



ECM1 2020

Lauralice de C. F. Canale

Depto de Eng Materiais

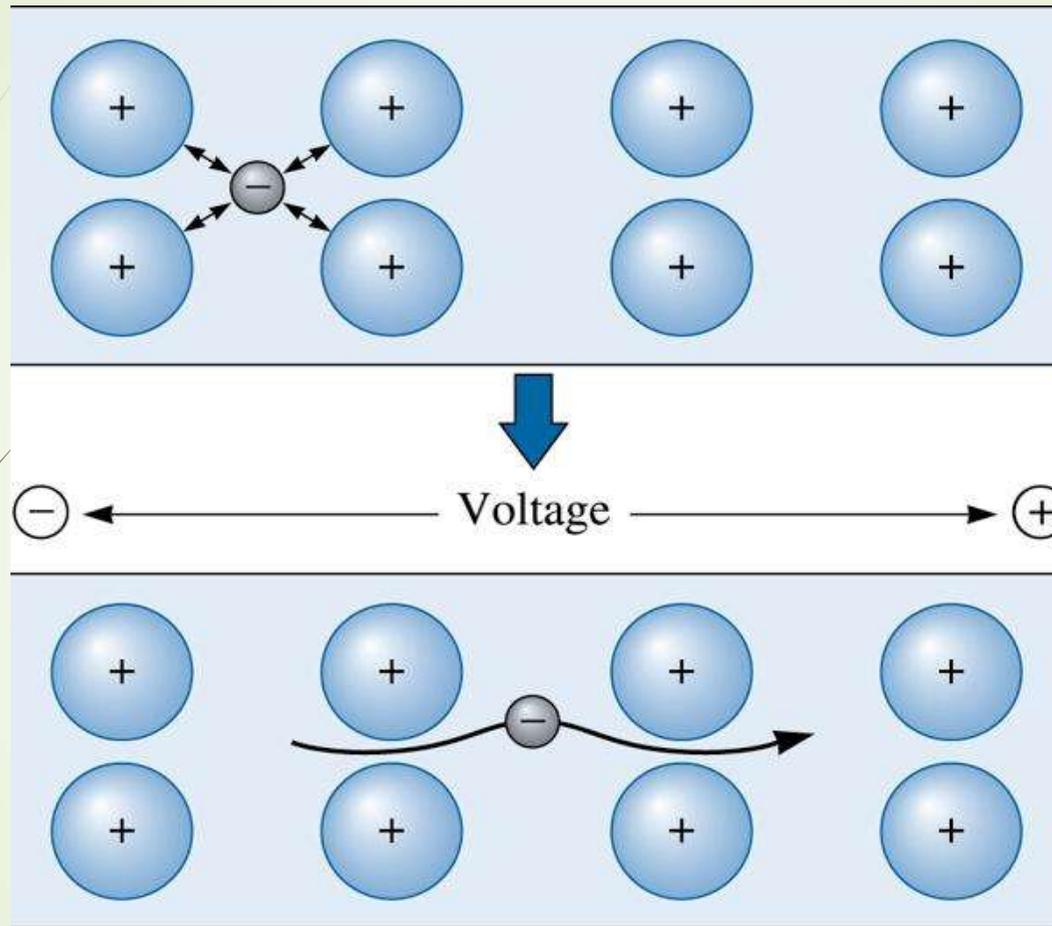
EESC-USP

Materiais metálicos são geralmente constituídos por elementos químicos metálicos.

Nesses materiais existem elétrons de grande mobilidade por causa da ligação metálica entre os átomos, o que lhes confere algumas propriedades típicas:

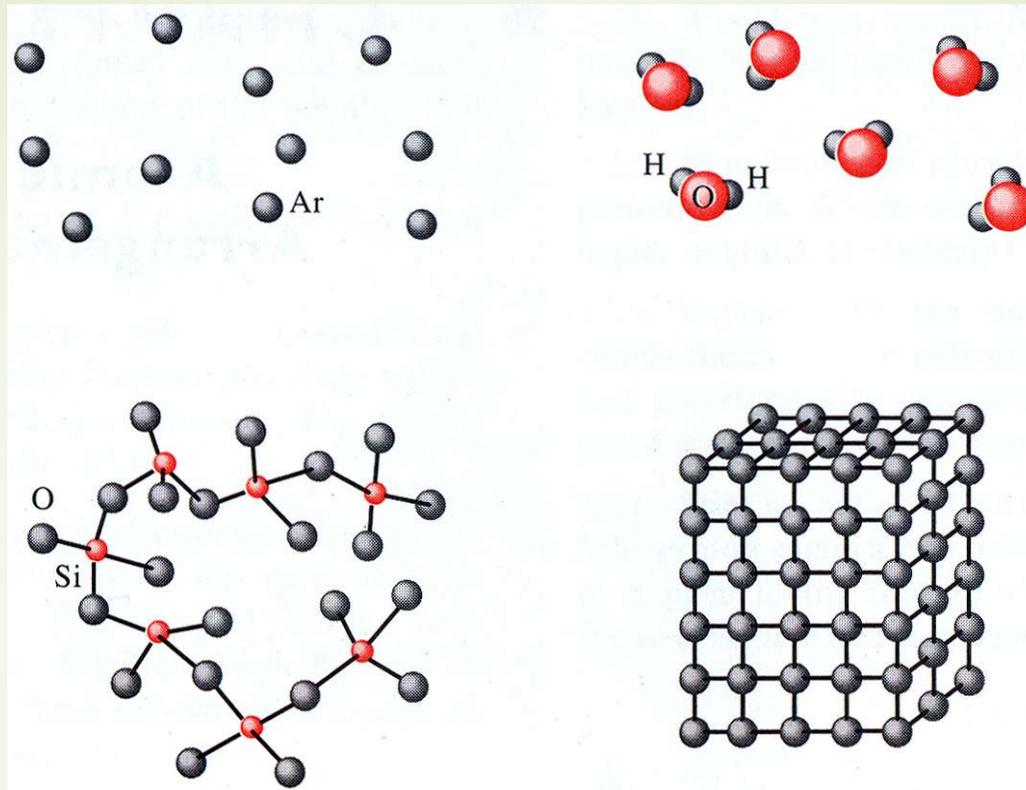
alta condutividade térmica e elétrica.

LIGAÇÃO METÁLICA



Quando uma voltagem é aplicada ao metal, os elétrons da nuvem comum aos átomos podem mover-se facilmente e criar uma corrente.

ESTRUTURA DOS SÓLIDOS CRISTALINOS



ARRANJOS ATÔMICOS (MOLECULARES)

ORDENAMENTOS DE CURTO E LONGO ALCANCE

1 - GASES NOBRES (Ar) = NENHUM ARRANJO ESPACIAL DEFINIDO (PREENCHEM TOTALMENTE O ESPAÇO DE CONFINAMENTO)

2 - VAPORES, LÍQUIDOS E SÓLIDOS AMORFOS (VIDRO) = ARRANJO ORDENADO DE CURTO ALCANCE (DA ORDEM DE ÁTOMOS E MOLÉCULAS VIZINHAS)

3 - VIRTUALMENTE TODOS OS METAIS, MUITOS CERÂMICOS E POLÍMEROS = ARRANJO ORDENADO DE LONGO ALCANCE = ESTRUTURA CRISTALINA



Arranjos Cristalinos

- Os materiais sólidos podem ser classificados em **cristalinos ou não-cristalinos** de acordo com a regularidade na qual os átomos ou íons se dispõem em relação à seus vizinhos.
- **Material cristalino** é aquele no qual os átomos encontram-se ordenados sobre longas distâncias atômicas formando uma estrutura tridimensional que se chama de **rede cristalina**
- Todos os metais, muitas cerâmicas e alguns polímeros formam estruturas cristalinas sob condições normais de solidificação



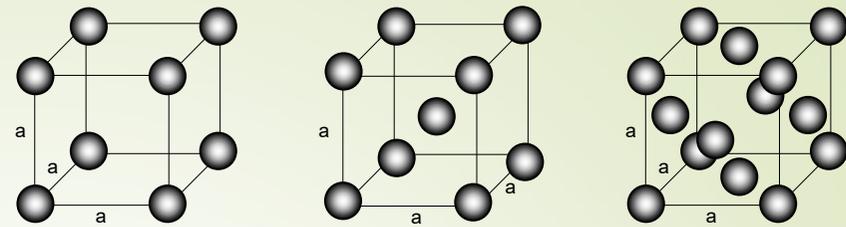
CÉLULA UNITÁRIA

(unidade básica repetitiva da estrutura tridimensional)

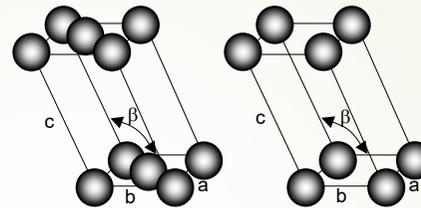
- ▶ Consiste num pequeno grupos de átomos que formam um modelo repetitivo ao longo da estrutura tridimensional (analogia com elos da corrente)
- ▶ **A célula unitária é escolhida para representar a simetria da estrutura cristalina**

Uma célula unitária é definida como a menor porção do cristal que ainda conserva as propriedades originais do mesmo. Existem células unitárias de diversos tipos. Em meados do século passado, o cientista francês Bravais descreveu 14 células unitárias, as quais englobariam qualquer tipo de estrutura cristalina conhecida. Na figura são apresentados as células unitárias de Bravais.

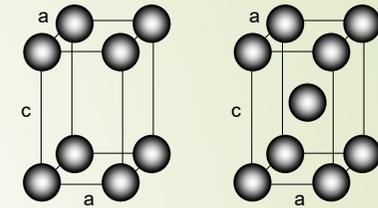
Uma avaliação mais aprofundada dos arranjos cristalinos de Bravais revela que as estruturas cúbica de corpo centrado (CCC), cúbica de face centrada (CFC) e hexagonal compacta (HC) são aquelas que permitem maior grau de empacotamento atômico.



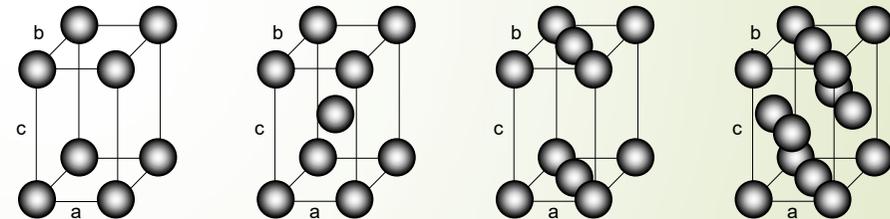
CÚBICO



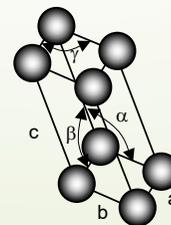
MONOCLÍNICO



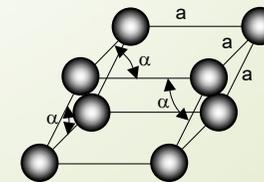
TETRAGONAL



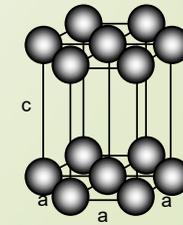
ORTORRÔMBICO



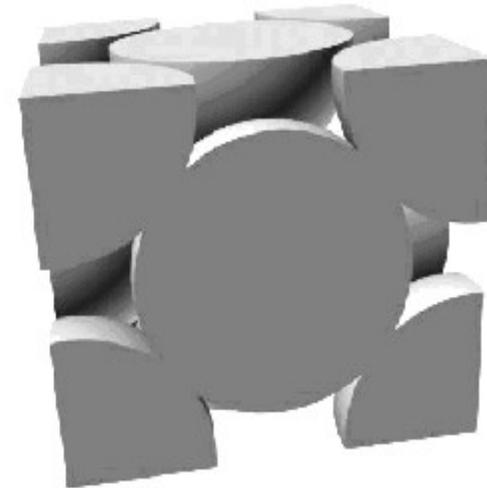
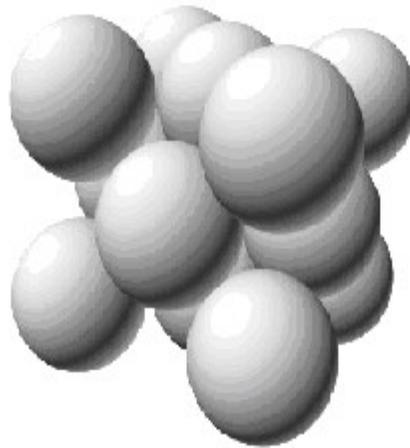
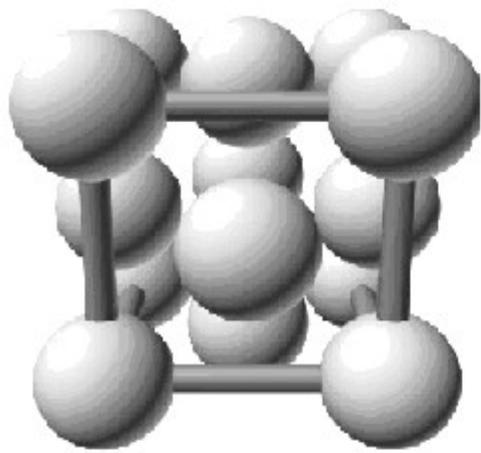
TRICLÍNICO



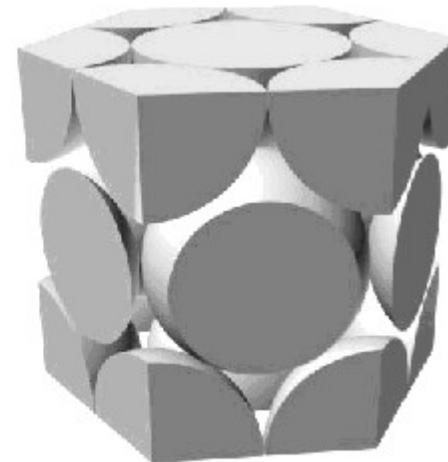
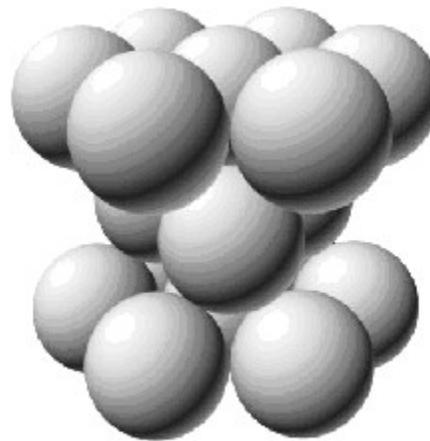
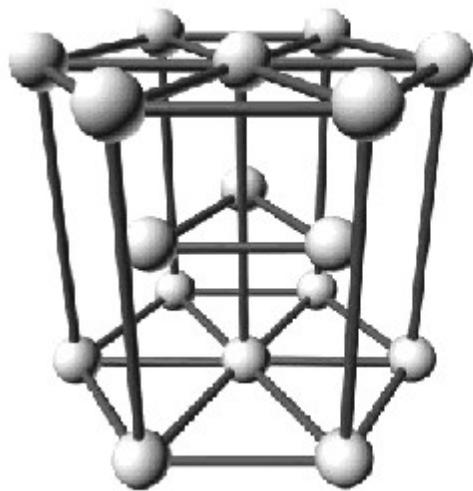
ROMBOÉDRICO



HEXAGONAL



Representação esquemática de uma célula unitária CFC: (a) posições atômicas; (b) arranjo atômico; (c) átomos dentro da célula unitária.





Elemento	Símbolo	Número Atômico	Massa Atômica (g/mol)	Densidade à 20 °C (g/m ³)	Estrutura Cristalina à 20 °C	Raio Atômico (nm)
Alumínio	Al	13	26,98	2,70	CFC	0,143
Chumbo	Pb	82	207,20	11,36	CFC	0,175
Cobalto	Co	27	58,93	8,83	CCC	0,125
Cobre	Cu	29	63,54	8,93	CFC	0,128
Cromo	Cr	24	51,99	7,19	CCC	0,125
Enxofre	S	16	32,06	2,07	Ortorrômbica	0,104
Ferro	Fe	26	55,85	7,87	CCC	0,124
Magnésio	Mg	12	24,30	1,74	HC	0,160
Manganês	Mn	25	54,94	7,47	Cúbica	0,112
Merúrio	Hg	80	200,59	13,55	Romboédrica	0,155
Molibdênio	Mo	42	95,94	10,22	CCC	0,136
Nióbio	Nb	41	92,90	8,57	CCC	0,143
Níquel	Ni	28	58,69	8,90	CFC	0,124
Platina	Pt	78	195,09	21,45	CFC	0,139
Titânio	Ti	22	47,88	4,51	HC	0,148
Tungstênio	W	74	183,85	19,25	CCC	0,137
Urânio	U	92	238,03	19,05	Ortorrômbica	0,138
Vanádio	Va	23	50,94	6,10	CCC	0,132
Zinco	Zn	30	65,38	7,13	HC	0,133
Zircônio	Zr	40	91,22	6,51	HC	0,159

Estrutura cristalina e propriedades de alguns elementos.

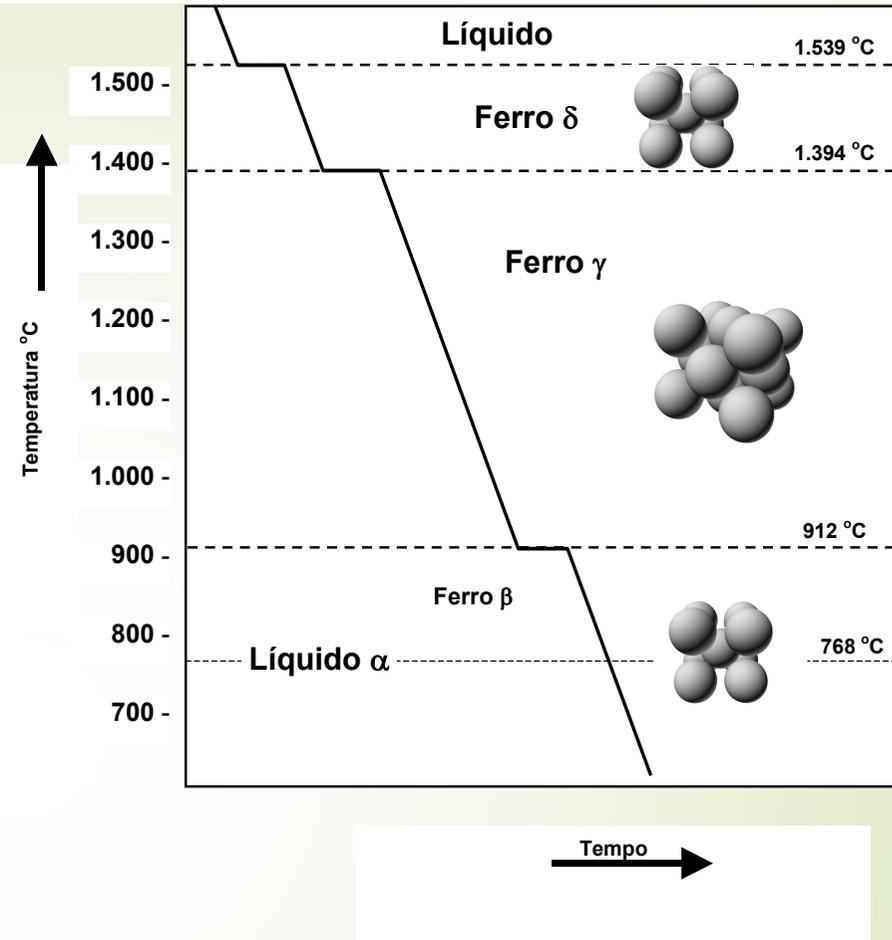
ESTRUTURA CRISTALINA DOS METAIS

Três são as estruturas cristalinas mais comuns em metais:

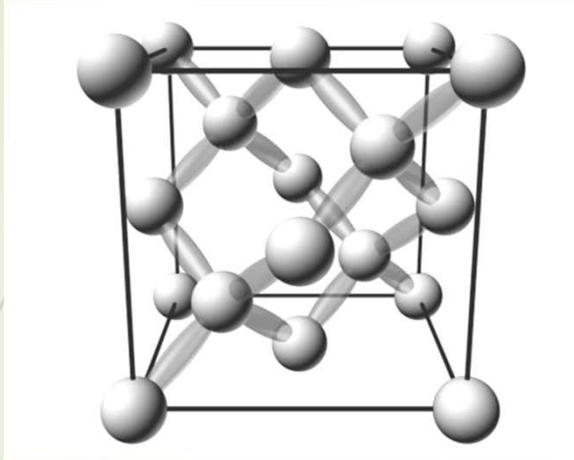
Cúbica de corpo centrado,
cúbica de face centrada e
hexagonal compacta.

ALOTROPIA OU POLIMORFISMO

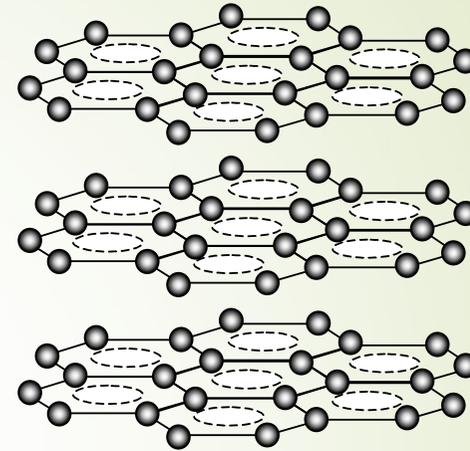
- ◆ Alguns metais e não-metais podem ter mais de uma estrutura cristalina dependendo da temperatura e pressão. Esse fenômeno é conhecido como polimorfismo.
- ◆ Geralmente as transformações polimórficas são acompanhadas de mudanças na densidade e mudanças de outras propriedades físicas.



diamante e do grafite.



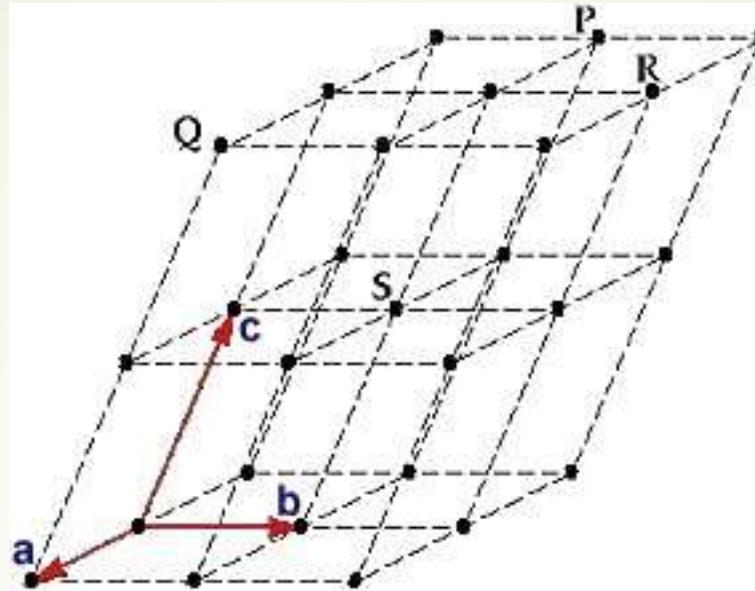
(a) Diamante



(b) Grafite

Figura 3.9. Estruturas cristalinas do carbono nas variações alotrópicas "diamante" e "grafite".

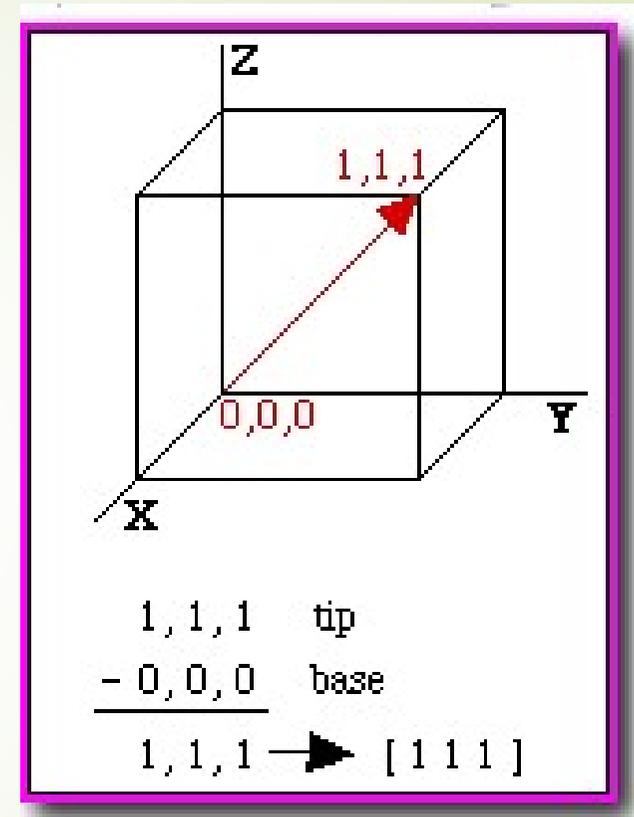
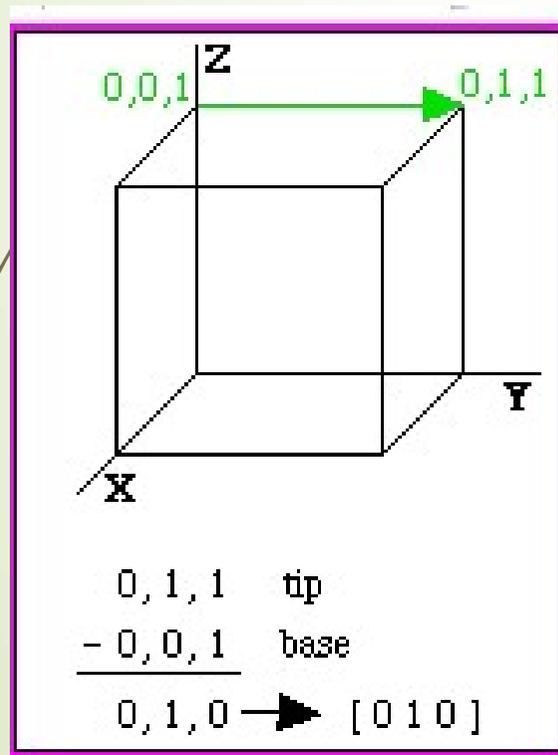
DIREÇÕES NOS CRISTAIS



a, b e c definem os eixos de um sistema de coordenadas em 3D. Qualquer linha (ou direção) do sistema de coordenadas pode ser especificada através de dois pontos: · um deles sempre é tomado como sendo a origem do sistema de coordenadas, geralmente (0,0,0) por convenção;

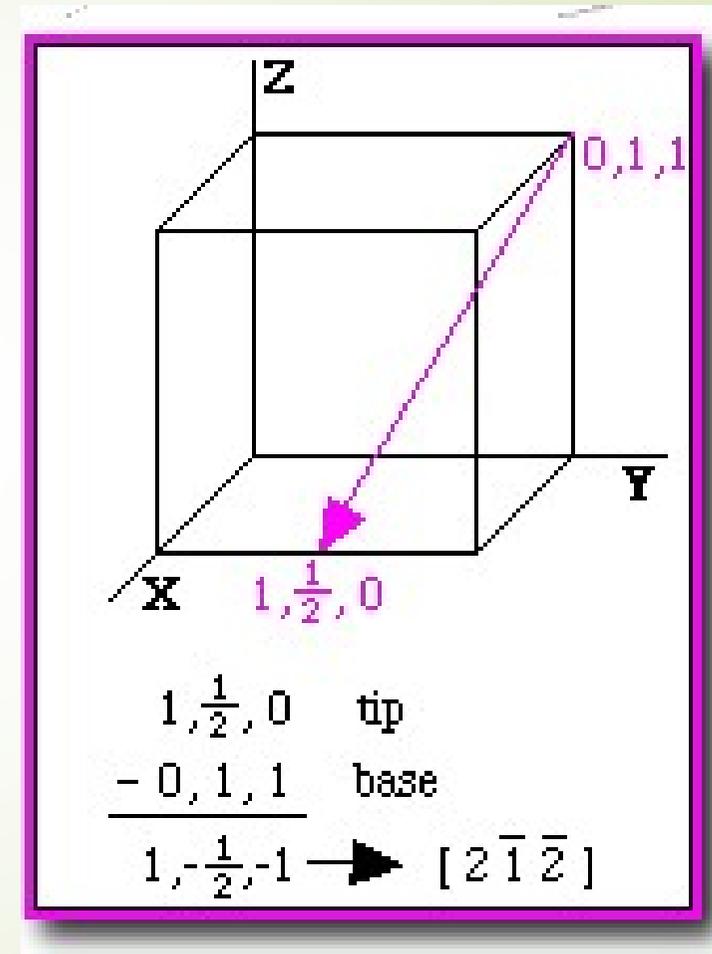
DIREÇÕES NOS CRISTAIS

São representadas entre colchetes = $[hkl]$
Quando passa pela origem



DIREÇÕES NOS CRISTAIS

Os números devem ser divididos ou multiplicados por um fator comum para dar números inteiros



PLANOS CRISTALINOS

Por que são importantes?

