

# UNIDADE 5 - IMPERFEIÇÕES DA ESTRUTURA CRISTALINA

## 5.1. INTRODUÇÃO

- **Como visto, a maior parte dos cristais e polímeros apresenta repetição estrutural das células unitárias ou dos meros, com os quais são compostos.**
- **Entretanto, há uma pequena fração dos materiais e mesmo de seus volumes ( $< 1\%$ ) que não é perfeita.**
- **Estas irregularidades ou imperfeições estruturais têm grande influência nas propriedades dos materiais, principalmente nas suas propriedades mecânicas.**

- **Cristais imperfeitos são resultantes de:**
  - 1) Variações nas composições locais (impurezas)**
  - 2) Imperfeições (defeitos) na estrutura cristalina**
- **Além disso, como os átomos em um cristal não são estáticos, o movimento atômico deve ser analisado pois interfere nas propriedades do material.**

## 5.2. IMPUREZAS OU IMPERFEIÇÕES QUÍMICAS

- **Alguns metais usados comercialmente em aplicações de engenharia são puros, como é o caso do cobre usado nos condutores elétricos e da camada de zinco usada em aços galvanizados. A fase de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  usada em uma vela de ignição também é essencialmente pura.**
- **Em muitos casos são adicionados elementos estranhos nos materiais para melhorar suas propriedades. O latão é um exemplo de cobre que contém zinco, com menor custo, mais duro, mais “forte” e mais dúctil que o cobre puro. A prata *sterling* é outro exemplo, contendo 7,5% de cobre e 92,5% de prata, que é mais barata, mais resistente, mais dura, mais durável e de mesma aparência da prata pura.**

- **Por outro lado, o latão tem condutividade elétrica inferior à do cobre e deve-se usar cobre puro, de maior custo, em cabos elétricos e aplicações similares onde a condutividade elétrica seja importante.**
- **Ligas são combinações de dois ou mais metais num material. Essas combinações podem:**
  - 1) Ser constituídas por misturas de vários tipos de estruturas cristalinas. Por exemplo, o ferro CCC e  $\text{Fe}_3\text{C}$  num arco de uma ponte de aço.**
  - 2) Envolver soluções sólidas. Se a adição de elementos passa a fazer parte integrante da fase sólida, a fase resultante recebe o nome de solução sólida.**

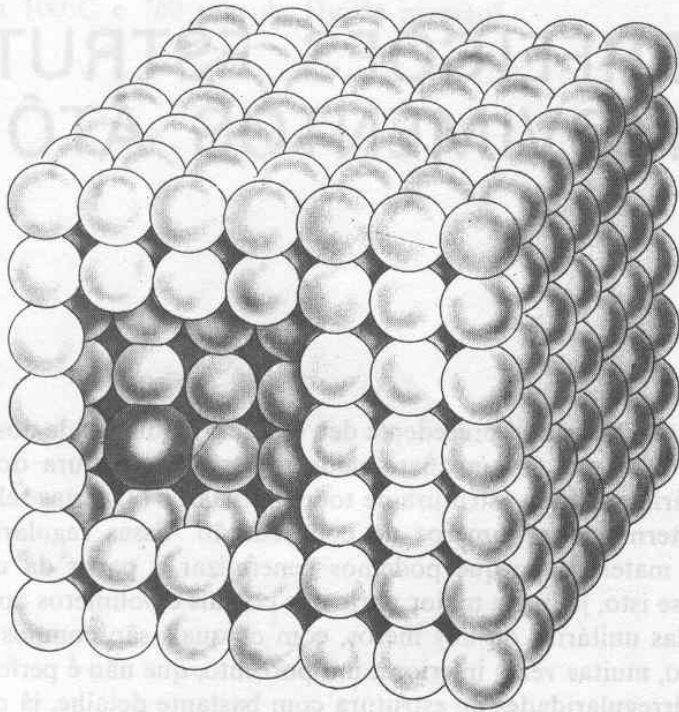


Fig. 4-1. Átomo substituinte. Um átomo pode ser substituído por outro átomo de dimensões comparáveis. O átomo da impureza é considerado o átomo soluto em um solvente sólido (Guy, A. G., *Elements of Physical Metallurgy*, Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1959, pág. 104).

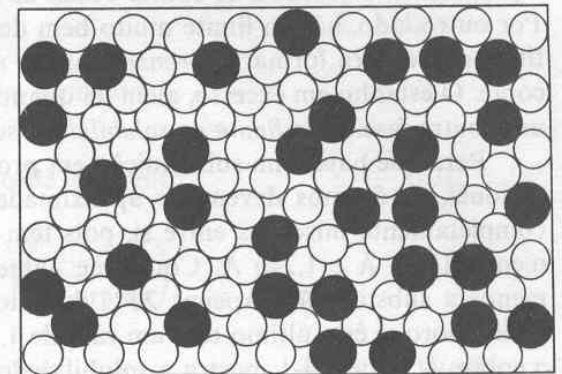


Fig. 4-2. Solução sólida substitucional ao acaso (zinco em cobre, ou seja, latão). O arranjo cristalino não é alterado. (Clyde Mason, *Introductory Physical Metallurgy*: American Society for Metals, 1947).

## 5.2.1. SOLUÇÕES SÓLIDAS EM METAIS

### SOLUÇÕES SÓLIDAS SUBSTITUCIONAIS

- **As soluções sólidas formam-se mais facilmente quando os átomos do solvente e do soluto têm dimensões e estruturas eletrônicas comparáveis.**
- **No caso do latão, o cobre e o zinco têm raios atômicos de 0,1278 e 0,1332 nm, respectivamente. Ambos têm, excetuando-se o nível de valência, 28 elétrons e apresentam, quando isolados, número de coordenação  $NC = 12$ . Portanto, o zinco substitui facilmente até um máximo de cerca de 40% dos átomos de cobre no reticulado CFC. Este é um exemplo de solução sólida substitucional, bastante comum em vários sistemas metálicos.**

- **Outro exemplo é a solução de cobre e níquel formando o monel. Estas soluções vão desde praticamente a ausência de níquel até quase 100% de átomos de níquel. Todas as ligas cobre-níquel são CFC. Os raios atômicos do cobre e do níquel são 0,1278 e 0,1246 nm, respectivamente, e eles têm a mesma estrutura CFC.**
- **Por outro lado, há um limite muito bem definido na quantidade de estanho que pode substituir cobre para formar bronze e ainda manter a estrutura CFC do cobre. O estanho em excesso, além da quantidade correspondente à solubilidade sólida, forma uma outra fase. Isto é definido pelo limite de solubilidade.**
- **Conforme aumenta a diferença de dimensões entre os átomos, ocorre cada vez menos substituição. Apenas 20% dos átomos de Cu podem ser substituídos por alumínio.**

- **Para ocorrer a completa miscibilidade em soluções sólidas metálicas, os metais devem ser bastante similares, como definido pela Regras de Hume-Rothery (metalurgista inglês, 1899-1968):**
  - 1) Menos que cerca de 15% de diferença nos raios atômicos**
  - 2) A mesma estrutura cristalina**
  - 3) Eletronegatividades similares (atração de elétrons)**
  - 4) A mesma valência.**
- **A Tabela 4-1 e a Figura 4-3 mostram a solubilidade sólida máxima, no cobre, de vários metais com a mesma estrutura CFC do cobre.**



Tabela 4-1

Solubilidade Sólida *versus* Raios Atômicos para Metais de  
Mesma Estrutura do Cobre

Soluto	Solvente	Relação de Raios	Solubilidade Máxima	
			%(em peso)	%(atômica)
Ni	Cu	$1,246/1,278 = 0,98$	100	100
Al	Cu	$1,431/1,278 = 1,12$	9	19
Ag	Cu	$1,444/1,278 = 1,14$	8	6
Pb	Cu	$1,750/1,278 = 1,37$	nil	nil
Ca	Cu	$1,965/1,278 = 1,54$	?	?
Ni	Ag	$1,246/1,444 = 0,86$	0,1	0,1
Cu	Ag	$1,278/1,444 = 0,88$	9	11
Al	Ag	$1,431/1,444 = 0,99$	6	20
Pb	Ag	$1,750/1,444 = 1,21$	5	3
Ca	Ag	$1,965/1,444 = 1,36$	nil	nil
Cu	Ni	$1,278/1,246 = 1,02$	100	100
Al	Ni	$1,431/1,246 = 1,14$	12	22
Ag	Ni	$1,444/1,246 = 1,16$	4	2
Pb	Ni	$1,750/1,246 = 1,40$	?	?
Ca	Ni	$1,965/1,246 = 1,58$	nil	nil
Ni	Al	$1,246/1,431 = 0,87$	0,05	0,03
Cu	Al	$1,278/1,431 = 0,90$	6	3
Ag	Al	$1,444/1,431 = 1,01$	48	19
Pb	Al	$1,750/1,431 = 1,22$	0,02	0,1
Ca	Al	$1,965/1,431 = 1,38$	nil	nil

