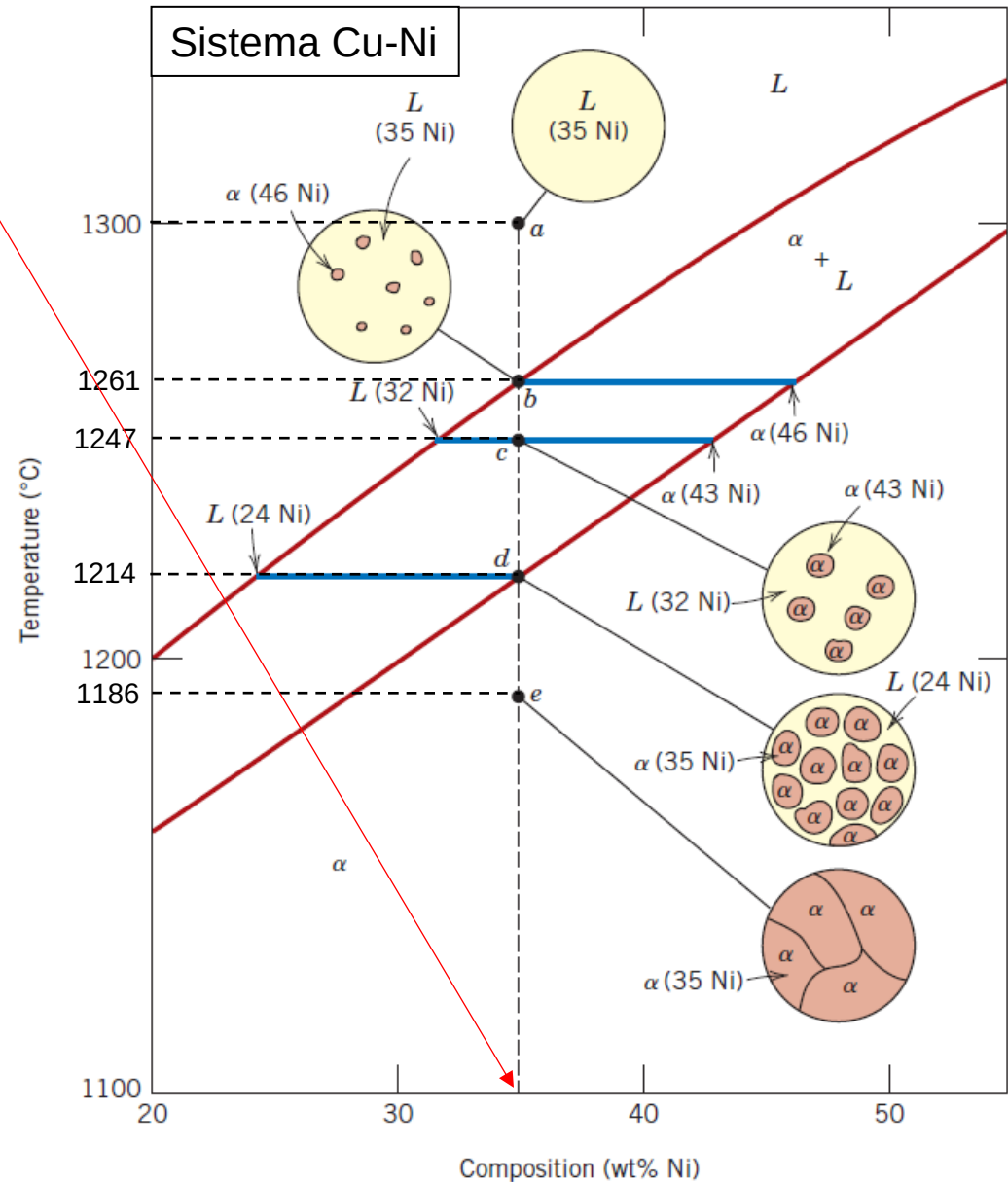
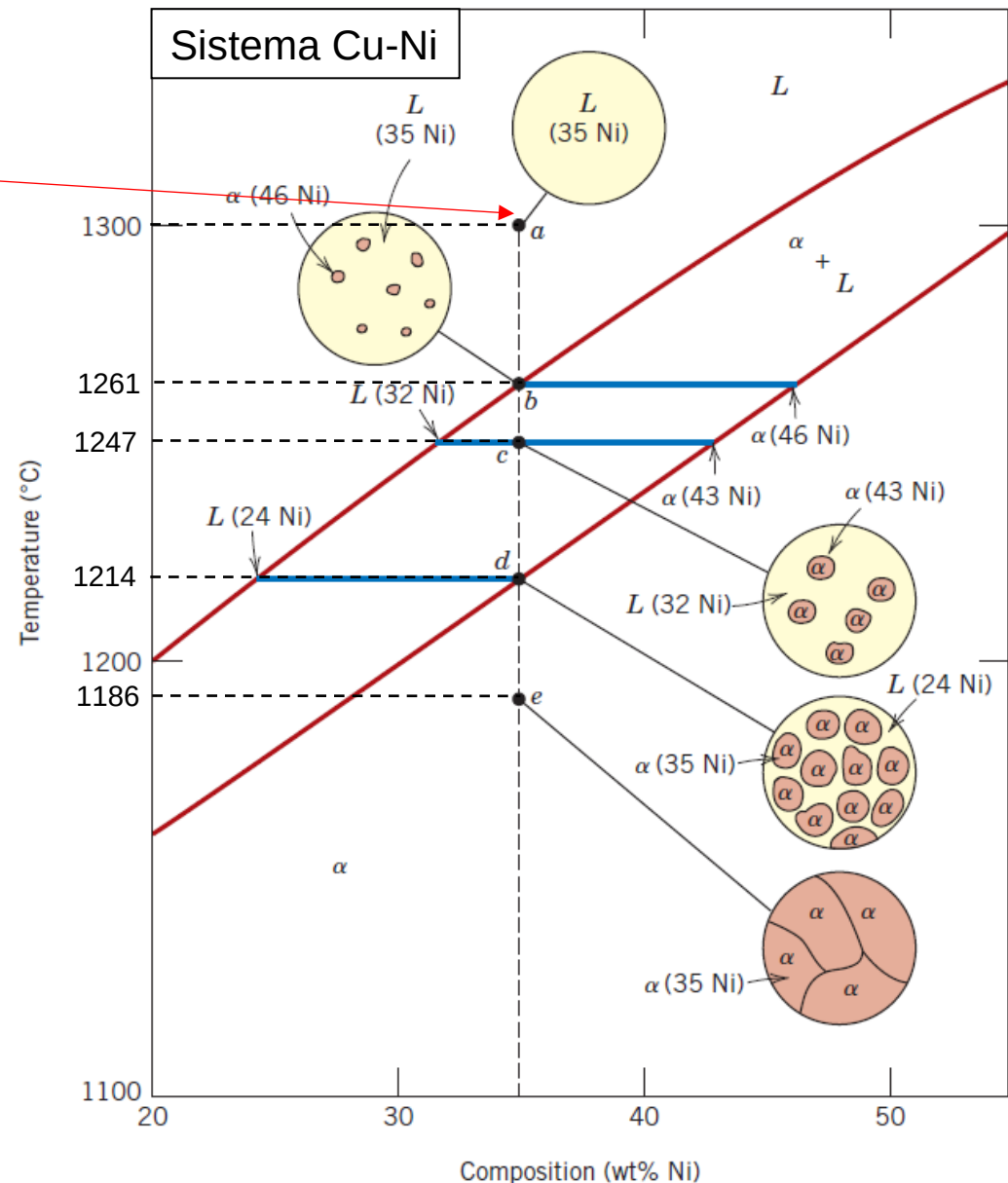


Diagrama de fases do Sistema Cu - Ni

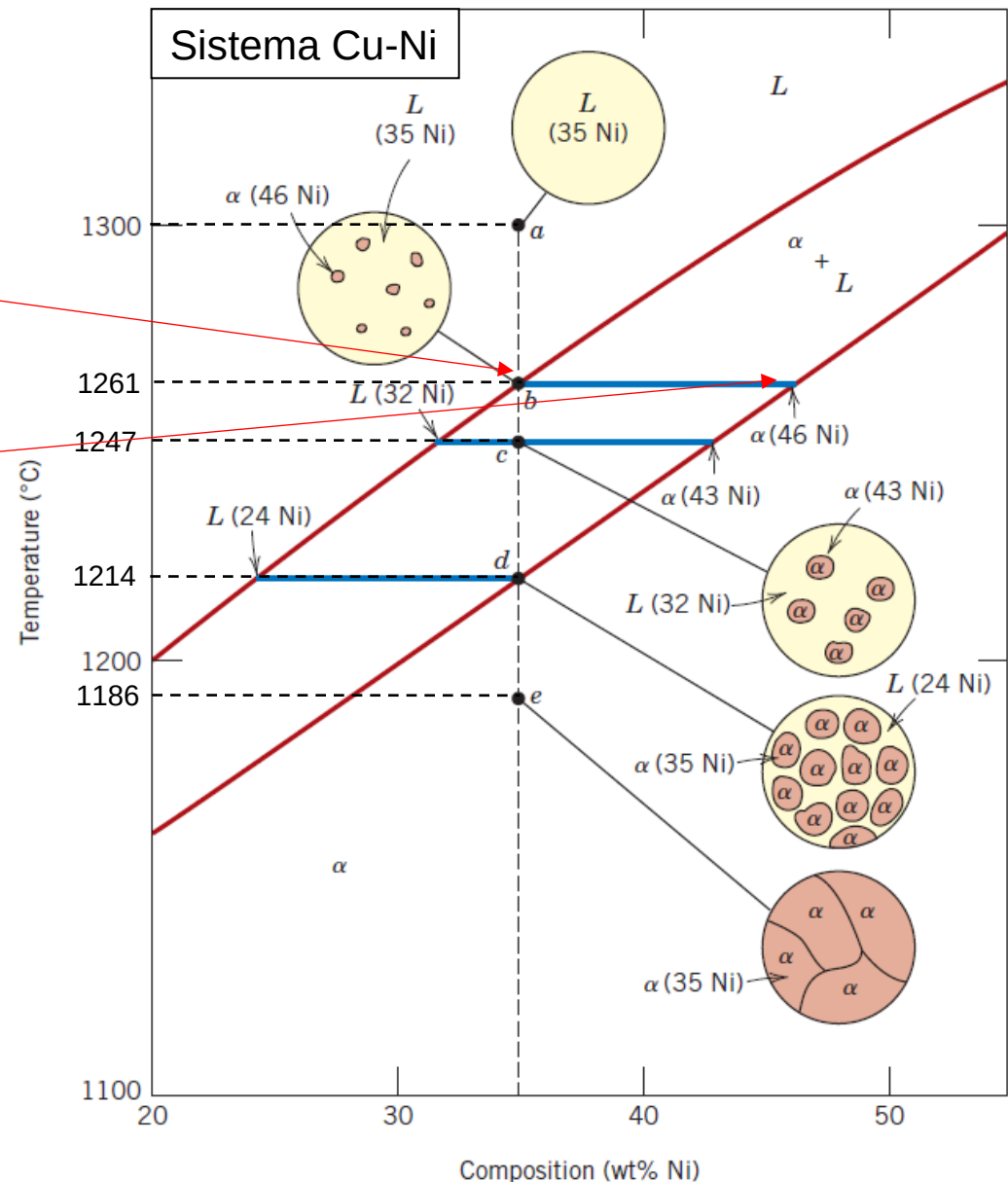
- A leitura de diagramas de fases é feita primeiramente definindo-se uma liga de interesse, como por exemplo 35% Ni.
- Na temperatura de 1300°C (ponto a) a fase em equilíbrio termodinâmico é a fase líquida com 35% de Ni.
- Na temperatura de 1261°C (ponto b), que é a temperatura líquidus desta liga, começa 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.



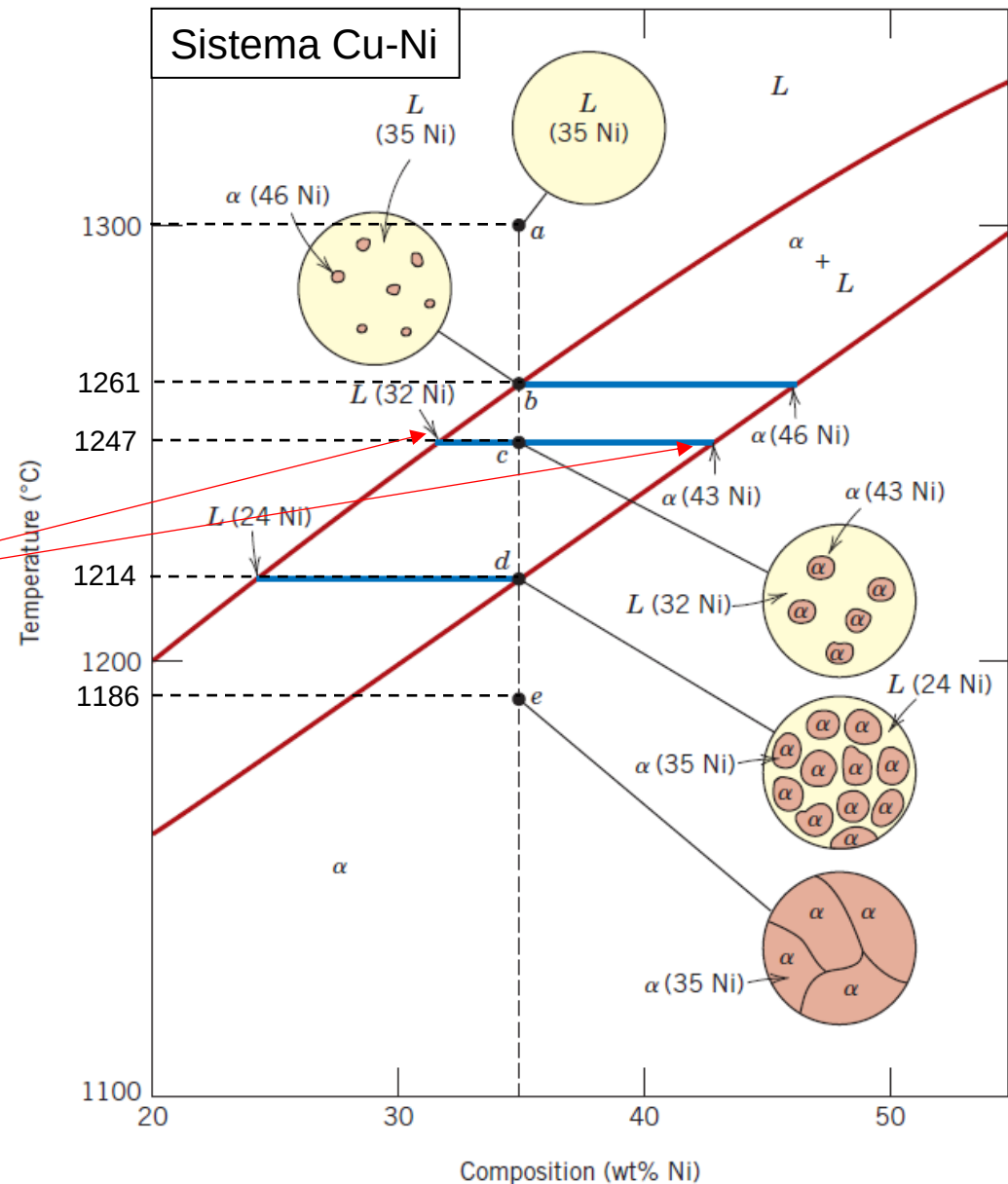
- A leitura de diagramas de fases é feita primeiramente definindo-se uma liga de interesse, como por exemplo 35% Ni.
- Na temperatura de 1300°C (ponto a) a fase em equilíbrio termodinâmico é a fase líquida com 35% de Ni.
- Na temperatura de 1261°C (ponto b), que é a temperatura líquidus desta liga, começa 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.