- **Para a deformação plástica**

A deformação plástica (permanente) dos metais ocorre pelo deslizamento dos átomos, escorregando uns sobre os outros no cristal. Este deslizamento tende a acontecer preferencialmente ao longo de planos direções específicos do cristal.

PLANOS CRISTALINOS

Por que são importantes?

- **Para as propriedades de transporte**

Em certos materiais, a estrutura atômica em determinados planos causa o transporte de elétrons e/ou acelera a condução nestes planos, e, relativamente, reduz a velocidade em planos distantes destes.

Exemplo : supercondutores a base de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$

Alguns planos contêm somente Cu e O. Estes planos conduzem pares de elétrons (chamados pares de cobre) que são os responsáveis pela supercondutividade. Estes supercondutores são eletricamente isolantes em direções perpendiculares as dos planos Cu-O.

PLANOS CRISTALINOS

São representados de maneira similar às direções

São representados pelos índices de Miller = (hkl)

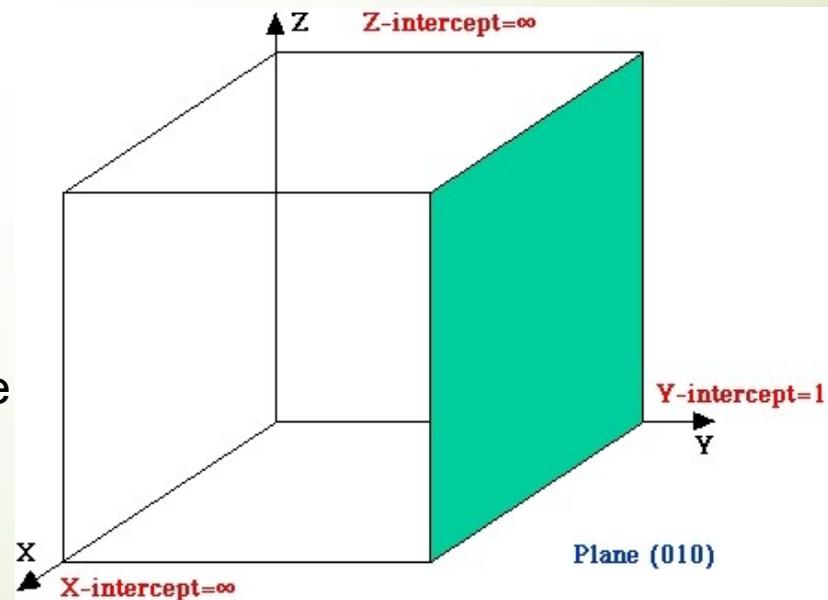
Planos paralelos são equivalentes tendo os mesmos índices

Planos (010)

São paralelos aos eixos x e z (paralelo à face)

Cortam um eixo (neste exemplo: y em 1 e os eixos x e z em ∞)

$1/\infty, 1/1, 1/\infty = (010)$



PLANOS CRISTALINOS

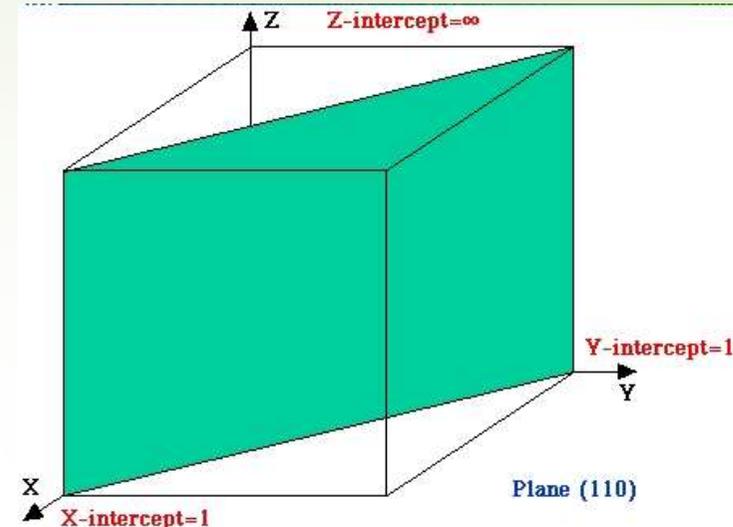
Planos (110)

São paralelos a um eixo
(z)

Cortam dois eixos

(x e y)

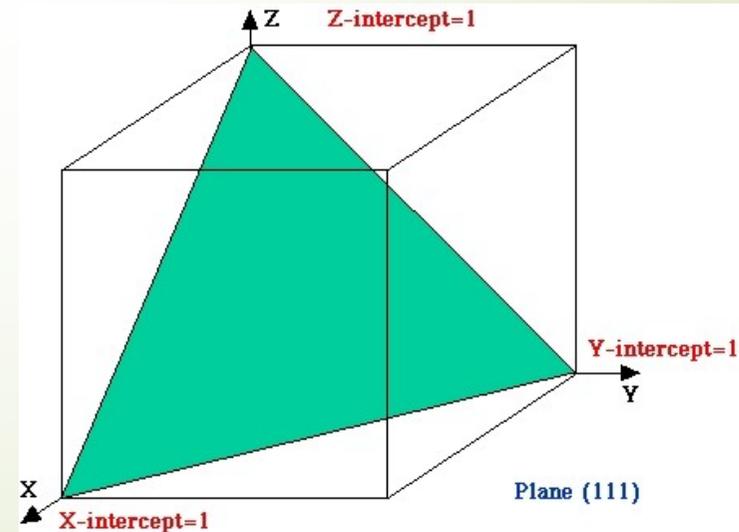
$$1/1, 1/1, 1/\infty = (110)$$



Planos (111)

Cortam os 3 eixos
cristalográficos

$$1/1, 1/1, 1/1 = (111)$$



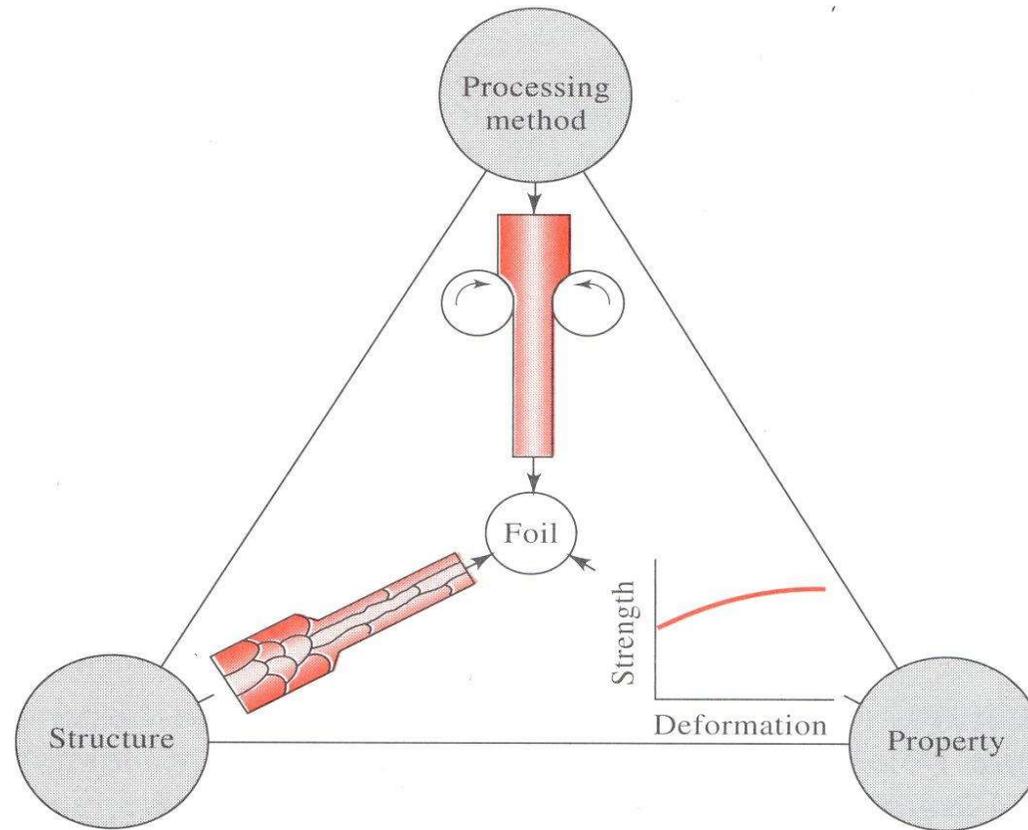


PLANOS NO SISTEMA CÚBICO

Deformação em metais envolve deslizamento de planos atômicos. O deslizamento ocorre mais facilmente nos planos e direções de maior densidade atômica

Nos materiais metálicos existe uma complexa relação entre

estrut
proce



Quando o engenheiro muda qualquer um desses 3 aspectos, 1 ou ambos os outros também se modificam.

A estrutura pode ser modificada por mudanças na composição química ou no processamento gerando propriedades diferentes.

Propriedades são avaliadas por ensaios mecânicos (dureza, tração, fadiga, desgaste).

Processamento é o conjunto de processos utilizados na fabricação dos componentes.

Processos: fundição, forjamento, soldagem, usinagem, tratamentos térmicos, etc



Quer entender melhor isso?



Olha pro slide e presta
atenção!!!!



IMPERFEIÇÕES EM SÓLIDOS



- Ao estudar os materiais cristalinos, tem-se admitido que existe uma perfeita ordem em escala atômica

- Contudo esse tipo de **sólido idealizado** não existe, todos os materiais contém grandes números de uma **variedade de defeitos e imperfeições.**

- As propriedades de alguns materiais são profundamente influenciadas pela presença de imperfeição no sólido cristalino
- Por “defeito cristalino” é designada uma irregularidade na rede cristalina

- 
- O tipo e o número de defeitos dependem do material, do meio ambiente, e das circunstâncias sob as quais o cristal é processado
 - Mesmo sendo poucos eles influenciam muito nas propriedades dos materiais e nem sempre de forma negativa



1- DEFEITOS PONTUAIS

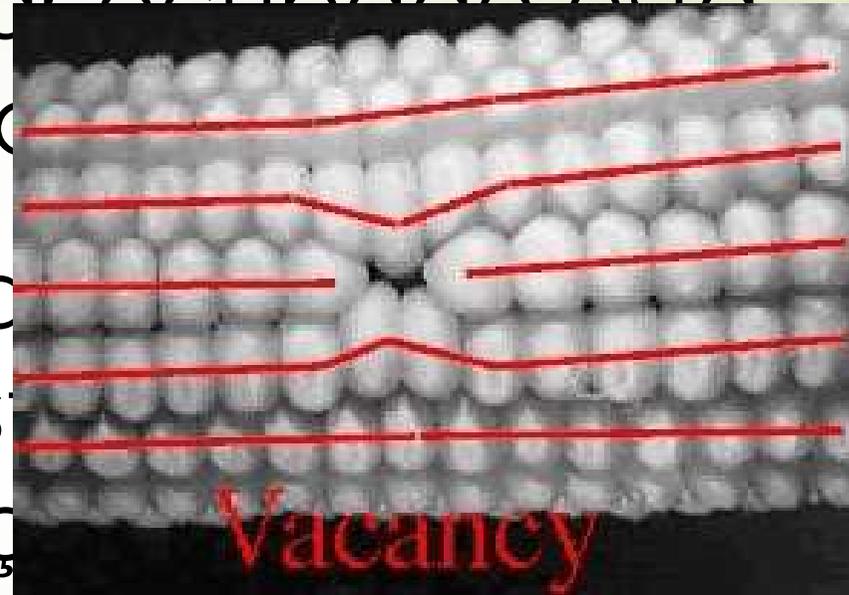
- Lacunas ou vacâncias ou vazios
- Átomos Intersticiais
- Impurezas

LACUNAS (vacâncias)

- Envolve a falta de um átomo, onde



posições normais)



-se de suas

- Não é possível criar um material isento desse tipo de defeito

- A presença de impurezas promove a formação de defeitos pontuais e atua proporcionando modificações nas propriedades.
- Exemplo: prata de lei é uma liga composta por 92,5% de prata e 7,5% de cobre (a prata pura é resistente à corrosão, mas é muito macia).

IMPUREZAS EM SÓLIDOS

- A adição de impurezas pode formar: SOLUÇÕES SÓLIDAS
- Existem vários termos relacionado a impurezas e soluções sólidas. Com relação às ligas os termos normalmente empregados são: SOLUTO E SOLVENTE

- **SOLVENTE:** átomo ou composto presente em maior quantidade.
- **SOLUTO:** é usado para indicar um elemento ou composto presente em menor concentração

SOLUÇÕES SÓLIDAS

Nas soluções sólidas a estrutura cristalina do material que impurezas podem ser mantida e não formam-se novas estruturas

- Intersticial

As soluções sólidas formam-se mais facilmente quando o elemento de liga (impureza) e matriz apresentam estrutura cristalina e dimensões eletrônicas semelhantes

- Substitucional

SOLUÇÕES SÓLIDAS SUBSTITUCIONAIS

- Os átomos do soluto ou átomos de impureza tomam o lugar dos átomos hospedeiros ou os substituem
- **Fatores que influem na formação de soluções sólidas substitucionais**

SOLUÇÕES SÓLIDAS INTERSTICIAIS

Os átomos de impureza dos elementos de liga ocupam os espaços interstícios.

Como os materiais metálicos tem geralmente fator de empacotamento alto as posições intersticiais são relativamente pequenas.





Conseqüentemente ocorre quando a impureza apresenta raio atômico bem menor que o hospedeiro

Geralmente, no máximo 10% de impurezas são incorporadas nos interstícios

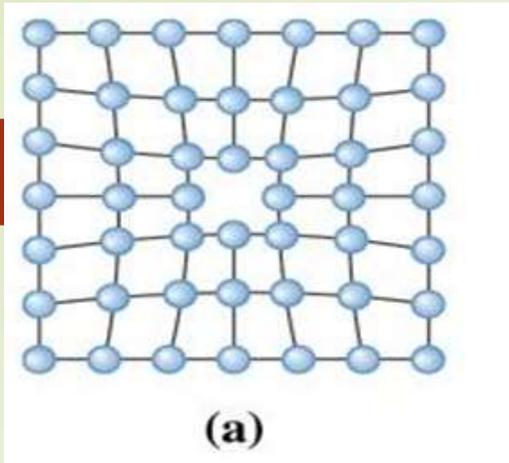
EXEMPLO DE SOLUÇÃO SÓLIDA INTERSTICIAL

Fe + C → solubilidade máxima do C
no Fe é 2,1% a 910 C (Fe CFC)

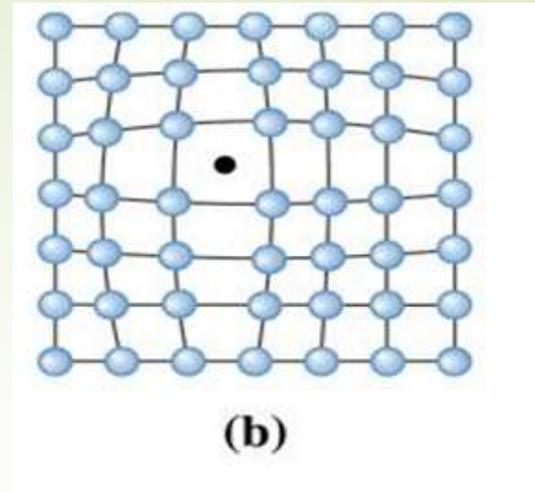
O C tem raio atômico bastante pequeno se comparado com o Fe

$$r_C = 0,071 \text{ nm} = 0,71 \text{ \AA}$$

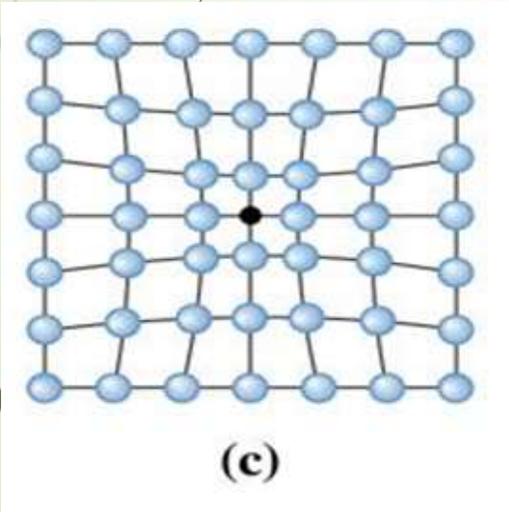
$$r_{Fe} = 0,124 \text{ nm} = 1,24 \text{ \AA}$$



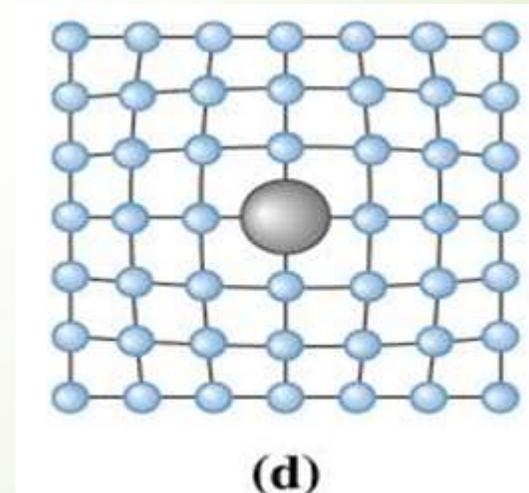
(a) vacância



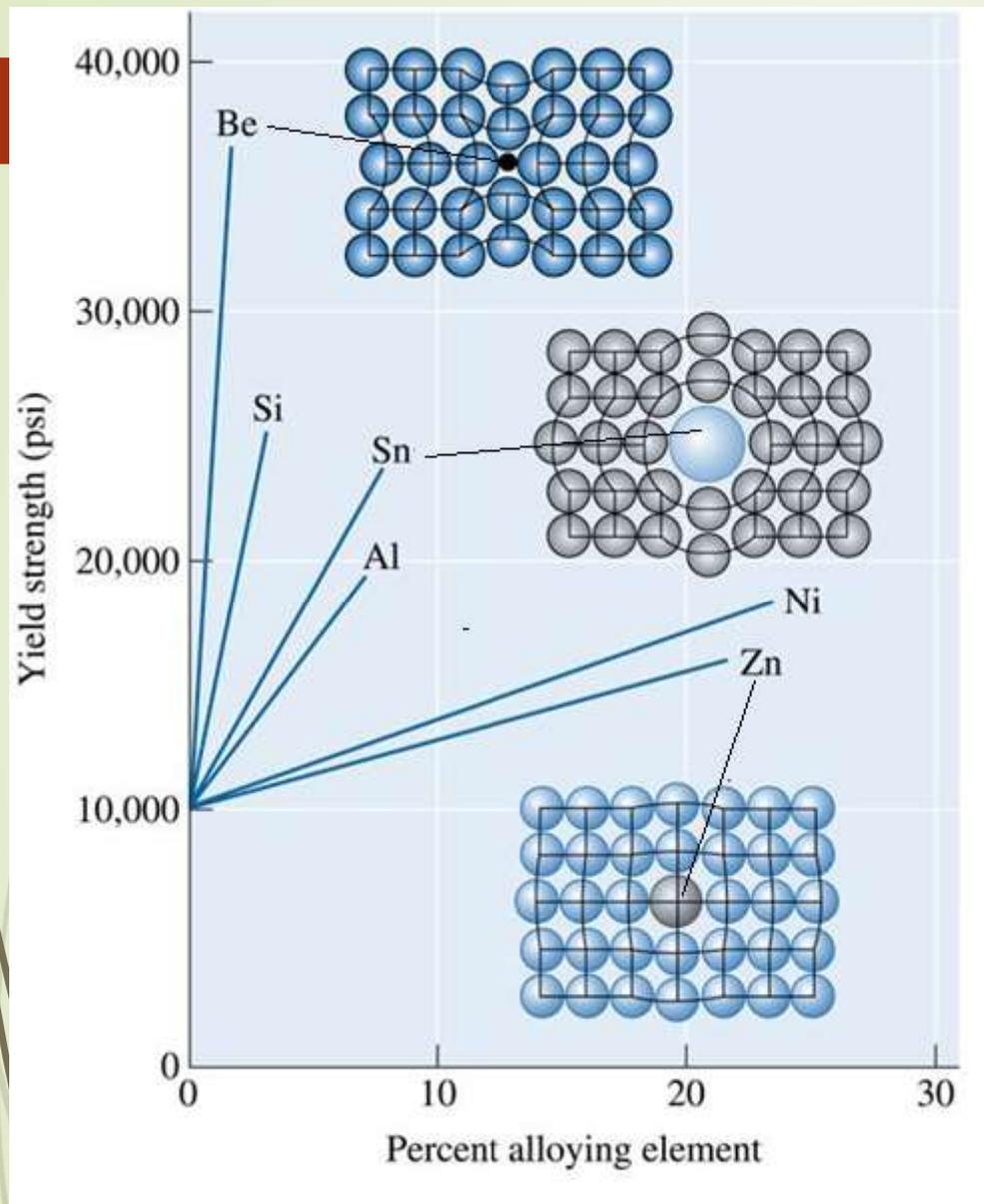
(b) átomo intersticial



**(c) pequeno átomo
sustitucional**



**(d) grande átomo
sustitucional**



Efeitos do tamanho do átomo na solução sólida tendo Cu como solvente



2- DEFEITOS LINEARES: DISCORDÂNCIAS

- É um defeito linear ou unidimensional em torno do qual alguns dos átomos estão desalinhados
- Podem ser:
 - Aresta
 - Espiral
 - Mista

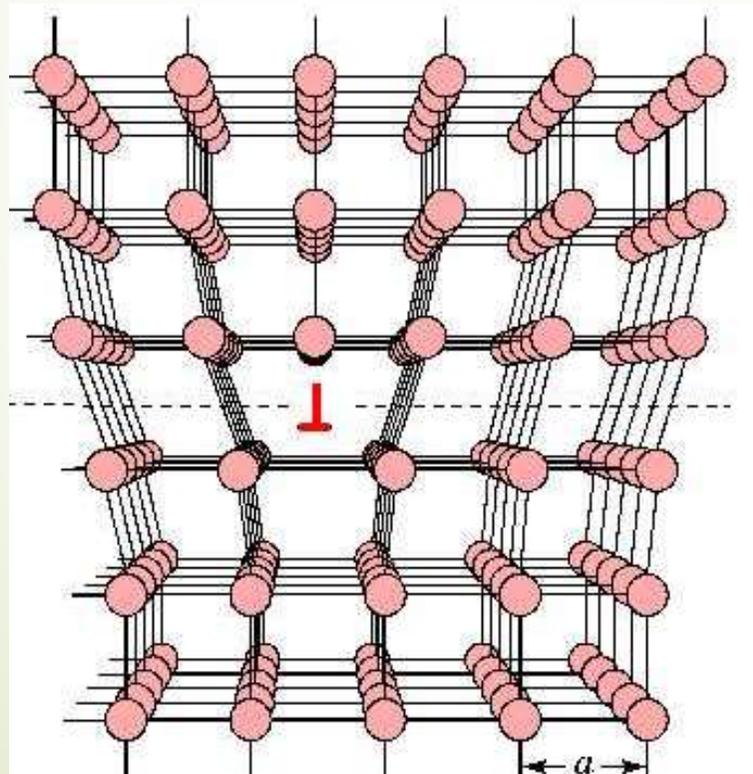
Wiskers de ferro (sem imperfeições do tipo discordâncias) apresentam resistência maior que **70GPa**, enquanto o ferro comum rompe-se a aproximadamente **270MPa**.

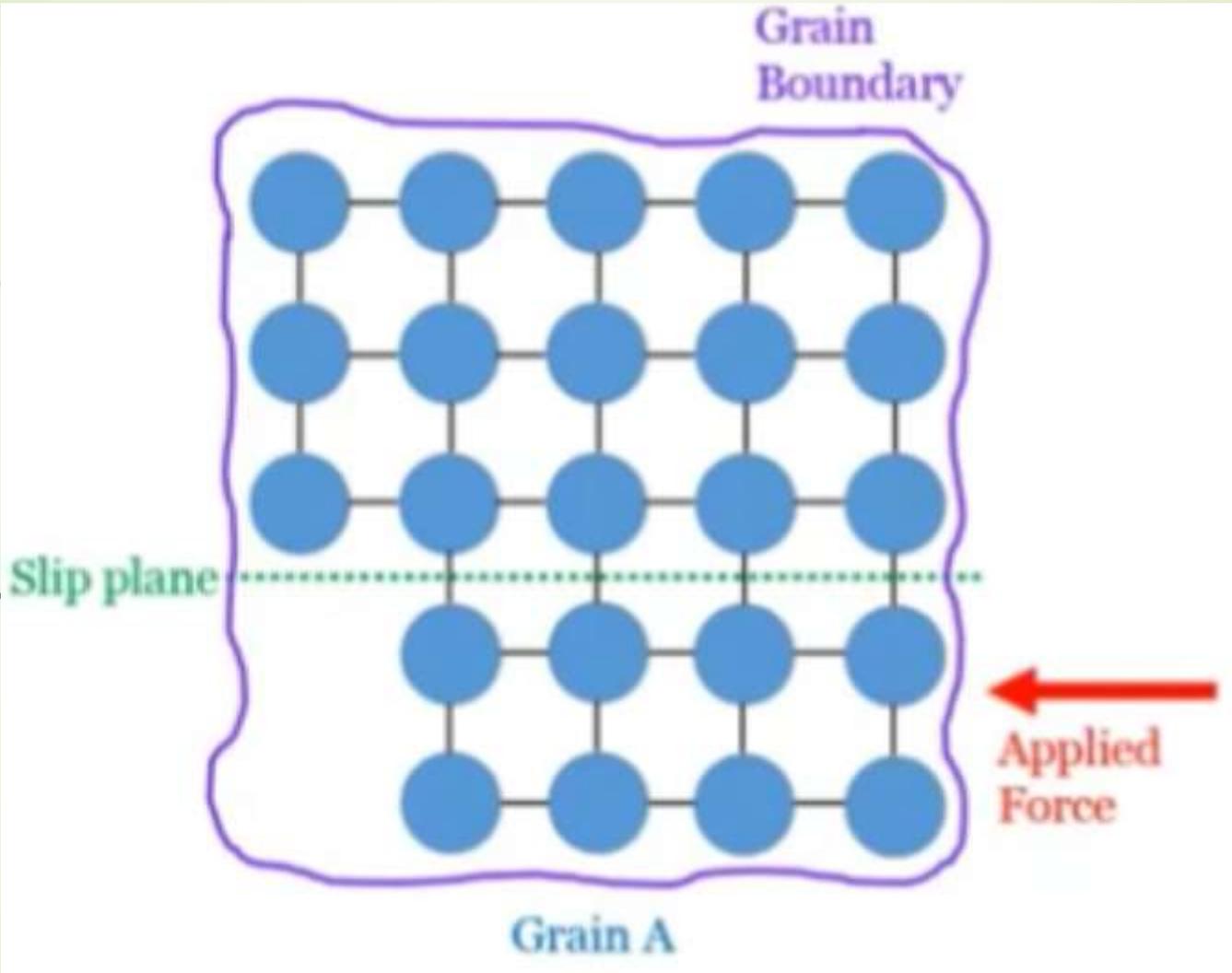
Ligas: adiciona-se átomos de impureza para aumentar a resistência mecânica e a resistência à corrosão

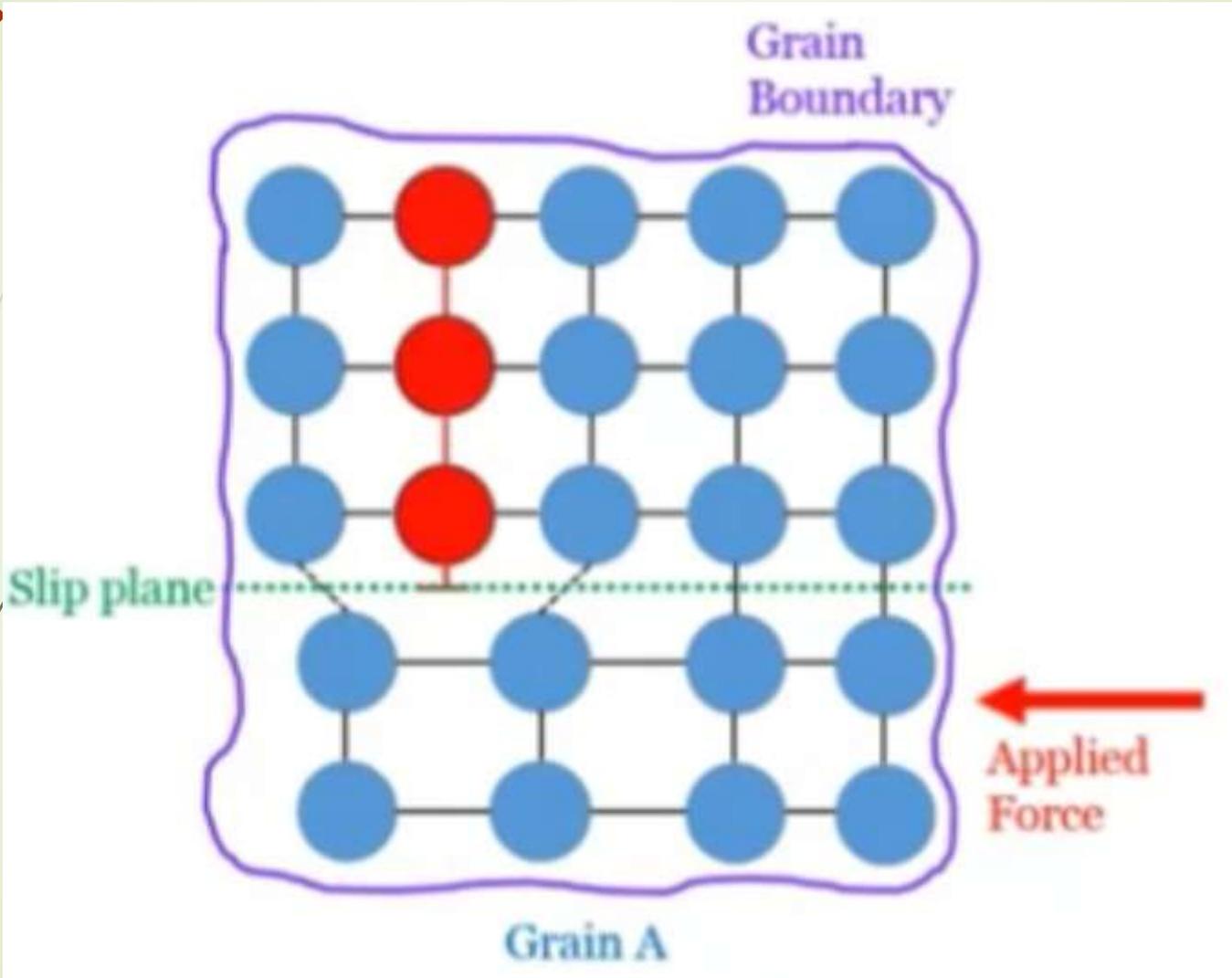
pascal (símbolo: **Pa**) é a unidade padrão de **pressão** e **tensão** no **Sistema Internacional de Unidades** (SI). Equivale à força de 1 **N** aplicada uniformemente sobre uma superfície de 1 **m²**.