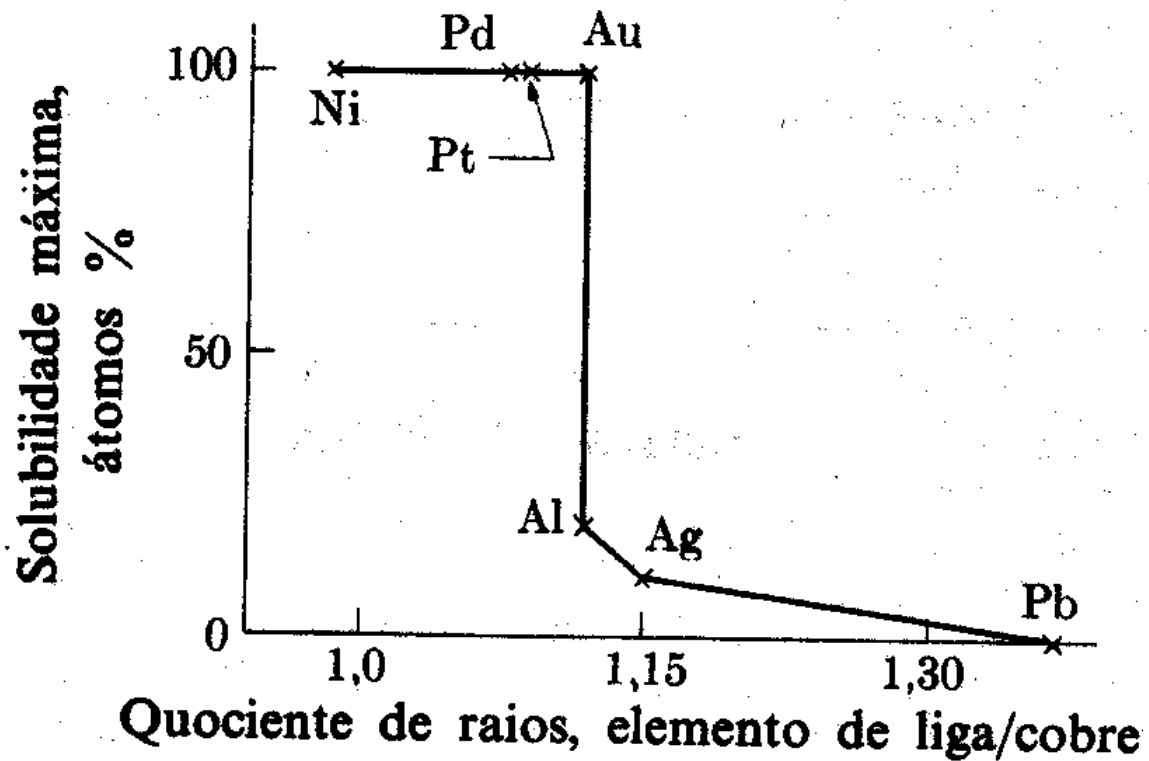
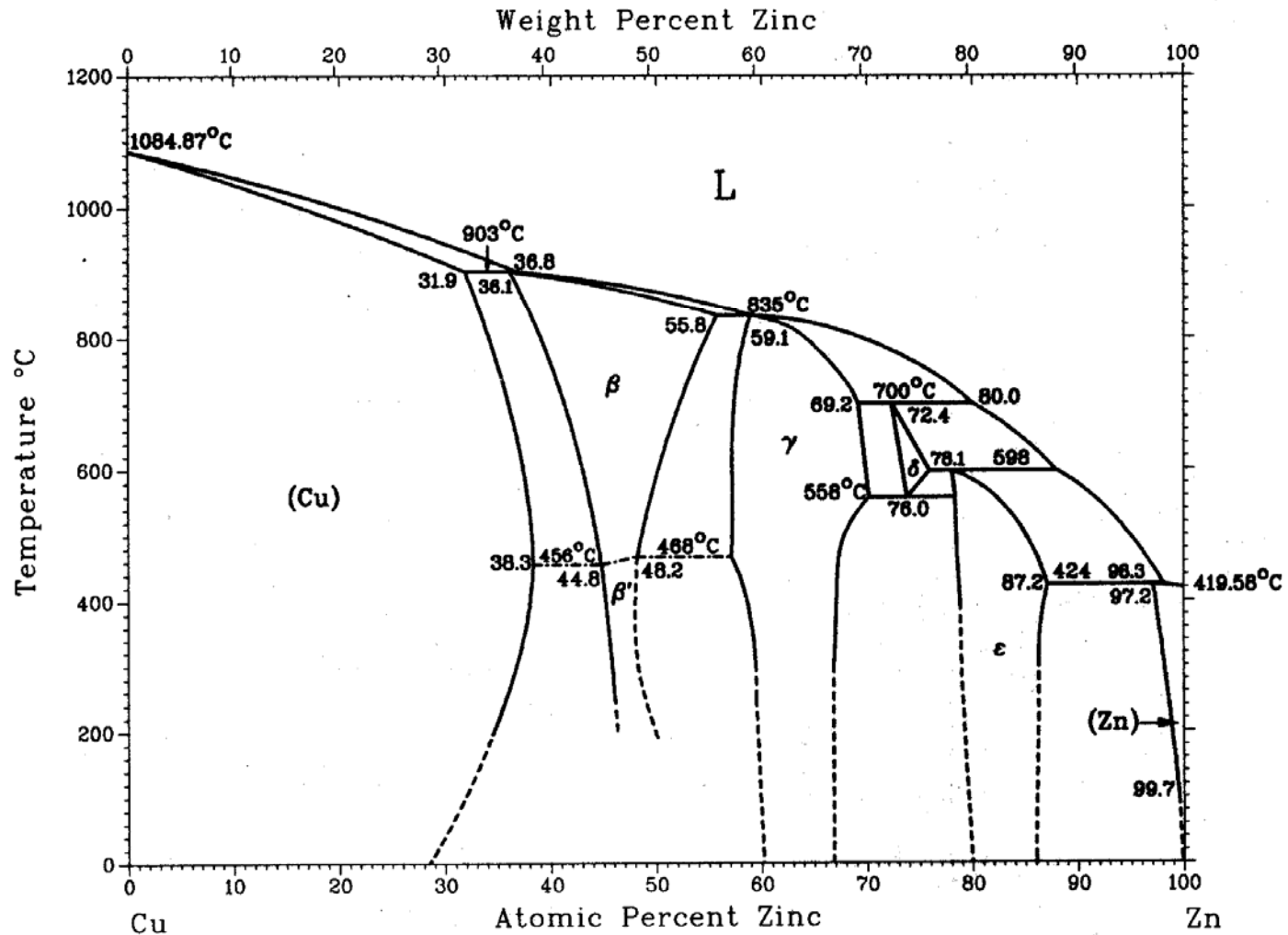