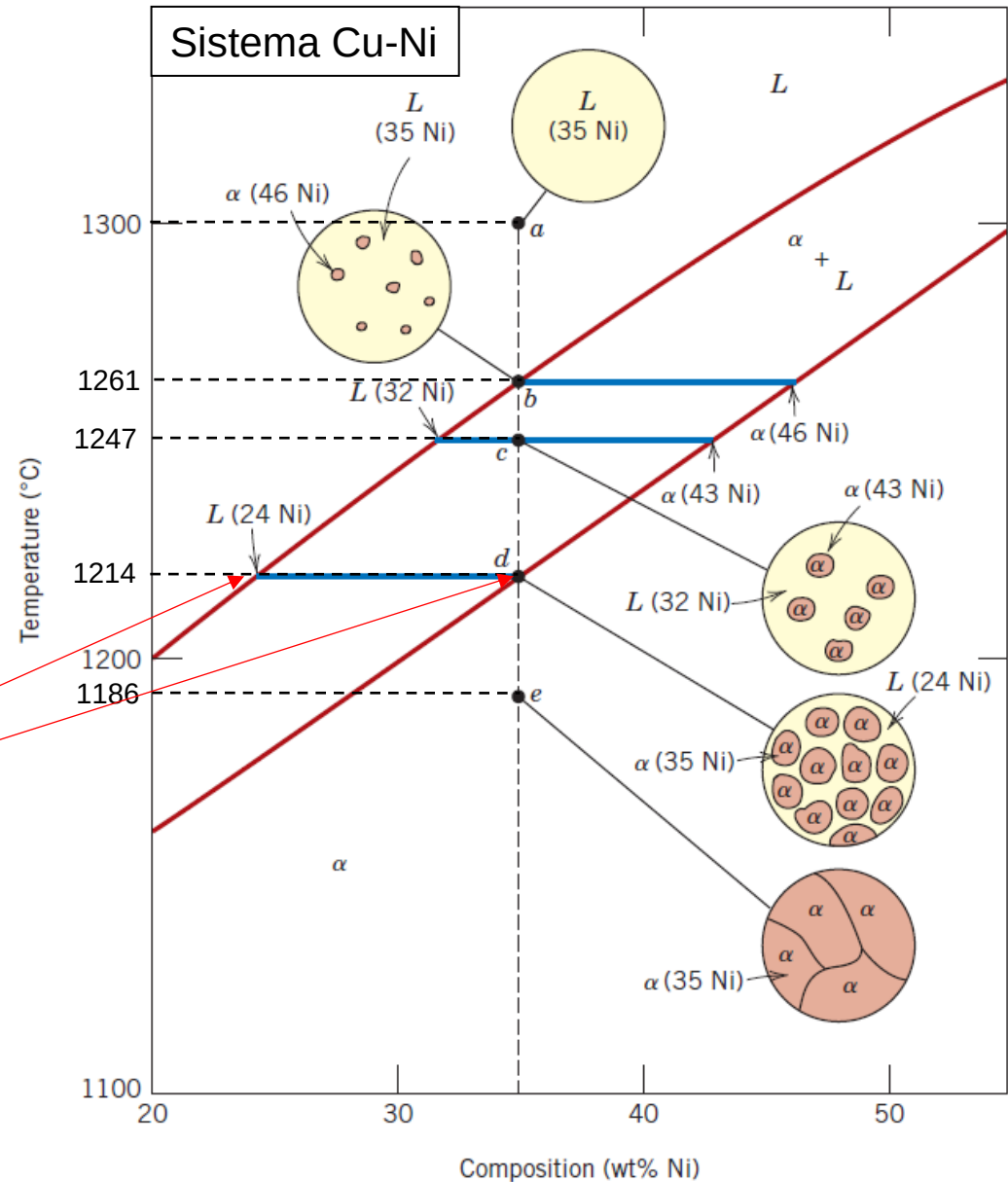
- A leitura de diagramas de fases é feita primeiramente definindo-se uma liga de interesse, como por exemplo 35% Ni.
- Na temperatura de 1300°C (ponto a) a fase em equilíbrio termodinâmico é a fase líquida com 35% de Ni.
- Na temperatura de 1261°C (ponto b), que é a **temperatura líquidus** desta liga, 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.



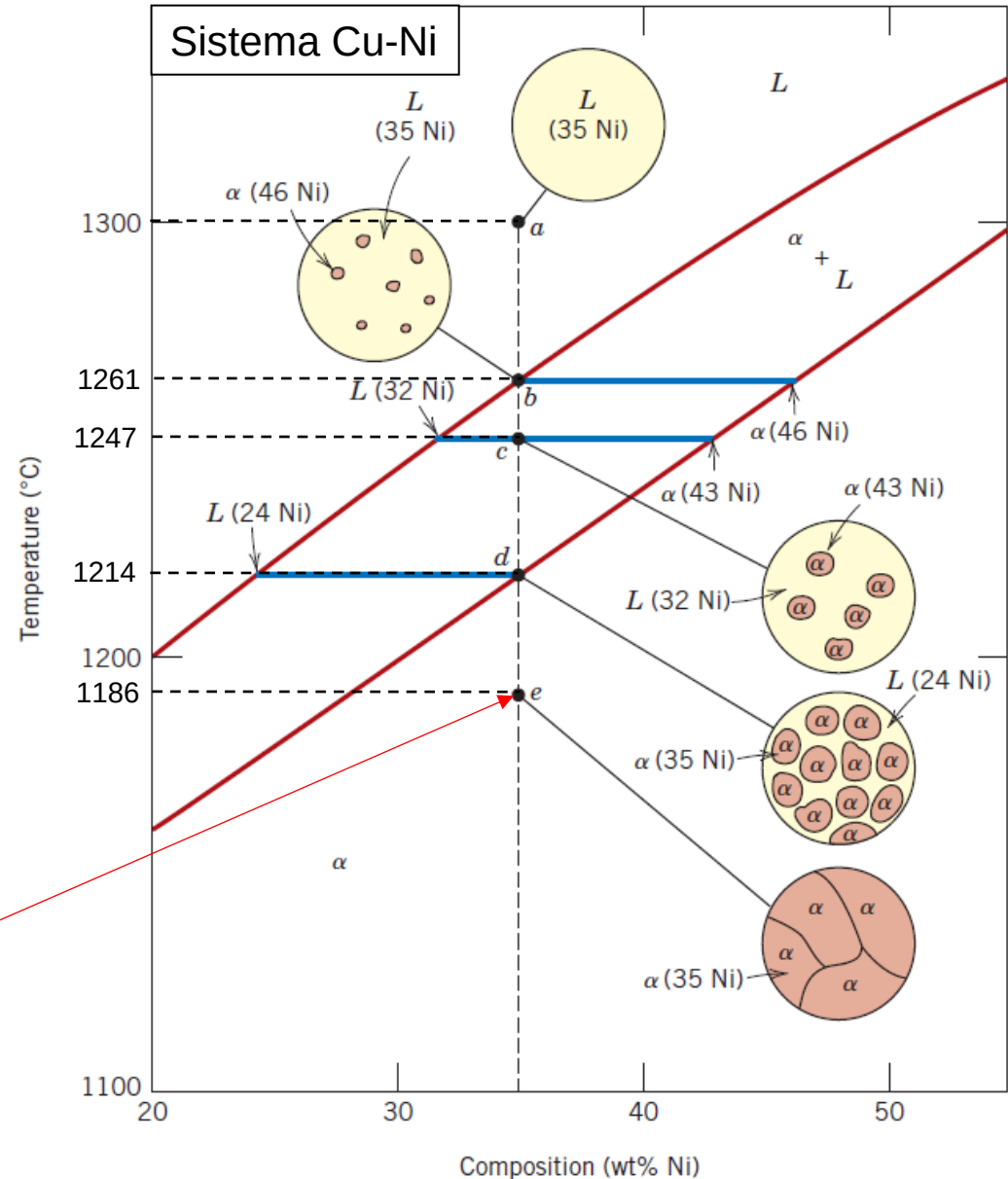
- A leitura de diagramas de fases é feita primeiramente definindo-se uma liga de interesse, como por exemplo 35% Ni.
- Na temperatura de 1300°C (ponto a) a fase em equilíbrio termodinâmico é a fase líquida com 35% de Ni.
- Na temperatura de 1261°C (ponto b), que é a temperatura líquidus desta liga, começa 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.



- A leitura de diagramas de fases é feita primeiramente definindo-se uma liga de interesse, como por exemplo 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.

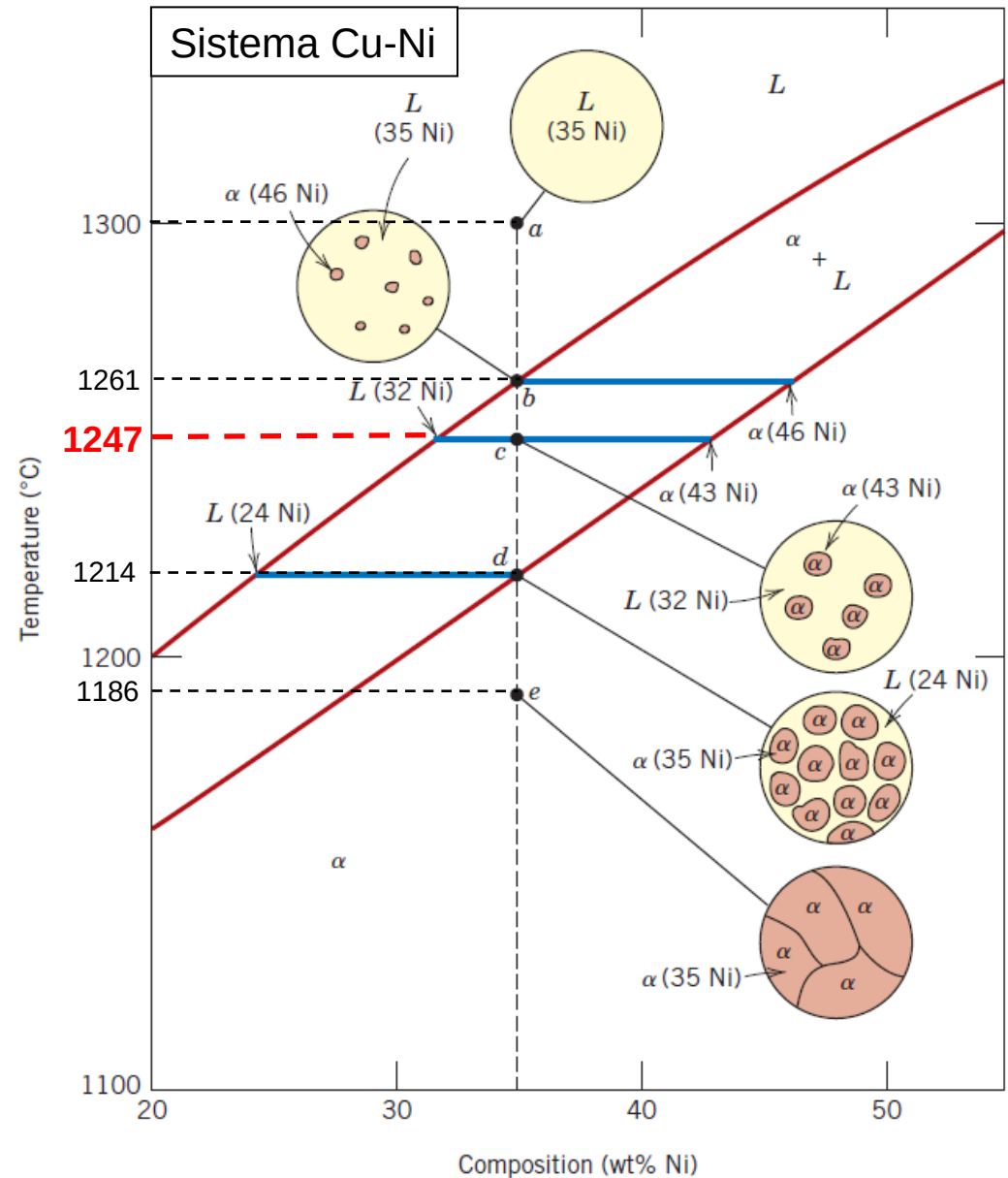


- A leitura de diagramas de fases é feita primeiramente definindo-se uma liga de interesse, como por exemplo 35% Ni.
- Na temperatura de 1300°C (ponto a) a fase em equilíbrio termodinâmico é a fase líquida com 35% de Ni.
- Na temperatura de 1261°C (ponto b), que é a **temperatura líquidus** desta liga, 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.



Como pode existir, a partir da composição química do líquido 35% Ni, em condições de equilíbrio termodinâmico a 1247°C, um líquido com 32% de Ni e um sólido com 43% Ni?

Resposta: A massa é conservada, logo as quantidades das fases em equilíbrio termodinâmico não podem ser iguais nesta temperatura.



Regra da alavanca

22

É usada para se determinar as quantidades das fases em equilíbrio em um campo de duas fases.

Dedução

- Chega-se à regra das alavancas simplesmente através de um balanço de massa.
- Consideremos W_L e W_α as frações mássicas, Respectivamente, da fase líquida, L, e da fase sólida, α .
- Cada componente do sistema pode estar em cada uma das fases, em concentração C_L (no líquido) e C_α (no sólido)
- As duas equações abaixo podem ser escritas:

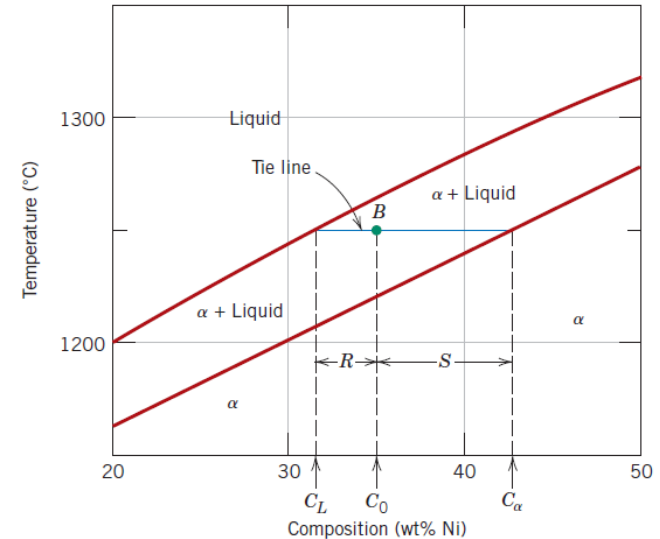
$$W_L + W_\alpha = 1 \rightarrow W_L = 1 - W_\alpha \quad (eq.I)$$

$$W_L C_L + W_\alpha C_\alpha = C_0 \quad (eq. II)$$

$$(1 - W_\alpha) C_L + W_\alpha C_\alpha = C_0$$

$$C_L - W_\alpha C_L + W_\alpha C_\alpha = C_0$$

$$W_\alpha (C_\alpha - C_L) = C_0 - C_L$$



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

Se, ao invés de isolar W_L na (eq.I) isolarmos W_α , chega-se à equação da fração de fase líquida.