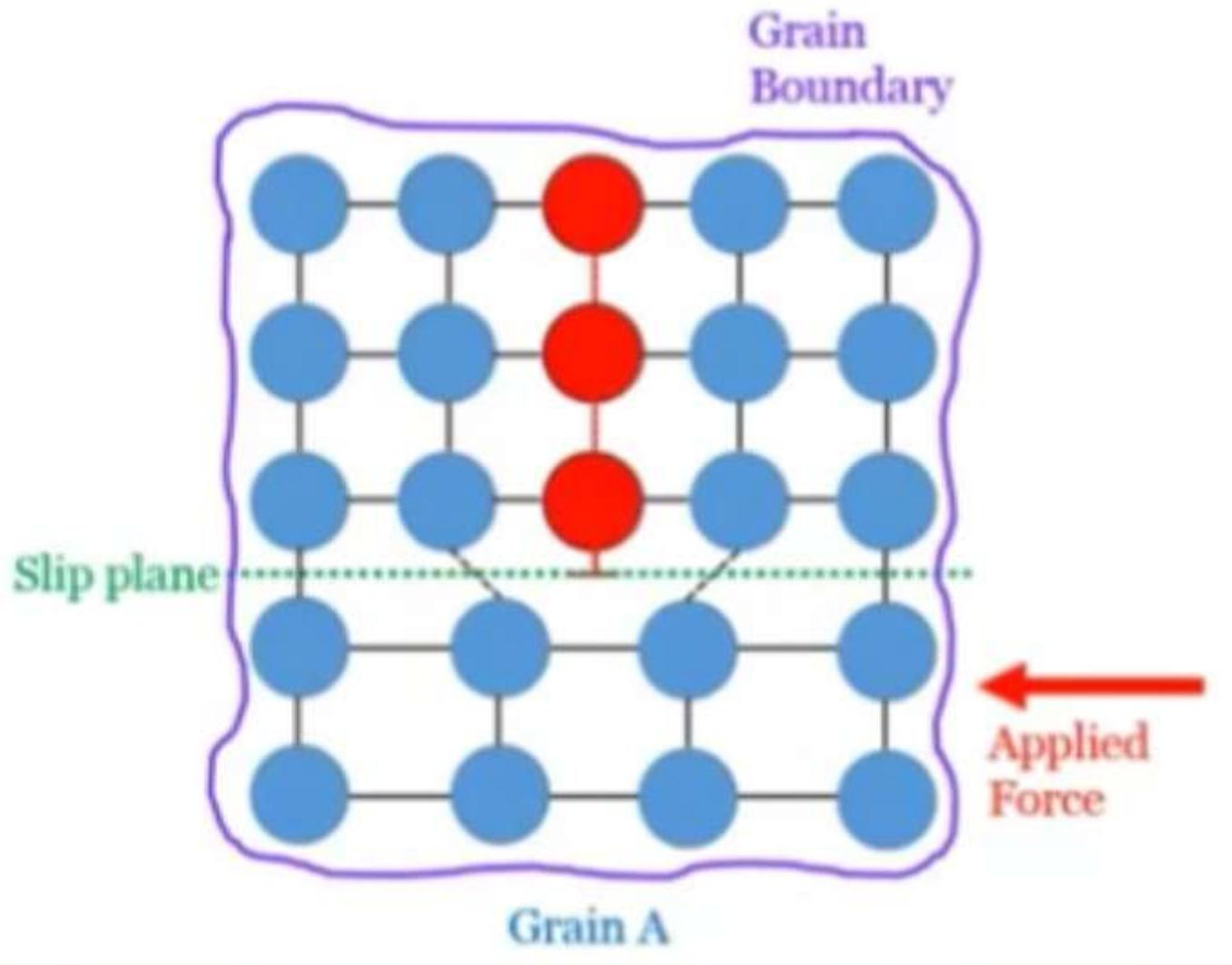
DISCORDÂNCIAS EM ARESTA

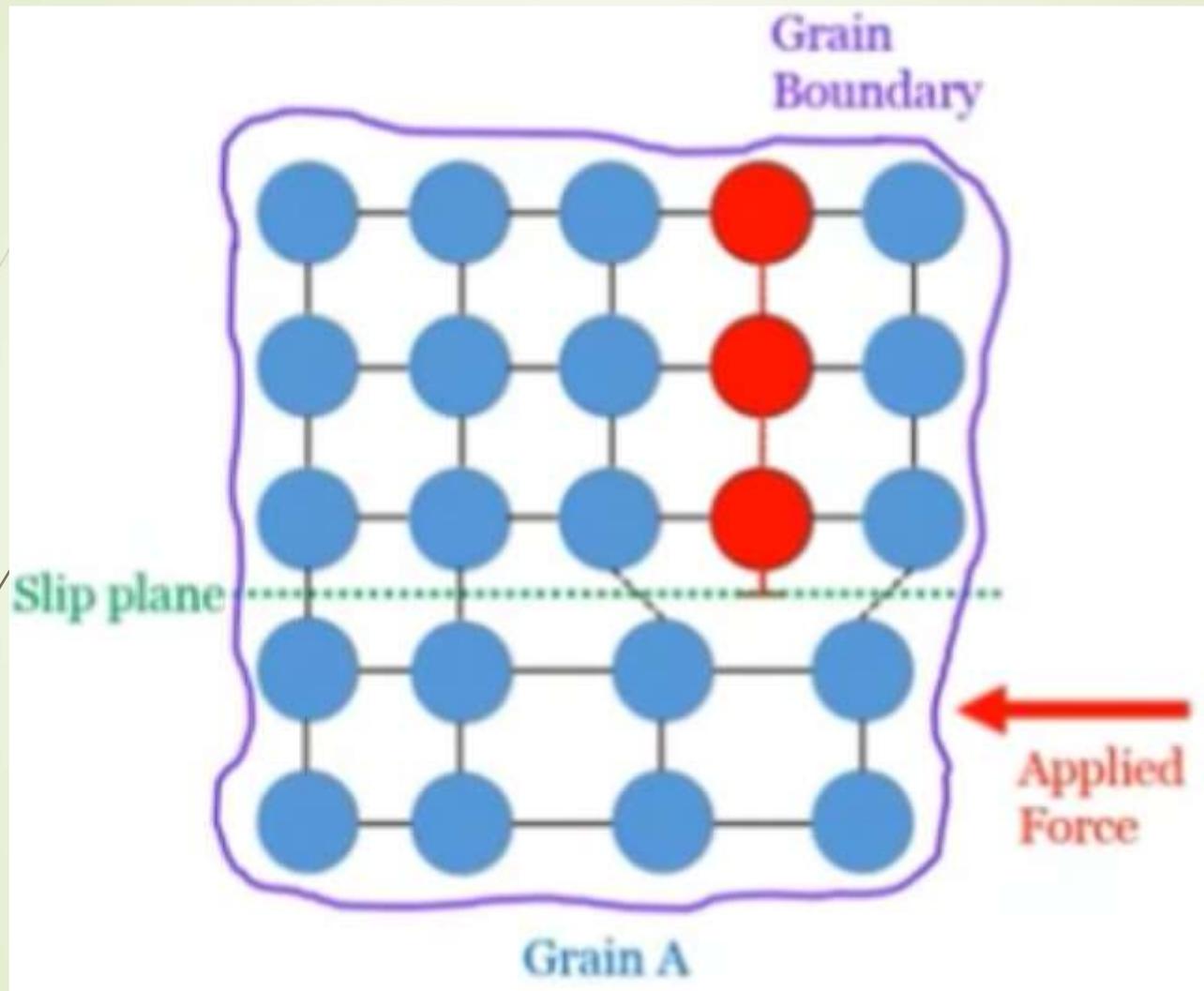
- Uma porção extra de um plano de átomos, ou semi-plano, cuja aresta termina no interior do cristal