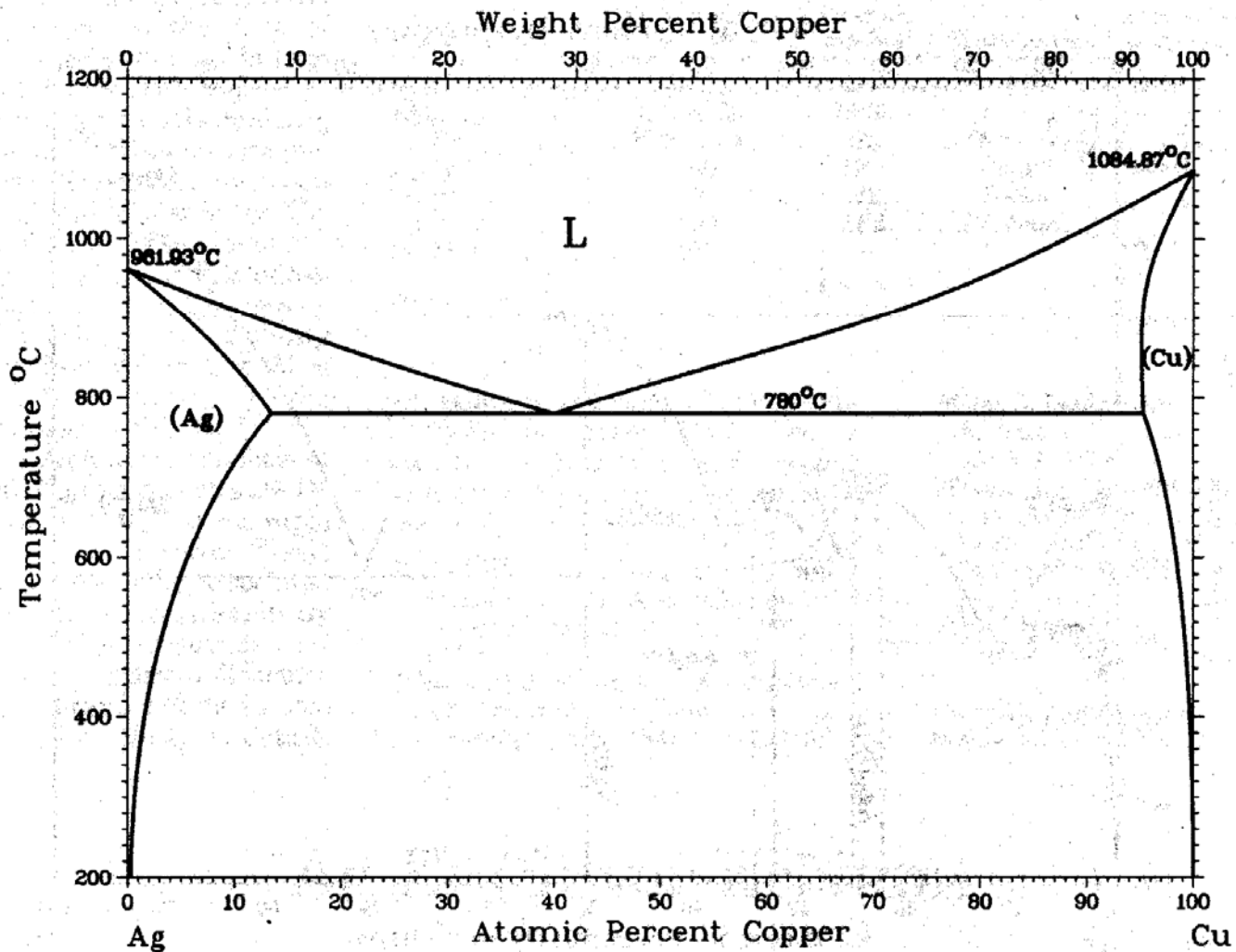
Fig. 4-3. Solubilidade sólida *versus* relação entre os raios atômicos (ligas à base de cobre com elementos que são normalmente cfc).