Regra da alavanca

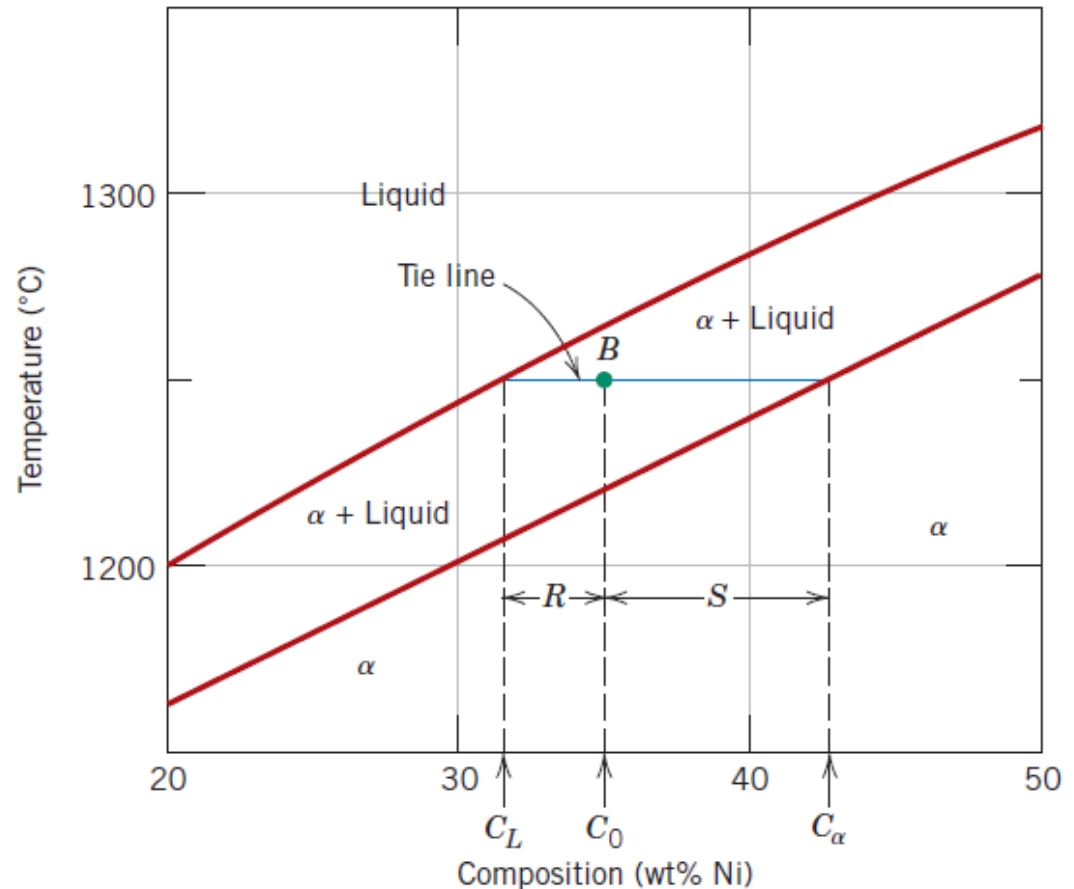
É usada para se determinar as proporções das fases em equilíbrio em um campo de duas fases

FRAÇÃO DE LÍQUIDO

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

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

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



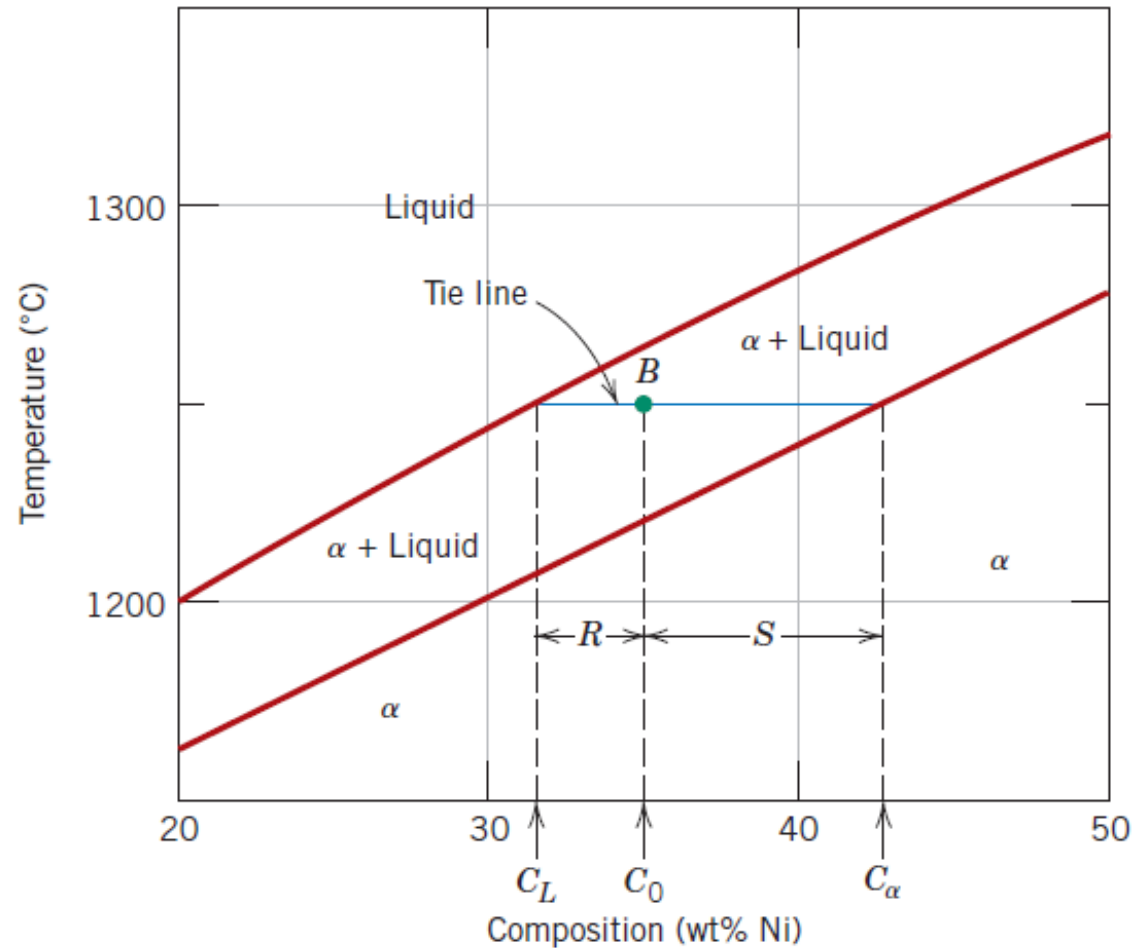
Regra da alavanca

FRAÇÃO DE SÓLIDO

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

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

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



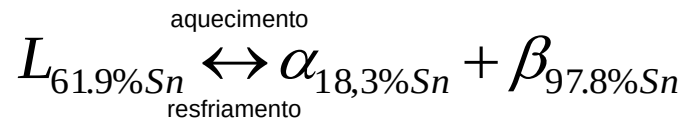
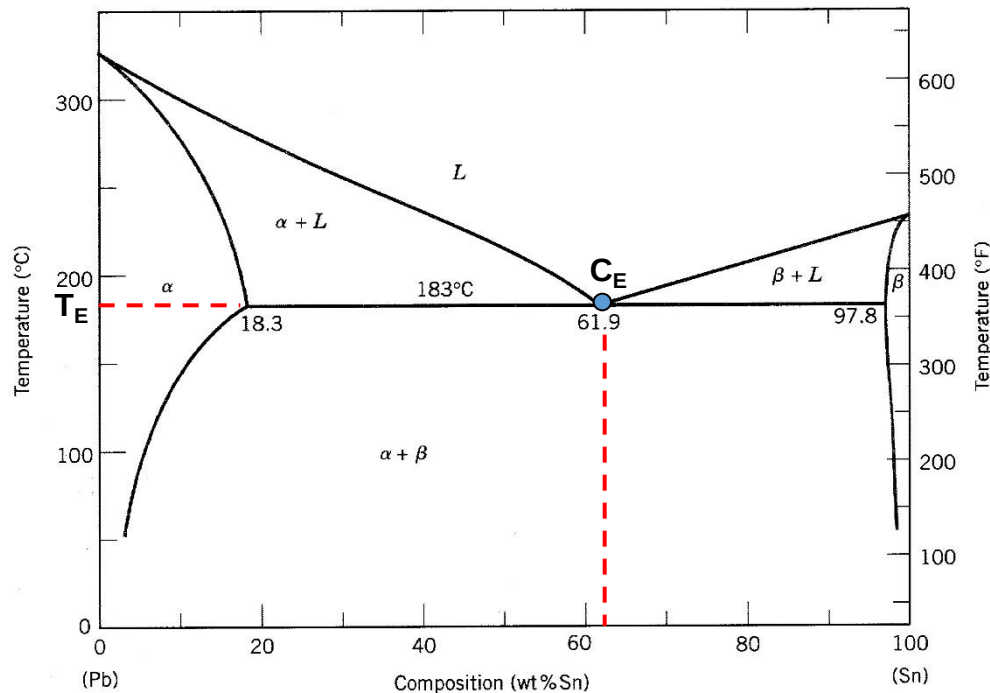
Diagramas de fase binários com três fases em equilíbrio

Diagramas de fase eutéticos

26

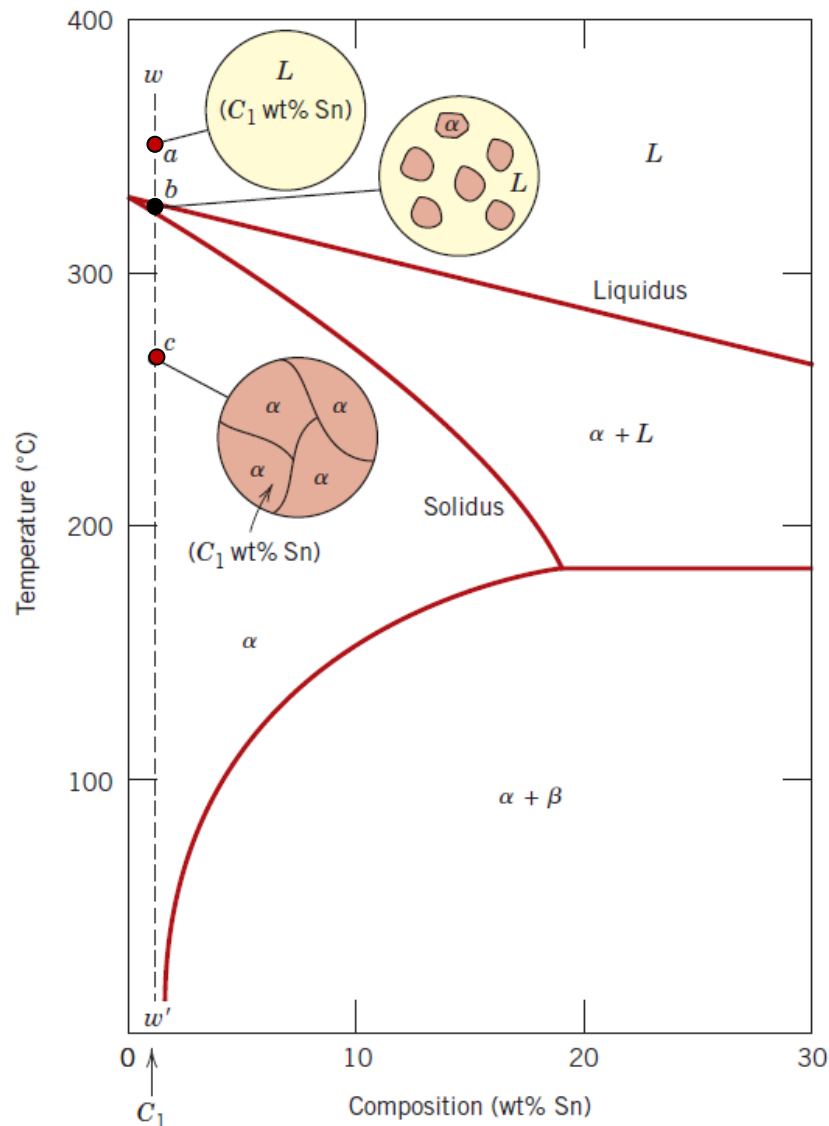
Eutético: O equilíbrio entre três fases ocorre a uma determinada temperatura (T_E) e a uma determinada composição (C_E), formando dois sólidos também com composições fixas.

$$L_{C_E} \underset{\text{resfriamento}}{\overset{\text{aquecimento}}{=}} \alpha_{C_\alpha^E} + \beta_{C_\beta^E}$$

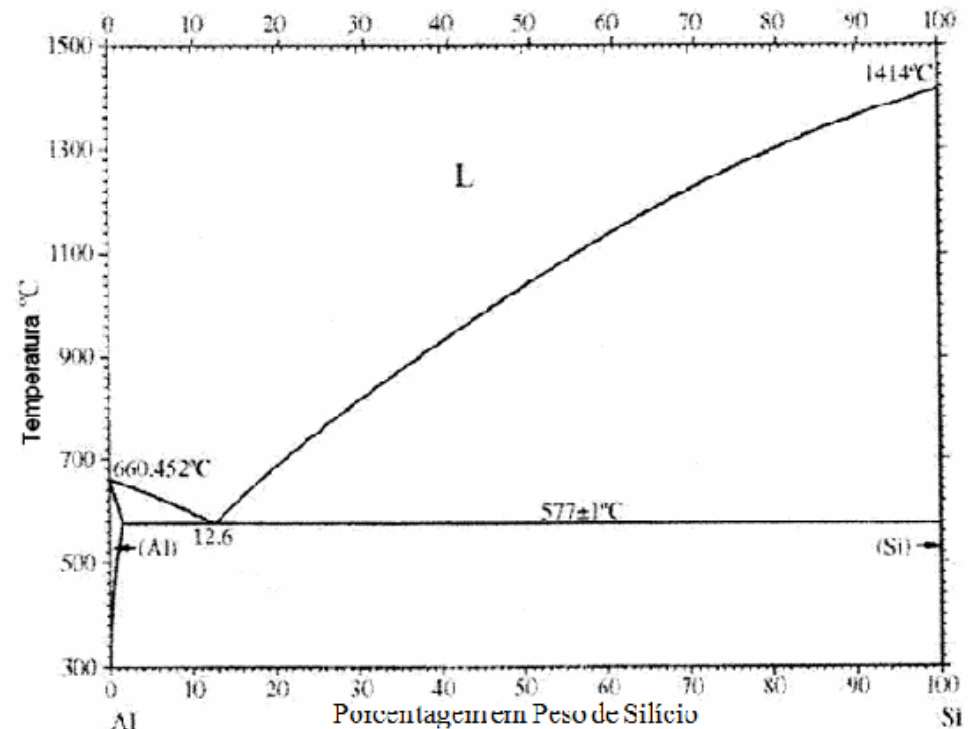


Microestrutura monofásica

27



- É comum ser muito pequena a faixa de composições químicas em que pode se formar uma estrutura monofásica (por exemplo, α).

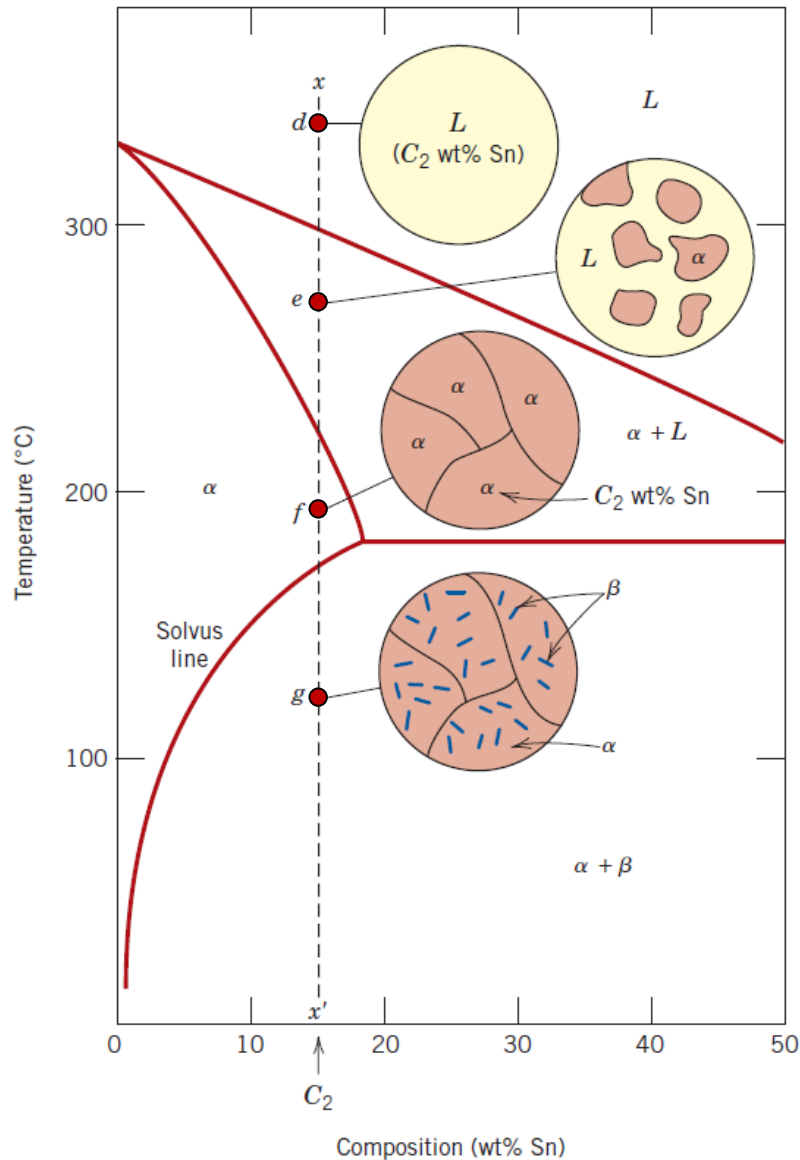


Precipitação de β em α .