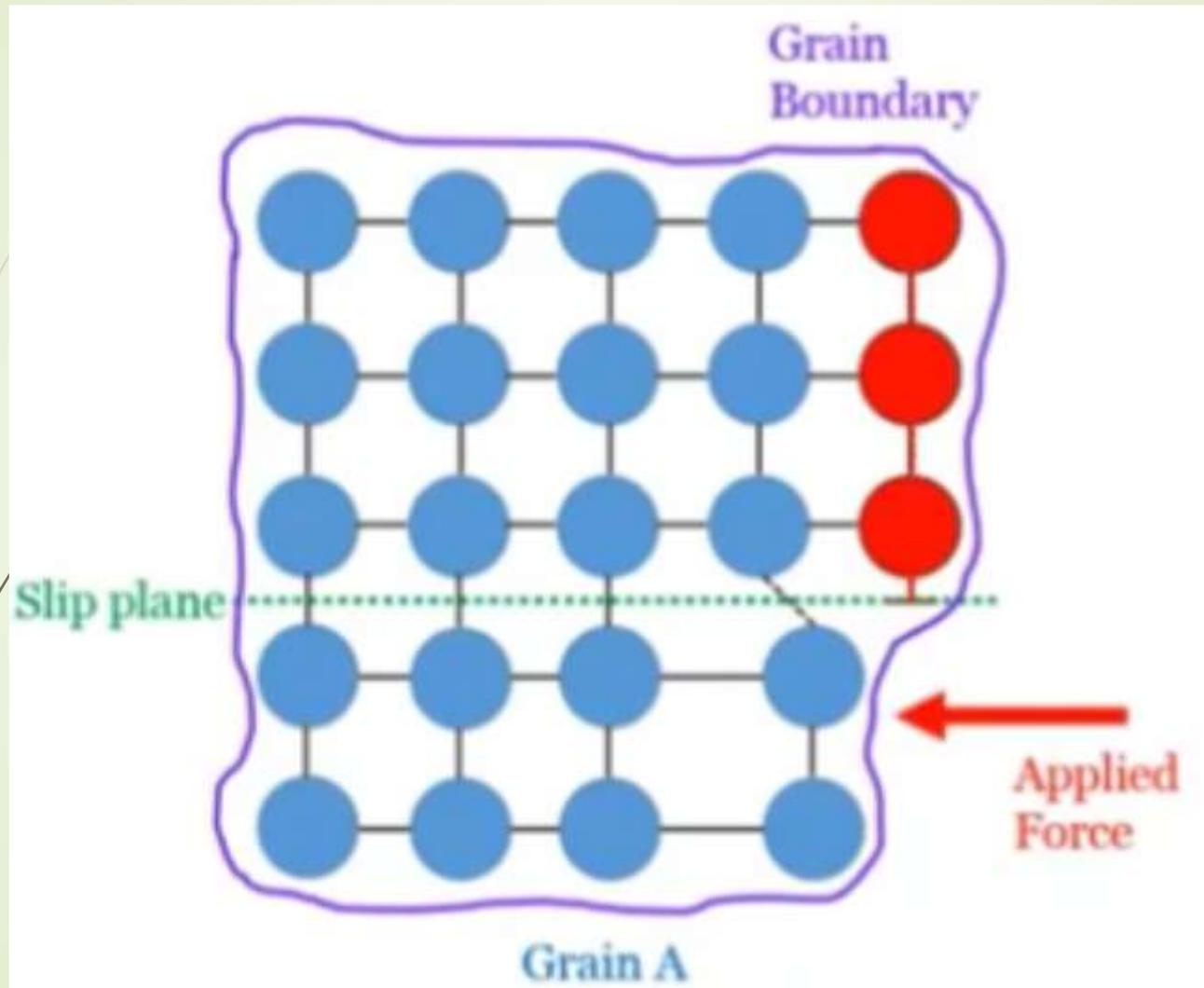


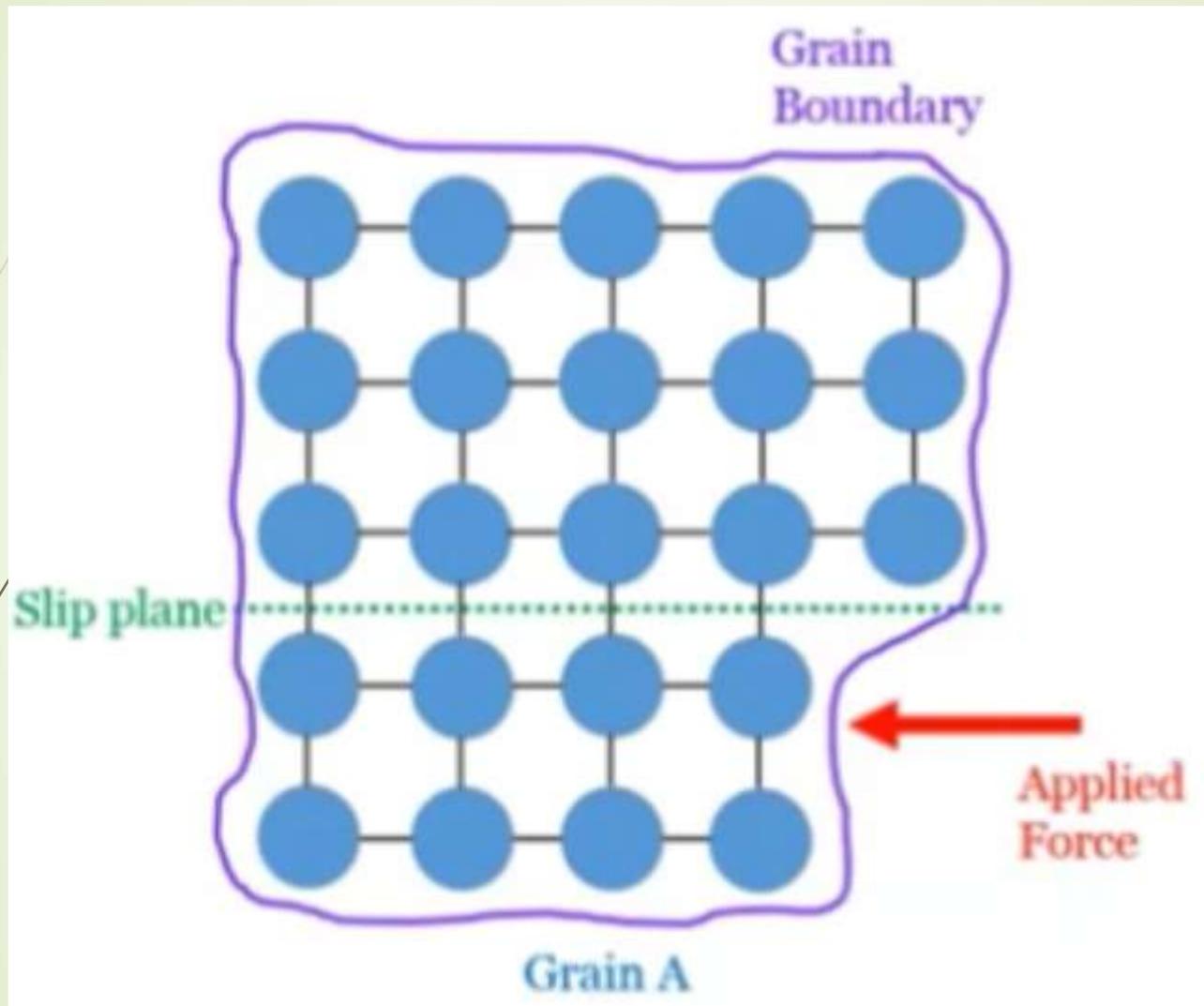


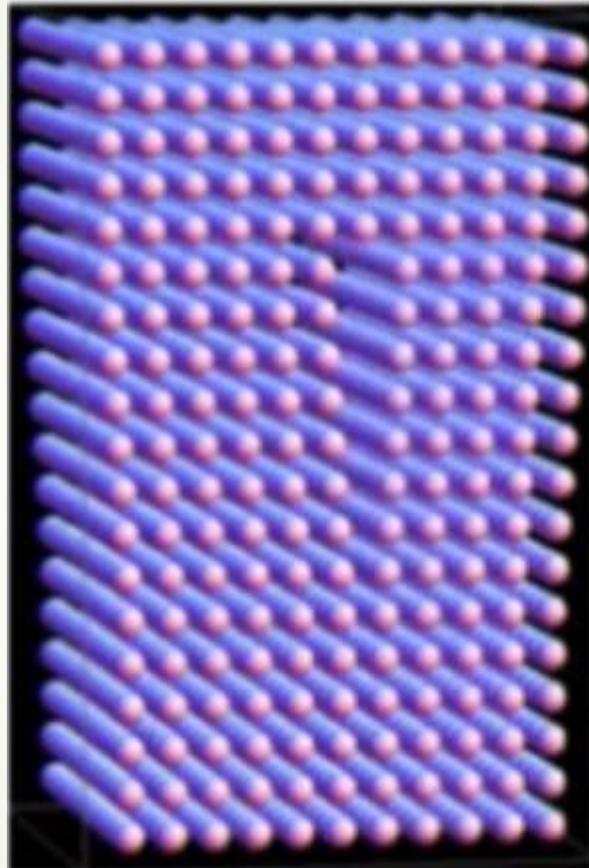


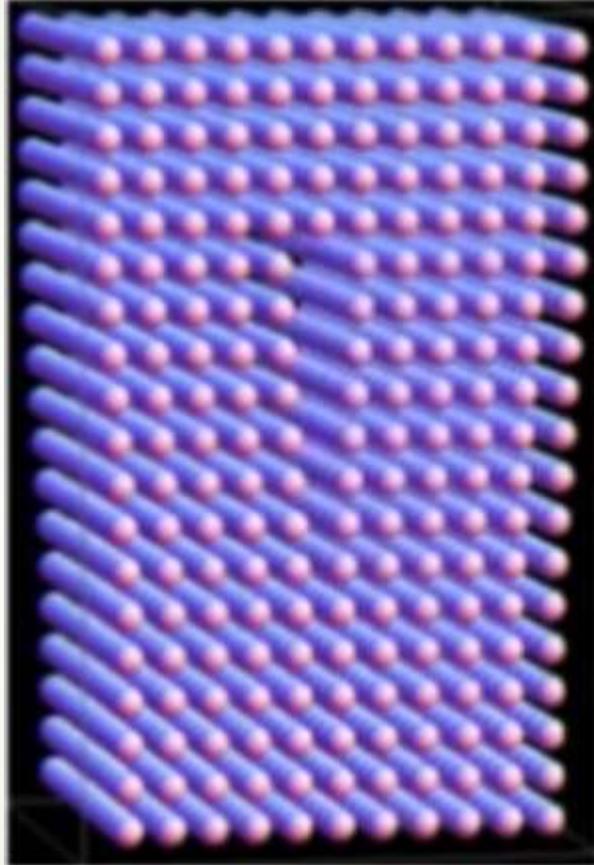


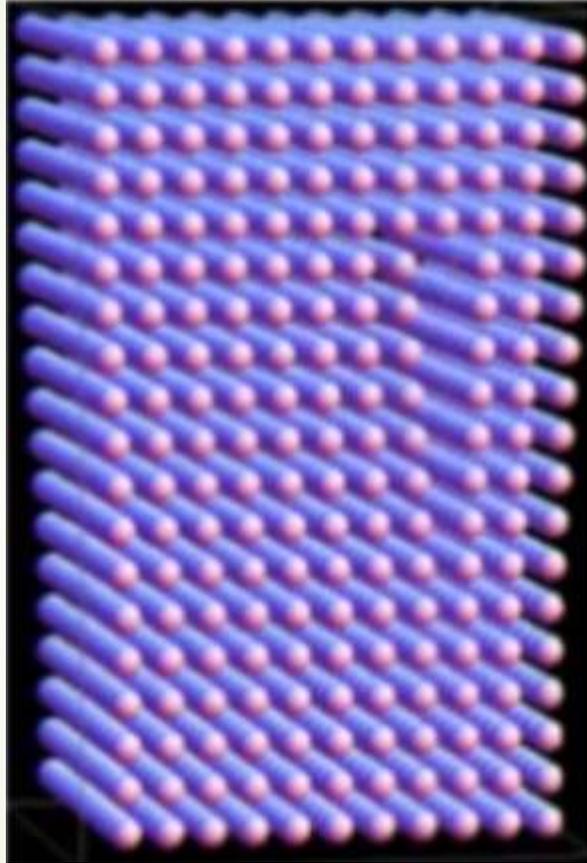


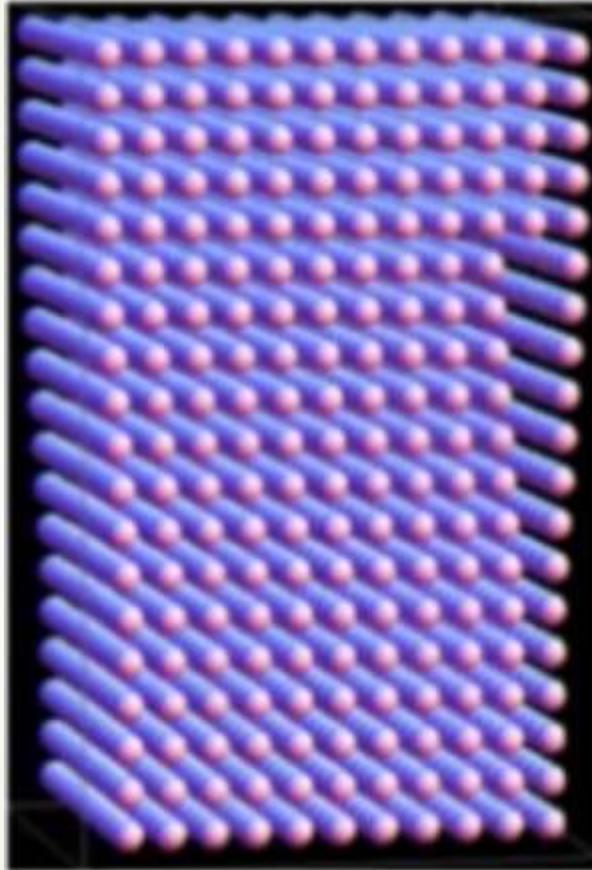


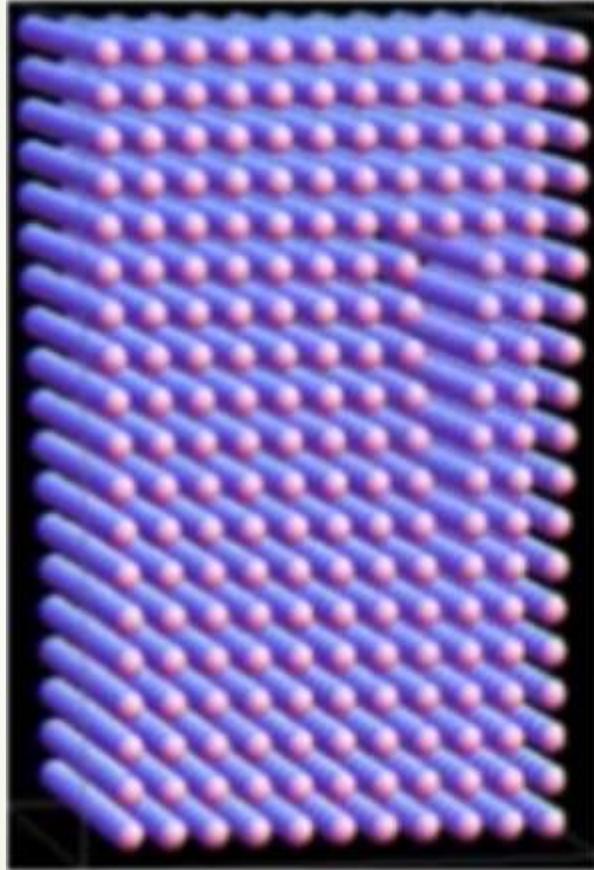


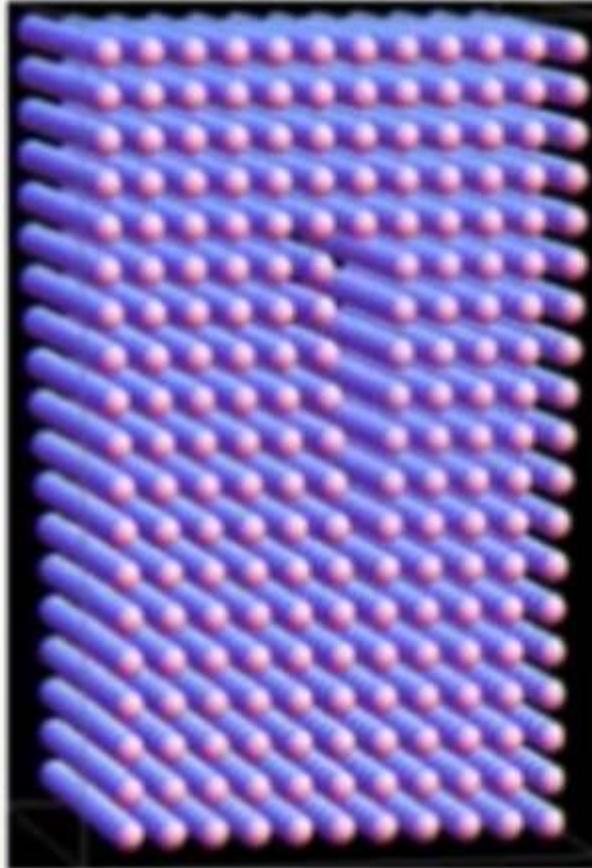


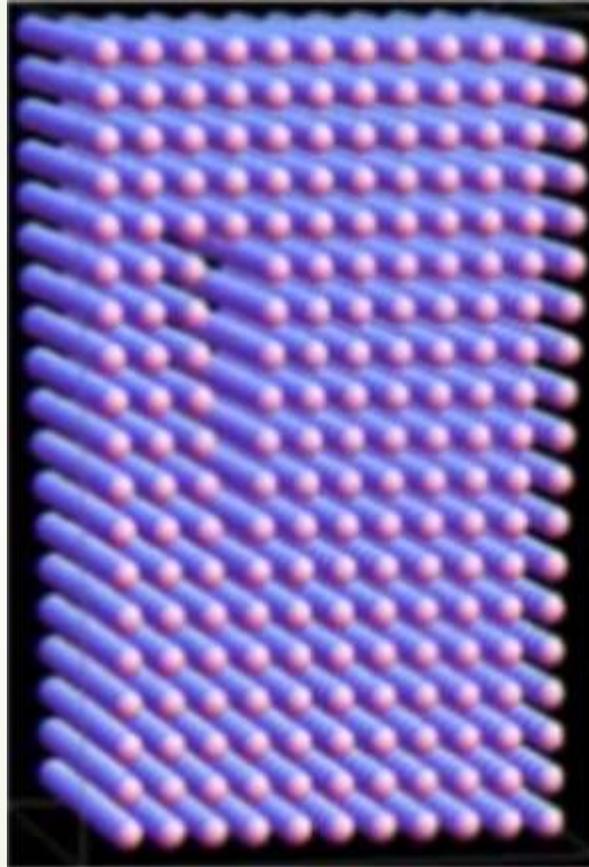


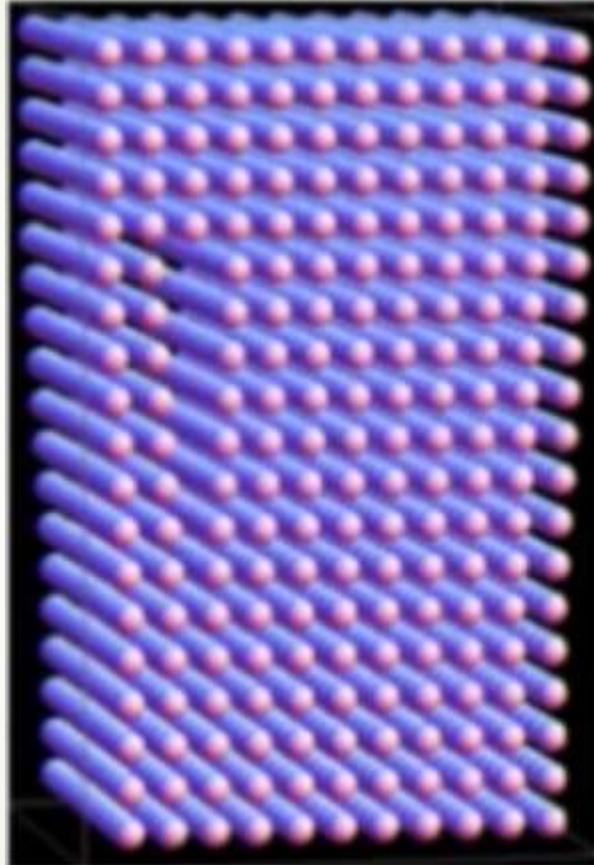


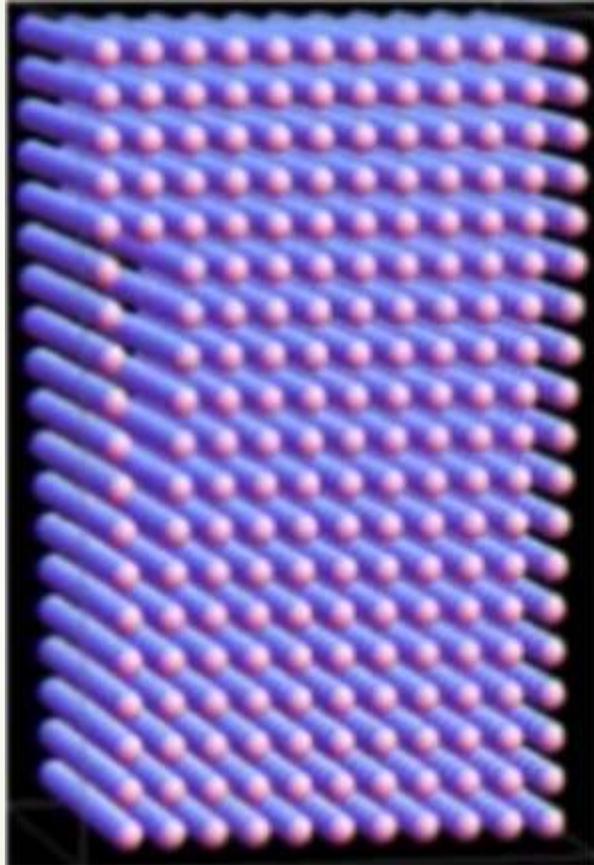












CONTORNOS DE GRÃO



Monocristal: Material com apenas uma orientação cristalina, ou seja, que contém apenas um

Contorno que separa dois pequenos grãos ou cristais que possuem diferentes orientações

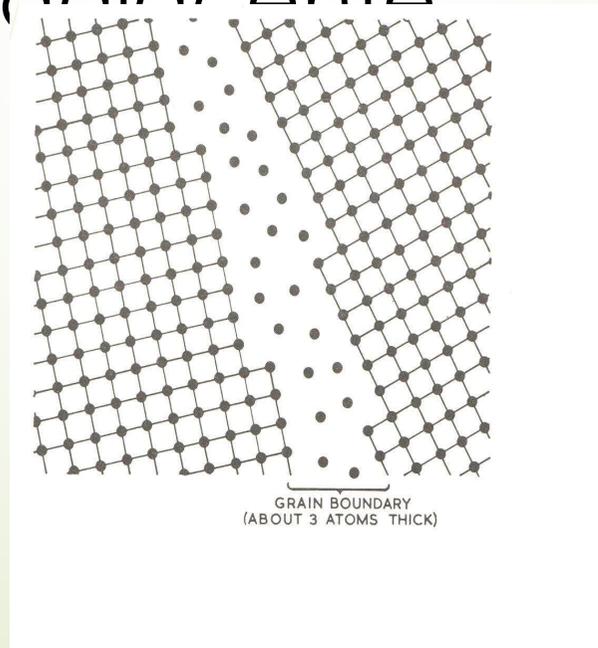
Policristal: Material com mais de uma orientação cristalina, ou seja, que contém vários grãos

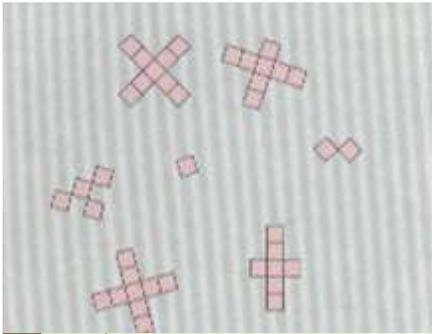
cristalográficas em materiais policristalinos .

um cristal = um

CONTORNOS DE GRÃO

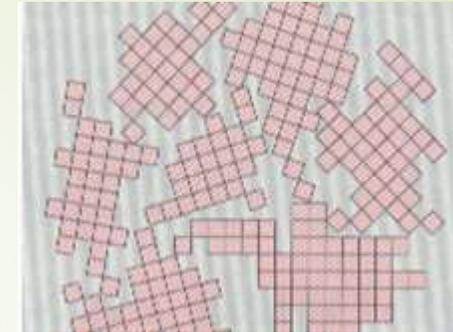
- Dentro da região do contorno, que possui provavelmente a largura equivalente a distancia de apenas alguns átomos, existem alguns desencontros atômicos na transição da orientação cristalina de um grão para aquela de outro adjacente





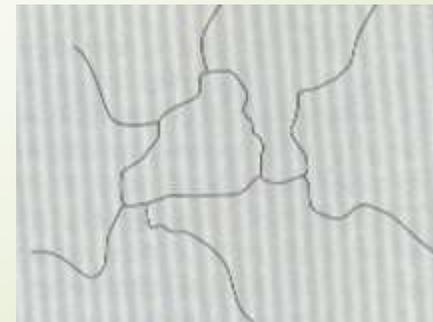
Formação de pequenos núcleos de cristalização (cristalitos)

Crescimento dos cristalitos



Formação de Grãos, com formatos irregulares, após completada a solidificação.

Vista, num microscópio, da estrutura de Grãos (as linhas escuras são os contornos dos Grãos)



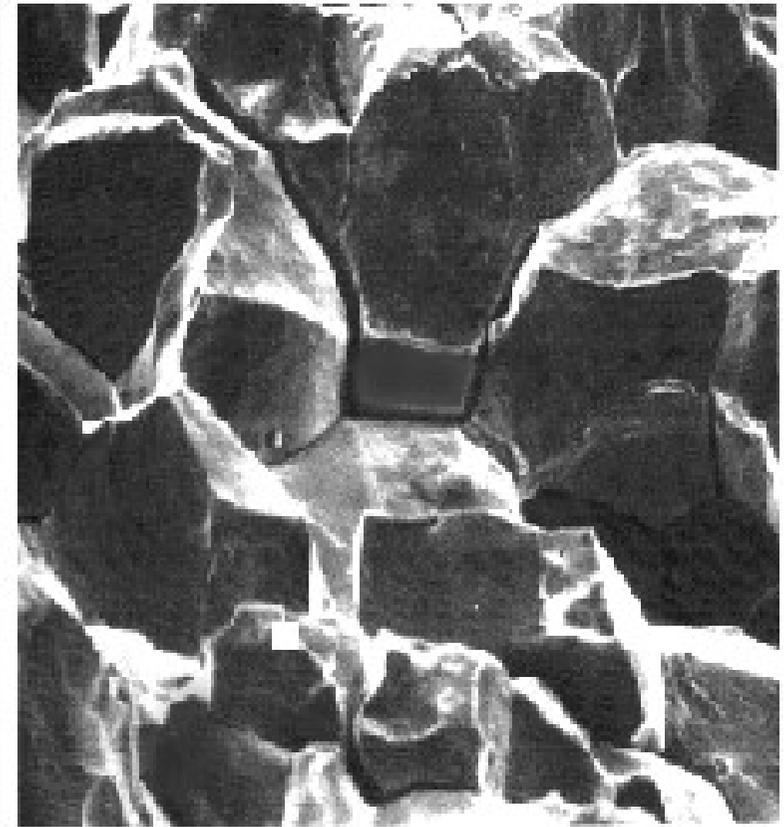
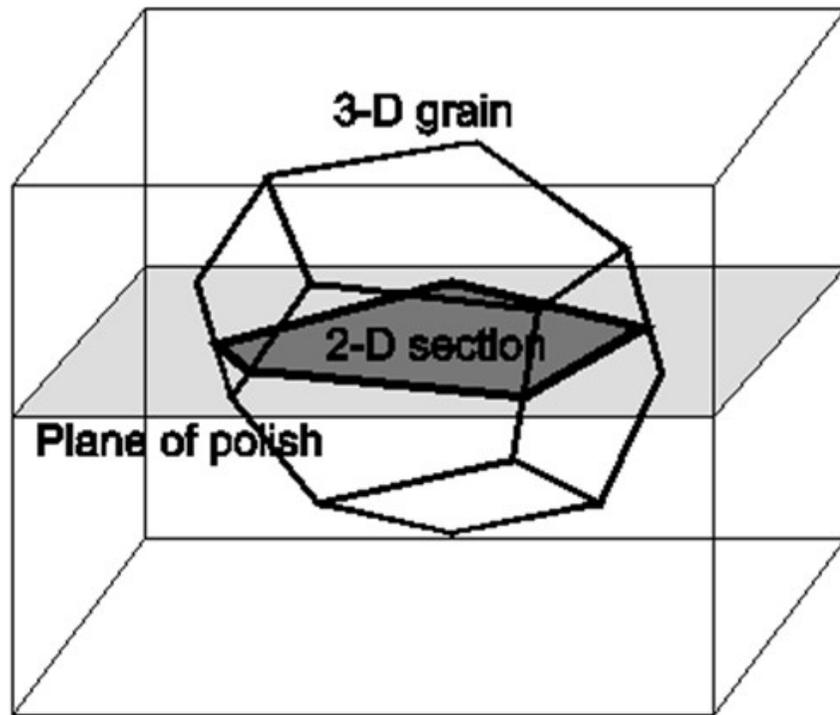
CONTORNOS DE GRÃO

- Os átomos estão ligados de maneira menos regular ao longo de um contorno de grão;
- Conseqüentemente existe uma energia interfacial ou de contorno de grão que é semelhante à energia de superfície;

Como consequência, os contornos de grão são quimicamente mais reativos.

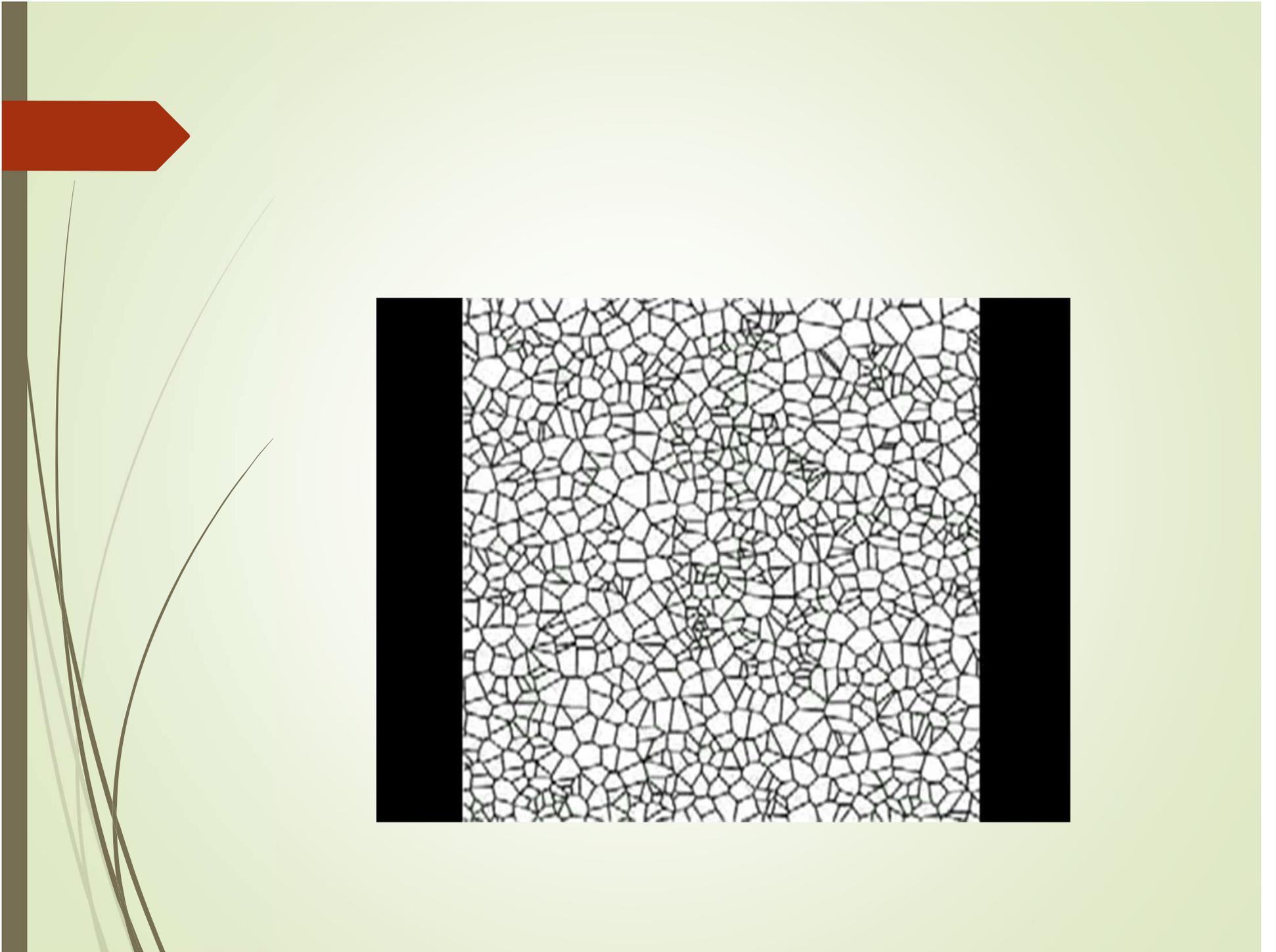


Além disso os átomos de impureza com frequência se segregam preferencialmente ao longo desses



CONTORNOS DE GRÃO

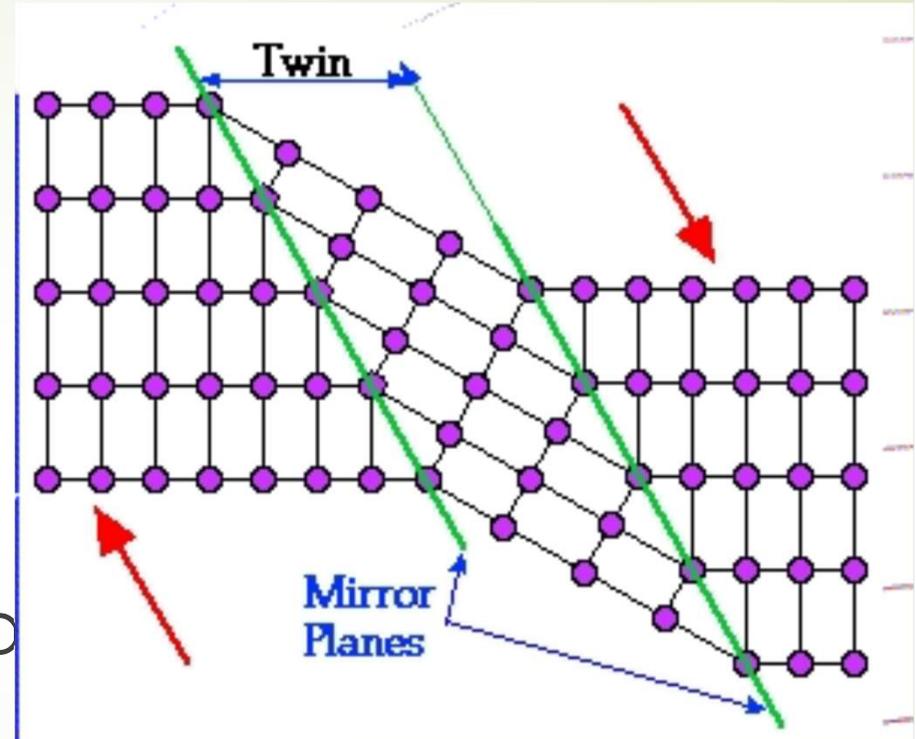
- A energia interfacial total é menor em materiais com grãos grandes ou grosseiros do que em materiais com grãos mais finos, uma vez que existe menos área de contorno nos primeiros;
Os grãos crescem quando se encontram a temperaturas elevadas, a fim de reduzir a energia de contorno total;



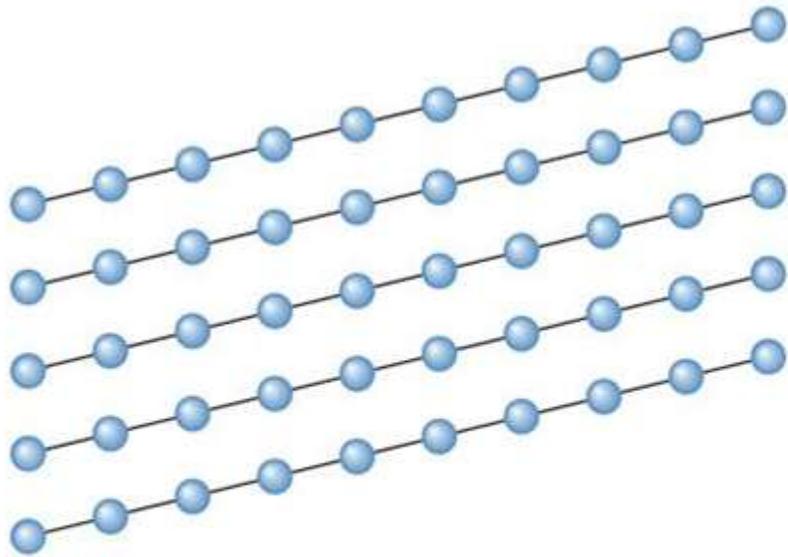
- Materiais com grãos menores apresentarão maior resistência, pois a diferença de orientação resultará em uma descontinuidade de plano de escorregamento;
- Apesar do arranjo desordenado dos átomos e da falta de uma ligação regular ao longo dos contornos de grãos um material policristalino ainda é muito forte.

CONTORNOS DE MACLA OU TWIN

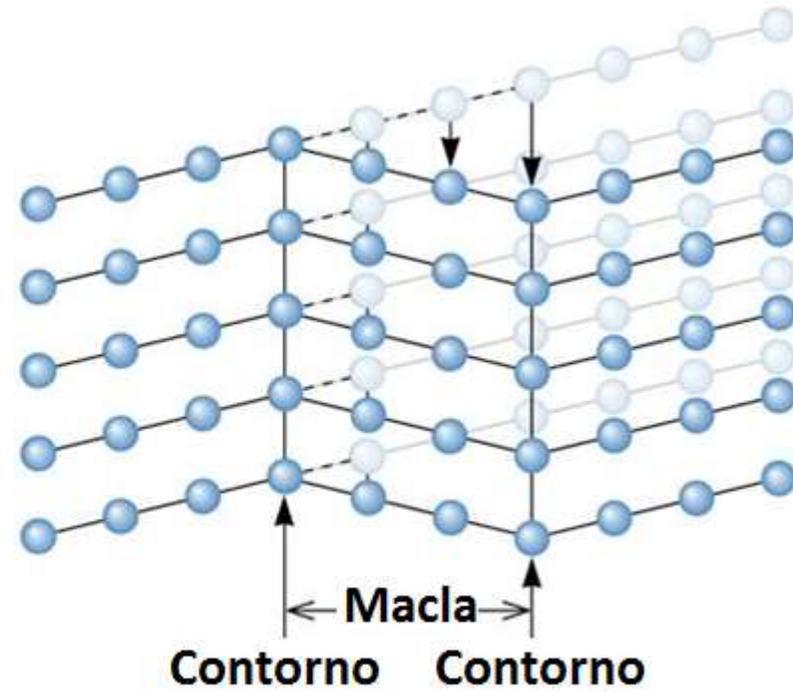
- ➔ É um tipo especial de contorno de grão
- ➔ Os átomos em um dos lados do contorno estão localizados em posições em imagem em espelho dos átomos no outro lado do contorno



Resultam de deslocamentos atômicos que são produzidos a partir de forças mecânicas de cisalhamento aplicadas (maclas de deformação) e também durante tratamentos térmicos de recozimento realizados após deformações (maclas de recozimento)



(a)

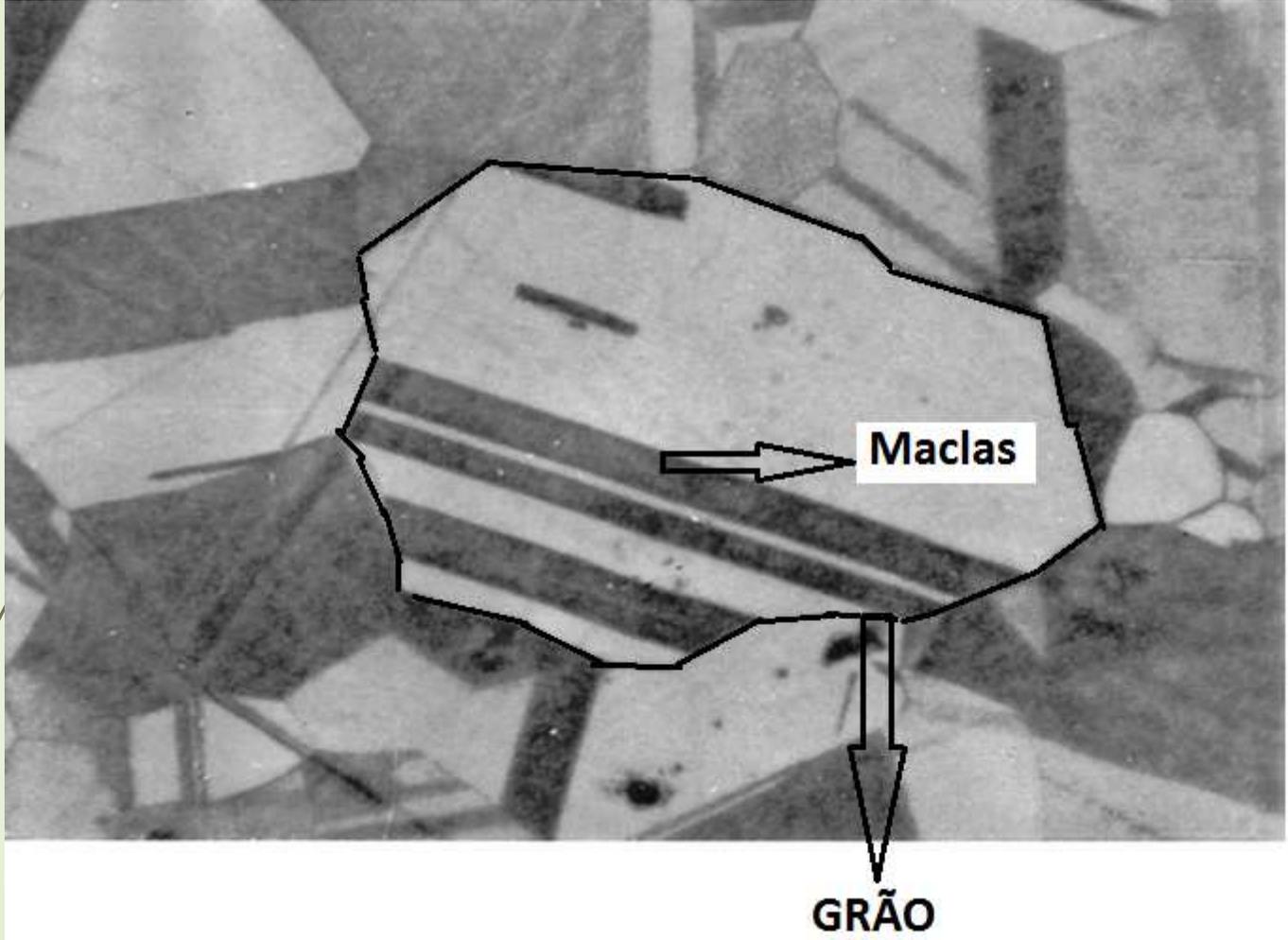


(b)

Application of a stress to the perfect crystal (a) may cause a displacement of the atoms, (b) causing the formation of a twin. Note that the crystal has deformed as a result of twinning.

CONTORNOS DE MACLA OU TWIN

- ▶ As maclas de recozimento são encontradas tipicamente em metais que possuem uma estrutura cristalina CFC, enquanto as maclas de deformação são observadas em metais com estruturas CCC e HC



Em um estudo metalográfico são utilizados reagentes químicos para se revelar o contorno de grão.

Os átomos de um contorno de grão estão ligados a seu vizinhos de forma menos intensa que os átomos localizados no interior do grão cristalino. Tal fato permite que a região dos contornos de grão sofra mais intensamente a ação de reagentes químicos.

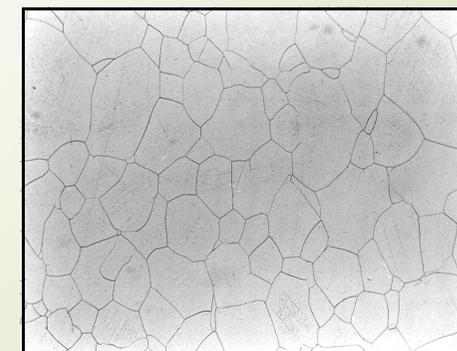
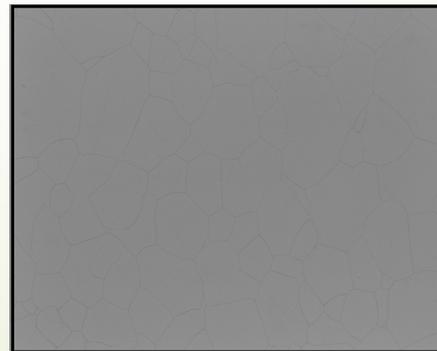
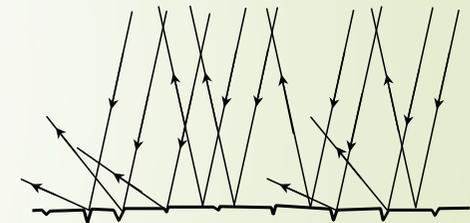
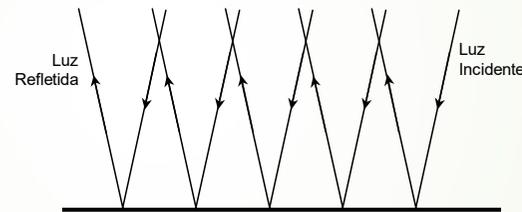
Isso permite revelar os contornos, pois é mais fácil reagir átomos dessa região em comparação com átomos do interior do grão.