## Diagrama de fases do sistema Cu-Zn

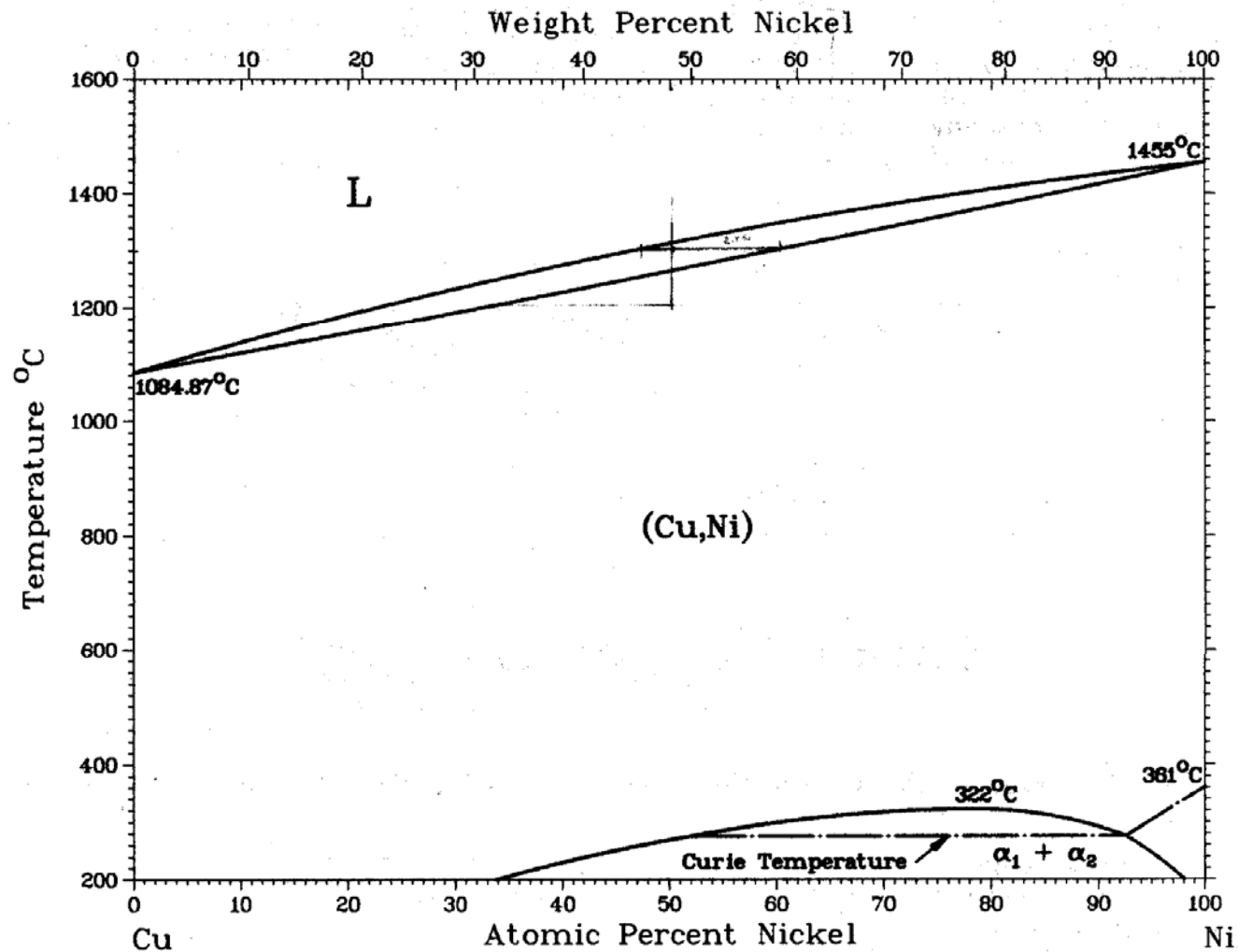
$$r_{\text{Cu}} = 0,1278 \text{ nm}$$

$$r_{\text{Zn}} = 0,1332 \text{ nm}$$



## Diagrama de fases do sistema Ag-Cu

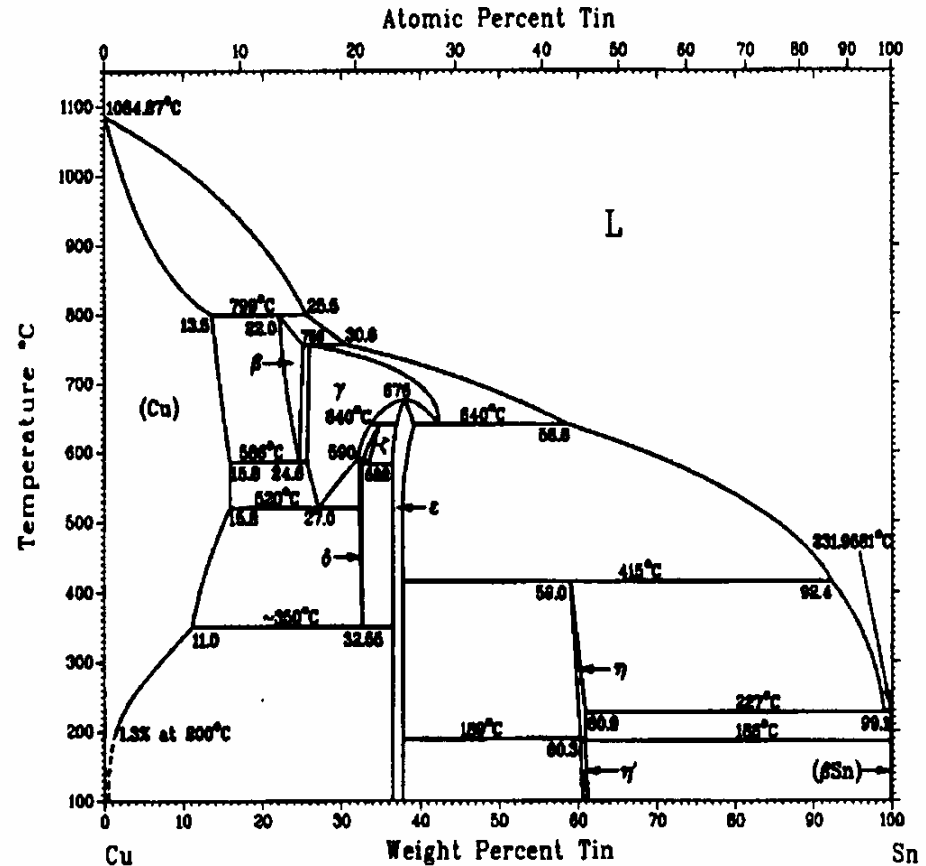
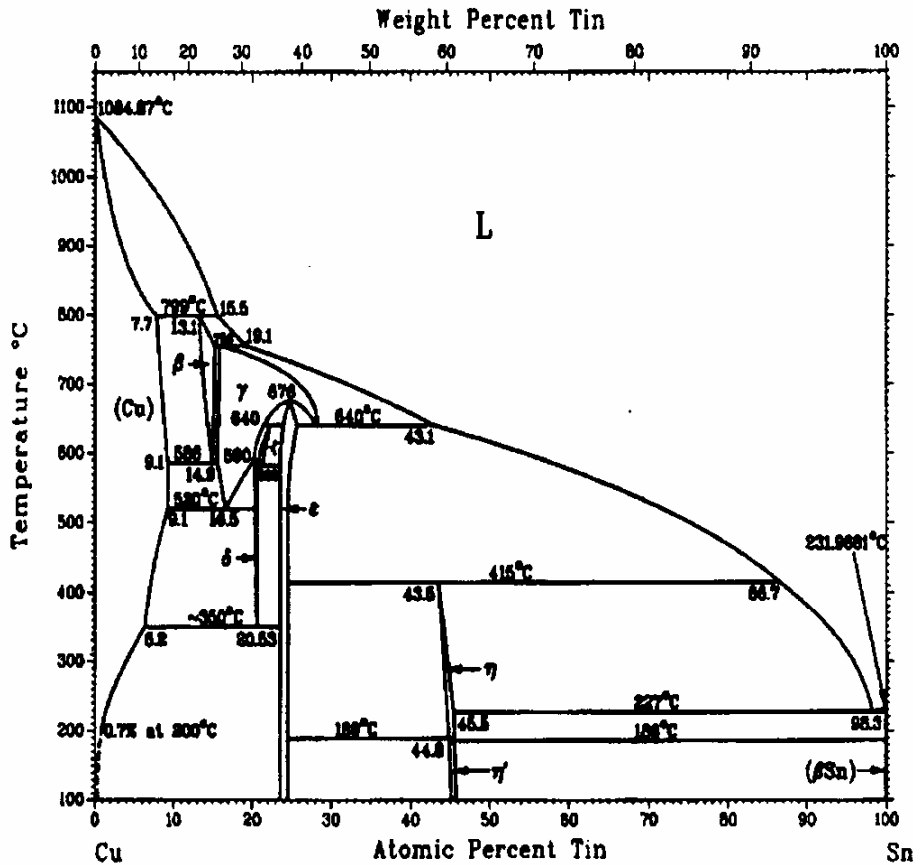
$$r_{\text{Cu}} = 0,1278 \text{ nm} \quad r_{\text{Ag}} = 0,1444 \text{ nm}$$