28

PRECIPITAÇÃO

- Ao ser ultrapassado o limite de solubilidade (*linha solvus*) de Sn no Pb, ocorre a precipitação da fase β , de reticulado cristalino distinto do da fase α e com distintas propriedades físico-químicas.

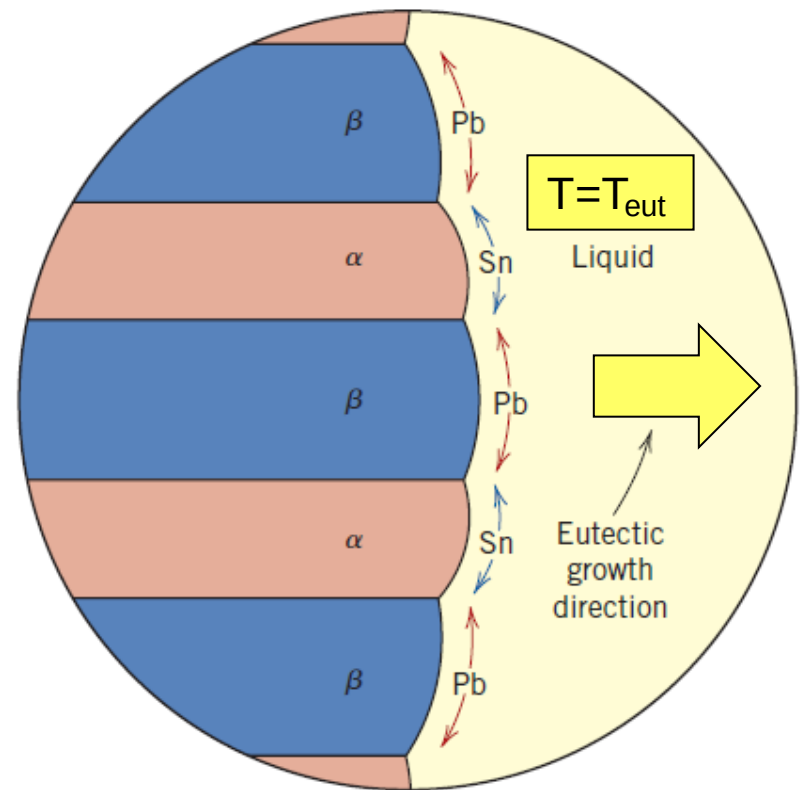
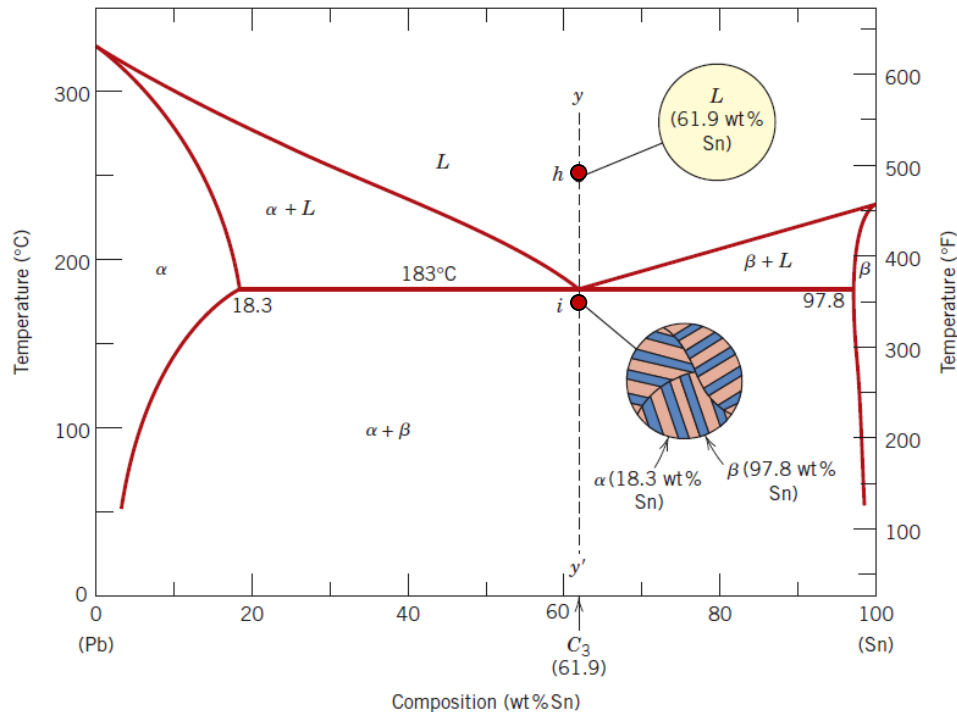


Eutéticos

29

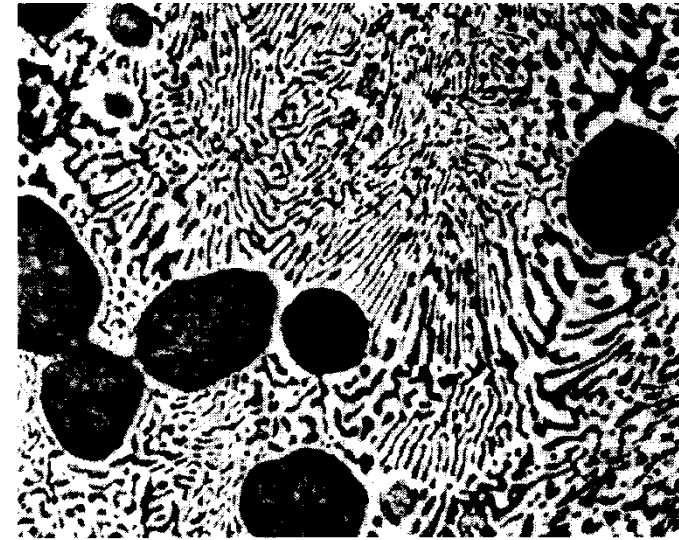
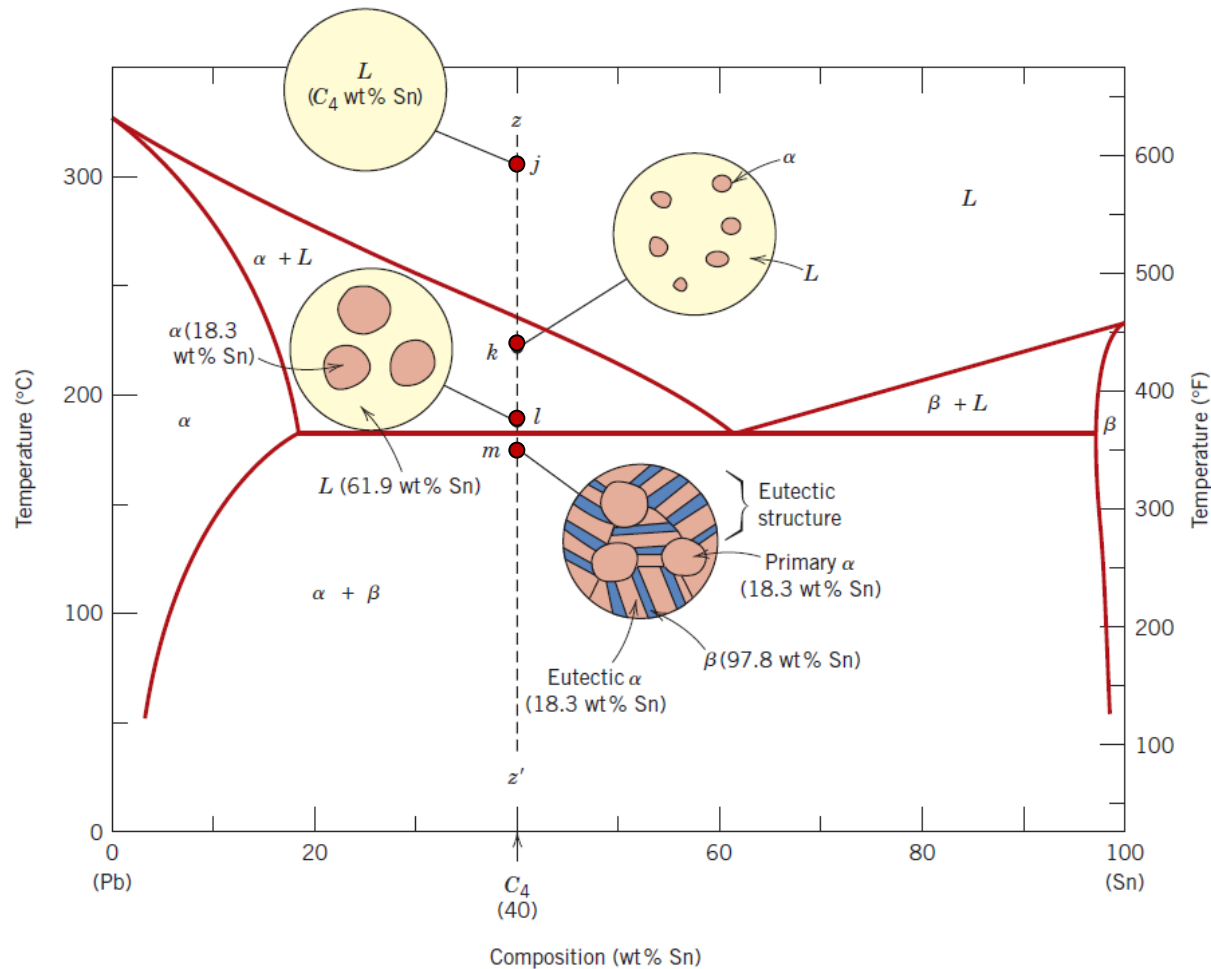


A transformação eutética corresponde à formação de uma mistura de duas fases ($\alpha + \beta$) a partir do líquido formando um arranjo interpenetrado



Crescimento cooperativo

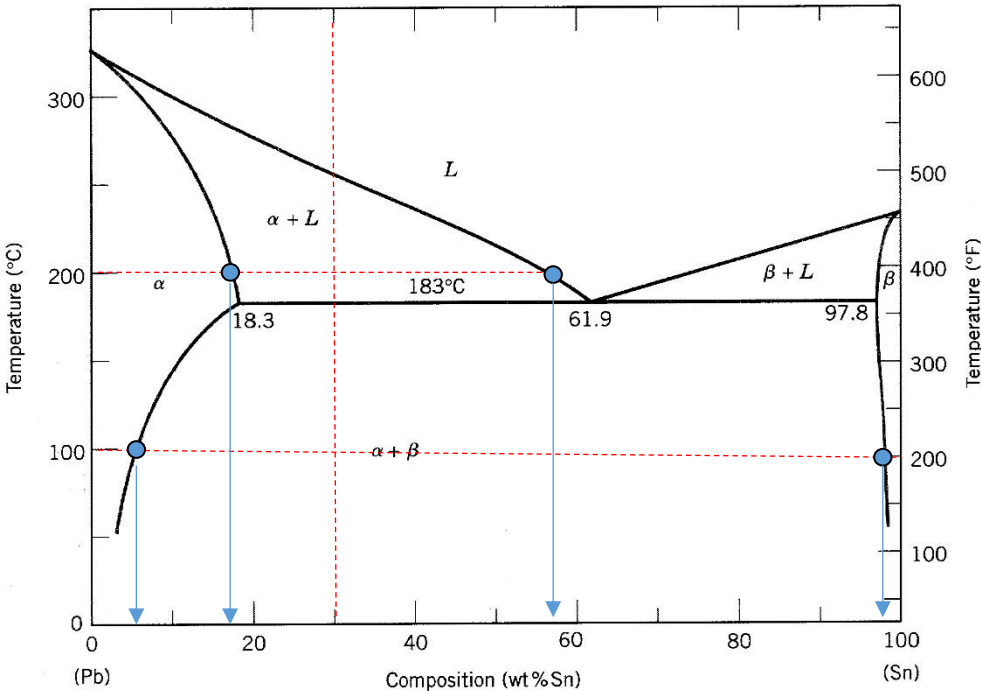
Hipo-eutéticos.



Em ligas hipo-eutéticas ocorre inicialmente precipitação de fase primária - *dendritas de α pró-eutéticas*.

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

Liga Pb30%Sn



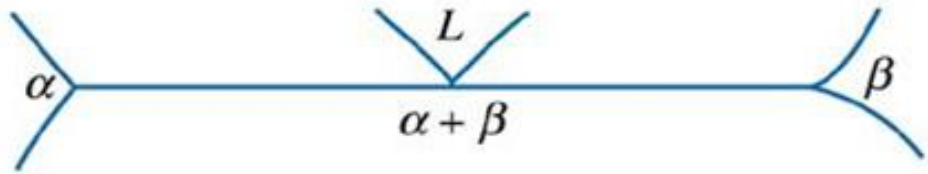
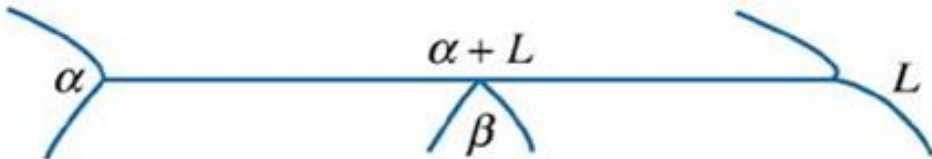
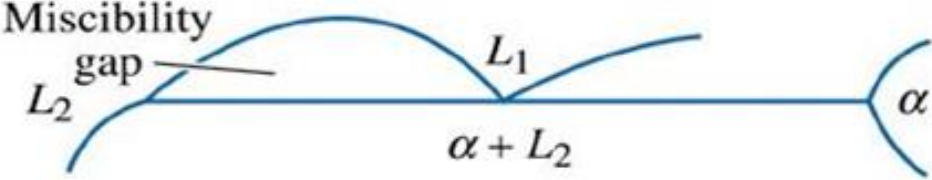
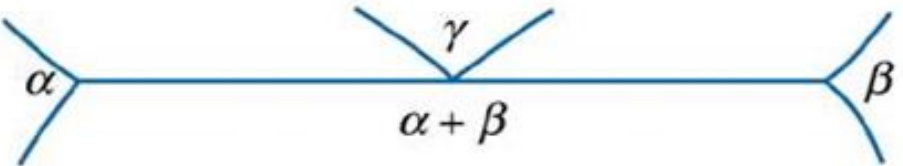
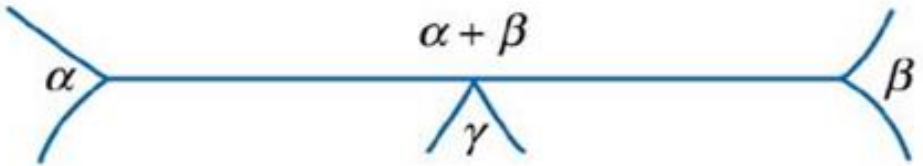
200° C