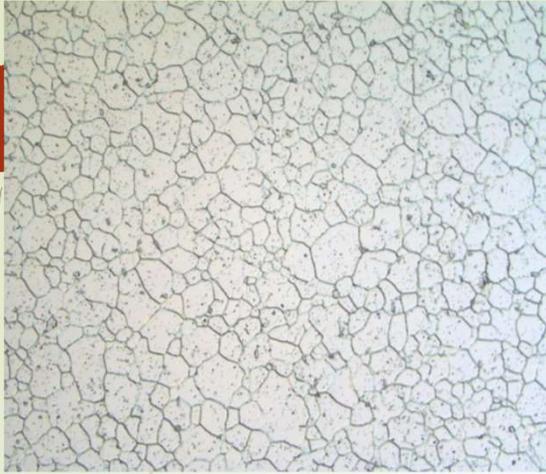
Dessa maneira, a região do contorno de grão aparece mais escura no microscópio devido à capacidade menor de refletir a luz em comparação com regiões onde a reação química não foi intensa, como mostra a figura 4.20.

Figura 4.20.

(a) Amostra só polida e
(b) atacada quimicamente.

A região do contorno de grão aparece mais escura no microscópio devido à menor capacidade de reflexão de luz da mesma.



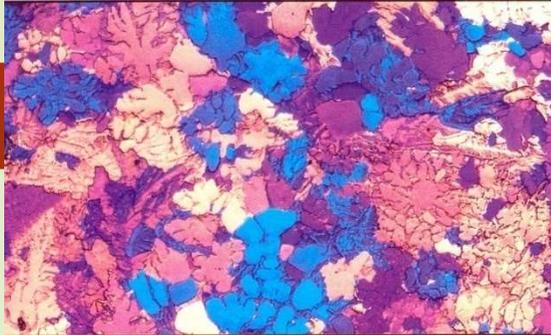


PREPARAÇÃO METALÓGRAFICA

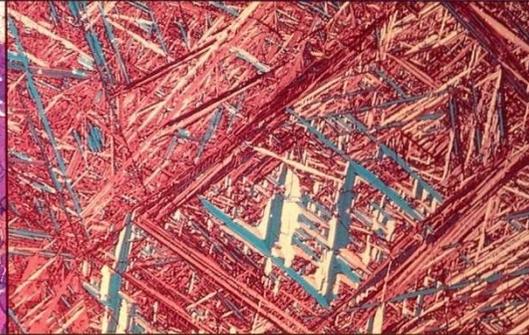


Fig. 4.11 (a) Grãos polidos e atacados quimicamente da forma como eles aparecem quando são vistos através de um microscópio ótico. (b) Seção feita através desses grãos mostrando como as características do ataque químico e a textura da superfície resultante variam de grão para grão devido a diferenças na orientação cristalográfica. (c) Fotomicrografia de uma amostra de latão policristalino. Ampliação de 60×. (Esta fotomicrografia é uma cortesia de J. E. Burke, General Electric Co.)

Non-Ferrous

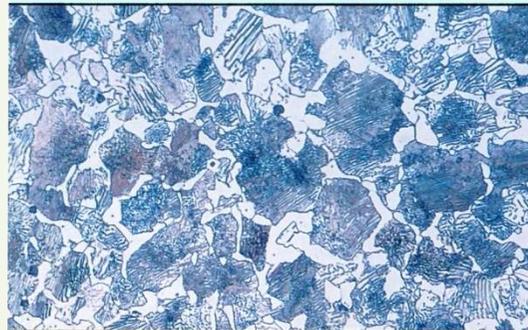


Aluminum

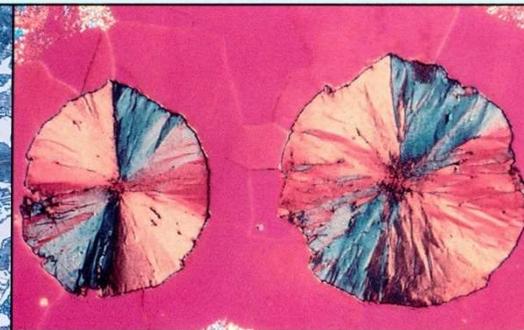


Aluminum-Bronze

Ferrous



Medium Carbon Steel



Ductile Cast Iron

Titanium



Titanium 6-4

Sintered Carbides



Tungsten Carbide



Fig. 39 Fe-1C alloy etched with acidified 1 g Na_2MoO_4 in 100 mL H_2O to color the cathodic cementite. The cementite in the pearlite is blue; grain-boundary cementite is violet. 500 \times . (G.F. Vander Voort)

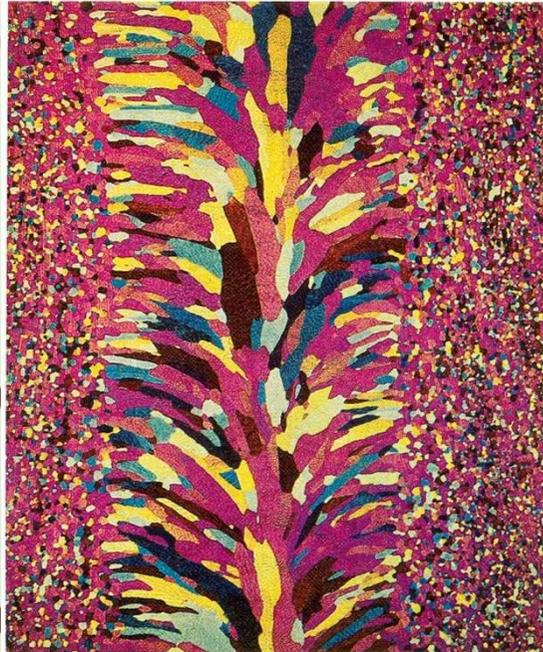


Fig. 32 Electron beam welded 32-mm (1 $\frac{1}{4}$ -in.) thick C103 plate. The vivid grain color separation is due to heat tinting. See Fig. 31 for specimen preparation. 10 \times . (P.E. Danielson)

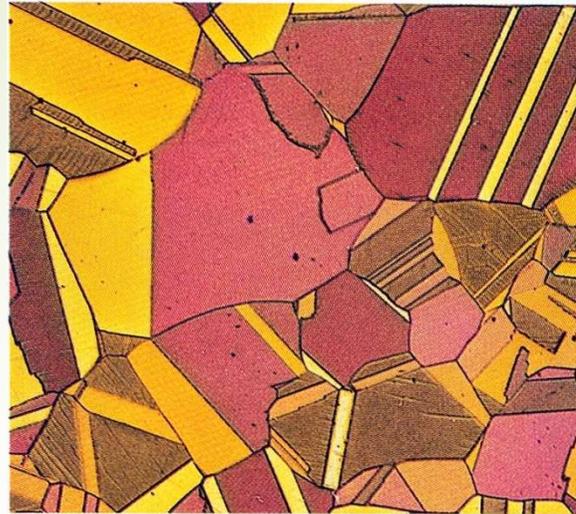


Fig. 42 Alpha-brass (Cu-30Zn), cold worked and annealed. Color etching with Klemm's I reagent, which required approximately 1 h, revealed all the grains and annealing twins. 100 \times . (G.F. Vander Voort)



Fig. 52 Same weld as shown in Fig. 31, but specimen swab etched in 5 mL lactic acid, 5 mL H_2O_2 , 5 mL HNO_3 , and 5 mL HF, then anodized (see Fig. 50 for solution) at 115 V. The Ta-10W is yellow, the C103 blue-green, and the alloyed area pink-red. 10 \times . (P.E. Danielson)

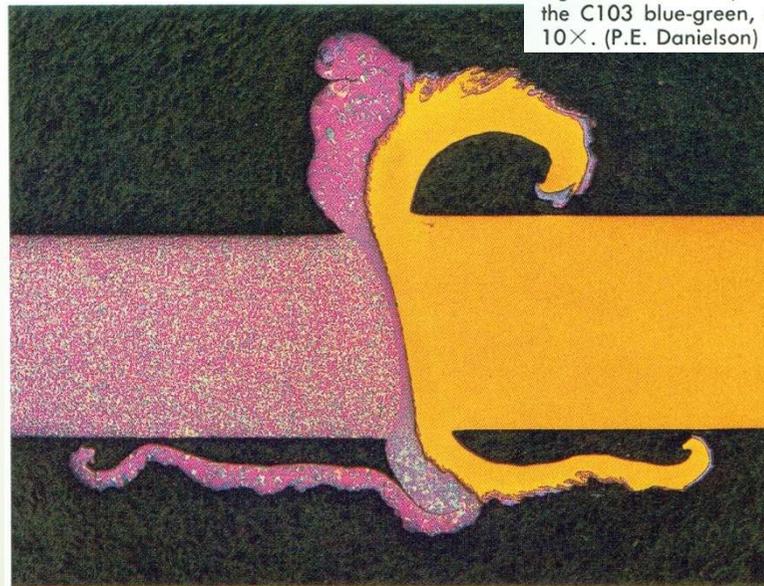


Fig. 51 Friction-welded tubing (zirconium to titanium). Note the small heat-affected zone produced by this weld process. The zirconium is yellow; the titanium, blue-purple. See Fig. 50 for specimen preparation. 10 \times . (P.E. Danielson)



DIAGRAMAS DE FASES

CAPÍTULO 9
CALLISTER

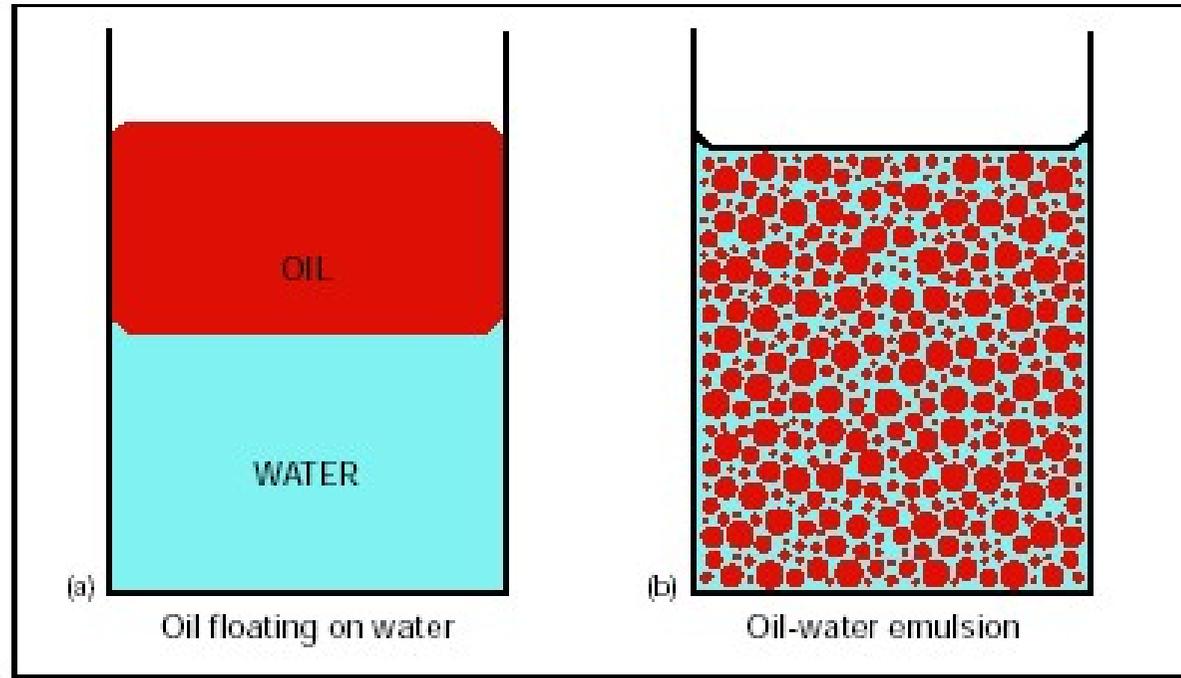
Profa.Dra. Lauralice Canale

FASE

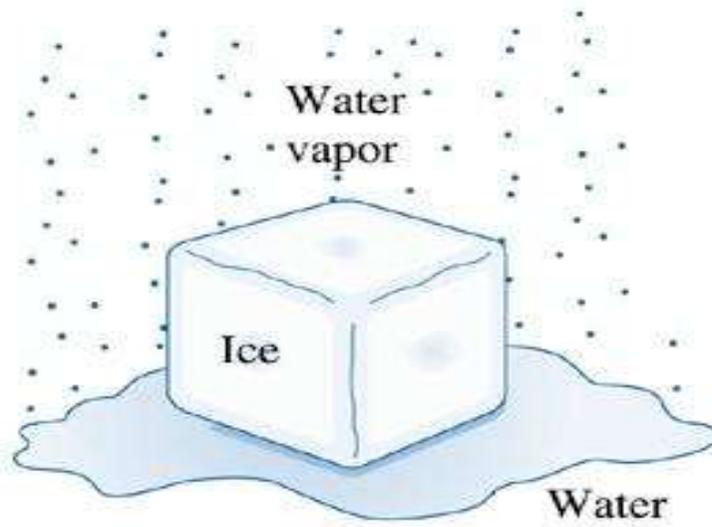
Uma fase pode ser definida como uma porção homogênea de um sistema que possui características físicas e químicas uniformes.

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.

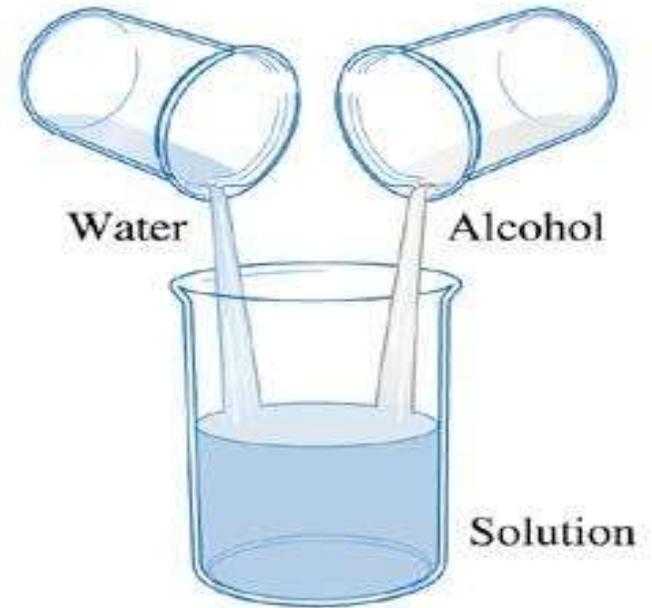
FASE



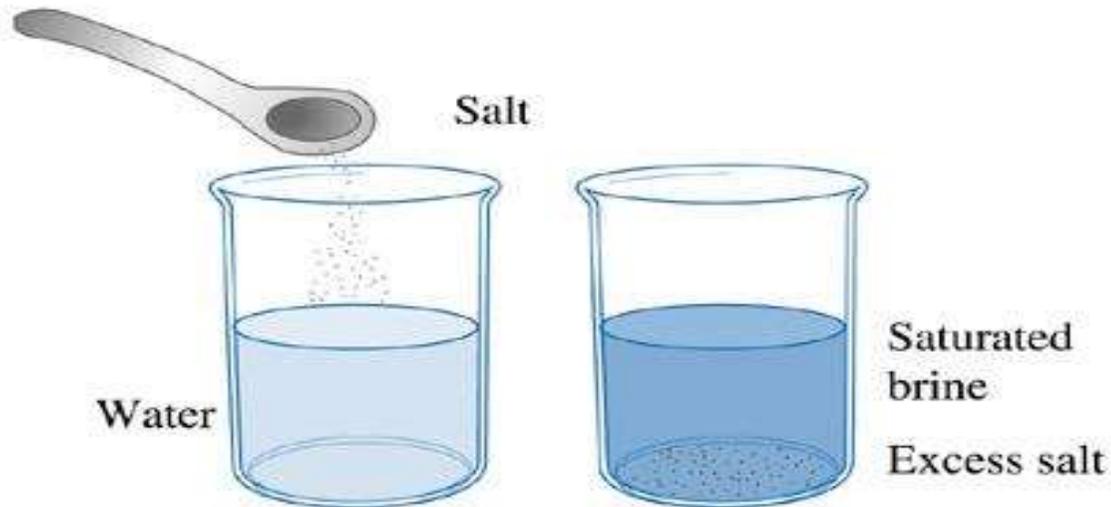
Duas fases em equilíbrio (a) óleo flutuando em água (b) emulsão de água-óleo. Ambos possuem as mesmas fases mas (a) possui uma microestrutura diferente de (b)



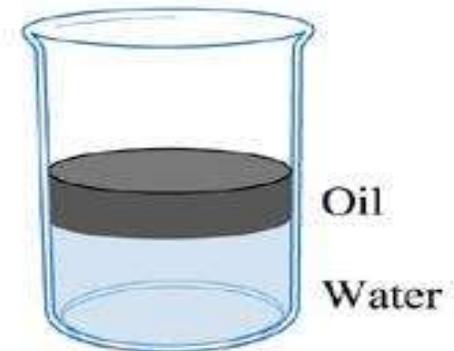
(a)



(b)

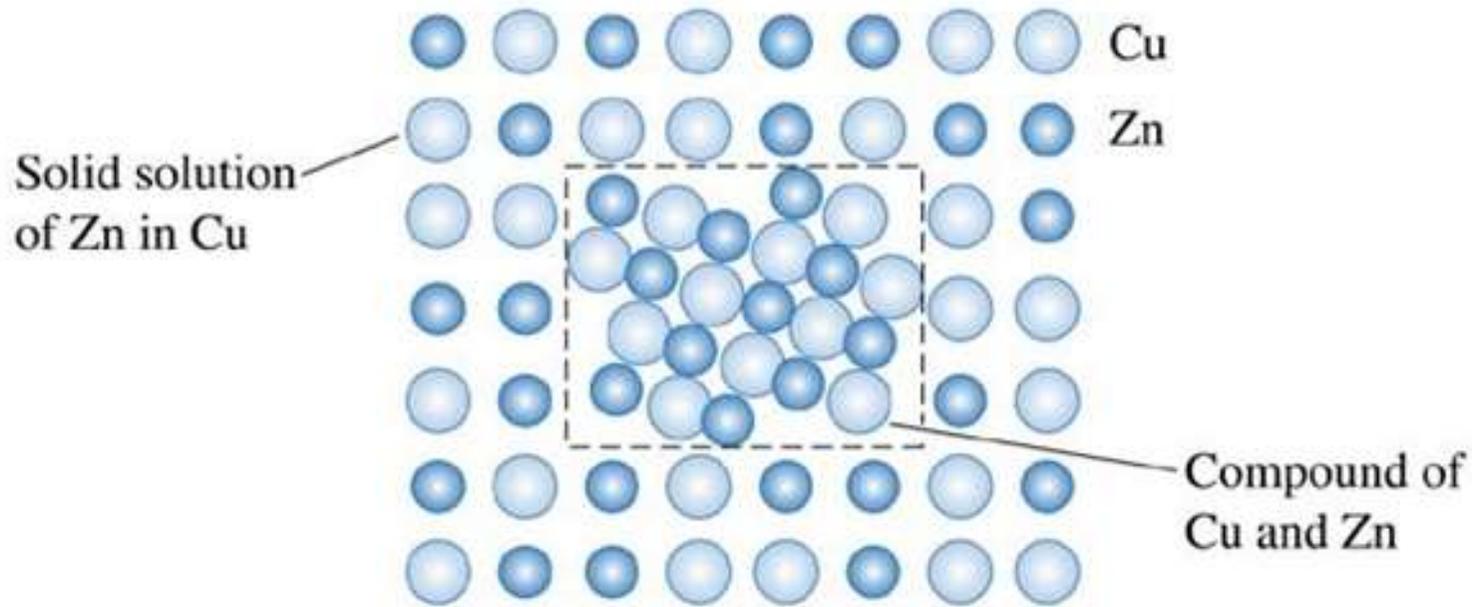


(c)



(d)

- **Solubilidade** – A quantidade de um material que se dissolverá completamente num segundo material sem criar uma segunda fase.
- **Solubilidade ilimitada** – Quando a quantidade de um material, que se dissolverá no outro sem criar uma nova fase, é ilimitada.
- **Solubilidade limitada**- Quando existe uma quantidade máxima de um material (soluto), que poderá ser dissolvido em outro material (solvente).



(c)

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

Liga Cu-Zn. À temperatura de 30% Zn, forma-se uma solução sólida com uma solubilidade limitada da



❖ Uma fase é identificada pela composição química e microestrutura

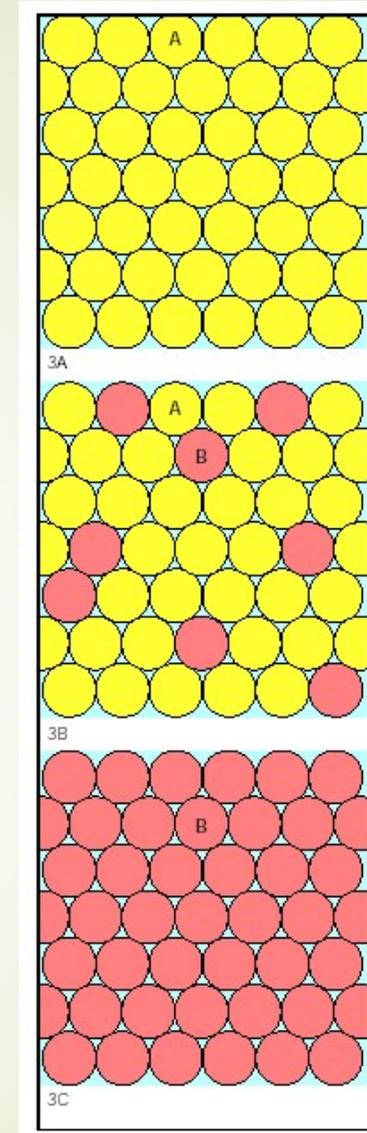
❖ A interação de 2 ou mais fases em um material permite a obtenção de propriedades diferentes

❖ É possível alterar as propriedades do material alterando a morfologia e

distribuição das fases

SOLUÇÕES

As soluções sólidas são formadas de soluto que é capaz de se dissolver no solvente e, é formada por **átomos intersticiais** formando com o solvente uma única fase. 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 : ouro e prata

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

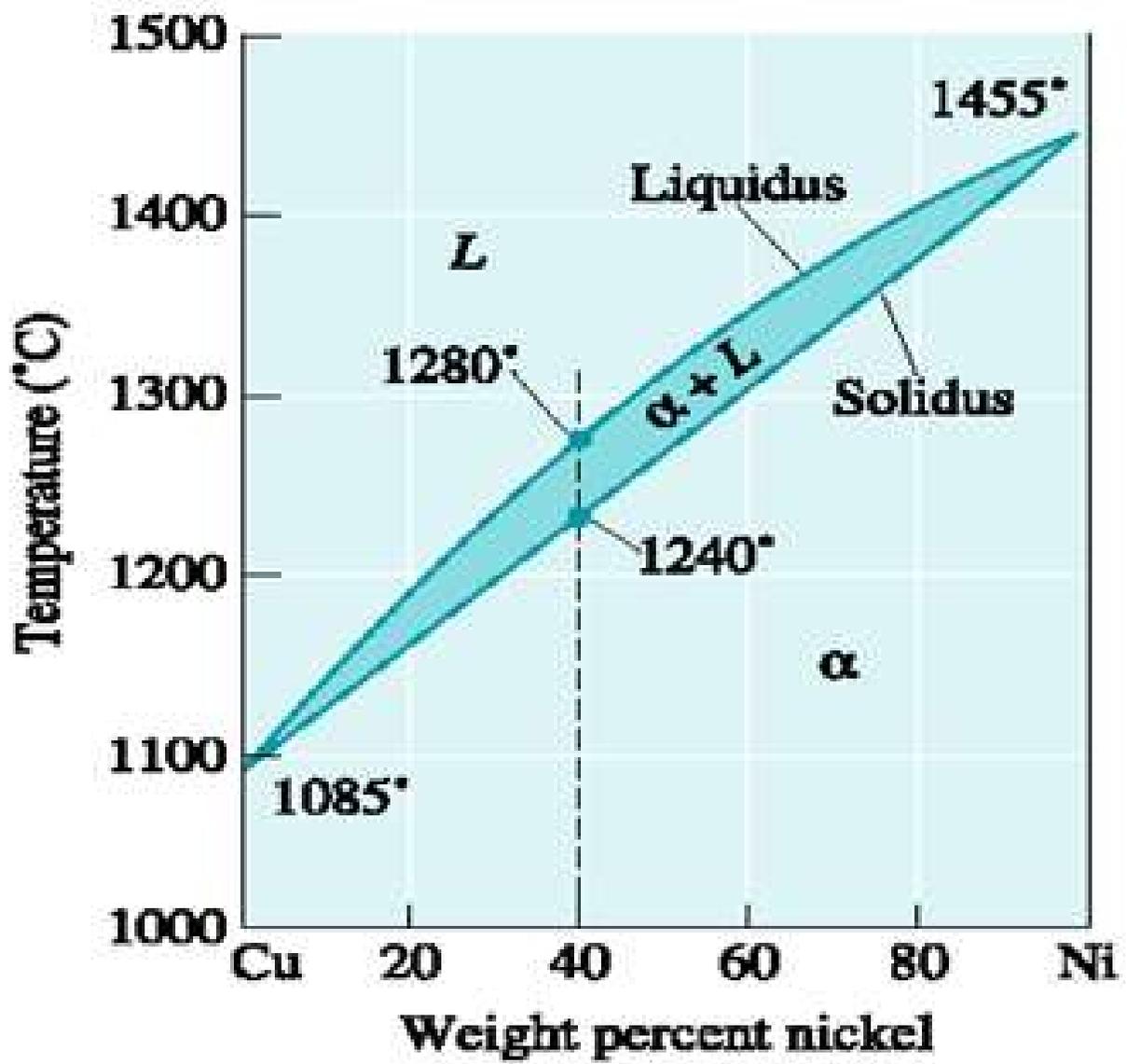
□ Diagrama de fase binário –

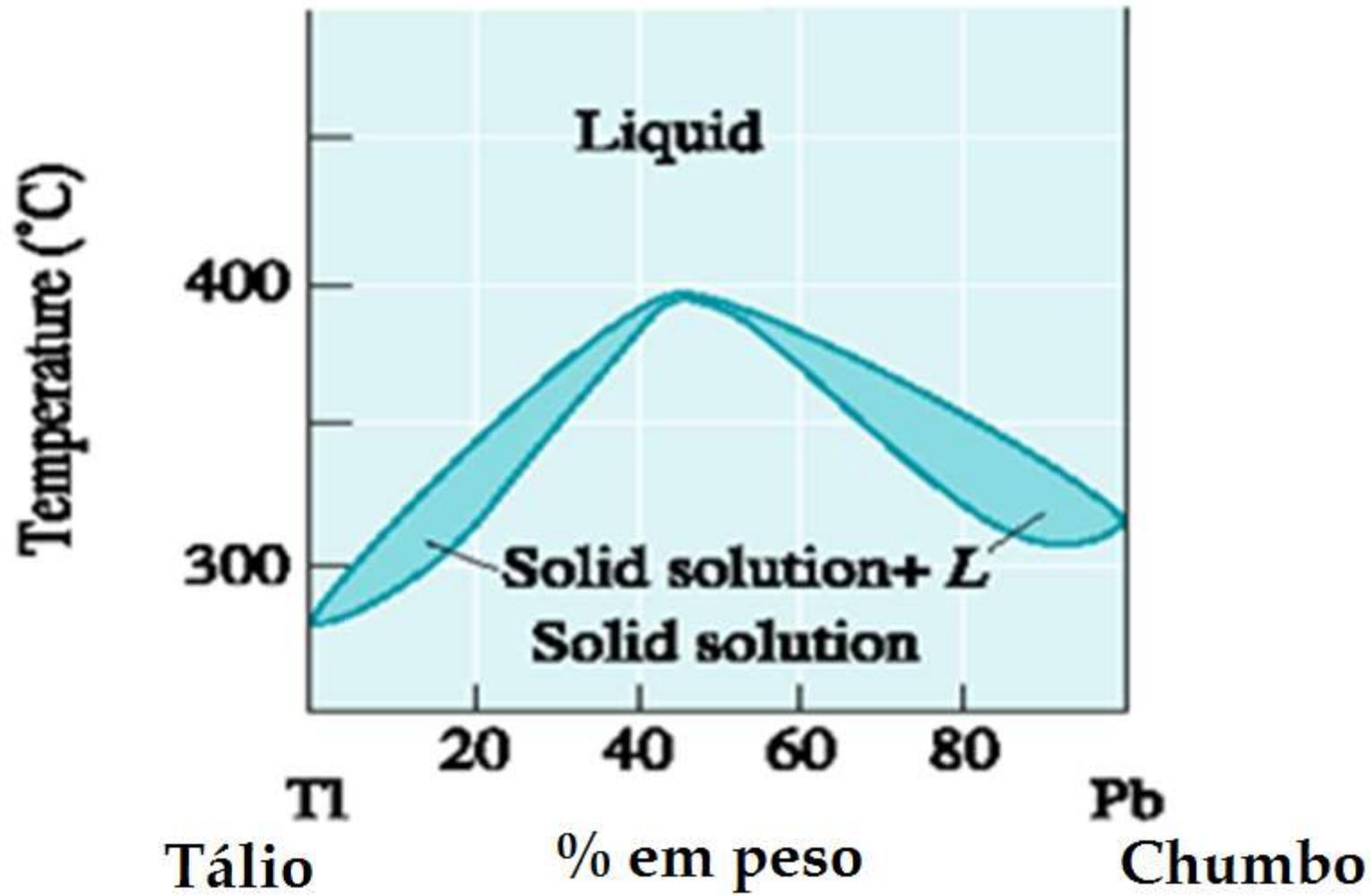
□ Diagrama de fase ternário-

□ Diagrama Isomorfo- diagrama de fases com solubilidade sólida ilimitada

□ Temperatura liquidus- A temperatura em que o primeiro sólido se forma durante a solidificação

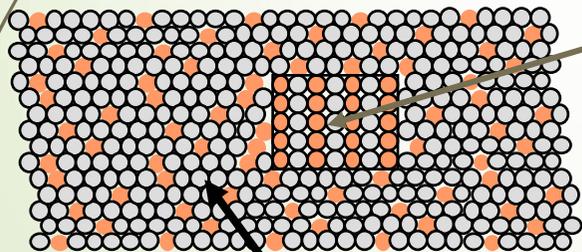
□ Temperatura solidus- Temperatura abaixo da qual todo o líquido está completamente solidificado.