## Diagrama de fases do sistema Cu-Ni

$$r_{\text{Cu}} = 0,1278 \text{ nm}$$

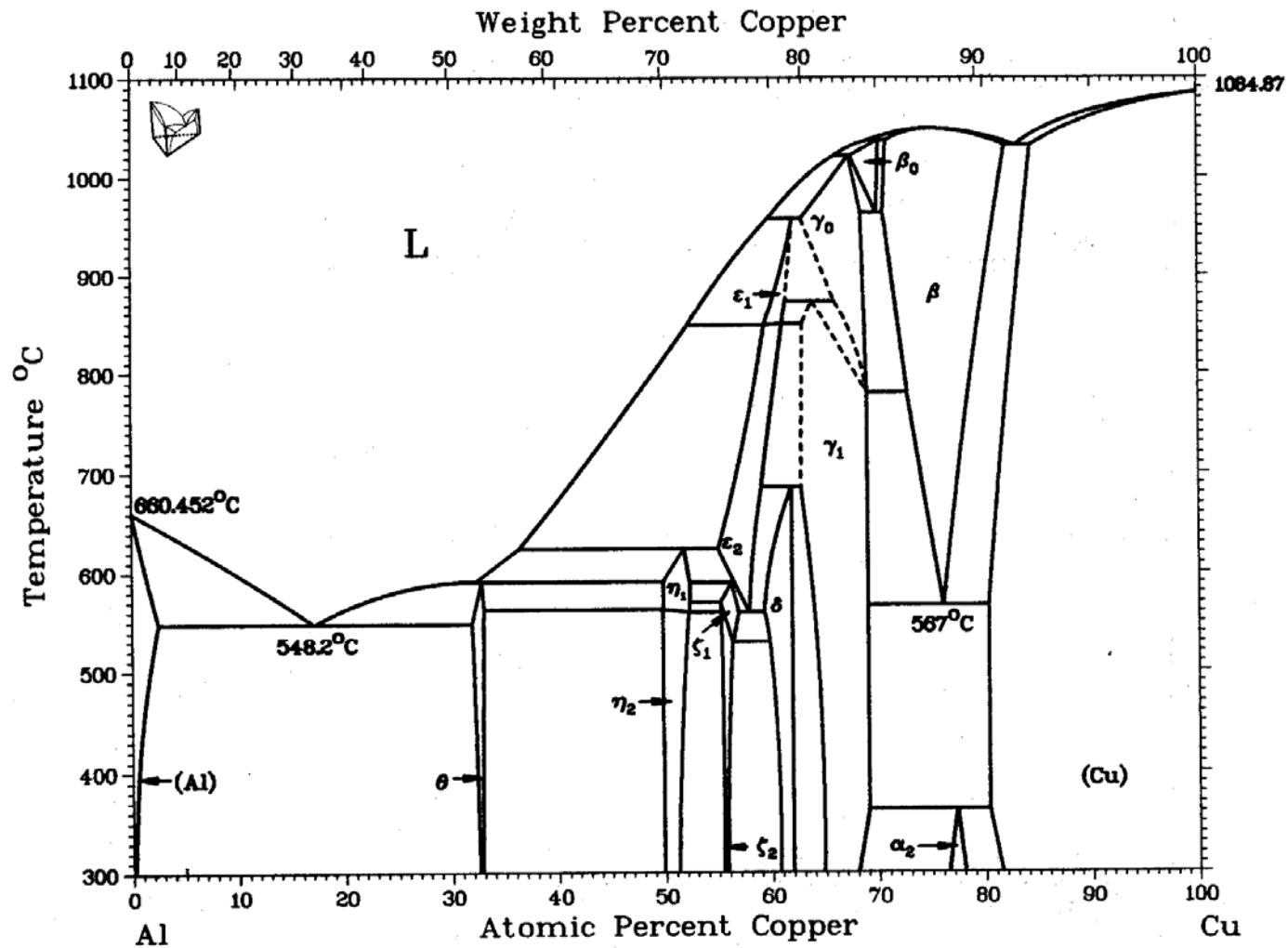
$$r_{\text{Ni}} = 0,1245 \text{ nm}$$



## Diagrama de fases do sistema Cu-Sn

$$r_{\text{Cu}} = 0,1278 \text{ nm}$$

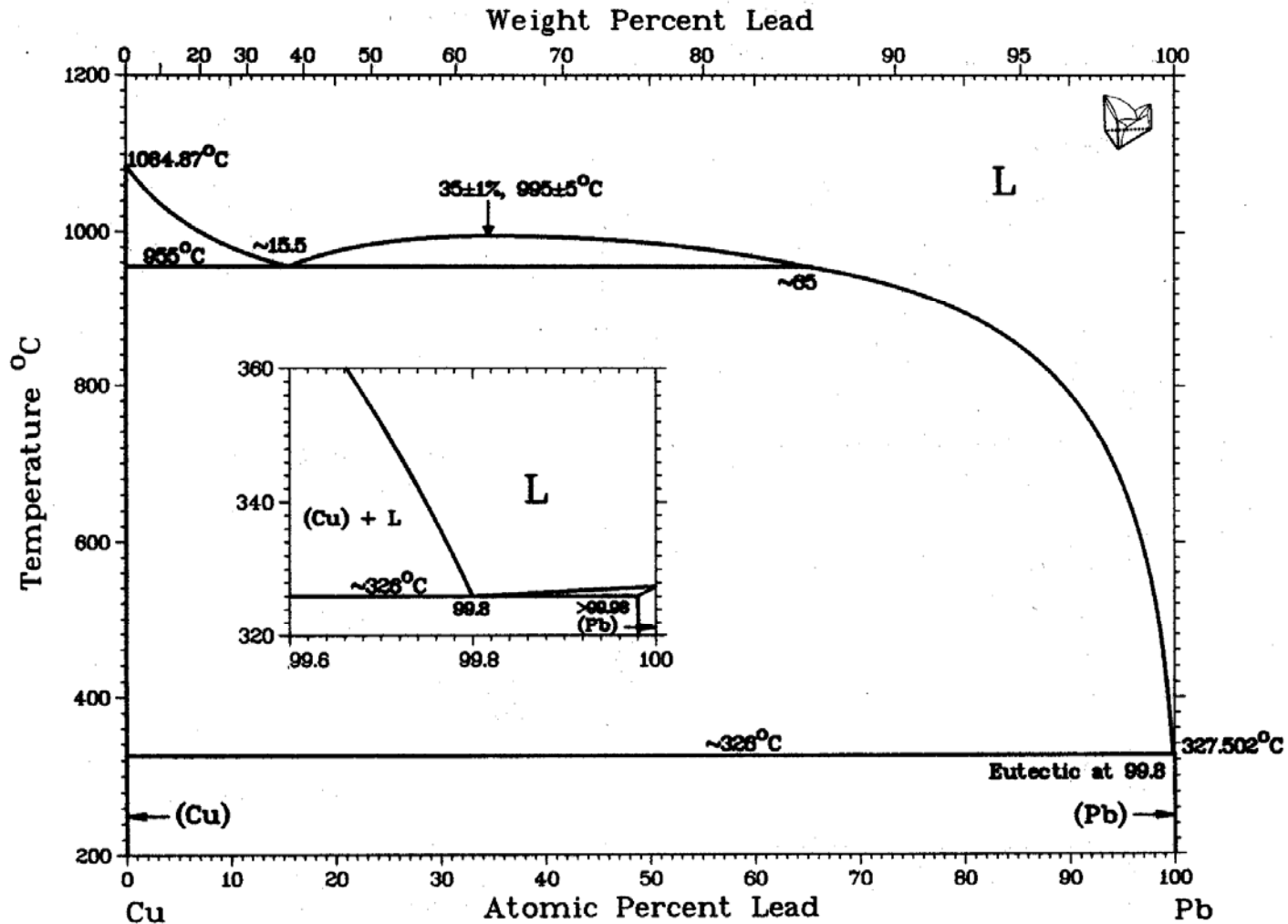
$$r_{\text{Sn}} = 0,1509 \text{ nm}$$



## Diagrama de fases do sistema Cu-Al

$$r_{\text{Cu}} = 0,1278 \text{ nm}$$

$$r_{\text{Al}} = 0,1431 \text{ nm}$$



## Diagrama de fases do sistema Cu-Pb

$$r_{\text{Cu}} = 0,1278 \text{ nm}$$

$$r_{\text{Pb}} = 0,1750 \text{ nm}$$



# SOLUÇÕES SÓLIDAS ORDENADAS

- Em oposição à substituição ao acaso, não é raro encontrar-se uma ordenação dos tipos de átomos em um arranjo específico.
- As Figuras 4-4 e 4-2.2 mostram estruturas ordenadas, mais comuns em baixas temperaturas, já que a agitação térmica mais intensa tende a destruir o arranjo ordenado.

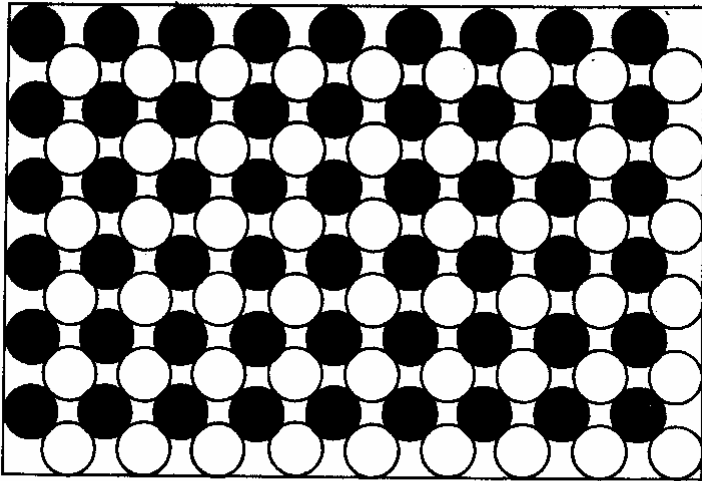
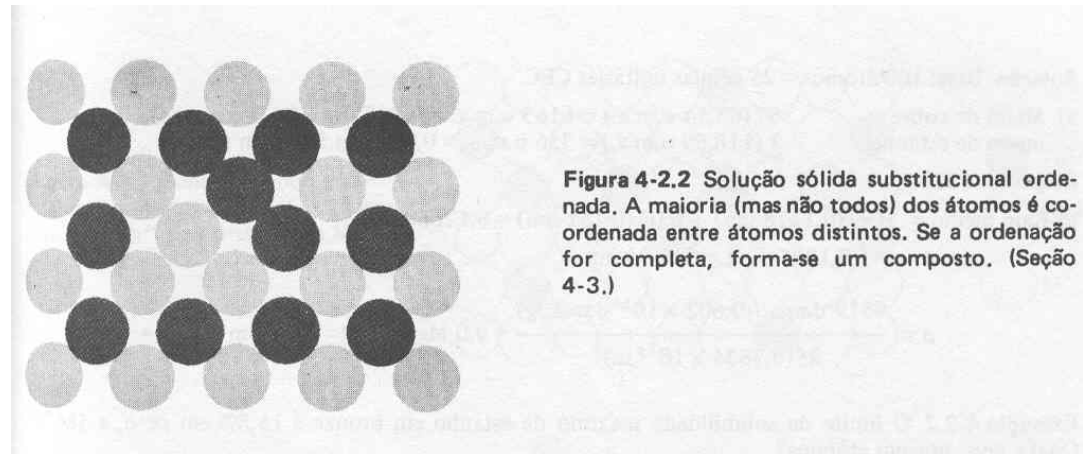


Fig. 4-4. Solução sólida substitucional ordenada. (Clyde Mason, *Introductory Physical Metallurgy*. Cleveland: American Society for Metals, 1947).



## *SOLUÇÕES SÓLIDAS INTERSTICIAIS*

- **Em um outro tipo de solução sólida, ilustrado na Fig. 4-5, um pequeno átomo pode se localizar nos interstícios entre os átomos maiores.**
- **O carbono no ferro é um exemplo. Em temperaturas abaixo de 910°C, o ferro puro ocorre com uma estrutura CCC. Acima de 910°C, existe uma faixa de temperatura na qual o ferro tem uma estrutura CFC. No reticulado CFC existe um “buraco” desocupado, relativamente grande, no centro da célula unitária. O átomo de carbono, sendo extremamente pequeno, pode se alojar nestes vazios e produzir uma solução sólida de ferro e carbono. Em temperaturas mais baixas, quando o ferro volta a ser CCC, os interstícios entre os átomos de ferro tornam-se menores e, conseqüentemente, a solubilidade do carbono no ferro CCC é relativamente pequena.**