- 2 fases: α e L
- Fase α : 17%Sn
- Fase L: 57%Sn
- $M_{\alpha} = (57-30)*100/(57-17)=67,5\%$
- $M_L = (30-17)*100/(57-17)=32,5\%$

100° C

- 2 fases: α e β
- Fase α : 5%Sn
- Fase β : 97%Sn
- $M_{\alpha} = (97-30)*100/(97-5)=72,8\%$
- $M_{\beta} = 100 - M_{\alpha} = 27,2\%$

Outros tipos de diagramas

Eutectic	$L \rightarrow \alpha + \beta$	 A schematic phase diagram for a eutectic system. It shows a horizontal eutectic reaction line. Above the line, a liquid phase 'L' is represented by a downward-pointing V-shape. Below the line, two solid phases, 'α' and 'β', are represented by upward-pointing V-shapes. The label 'α + β' is placed below the horizontal line.
Peritectic	$\alpha + L \rightarrow \beta$	 A schematic phase diagram for a peritectic system. It shows a horizontal peritectic reaction line. To the left of the line, a solid phase 'α' is represented by an upward-pointing V-shape. To the right of the line, a liquid phase 'L' is represented by a downward-pointing V-shape. Below the horizontal line, a solid phase 'β' is represented by an upward-pointing V-shape. The label 'α + L' is placed above the horizontal line, and 'β' is placed below it.
Monotectic	$L_1 \rightarrow L_2 + \alpha$	 A schematic phase diagram for a monotectic system. It shows a horizontal monotectic reaction line. Above the line, a liquid phase 'L ₁ ' is represented by a downward-pointing V-shape. Below the line, a liquid phase 'L ₂ ' and a solid phase 'α' are represented by upward-pointing V-shapes. The label 'α + L ₂ ' is placed below the horizontal line. A 'Miscibility gap' is indicated by a curved line above the horizontal line, with an arrow pointing to it.
Eutectoid	$\gamma \rightarrow \alpha + \beta$	 A schematic phase diagram for an eutectoid system. It shows a horizontal eutectoid reaction line. Above the line, a solid phase 'γ' is represented by a downward-pointing V-shape. Below the line, two solid phases, 'α' and 'β', are represented by upward-pointing V-shapes. The label 'α + β' is placed below the horizontal line.
Peritectoid	$\alpha + \beta \rightarrow \gamma$	 A schematic phase diagram for a peritectoid system. It shows a horizontal peritectoid reaction line. To the left of the line, a solid phase 'α' is represented by an upward-pointing V-shape. To the right of the line, a solid phase 'β' is represented by a downward-pointing V-shape. Below the horizontal line, a solid phase 'γ' is represented by an upward-pointing V-shape. The label 'α + β' is placed above the horizontal line, and 'γ' is placed below it.

(c)2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning, Inc. is a trademark used herein under license.

Diagrama de Fases Fe-C

33

A metalurgia do ferro é uma das bases da civilização há pelo menos 2.500 anos e é um dos pilares da sociedade industrial.

- O **C** forma uma solução sólida intersticial com o **Fe**, mas com solubilidade limitada
- Atingido o limite de solubilidade forma-se o composto Fe_3C um **carbeto de ferro** chamado cementita,.
- A solubilidade do C na ferrita é muito baixa (0,020 %) comparada com a solubilidade na austenita (2,04 %)
- **FERRITA** (solução sólida intersticial do C no Fe- α)
 - ✓ Fe- α : CCC
- **AUSTENITA** (solução sólida intersticial do C no Fe- γ)
 - ✓ Fe- γ : CFC
- **FERRITA δ** (solução sólida intersticial do C no Fe- δ)
 - ✓ Fe- δ : CCC
- **CEMENTITA**
 - ✓ Fe_3C
- **PERLITA** (não é fase, é morfologia)
 - ✓ Microestrutura formada por lamelas alternadas Fe_3C e ferrita

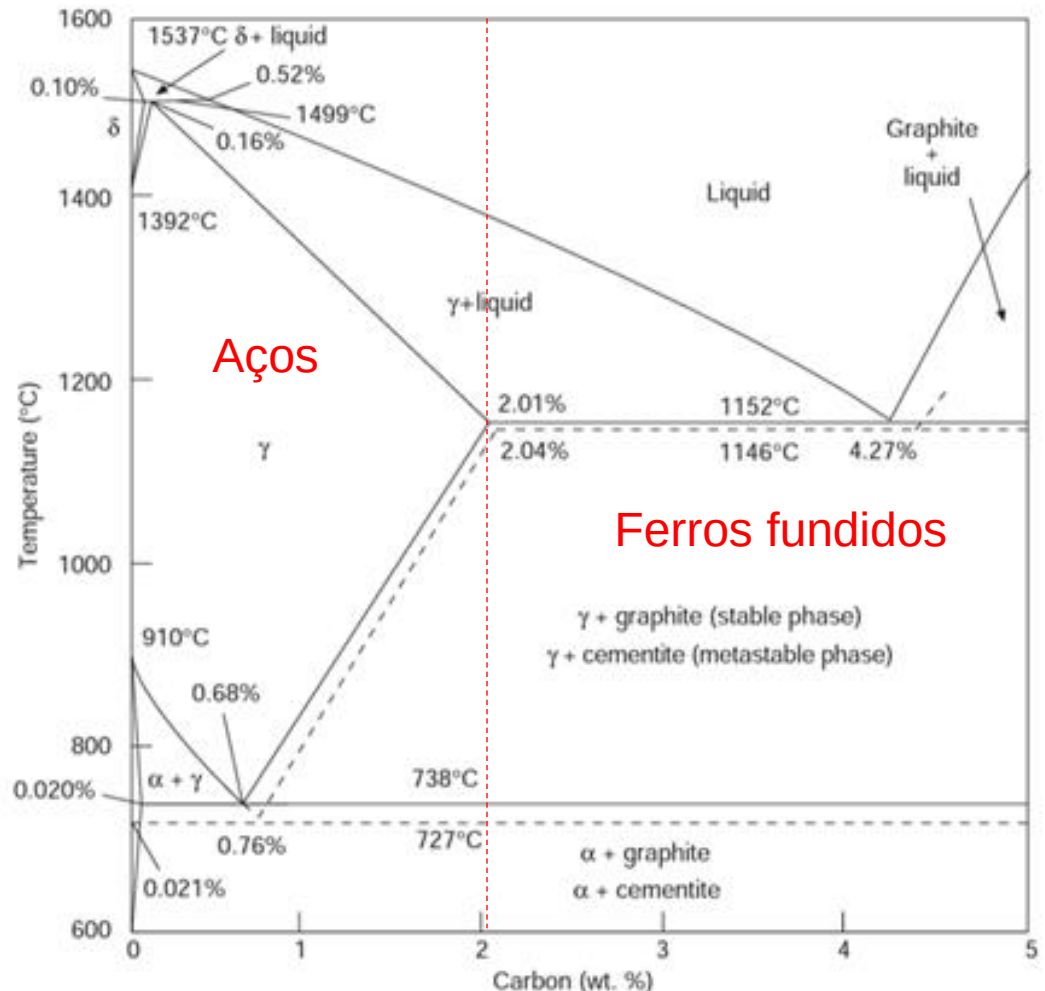
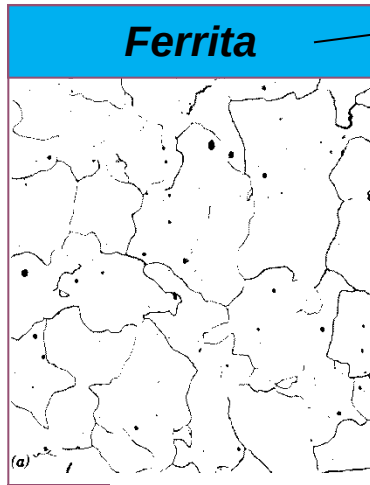


Diagrama de Fases Fe-Fe₃C

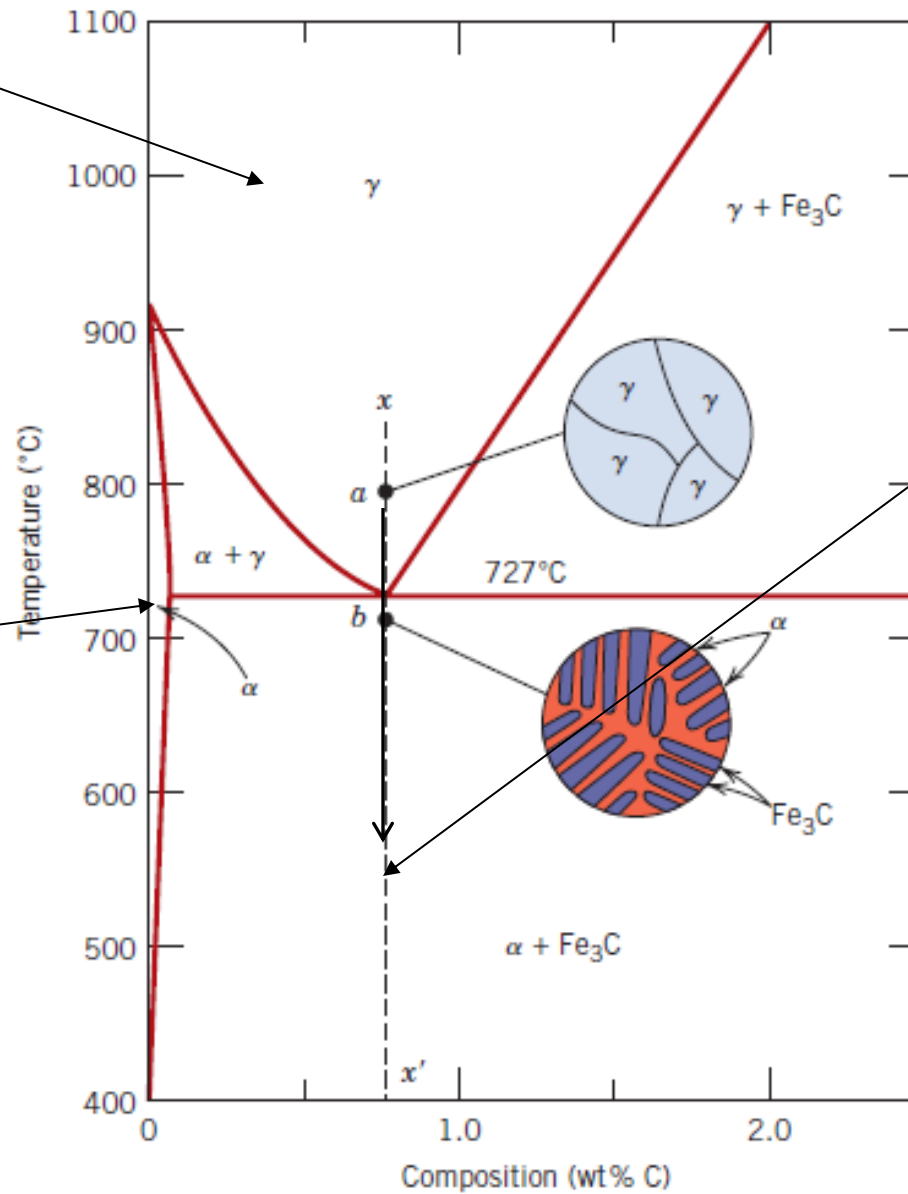
34



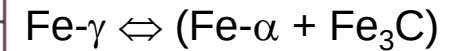
325x



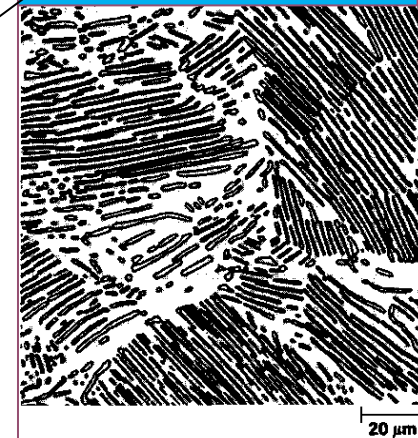
90x



**TRANSFORMAÇÃO
EUTETÓIDE:**



**Microestrutura
PERLÍTICA**

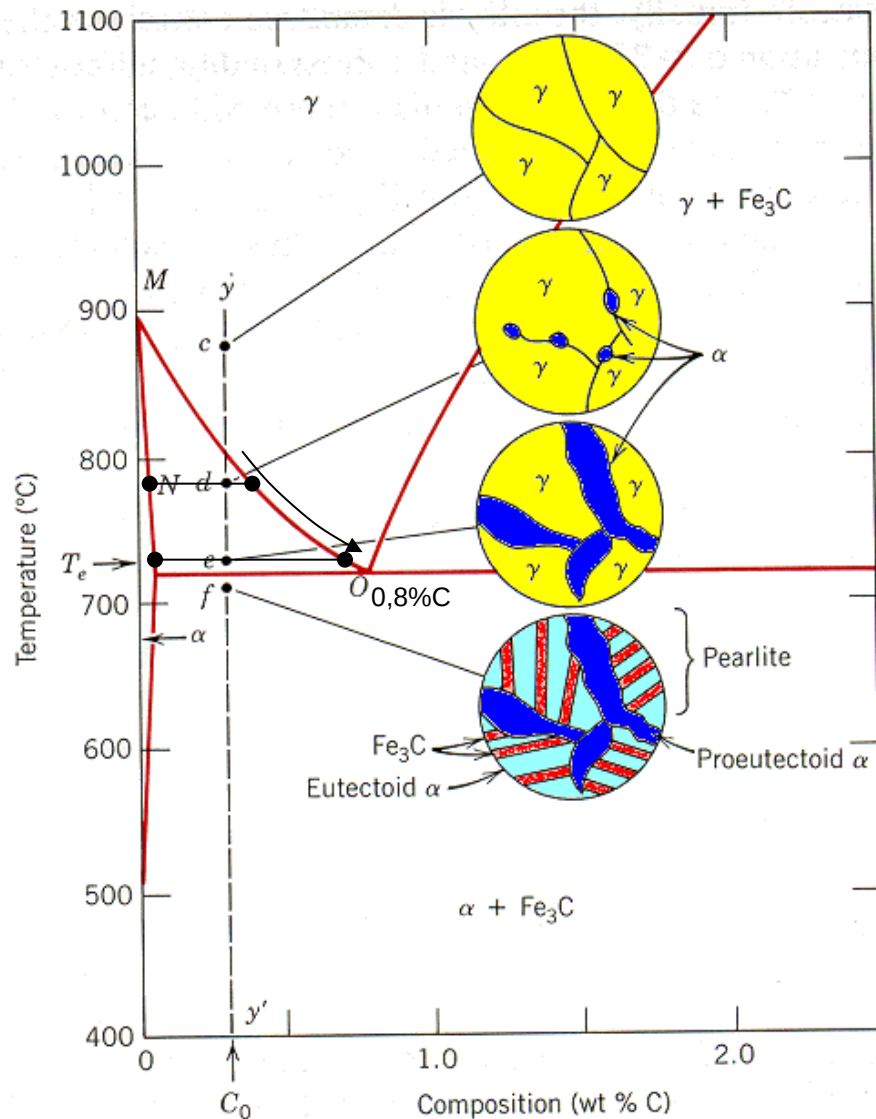


500x

Crescimento cooperativo

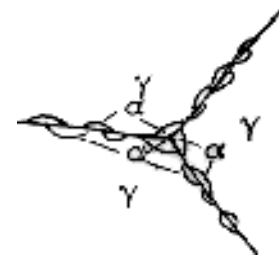
Diagrama de Fases Fe-Fe₃C

Transformação nos Aços Hipoeutetóides



Ponto c: Grãos de Austenita (γ) CFC

Ponto d: Nucleação e crescimento da ferrita (α – CCC) nos contornos de grão da austenita (γ – CFC).



Os contornos de grão apresentam elevada energia interfacial que é aproveitada facilitando a nucleação da nova fase.

Ponto e: Aumento da proporção de ferrita na austenita.