Partículas de uma nova fase em ligas

- Solução sólida de **B** em A mais partículas de uma nova fase
(usualmente para maiores quantidades de B)



Partículas de segunda fase
--diferente **composição**
--frequentemente diferente estrutura.

Solução Sólida átomos de B em A



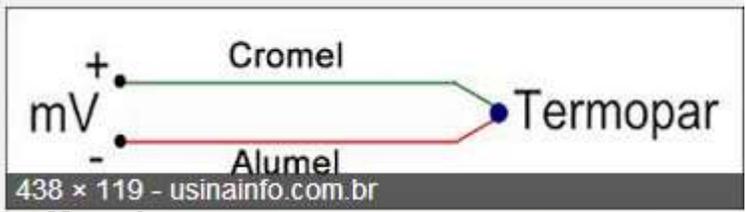
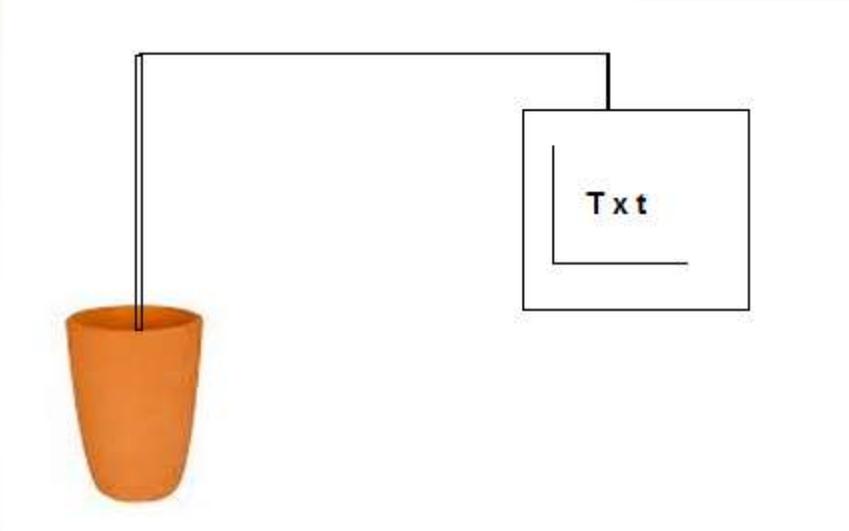
Exposed



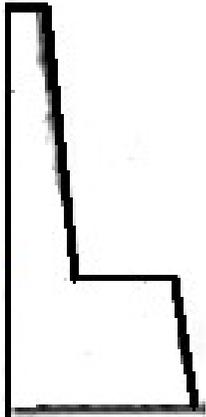
Ungrounded



Grounded



Temperatura



Tempo

Ni puro

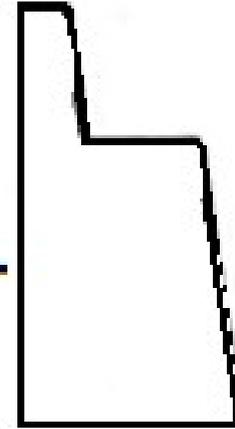
Temperatura



Tempo

50% Ni
50% Cu

Temperatura



Tempo

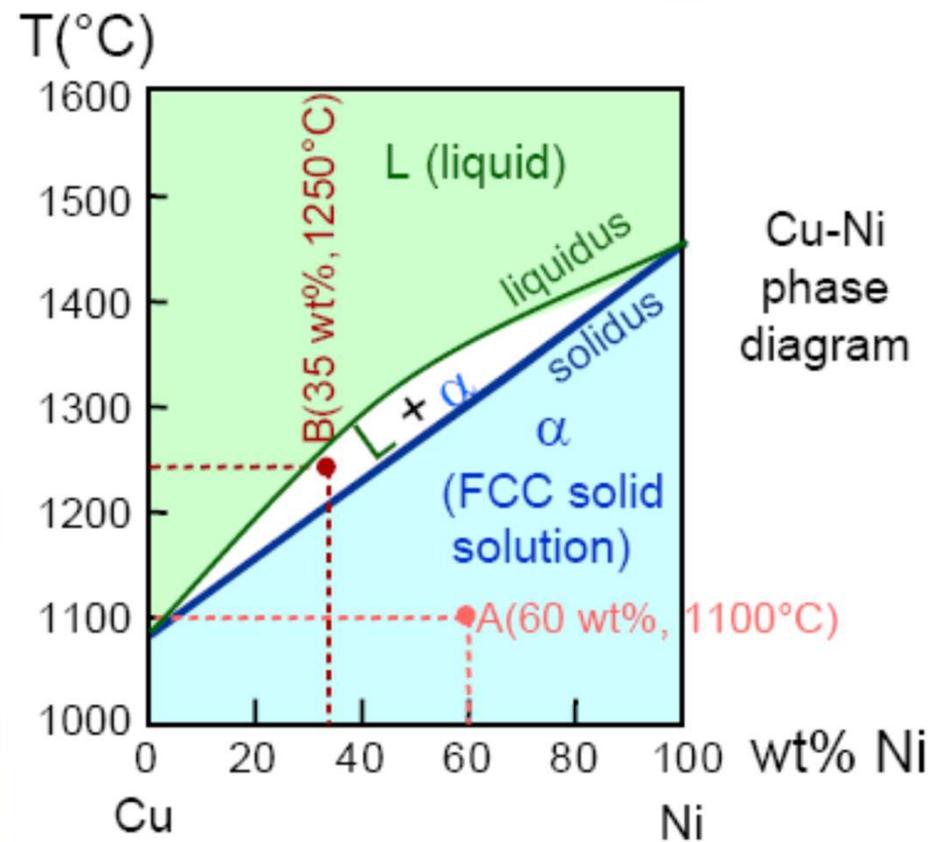
Cu puro

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 , 1100° C
1 fase : α

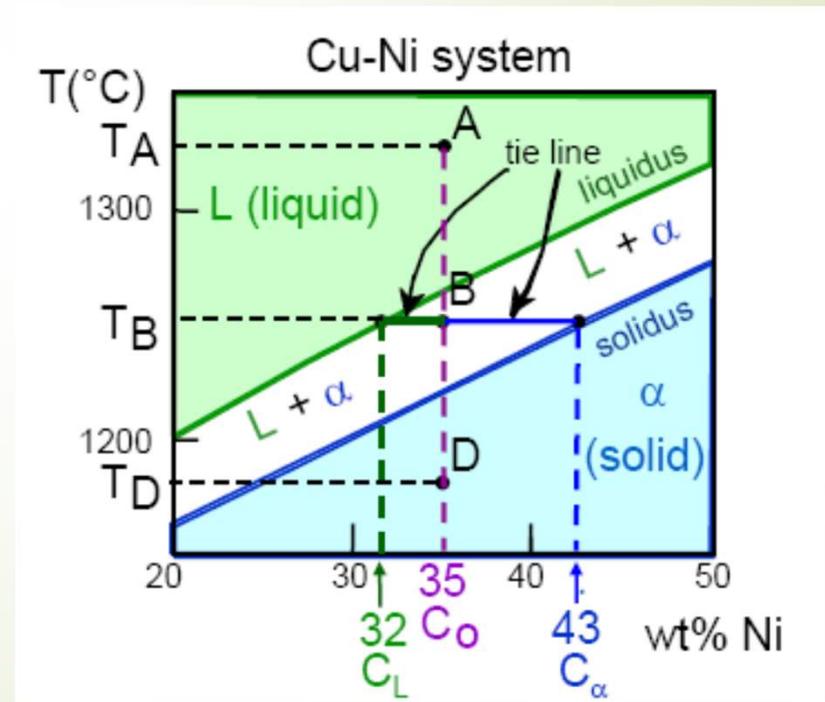
B: 35% WT, 1250° C
2 fases: L + α



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:

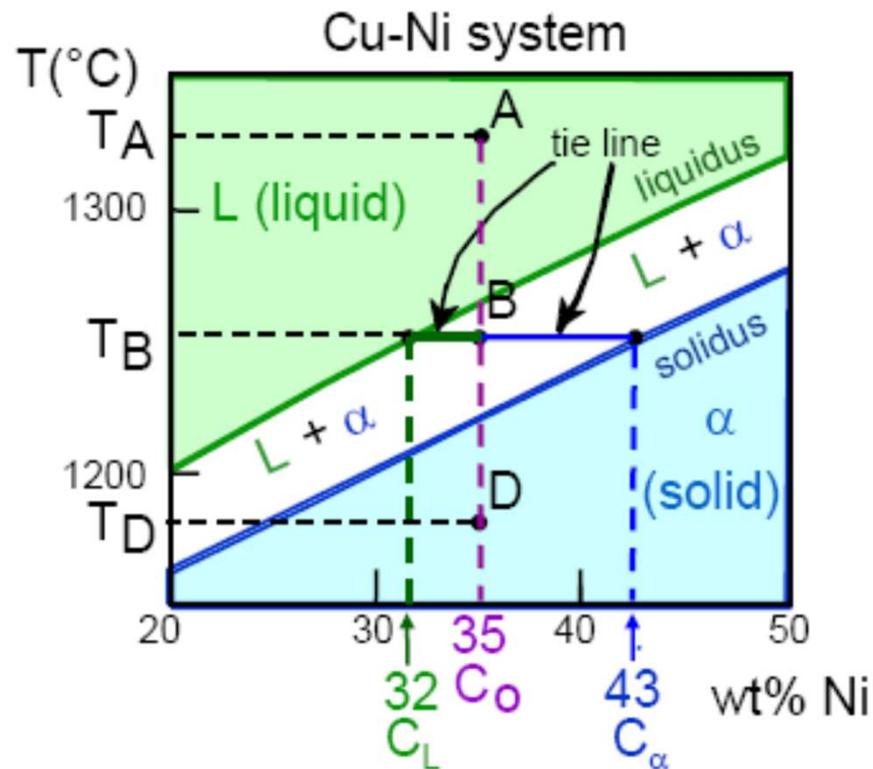
1. Constrói-se uma linha de amarração através da região bifásica à temperatura da liga
2. Anotam-se as intersecções da linha de amarração com as fronteiras entre as fases em ambos os lados
3. Traçam-se linhas perpendiculares à linha de amarração a partir dessas intersecções até o eixo horizontal das composições, onde cada uma das respectivas fases pode ser lida:



DETERMINAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES DAS FASES

No exemplo do sistema Cu - Ni tem-se :

Composição: $C_O = 35\% \text{ Ni}$



Em T_A :
Somente líquido
 $C_L = C_O$

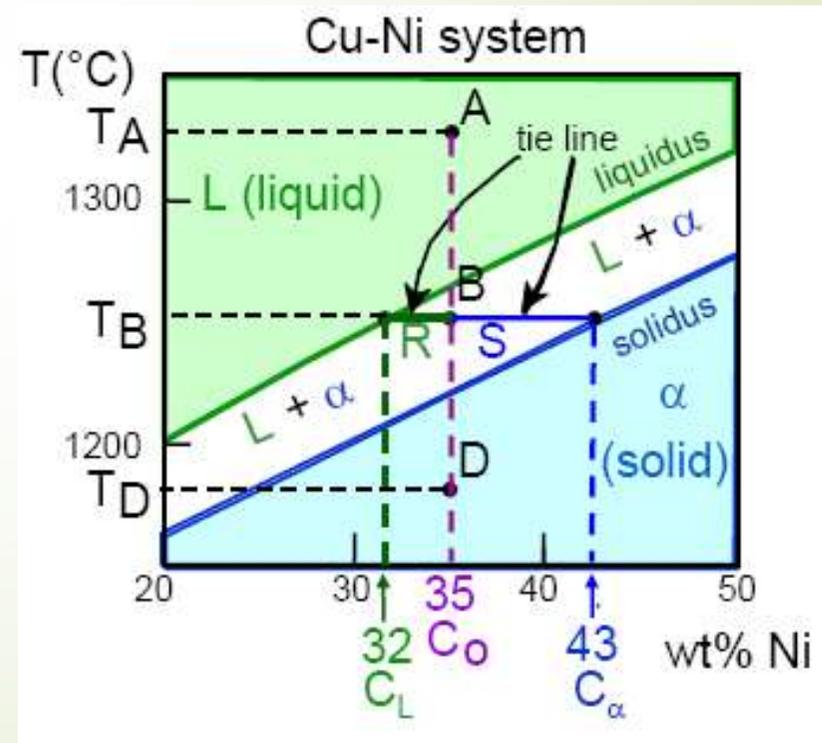
Em T_D :
Somente sólido
 $C_{\alpha} = C_O$

Em T_B :
 $C_L = C_{\text{líquido}} = 32\% \text{ Ni}$
 $C_{\alpha} = C_{\text{sólido}} = 43\% \text{ Ni}$

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 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 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

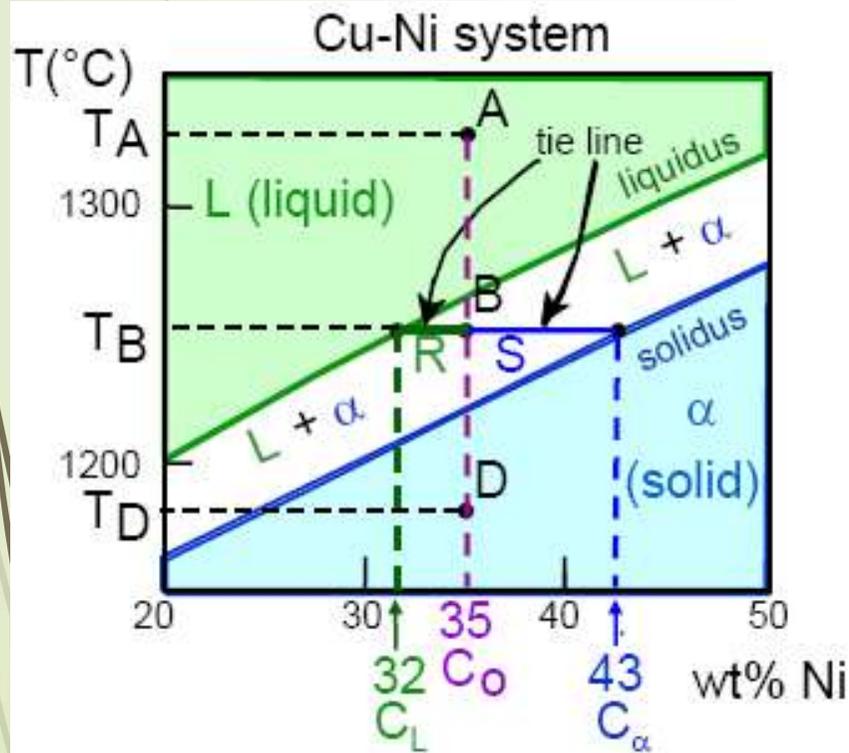


DETERMINAÇÃO DAS QUANTIDADES DAS FASES

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

Em um sistema Cu-Ni por exemplo:

Composição: $C_0 = 35\%$ Ni



Em T_A : somente líquido

$$W_L = 100\% , W_\alpha = 0$$

Em T_D : somente sólido

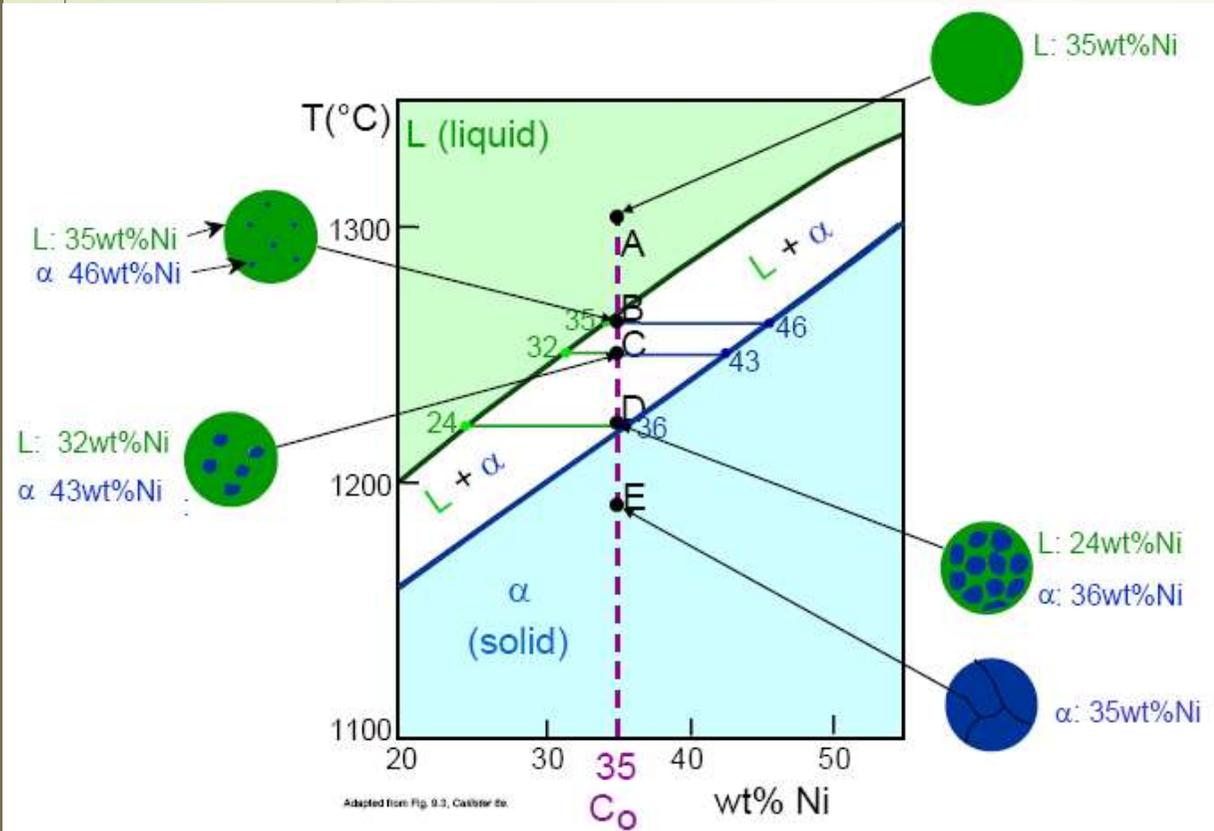
$$W_\alpha = 100\% , W_L = 0$$

Em T_B : 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 isomorficas



A: completamente líquida

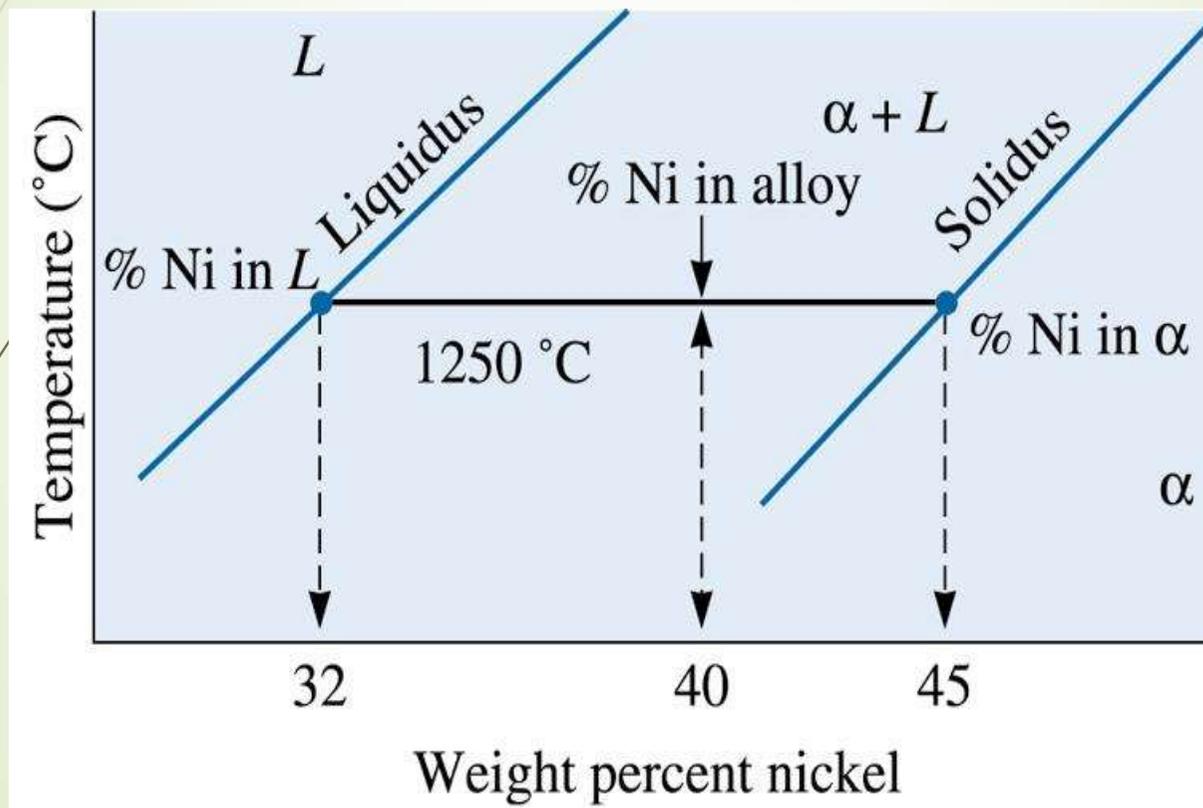
B: linha liquidus - primeiro sólido a começa a se formar

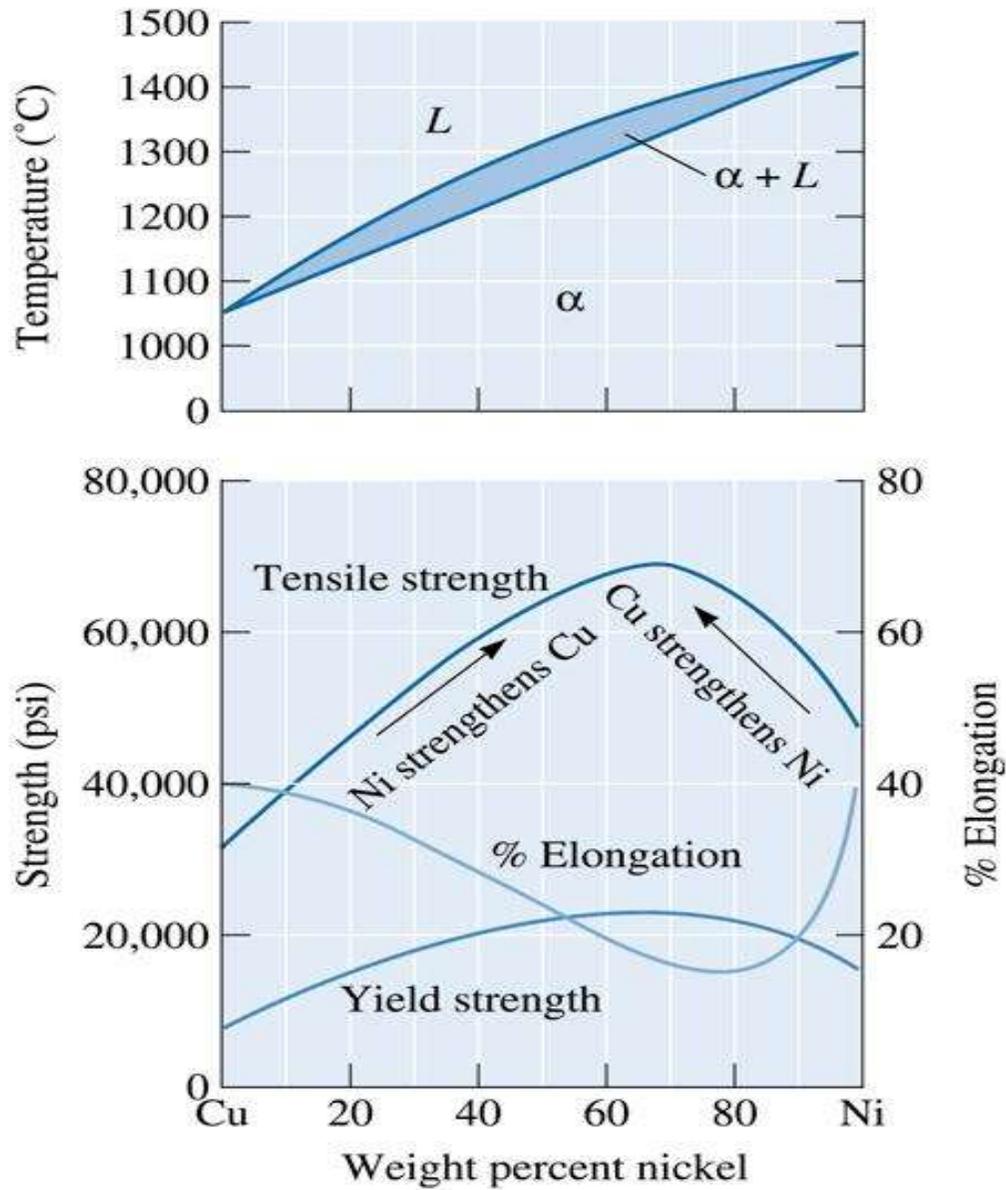
C: fases líquida e a

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

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

Calcule a quantidade de alfa e de líquido a 1250 graus C na liga Cu 40%Ni.