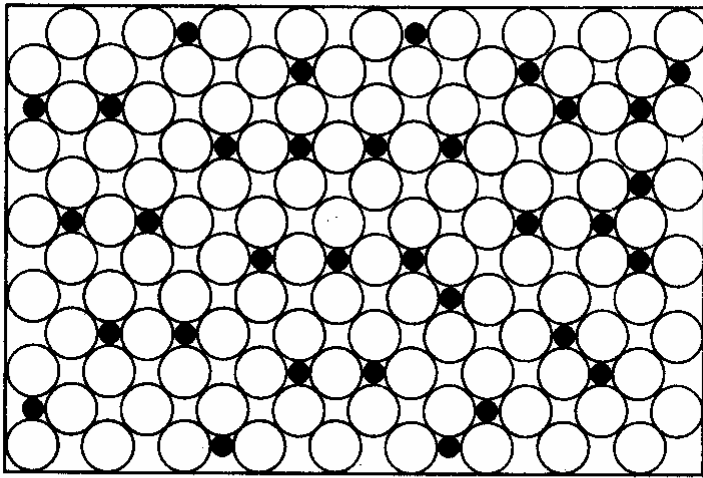
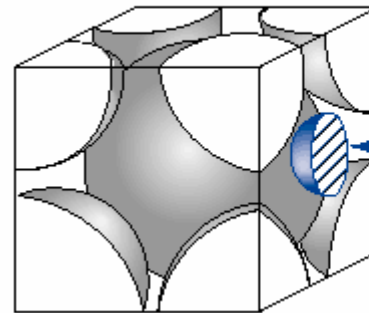
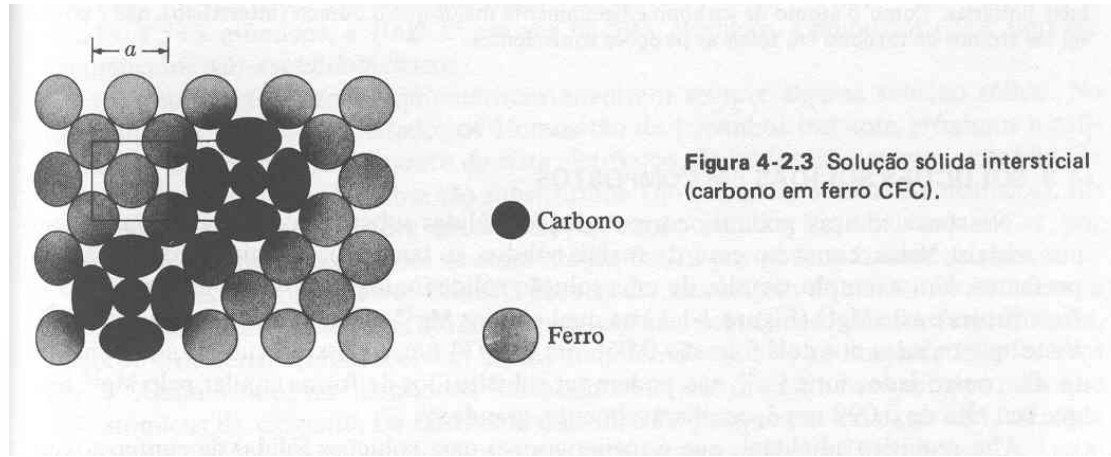


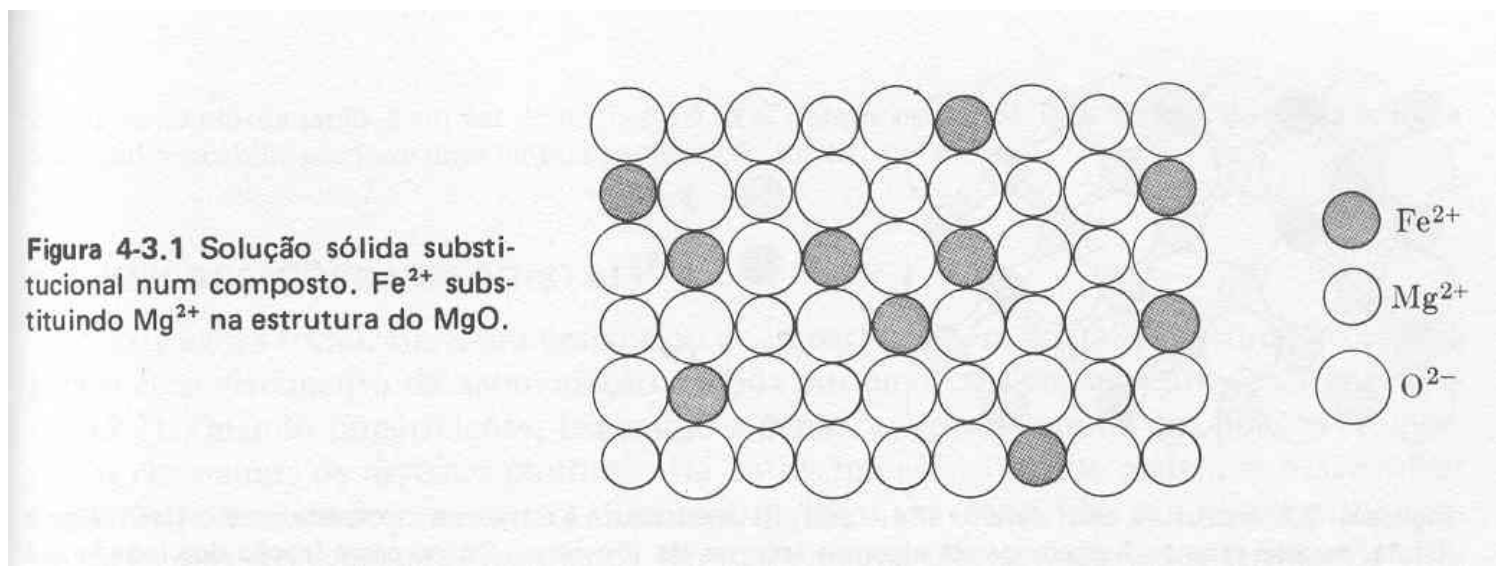
Fig. 4-5. Solução sólida intersticial (carbono no ferro fcc). (Clyde Mason, *Introductory Physical Metallurgy*. Cleveland: American Society for Metals, 1947).



C atom dissolved interstitially at a  $\frac{1}{2} 0 \frac{1}{2}$ -type position in the bcc structure of  $\alpha$ -Fe

## 5.2.2. SOLUÇÕES SÓLIDAS EM COMPOSTOS

- Soluções sólidas substitucionais podem ocorrer em fases iônicas sólidas, da mesma forma que nos metais sólidos.
- Na Fig. 4-3.1 é mostrado o MgO no qual íons  $\text{Mg}^{2+}$  foram parcialmente substituídos por íons  $\text{Fe}^{2+}$ , com raios 0,078 nm e 0,083 nm, respectivamente. Não seria possível ocorrer substituição por íons  $\text{Ca}^{2+}$ , devido ao seu maior tamanho, e seria bastante improvável a substituição por íons de  $\text{Li}^+$  pois passaria a existir uma deficiência de cargas positivas.



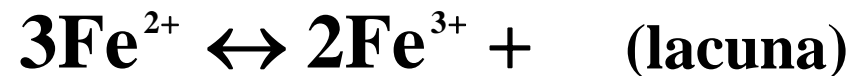
## COMPOSTOS NÃO-ESTEQUIOMÉTRICOS

- Os compostos estequiométricos têm uma razão fixa entre seus diferentes átomos constituintes, e formam uma estrutura mais perfeitamente ordenada ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Fe}_3\text{C}$ ,  $\text{CH}_4$ , etc.). Estes compostos também são chamados racionais ou daltonianos.
- Alguns compostos se desviam de relações exatas entre os elementos presentes e são chamados não-estequiométricos.
- Por exemplo, o  $\text{Cu}_2\text{Al}$  tem a concentração de Al variando de 31 a 37% atômico (16-20% peso), ao invés de 33,5% at. exatos. O oxigênio do  $\text{FeO}$  varia de 51% a 53% atômico, a  $1000^\circ\text{C}$ , em vez de 50% atômico.
- Os compostos não-estequiométricos envolvem sempre alguma solução sólida. O composto  $\text{Cu}_2\text{Al}$  é formado por substituição de Al por Cu, ou vice-versa, dependendo da composição.

- O não-estequiométrico  $\text{Fe}_{1-x}\text{O}$  (wustita) decorre de uma origem diferente, mas tem a mesma estrutura do  $\text{MgO}$  e do  $\text{NaCl}$ . Os íons  $\text{Fe}$  e  $\text{O}$  são muito diferentes para permitir substituição mensurável. No entanto, a presença constante de íons férricos ( $\text{Fe}^{3+}$ ) e de íons ferrosos ( $\text{Fe}^{2+}$ ) exige que haja mais que 50% atômico de oxigênio, no sentido do balanceamento das cargas:



- De fato, cada 2 íons de  $\text{Fe}^{3+}$  requerem um extra  $\text{O}^{2-}$ , ou cada par de íons  $\text{Fe}^{3+}$  deve ser acompanhado por uma lacuna catiônica, a fim de manter a neutralidade elétrica. Uma equação estrutural para este composto seria



- Trata-se de um defeito estrutural já que são irregularidades no empacotamento atômico. A  $1000^{\circ}\text{C}$  e com saturação de  $\text{Fe}$ , a composição é  $\text{Fe}_{0,96}\text{O}$ , e com saturação de oxigênio a composição é  $\text{Fe}_{0,88}\text{O}$ .