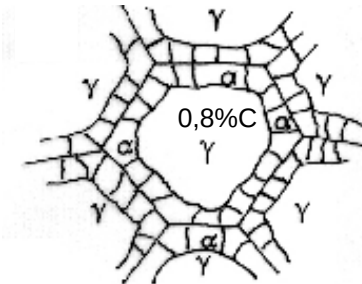
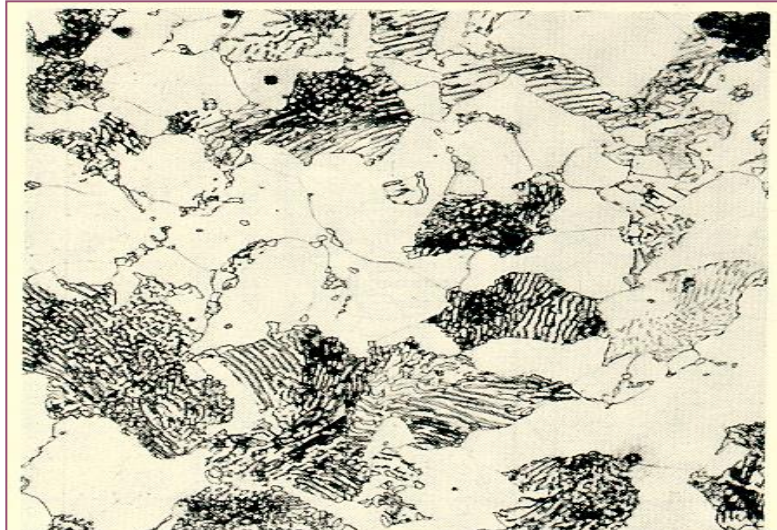
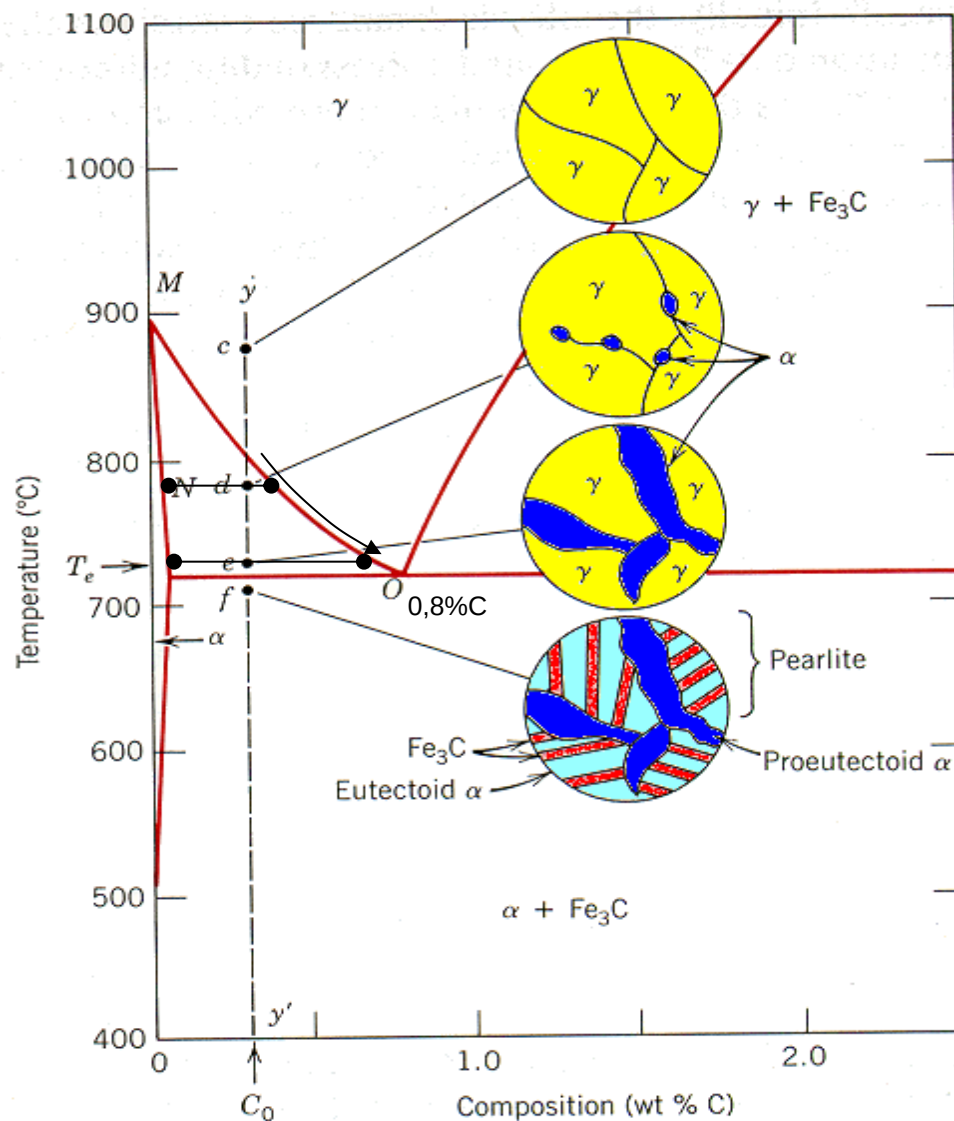


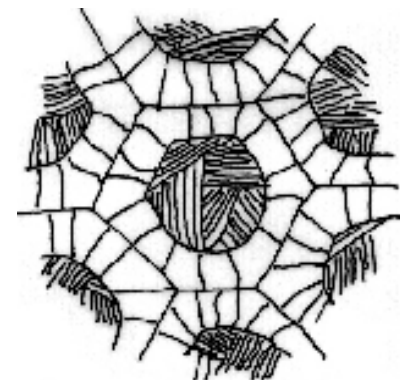
Diagrama de Fases Fe-Fe₃C

Transformação nos Aços Hipoeutetóides



Microestrutura de um aço 0,38% C resfriado lentamente (isto é, em condições próximas ao equilíbrio).

Ponto f: Crescimento de perlita a partir da austenita de composição eutetóide abaixo da temperatura eutetóide.



RESUMO

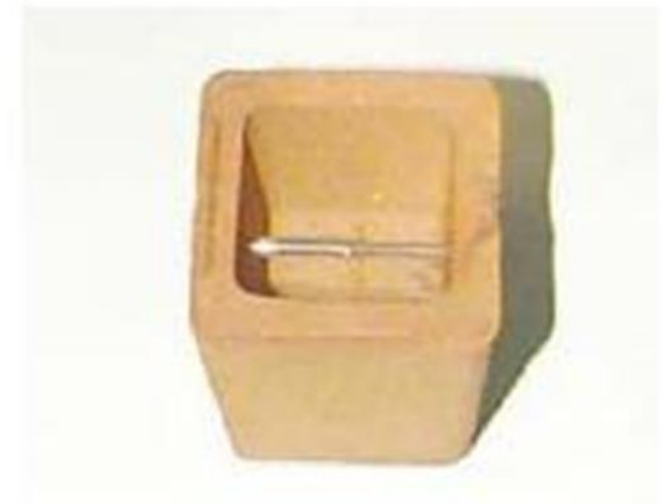
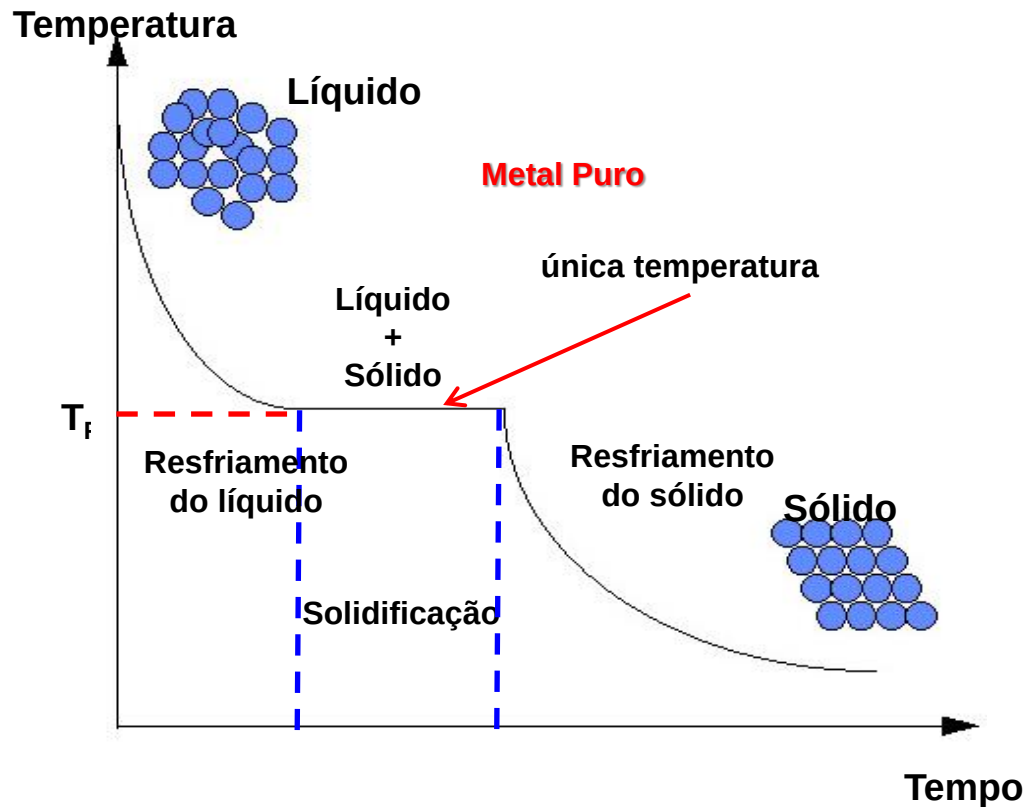
- Os **diagramas de fases** permitem o conhecimento das fases (número, quantidades e composições) presentes em determinada temperatura (e pressão) num dado material com composição química conhecida, em equilíbrio termodinâmico.
- A **regra das fases de Gibbs** ($P + F = C + N$) permite identificar o número de fases (**P**) associadas a uma condição de estado, a qual é definida como um conjunto de valores de temperatura (**N**) (e pressão), número de componentes (**C**) e outras variáveis necessárias para descrição do material (**F**).
- São **pontos invariantes** mais comuns: a fusão do componente puro e as transformações eutética, eutetóide, peritética e peritetóide (estas duas últimas a serem introduzidas em aulas posteriores)
- Num diagrama de fases, a **regra da alavanca** permite a determinação da quantidade relativa das fases em equilíbrio.

- **Capítulos do Callister (7ª ed., 2008) tratados nesta aula**
 - Itens do Capítulo 9: 9.1 A 9.12, 9.17
- **Outras referências importantes**
 - Callister – 5ª ed. Capítulo 9 do 9.1 até 9.7; 9.12
 - Shackelford, J. F. – Ciência dos Materiais, 6ª ed., 2008. Cap. 9
- Van Vlack , L. - Princípios de Ciência dos Materiais, 3ª ed.
 - os temas tratados nesta aula estão dispersos pelo livro do Van Vlack, e não são completamente cobertos nessa referência; os itens que apresentam assuntos tratados na aula são os seguintes:
 - Itens 9-1 a 9-9; 9-15; 10-9

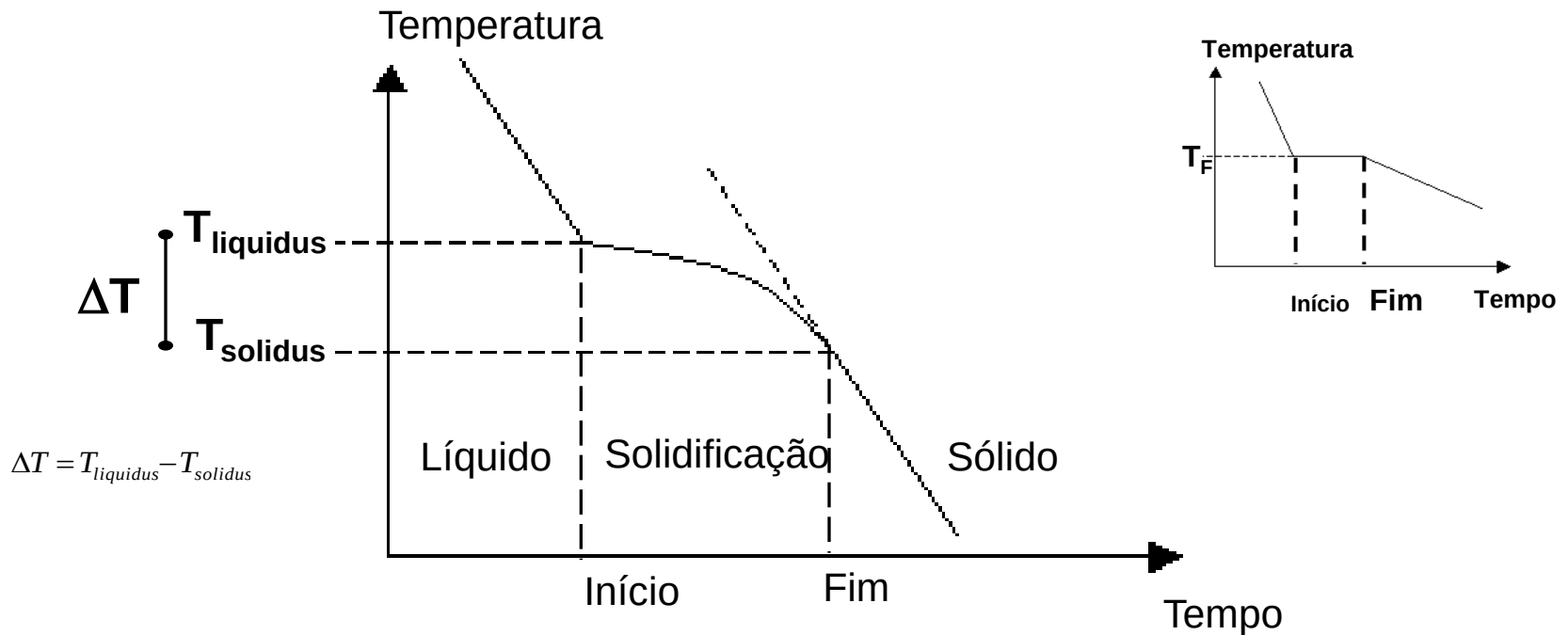
ANEXOS

Como se constrói experimentalmente um diagrama de fases?

- **Análise térmica:** Técnica experimental termo-analítica que identifica mudanças de estado em função da temperatura as quais envolvem geração de entalpia. Por exemplo, a passagem do estado líquido para o estado sólido.