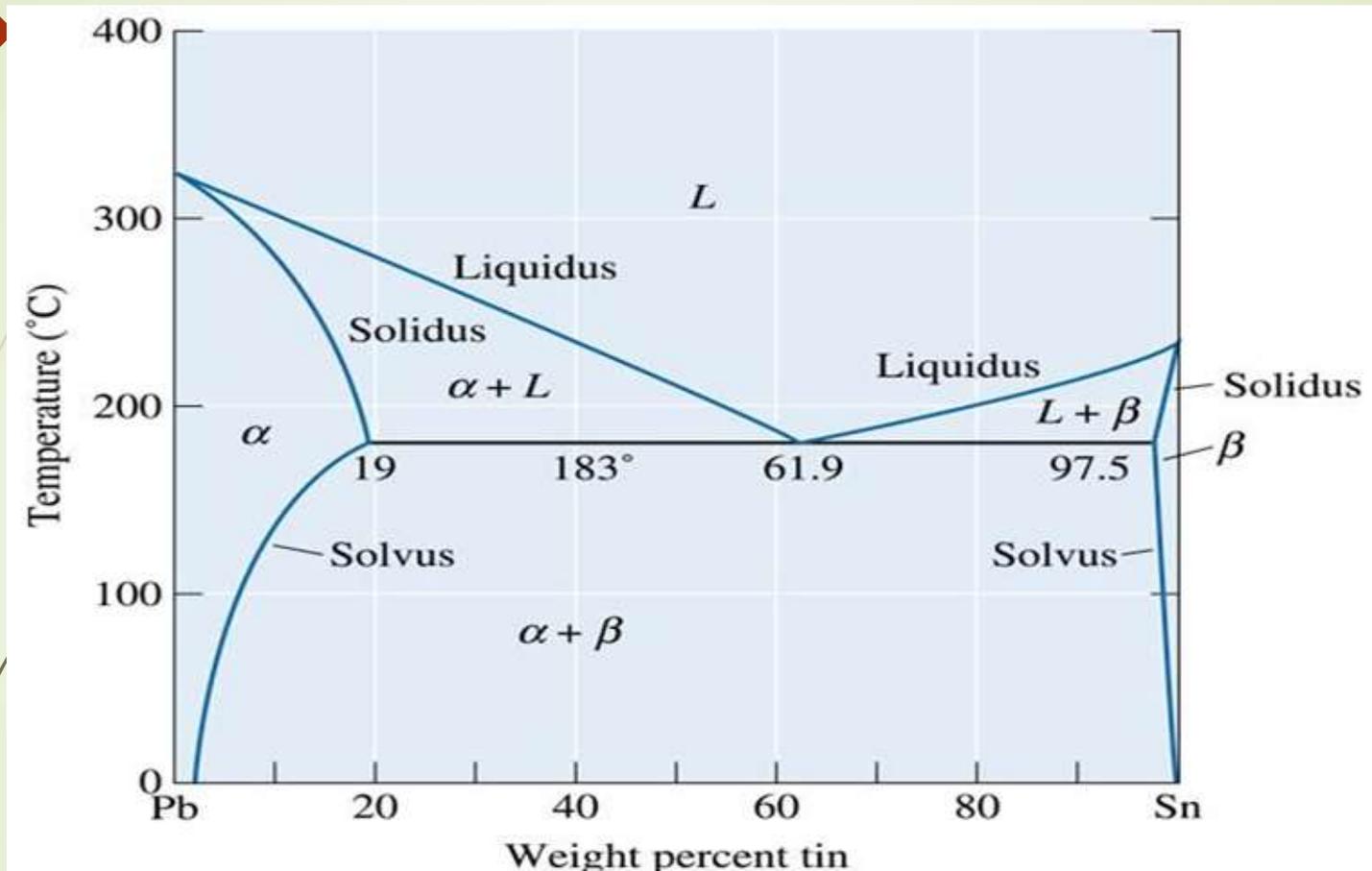
Propriedades mecânicas de ligas Cu Ni. O Cu aumenta linearmente a resistência com a adição de até 60% Ni. O Ni com até 40% de Cu.

Para atingir o equilíbrio na estrutura final, a taxa de resfriamento deve ser extremamente baixa.

Deve haver tempo suficiente para permitir a difusão dos átomos de Cu e Ni, produzindo as composições dadas no diagrama de equilíbrio.

Em muitas situações práticas de fundição, a taxa de resfriamento é muito rápida para permitir o equilíbrio.

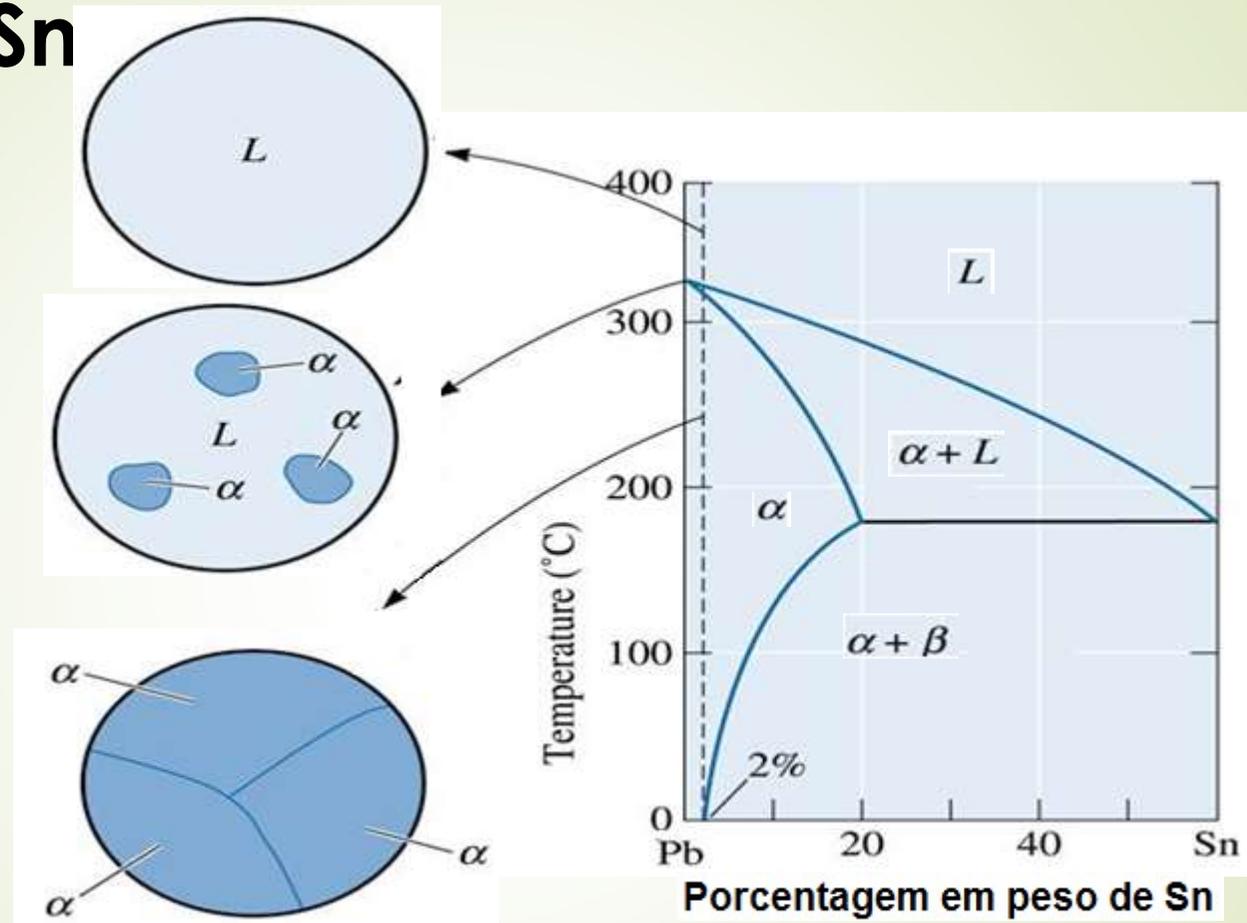
Diagrama de fase eutético



SOLVUS –

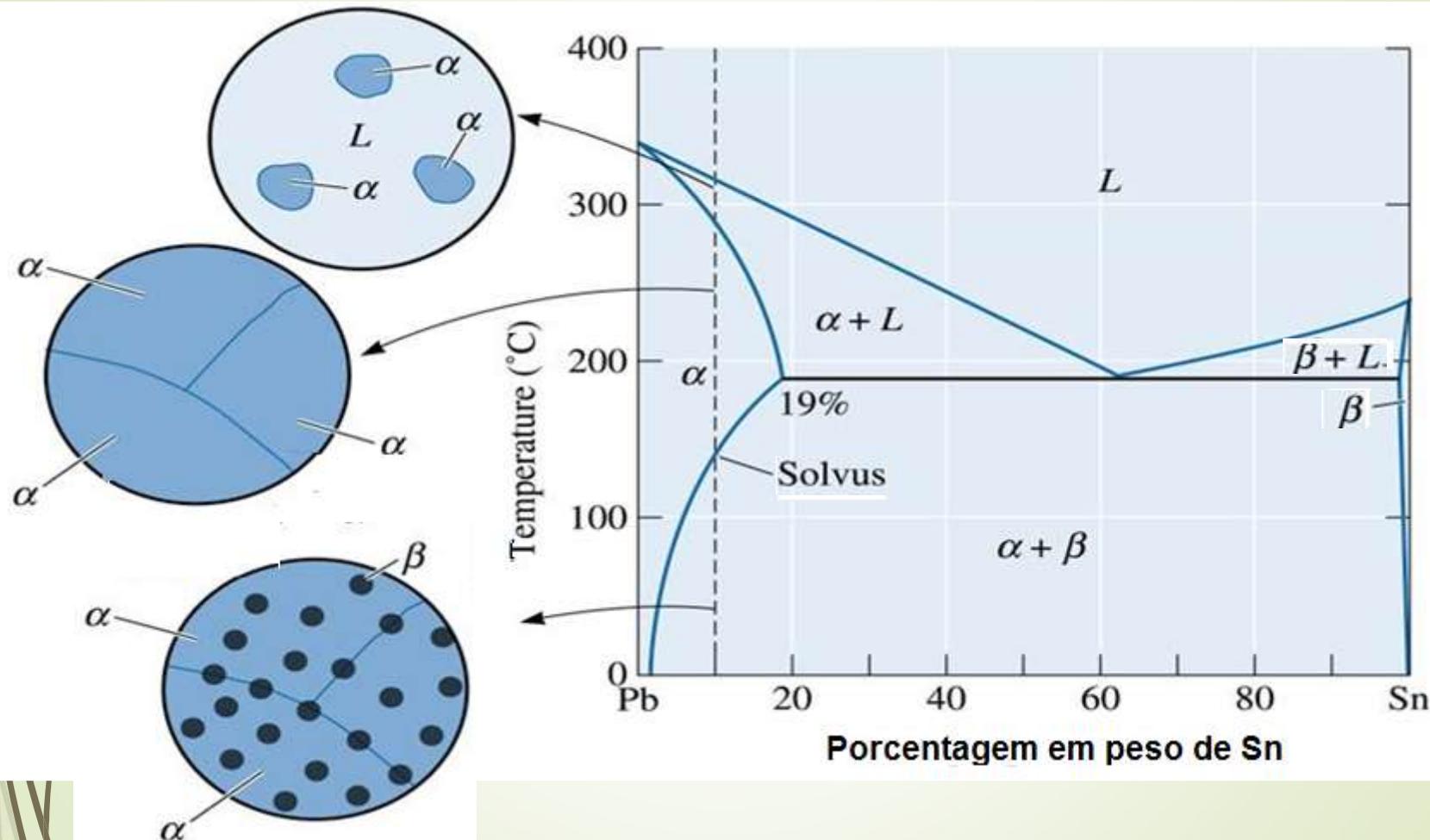
Uma curva de solubilidade que separa uma região de uma única fase para uma região de duas fases .

Solidificação e microestrutura de uma liga de Pb-2% Sn



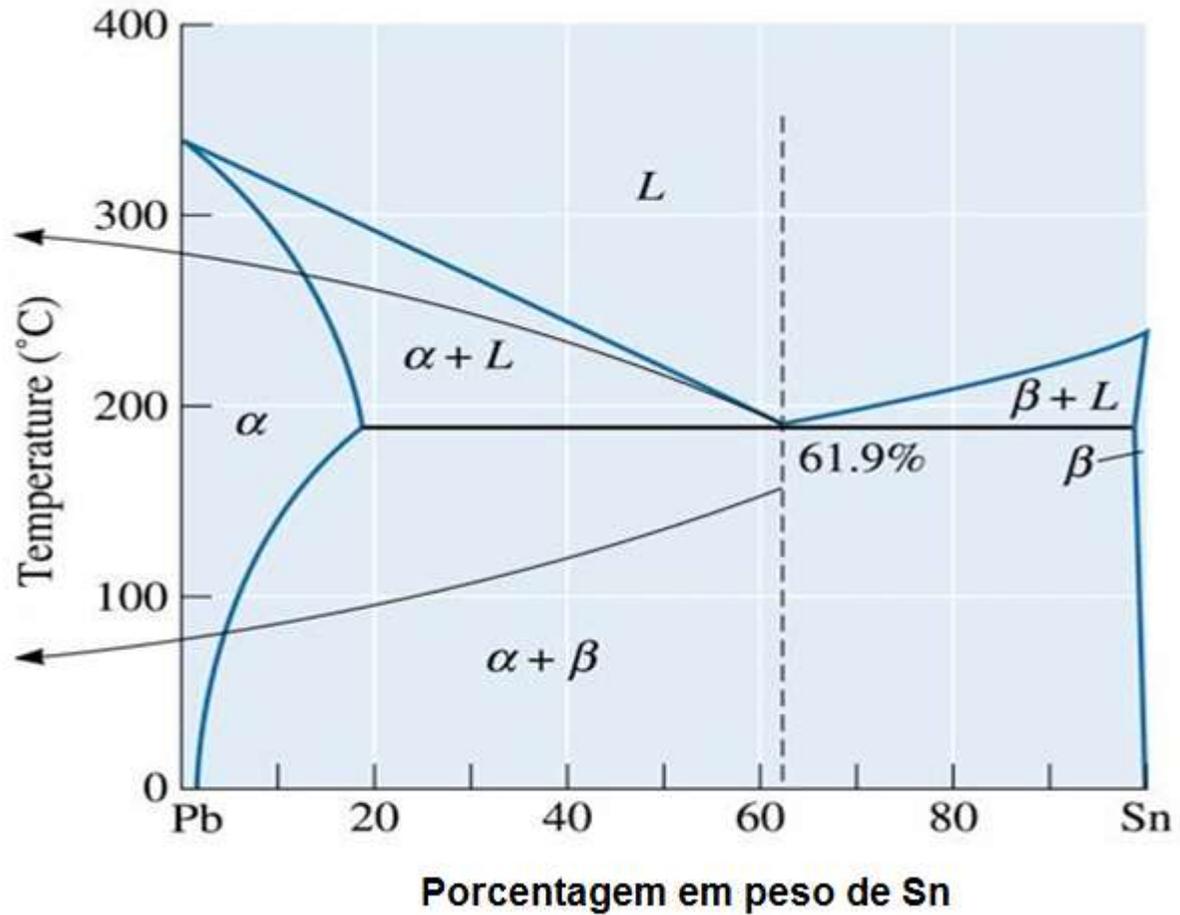
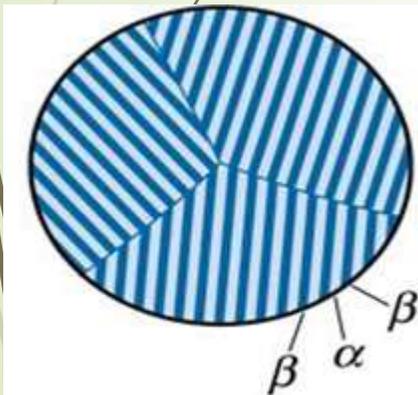
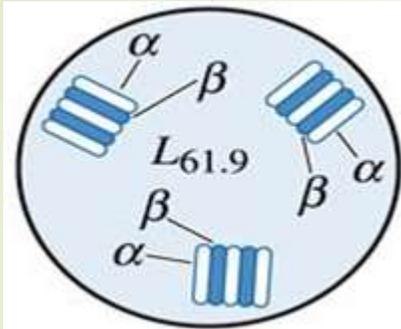
A liga é uma solução sólida de fase única.

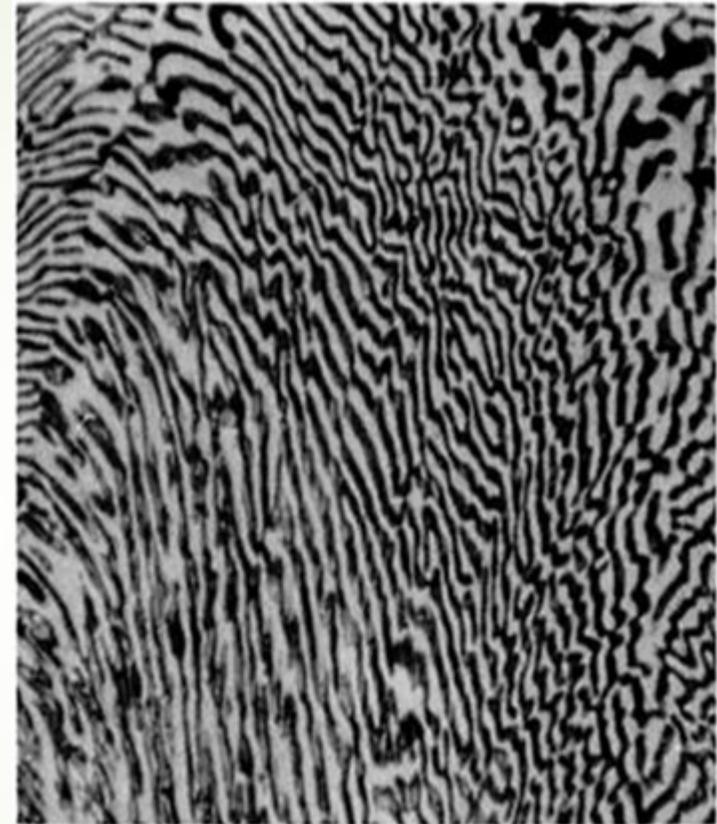
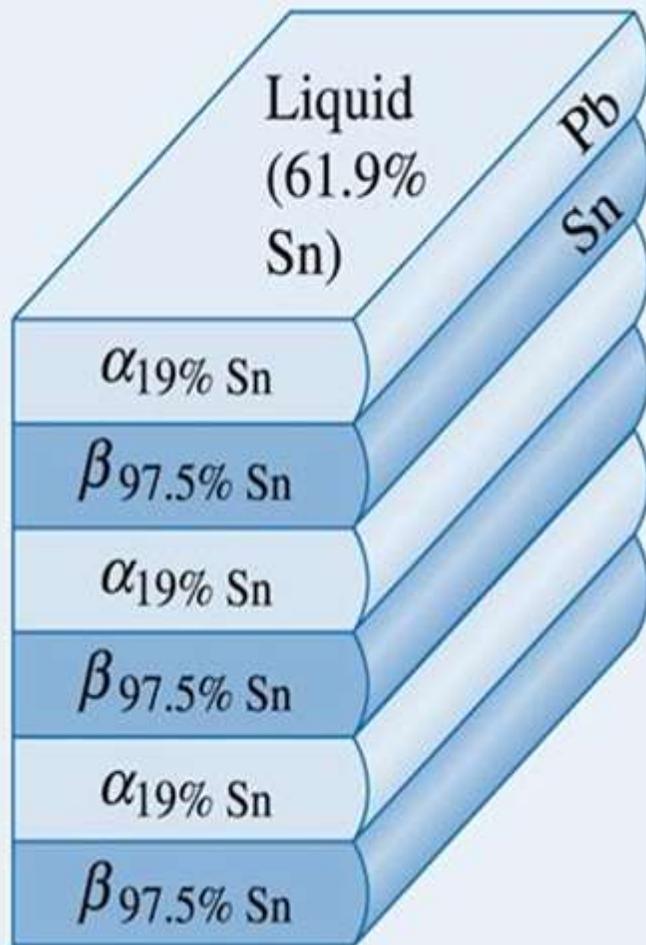
Solidificação, precipitação e microestrutura de uma liga Pb-10% Sn .



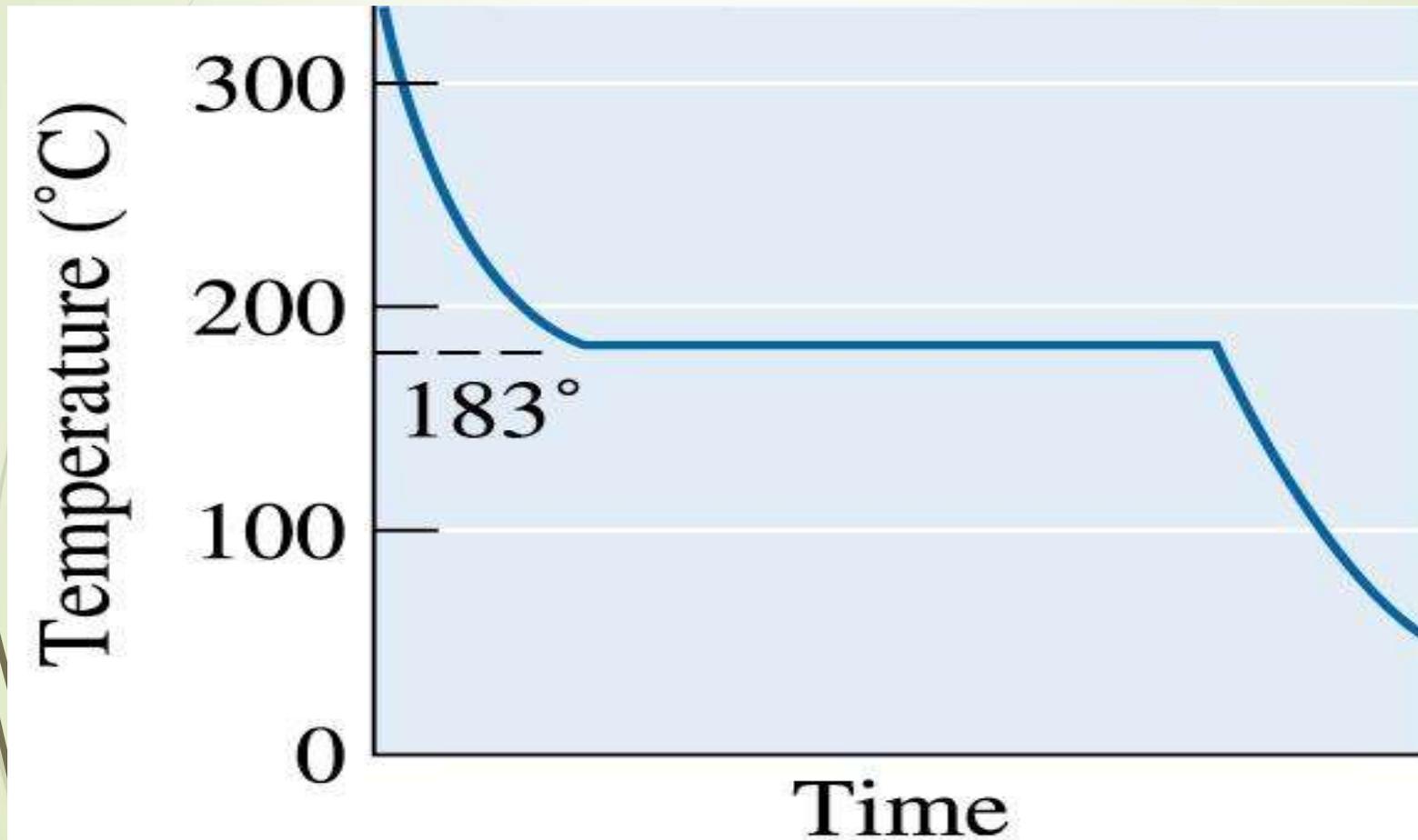
Algum endurecimento por precipitação ocorre com os precipitados sólidos β .

Solidificação e microestrutura de uma liga eutética Pb-61.9% Sn

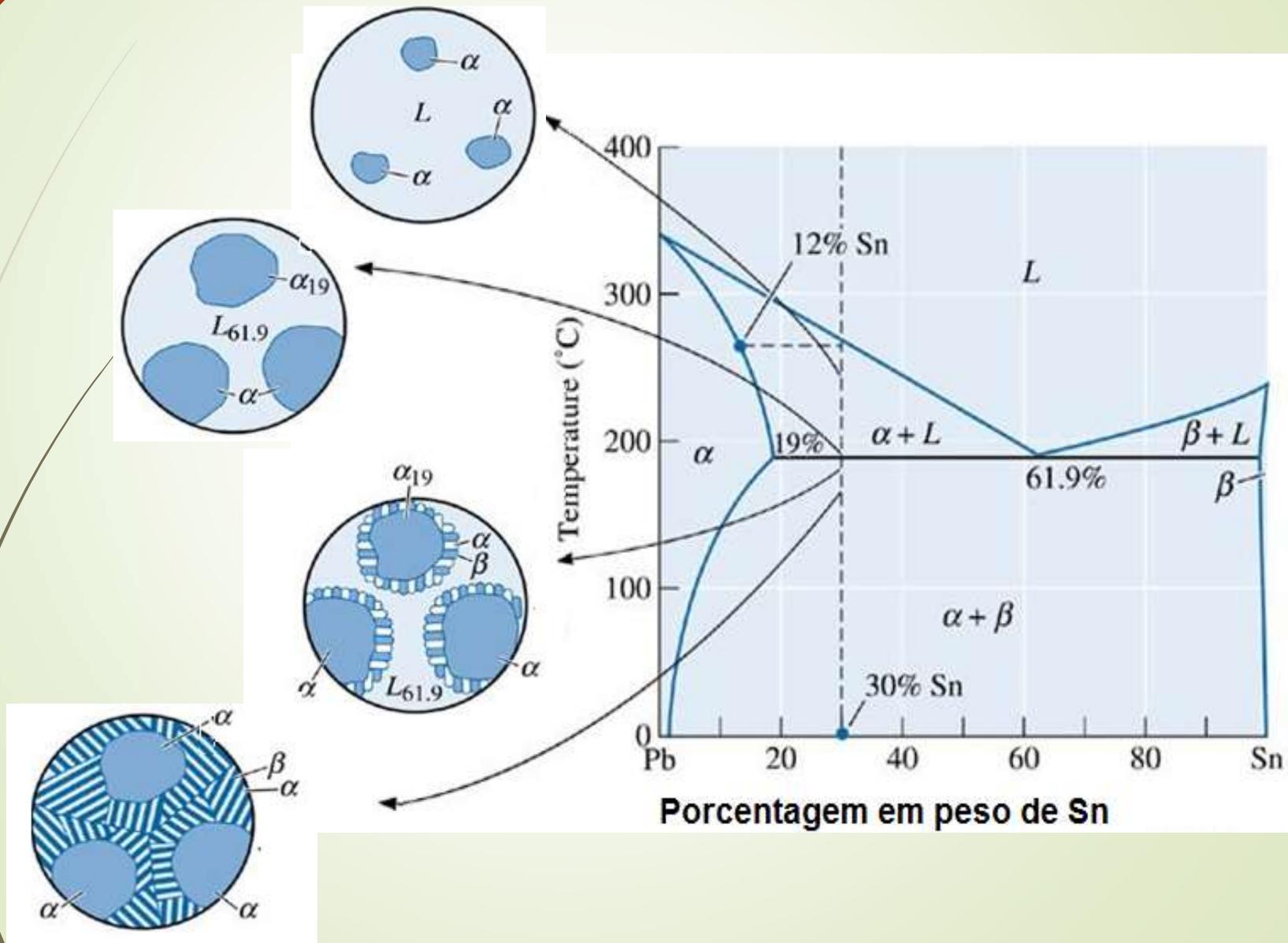




Regra de Gibbs

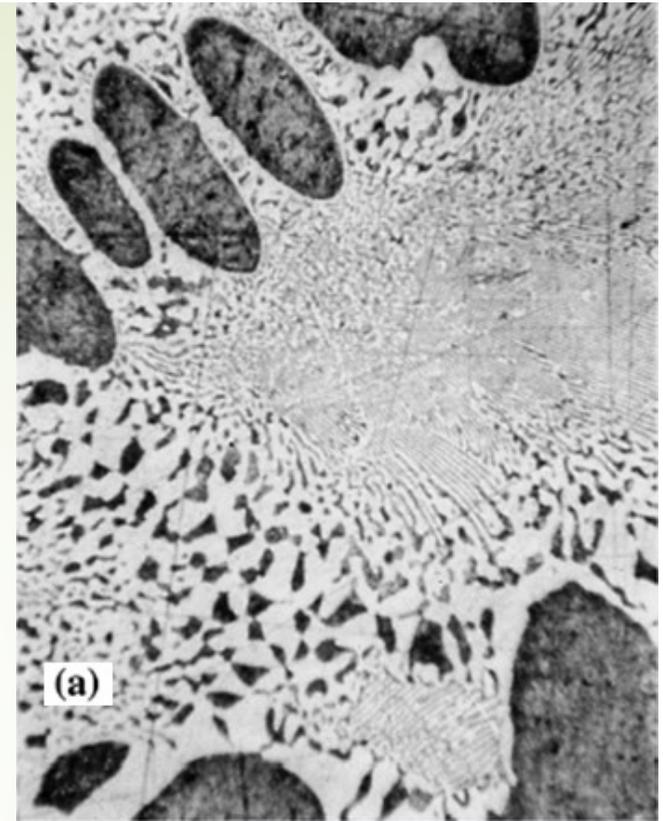
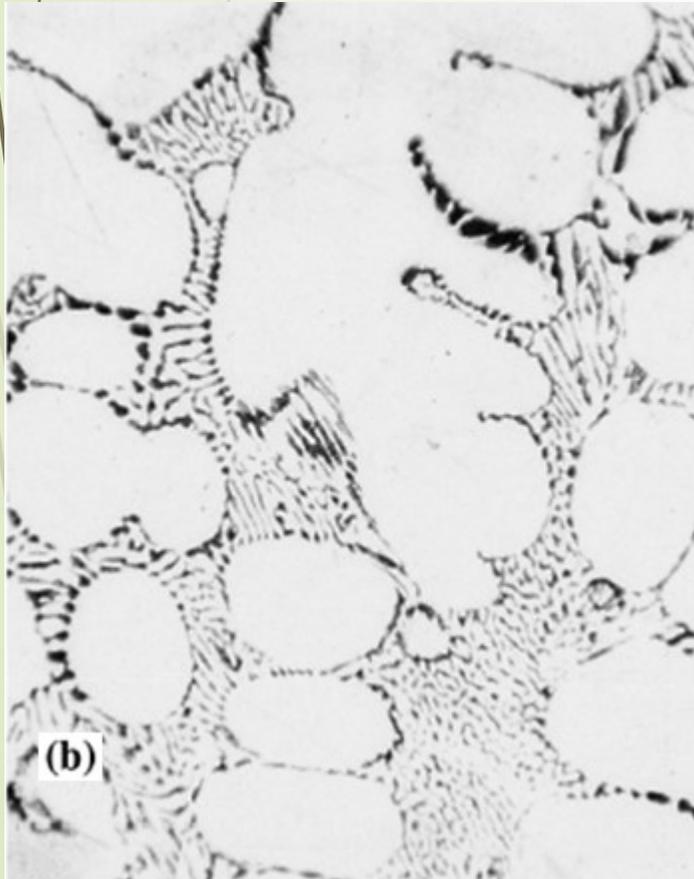


Solidificação e microestrutura de uma liga hipoeutética (Pb-30% Sn).