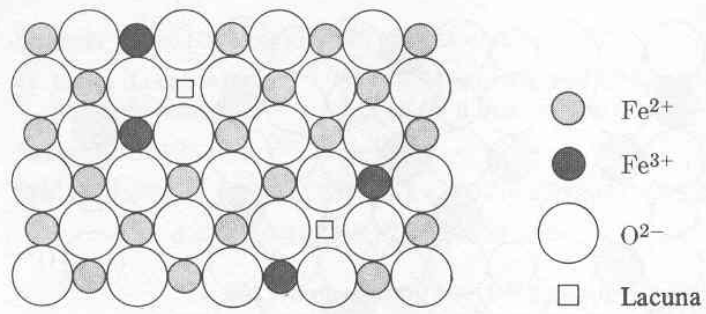


Figura 4-3.2 Estrutura com defeito ( $\text{Fe}_{1-x}\text{O}$ ). Esta estrutura é a mesma mostrada para o NaCl (Figura 3-1.1), exceto quanto à presença de algumas lacunas de íon ferro. Como certa fração dos íons ferro é  $\text{Fe}^{3+}$  em lugar de  $\text{Fe}^{2+}$ , as lacunas são necessárias ao balanceamento de cargas. O valor de  $x$  varia de 0,04 a 0,16, dependendo da temperatura e da quantidade de oxigênio disponível.

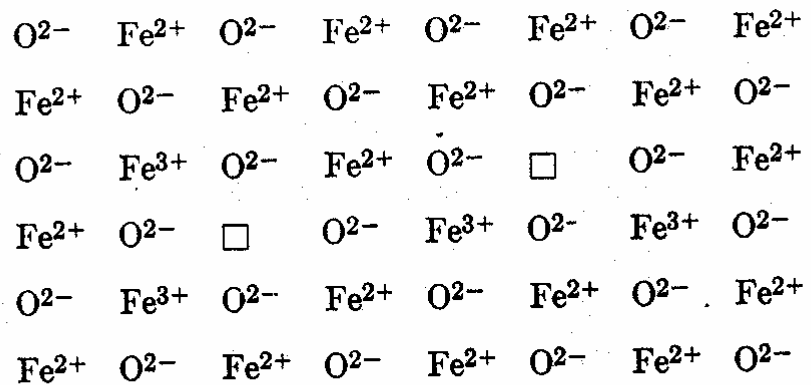
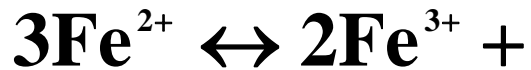


Fig. 4-9. Composto não estequiométrico ( $\text{Fe}_{<1}\text{O}$ ). A neutralidade elétrica é mantida pela presença de vazios catiônicos. (compare com a estrutura do composto estequiométrico MgO, na Fig. 3-10).

**EX. 1.** Estudar os exemplos 4-2.1, 4-2.2, 4-2.3, 4-3.1 e 4-3.2 do Capítulo 4 do Van Vlack (Editora Campus, capa verde).

**EX. 2.** Estudar os exemplos 4-1, 4-2 e 4-3 do Capítulo 4 do Van Vlack (Editora Edgard Blücher, capa amarela).

**EX. 3.** Estudar TODOS os *Sample Problems (SP)* e os *Practice Problems (PP)* do Capítulo 4 do Shackelford.



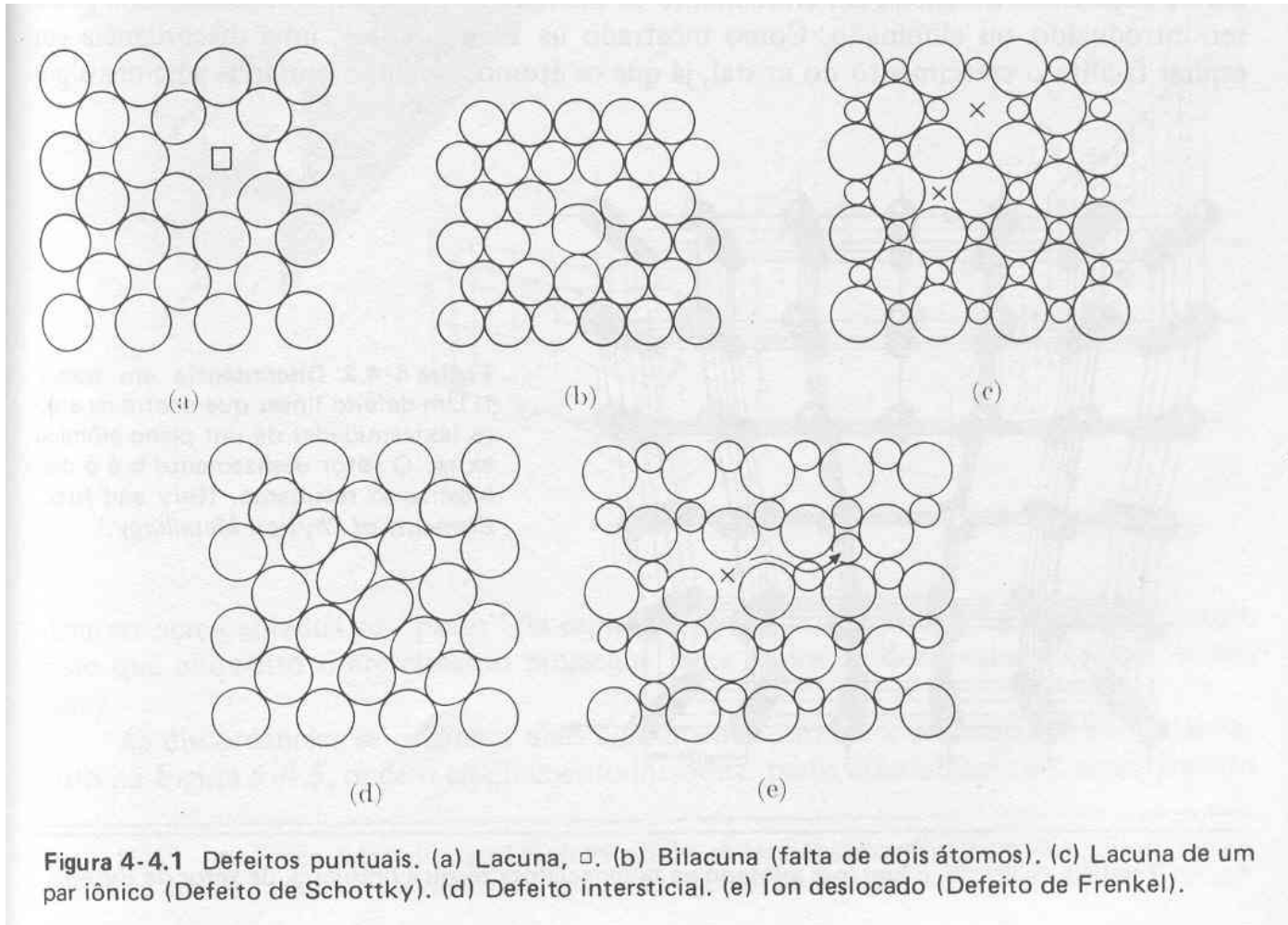
## 5.3. IMPERFEIÇÕES (DEFEITOS) NA ESTRUTURA CRISTALINA

- Imperfeições do reticulado são encontradas na maior parte dos cristais.
- Defeitos pontuais são aqueles que envolvem individualmente átomos deslocados, átomos extras ou falta de átomos.
- Defeitos de linha (lineares) envolvem a aresta de um plano extra de átomos, tais como as discordâncias em cunha.
- Defeitos de fronteira envolvem as superfícies externas do cristal ou cristais adjacentes, tais como os contornos de grãos.
- Tais imperfeições influenciam muitas das características dos materiais, tais como sua resistência mecânica e suas propriedades elétricas e químicas.

## 5.3.1. DEFEITOS PUNTUAIS

- **Vazios ou lacunas**: São os defeitos mais simples e podem resultar de um empacotamento imperfeito durante a cristalização original ou das vibrações térmicas dos átomos do cristal. Os vazios podem ser simples, duplos ou triplos.
- **Defeito de Schottky**: Envolvem vazios de pares de íons de cargas opostas e são encontrados em compostos que devem manter um balanço de carga. Tanto os vazios como os defeitos de Schottky facilitam a difusão atômica.
- **Defeitos intersticiais**: Um átomo extra pode se alojar em uma estrutura cristalina, particularmente se o fator de empacotamento atômico for baixo. Se o átomo intersticial for maior que os átomos do cristal, tal imperfeição produz uma distorção no reticulado.
- **Defeito de Frenkel**: Aparece quando um íon é deslocado de sua posição original no reticulado para um interstício.