Copo em Shell Molding com termopar

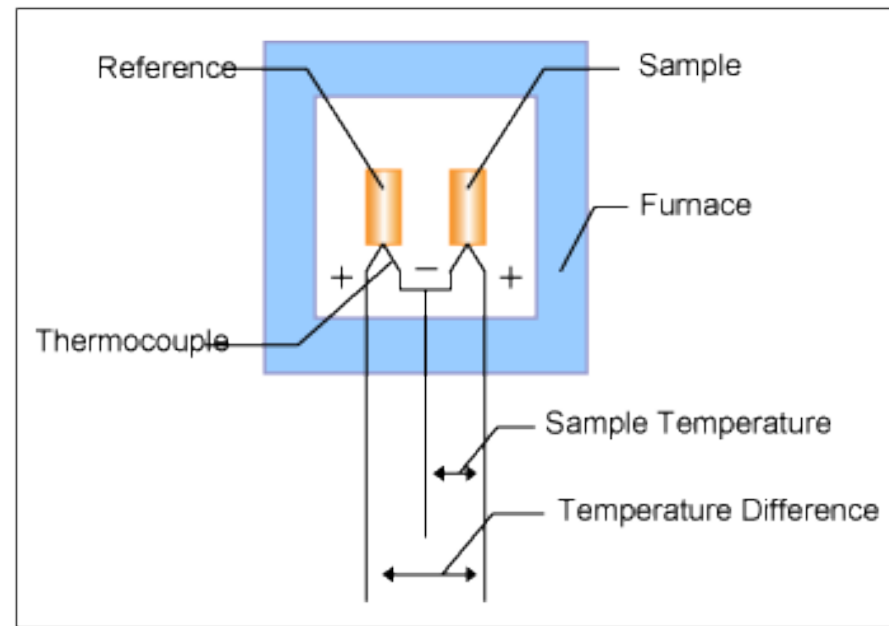
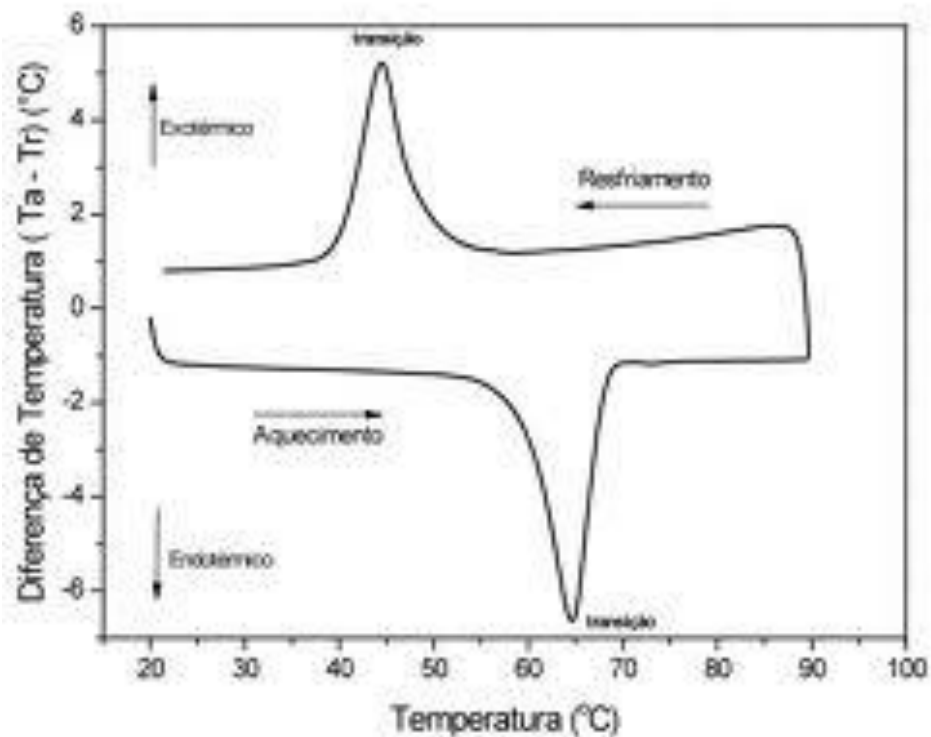


- a solidificação ocorre em um **INTERVALO DE TEMPERATURA (ΔT)**.

Temperatura liquidus = temperatura onde existe equilíbrio entre o líquido e os primeiros núcleos de sólido que se formaram. Acima desta temperatura a fase líquida é a fase estável.

Temperatura solidus = temperatura abaixo da qual o material é completamente sólido.

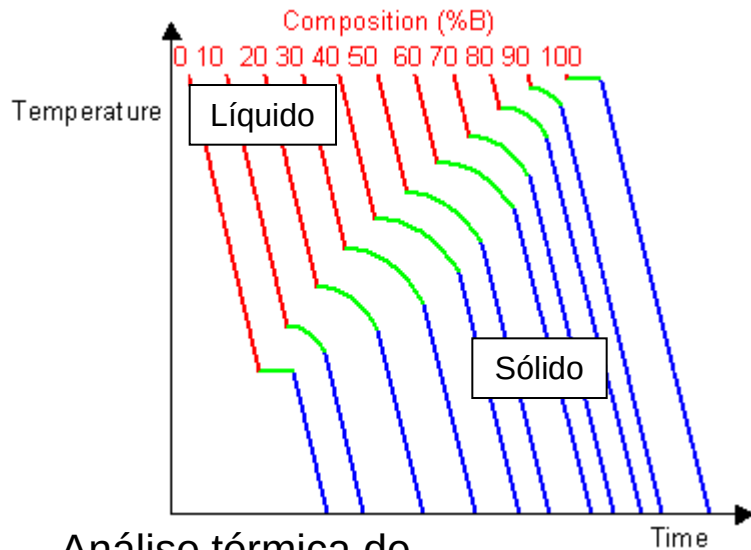
Análise Térmica Diferencial



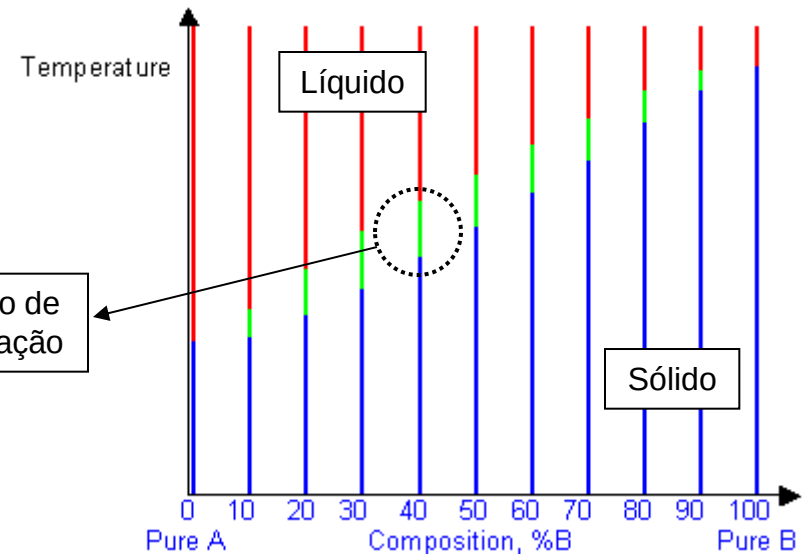
Outros métodos

- Metalografia – óptica e eletrônica
- Difração de raios-X
- Dilatometria
- ...

Diagrama de fase de uma liga A-B por análise térmica



Análise térmica de
diversas composições
químicas



Intervalos de
solidificação em função
da composição
(Despreza-se o tempo)

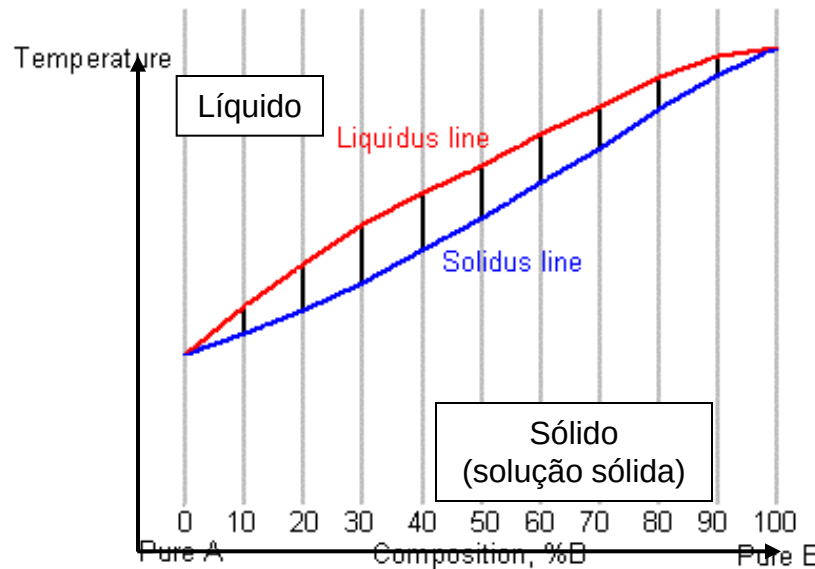
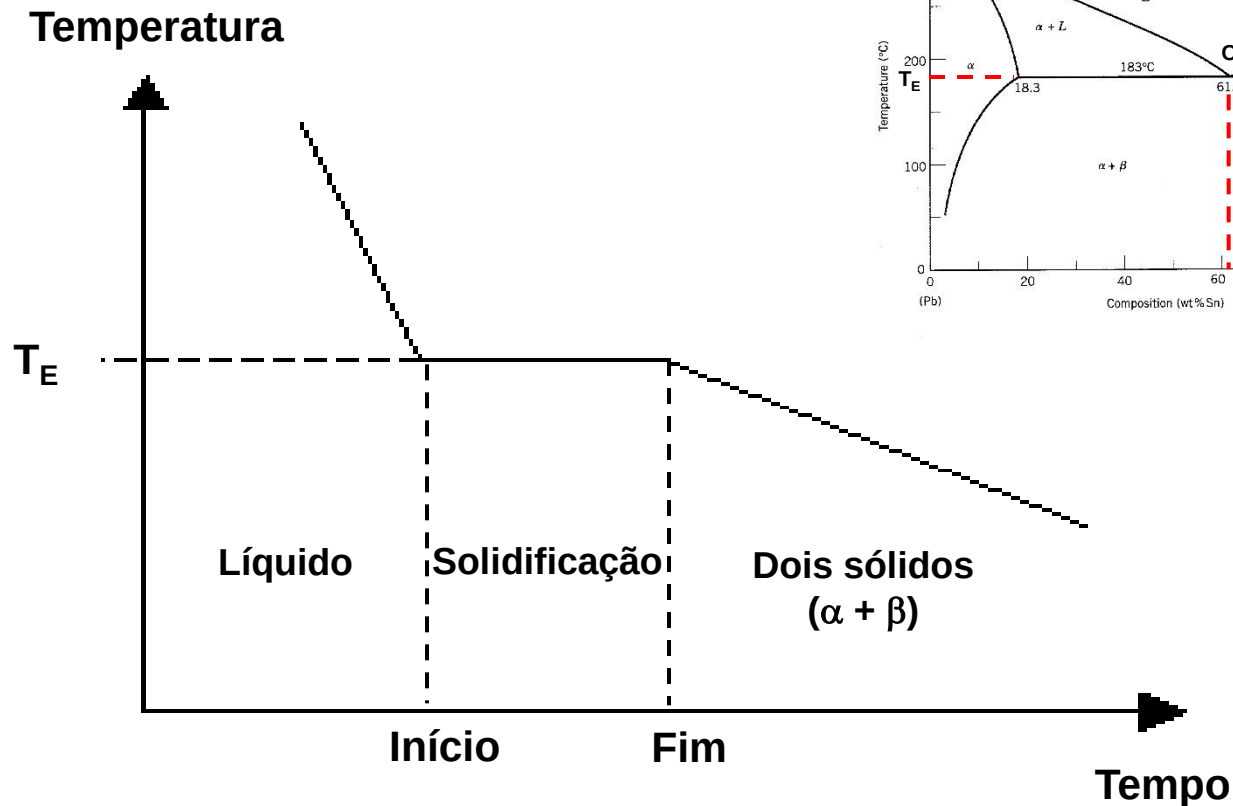


Diagrama de fases

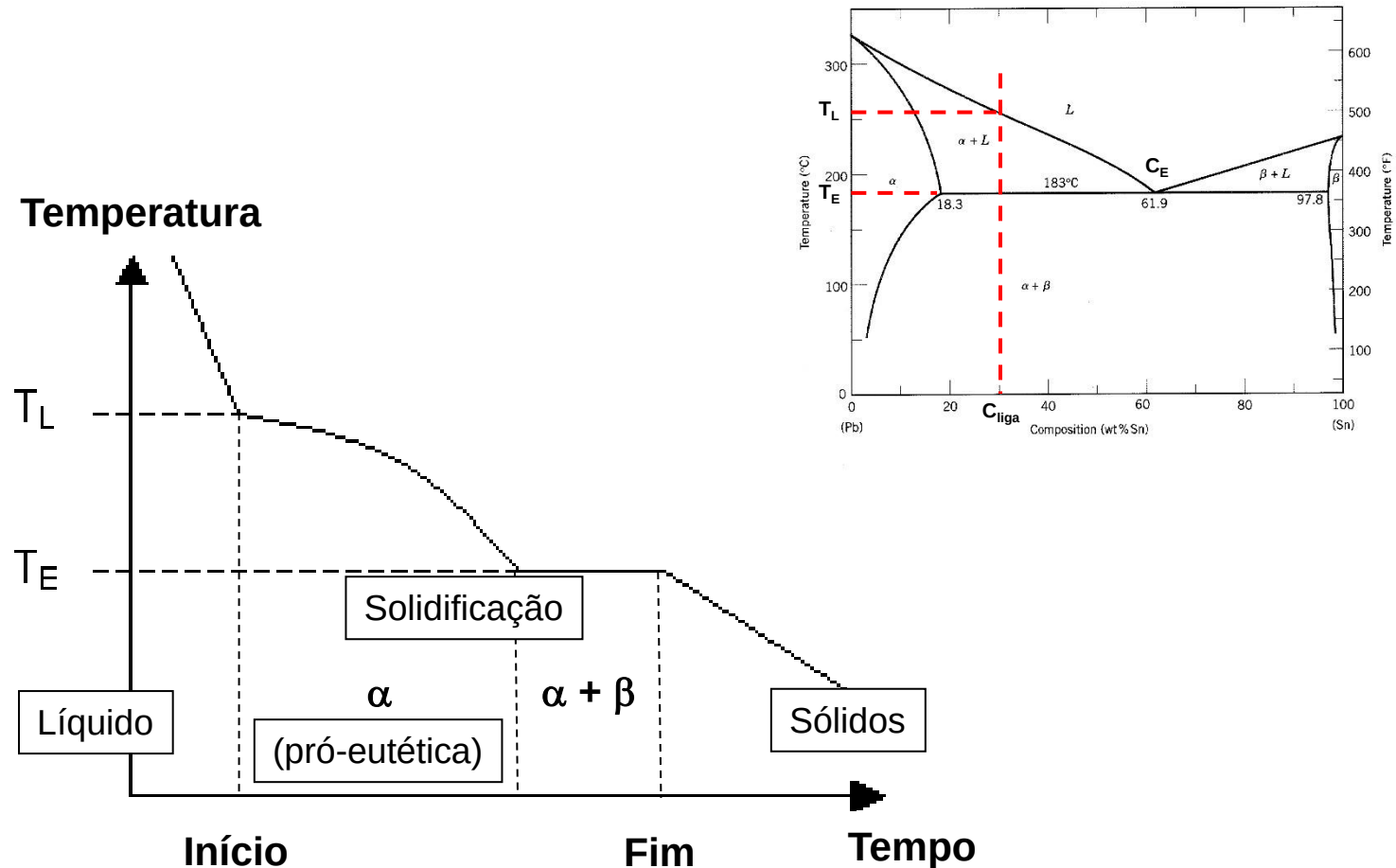
Análise térmica da solidificação: liga eutética.



- a solidificação ocorre em uma **TEMPERATURA CONSTANTE**, a temperatura eutética (T_E).

Análise térmica da solidificação: liga hipoeutética.

46



$$P + F = C + N$$

- **P** = número de fases presentes
- **C** = número de componentes do sistema
- **N** = número de variáveis além da composição química das fases. Por exemplo: temperatura e pressão.
- **F** = graus de liberdade
 - Número de variáveis externas controláveis que são especificadas para definir completamente o estado de um sistema. Esta variáveis podem ser alteradas de forma independente sem alterar o número de fases existente no sistema.
- A regra das fases **representa** um critério para o **número de fases** que coexistirão num sistema no equilíbrio.
- A regra das fases **não representa** um critério para **quantidade relativa** das fases que coexistem num sistema no equilíbrio.

Regra das fases de Gibbs aplicada em um diagrama de fases isomorfo

$$P + F = C + N$$

N = variáveis além da composição química = 1
(pressão é constante)

Ponto A

C = componentes = 1 (Cu)

P = número de fases = 2 (sólido e líquido).

$$2 + F = 1 + 1$$

$$F = 0$$

Assim, o ponto A é um **ponto invariante**, isto é, a temperatura de fusão do cobre puro é única.