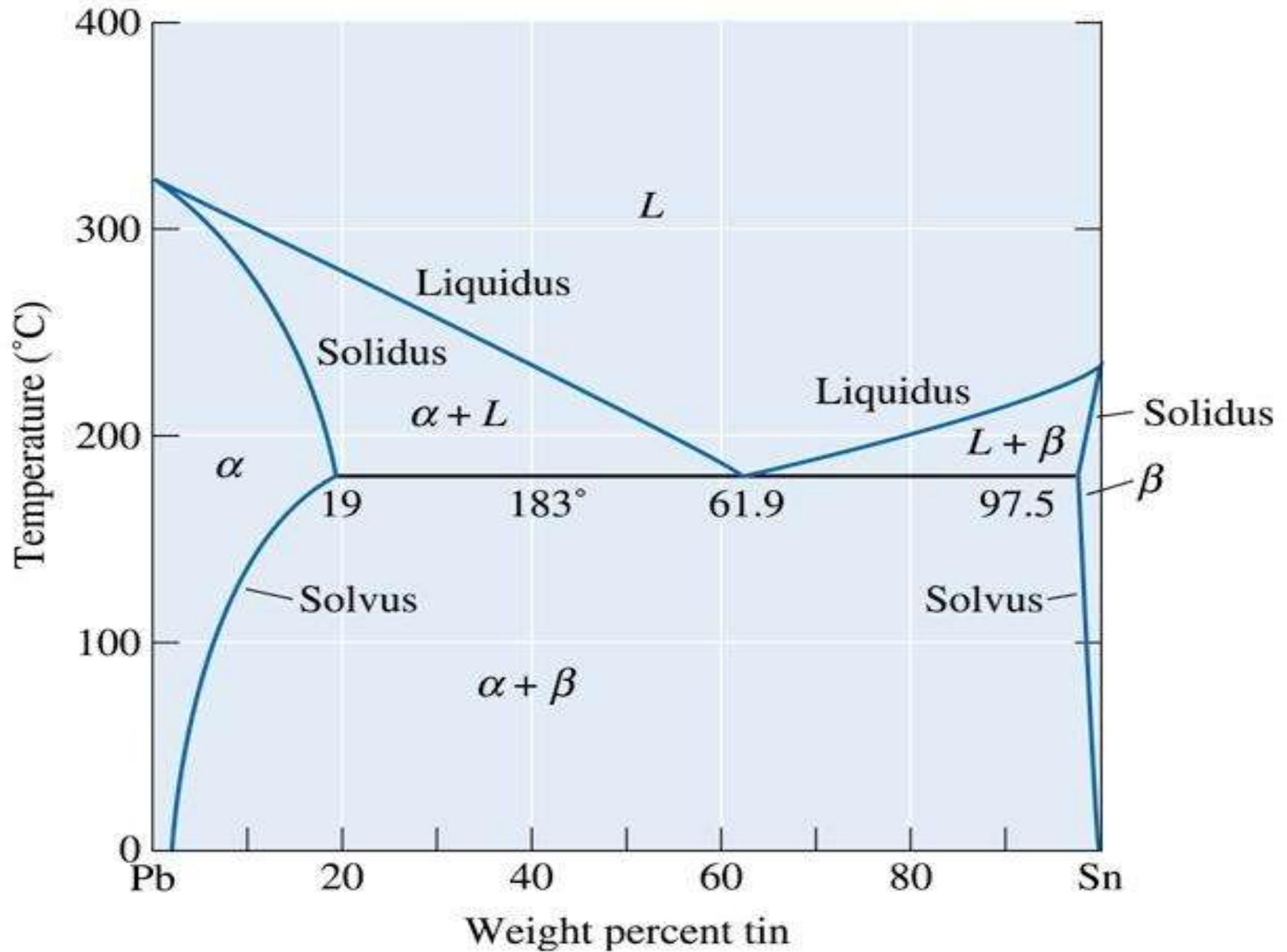


a) Liga hipoeutética de Pb/Sn.

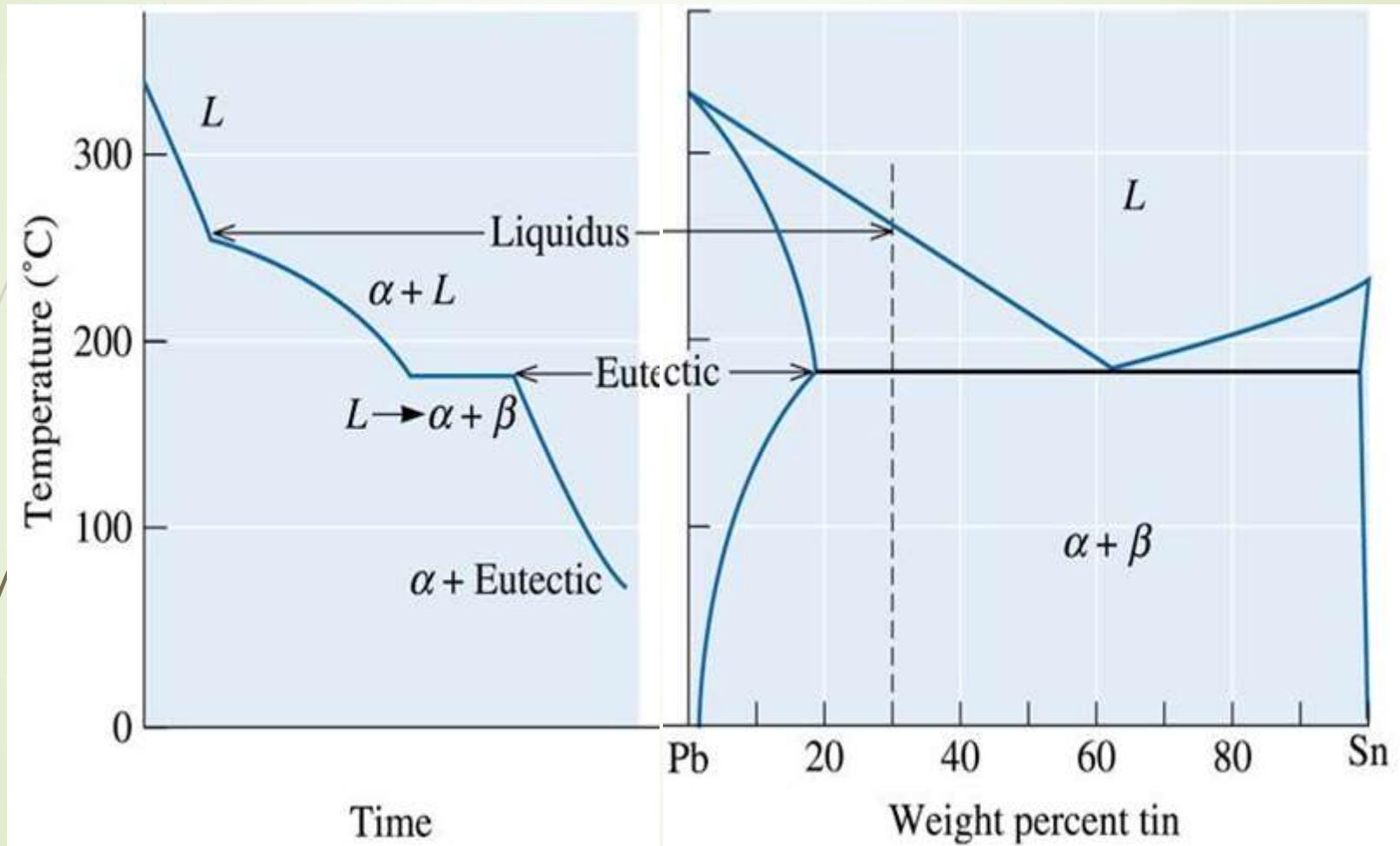
(b) Liga hipereutética de Pb/Sn.



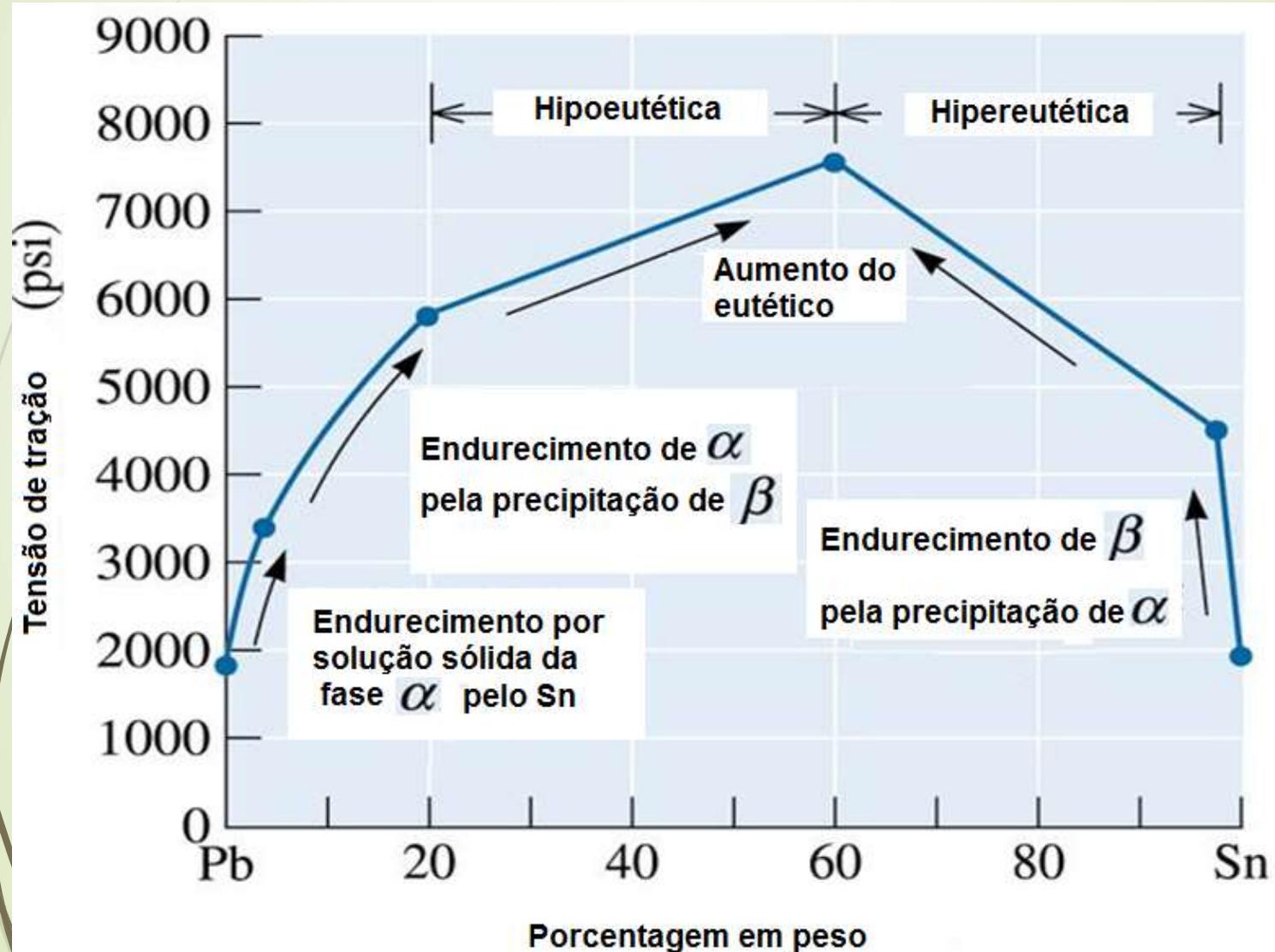
O constituinte escuro é rico em chumbo, fase α , o claro é rico em estanho, fase β , a estrutura “listrada” é o eutético .



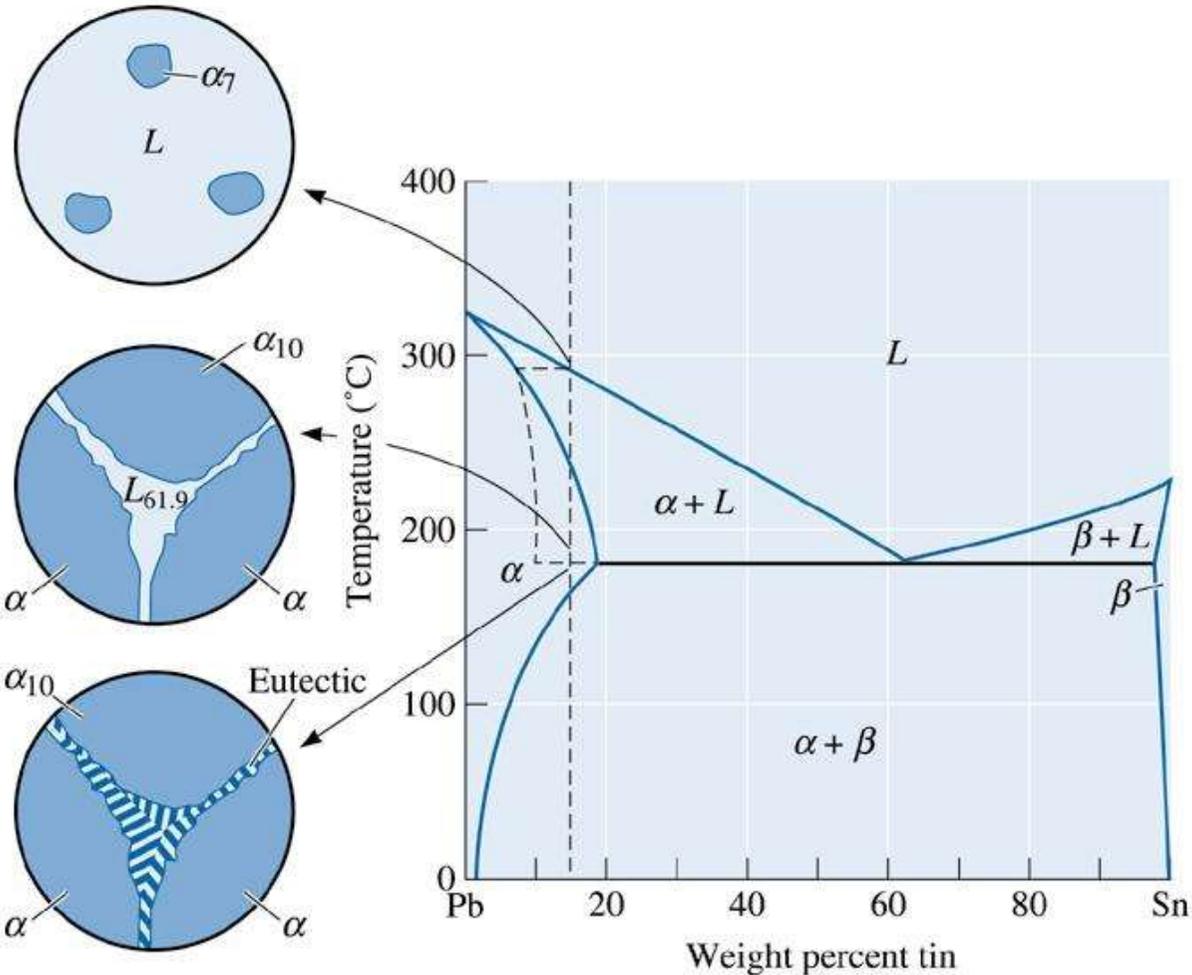
Regra de Gibbs



O efeito da composição e mecanismos de resistência na resistência à tração de ligas Pb/Sn.

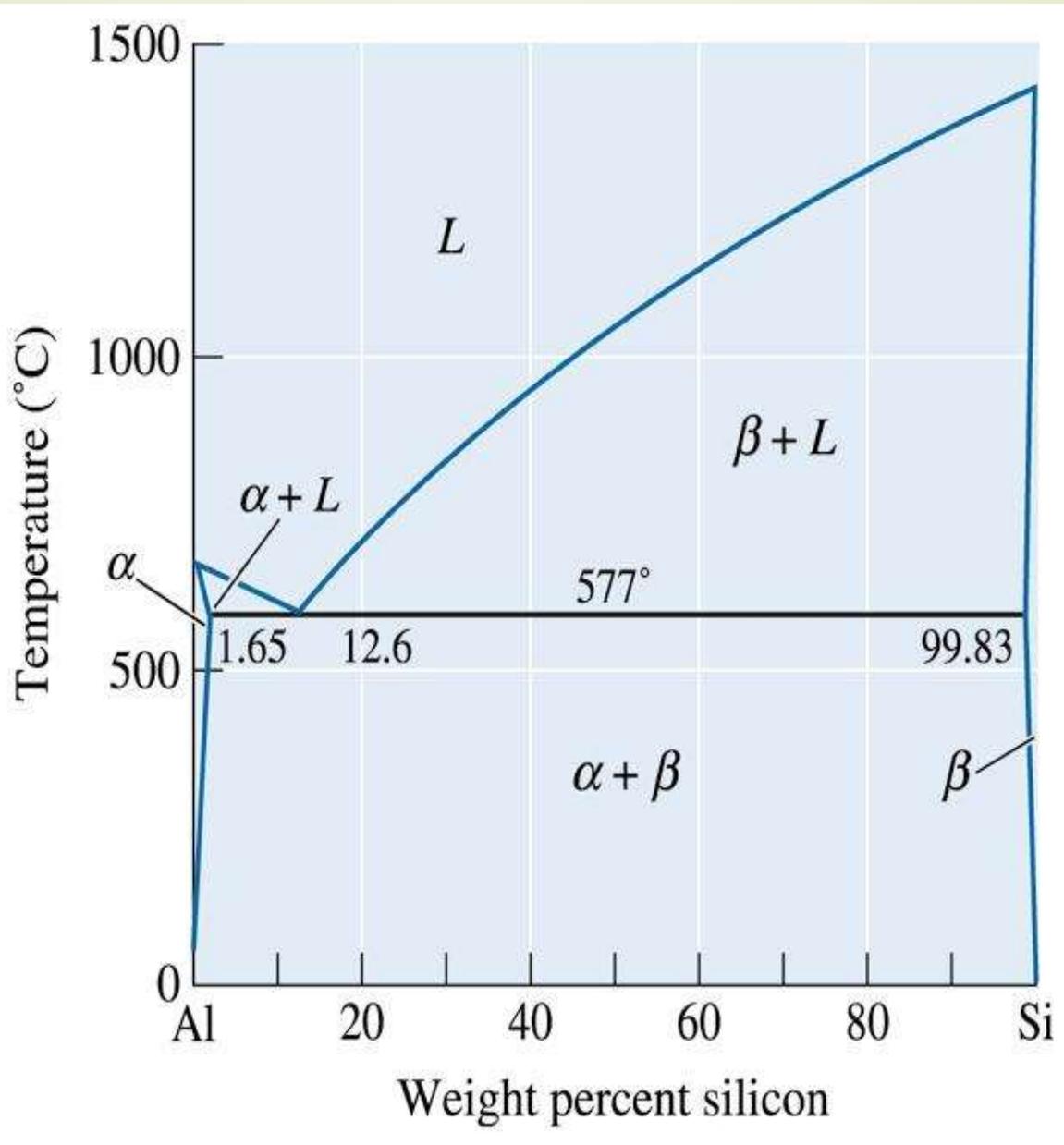


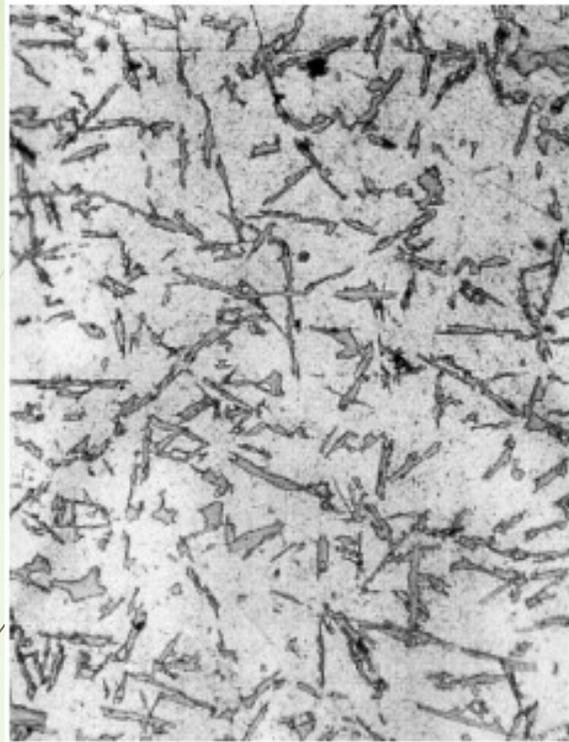
(c) 2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning, is a trademark used herein under license.



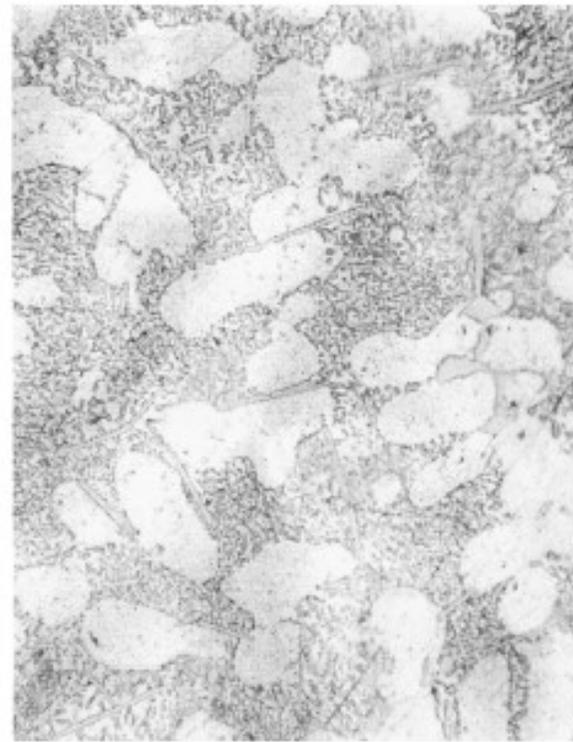
Solidificação de não equilíbrio de uma liga Pb-15% Sn . Um microconstituente de não equilíbrio eutético poderá ser formado se a solidificação for muito rápida.

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





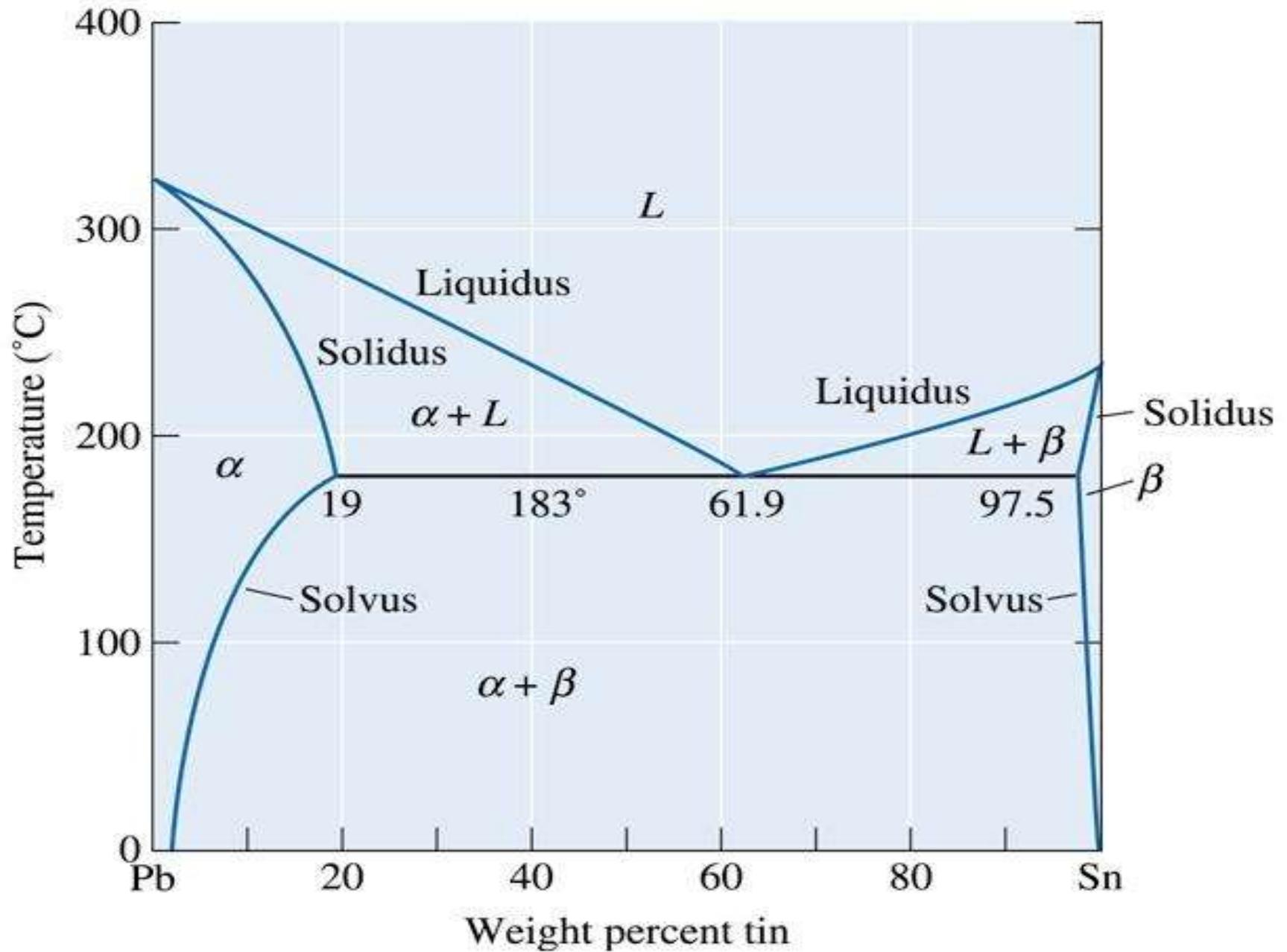
(a)



(b)

a) Eutético de Al Si

b) Eutético de Al Si modificada



Determinação das fases e quantidades em uma liga hipoeutética de Pb-30% Sn

- Para uma liga Pb – 30% Sn determine as fases presentes, suas quantidades e suas composições a 300°C , 200°C , 184°C , 182°C , e 0°C .



➤ Acabou a aula, acabou a aula