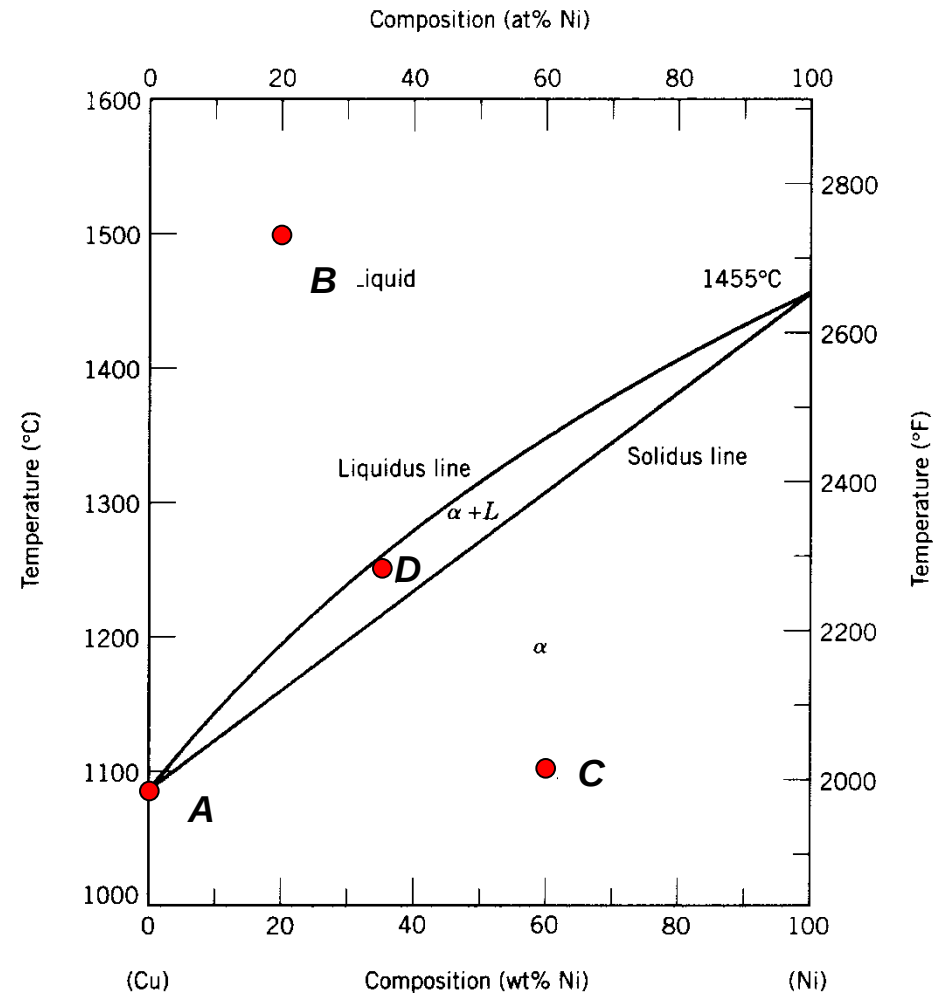


Diagrama de fases do Sistema Cu - Ni

Regra das fases de Gibbs aplicada em um diagrama de fases isomorfo

$$P + F = C + N$$

N = variáveis além da composição química = 1
(pressão é constante)

Ponto B ou Ponto C

C = componentes = 2 (Cu e Ni)

P = número de fases = 1 (ponto B fase líquida e no ponto C a fase sólida).

$$1 + F = 2 + 1$$

$$F = 2$$

Assim, nos pontos B e C são necessárias duas variáveis para definir o estado do sistema, a composição química e a temperatura. Em B a temperatura é de 1500°C e a composição de 20% de Ni. Em C a temperatura é de 1100°C e a composição é de 60% de Ni.

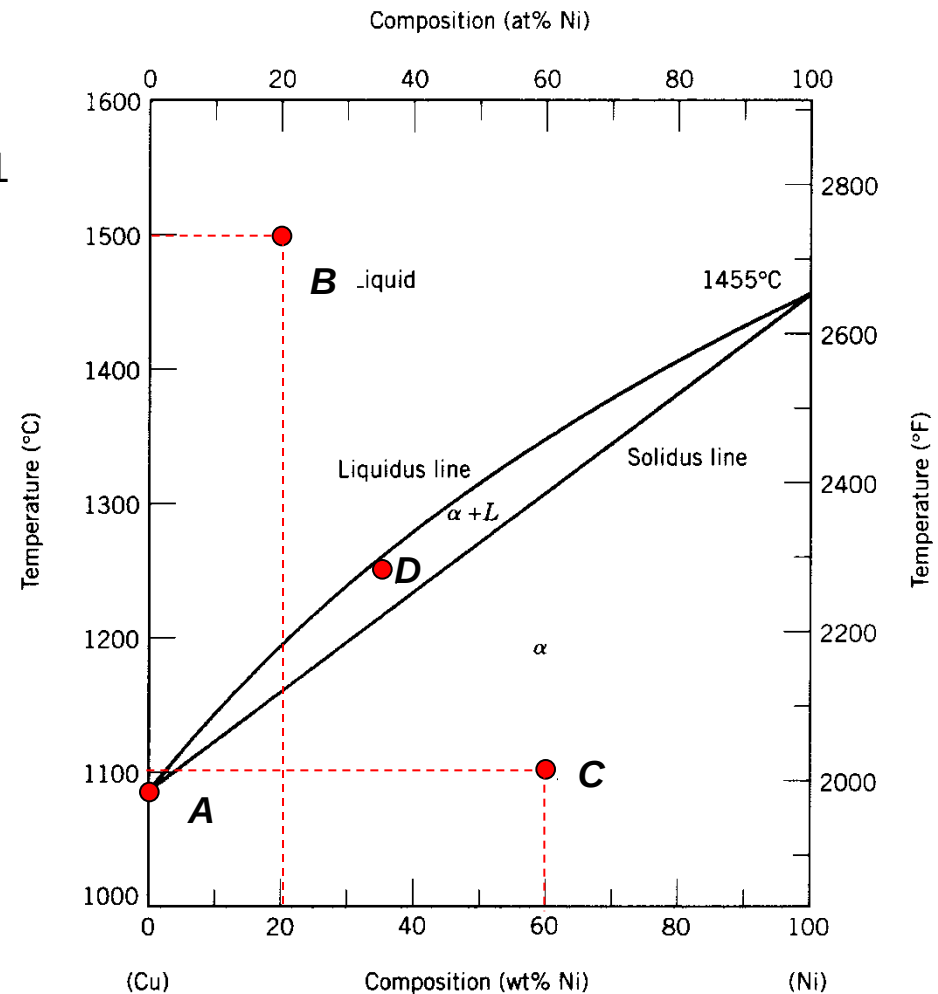


Diagrama de fases do Sistema Cu - Ni

Regra das fases de Gibbs aplicada em um diagrama de fases isomorfo.

N = variáveis além da composição química = 1
(pressão é constante)

Ponto D

$$P + F = C + N$$

C = componentes = 2 (Cu e Ni)

P = número de fases = 2 (sólido em equilíbrio termodinâmico com o líquido).

$$2 + F = 2 + 1$$

$$F = 1$$

Assim, para descrever o estado no ponto D basta uma variável, ou a temperatura ou a composição química de uma das fases (C_L ou C_S). Desta maneira, se for especificada a temperatura de 1250°C, a composição da fase líquida é de 33% de Ni e da fase sólida de 44% Ni. Por outro lado, se for especificada a composição química de uma das fases em equilíbrio termodinâmico, a composição da outra fase e a temperatura são automaticamente definidas.

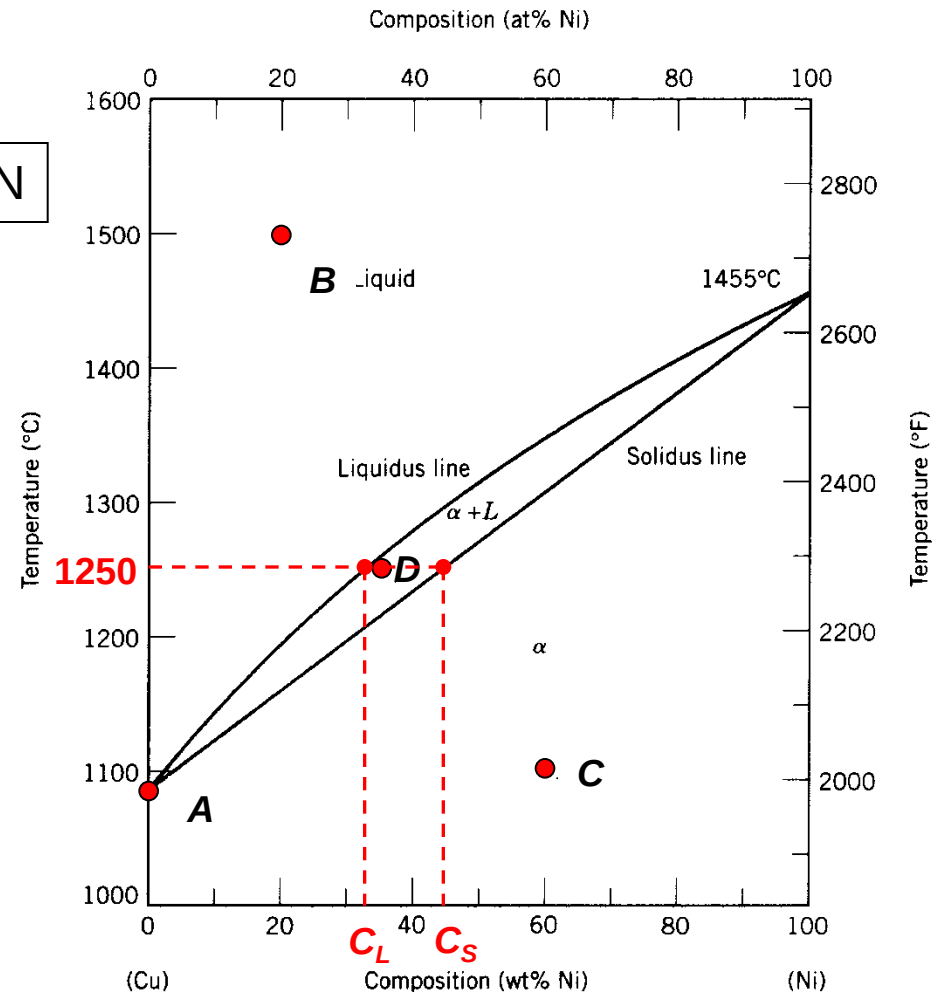


Diagrama de fases do Sistema Cu - Ni

Regra das fases de Gibbs

diagrama de fases binário com três fases em equilíbrio

$$P + F = C + N$$

N = variáveis além da composição química = 1
(pressão é constante)

Ponto D

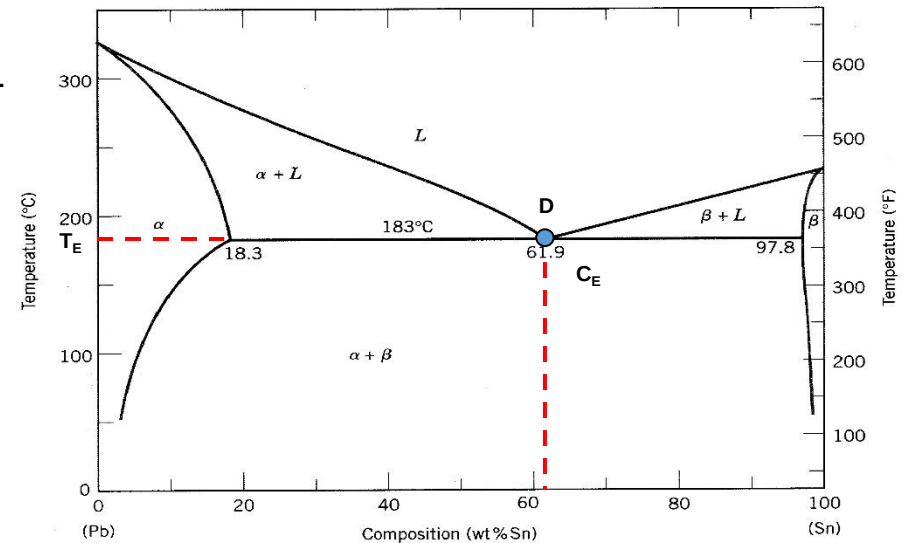
C = componentes = 2 (Pb e Sn)

P = número de fases = 3.

$$3 + F = 2 + 1$$

$$F = 0$$

Assim, o equilíbrio de três fases é invariante, isto é, sua temperatura é única e as composição das fases envolvidas também são únicas.

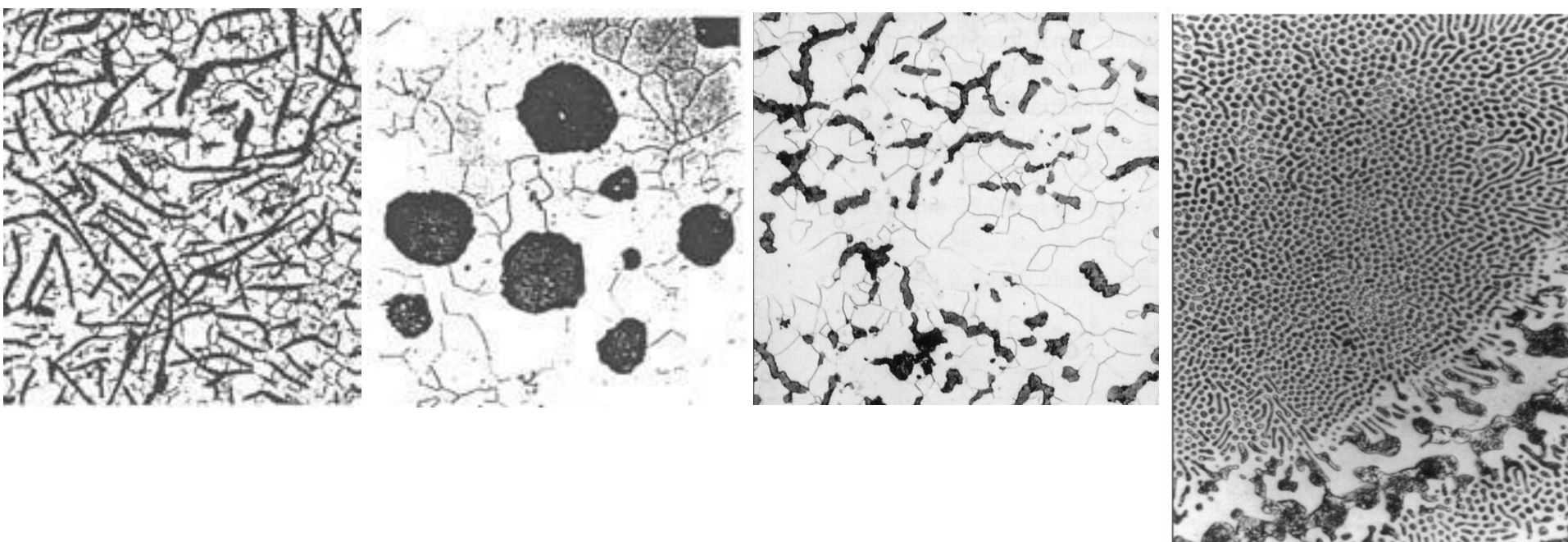


$L \rightarrow S_1 + S_2 = \text{eutético}$

$S \rightarrow S_1 + S_2 = \text{eutetóide}$

Sistema Fe-C

- Região do eutético: **ferros fundidos (fofo)**
 - **A forma da grafita determina o tipo de fofo**
 - **Cinzento:** grafita em flocos ou plaquetas
 - **Nodular:** grafita em esferas (nódulos)
 - **Vermicular:** mistura das anteriores
 - **Para o sistema Fe-Fe₃C:**
 - **Ferro fundido branco**



MICROESTRUTURA

Liga Cu-Ni