- **As estruturas de empacotamento fechado têm menor número de defeitos intersticiais e defeitos de Frenkel do que de vazios e defeitos de Schottky, porque é necessária energia adicional para forçar os átomos para novas posições, distorcendo a rede cristalina.**



## 5.3.2. DEFEITOS LINEARES (DISCORDÂNCIAS). DEFEITOS EM UMA DIMENSÃO.

- O tipo mais comum de defeito de linha no interior de um cristal é uma discordância.
- Uma discordância em cunha ou aresta (*edge*) pode ser descrita como a aresta de um plano atômico extra na estrutura cristalina. Zonas de compressão e de tração acompanham este tipo de discordância de forma que há um aumento de energia ao longo da mesma.
- A distância de deslocamento dos átomos ao redor da discordância é denominado vetor de Burgers *b*. Esse vetor é perpendicular à linha da discordância em cunha.

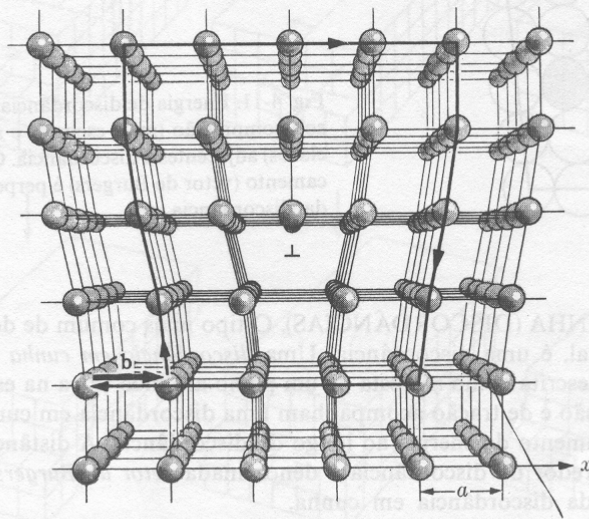


Fig. 4-10. Discordância em cunha. Um defeito de linha ocorre na aresta de um plano atômico extra. (Guy, A. G., *Elements of Physical Metallurgy*, Reading, Mass.: Addison Wesley, 1959, pág. 110).

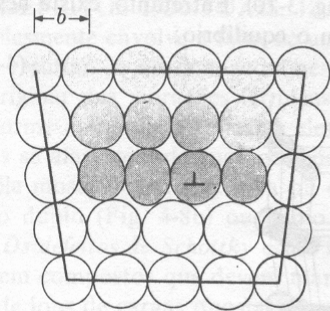


Fig. 4-11. Energia de discordância. Têm-se átomos sob compressão (mais escuros) e sob tração (mais claros) adjacentes à discordância. O vetor de deslocamento (vetor de Burgers) é perpendicular à linha da discordância.

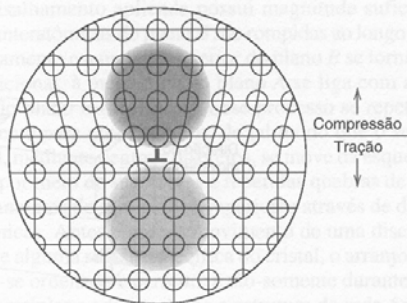
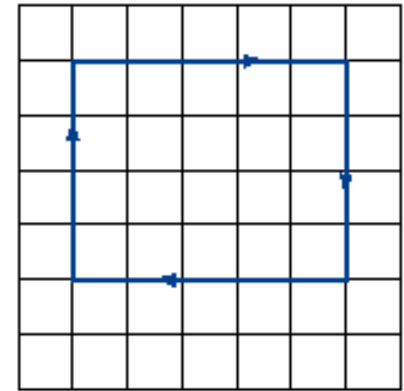
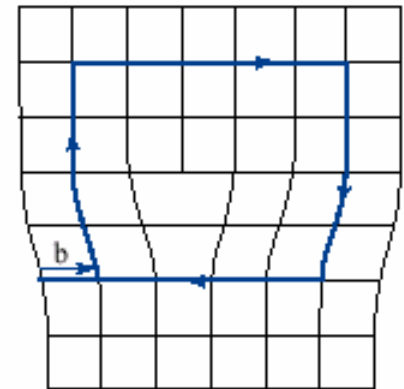


Fig. 7.4 Regiões de compressão (parte superior) e tração (parte inferior) localizadas ao redor de uma discordância aresta. (Adaptado de W. G. Moffatt, G. W. Pearsall, e J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. I, *Structure*, p. 85. Copyright © 1964 por John Wiley & Sons, New York. Reimpresso sob permissão de John Wiley & Sons, Inc.)



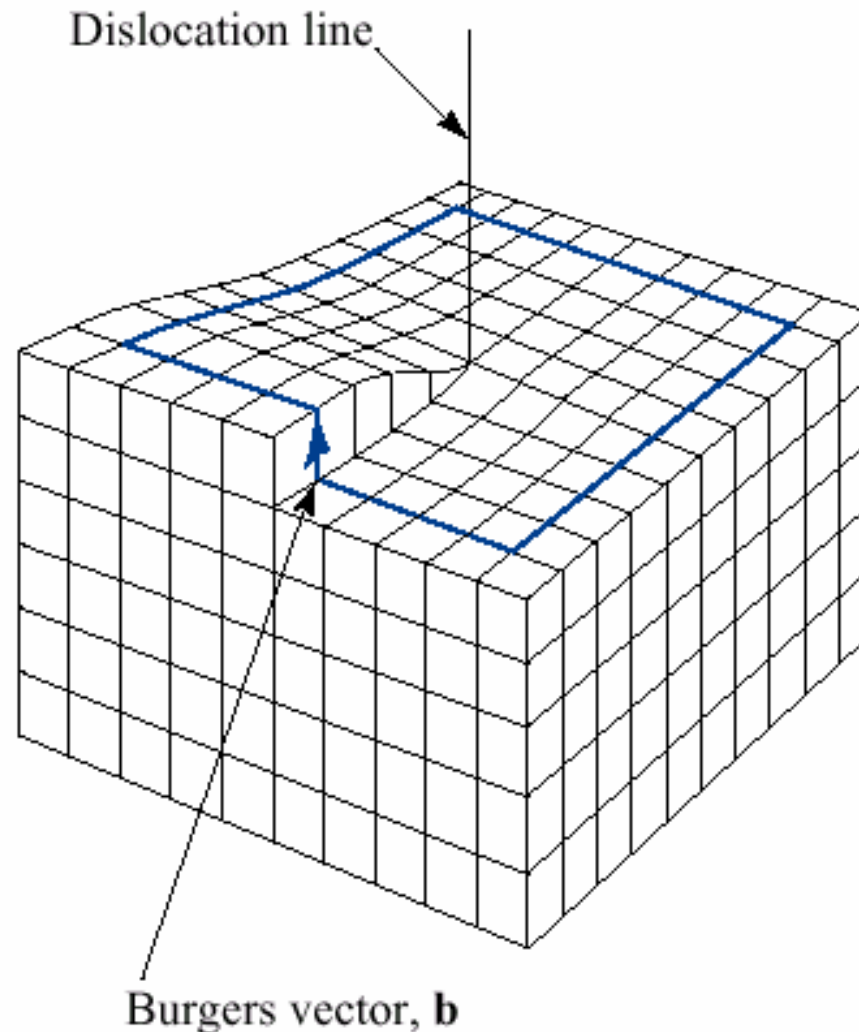
(a)



(b)

**Definição do vetor de Burgers  $b$ . Na região da discordância o circuito fechado não fecha e o vetor  $b$  (diferença) representa a magnitude do defeito estrutural.**

- Uma discordância espiral ou helicoidal (*screw*) tem seu deslocamento, ou vetor de Burgers, paralelo ao defeito de linha. Tensões de cisalhamento também estão associadas aos átomos adjacentes e tem-se um aumento de energia interna.



- **Ambos os tipos de discordâncias podem ser originados durante a cristalização.**
- **As discordâncias em cunha, por exemplo, decorrem de uma pequena diferença na orientação de partes adjacentes do cristal em crescimento, de maneira que um plano atômico extra possa ser introduzido ou eliminado.**
- **Uma discordância espiral facilita o crescimento do cristal, já que átomos e células unitárias adicionais podem ser acrescentados ao “passo” da espiral. Logo, o termo “espiral” é muito adequado pois, enquanto o crescimento cristalino prossegue, uma espiral se desenvolve ao longo de seu eixo.**
- **As discordâncias se originam mais comumente durante a deformação. Isto pode ser visto nas Figuras 4-13 e 4-4.5, onde o cisalhamento introduz tanto discordância em cunha quanto em espiral. Ambas levam ao mesmo deslocamento final  $b$  e estão de fato relacionadas às linhas de discordância mista que formam.**

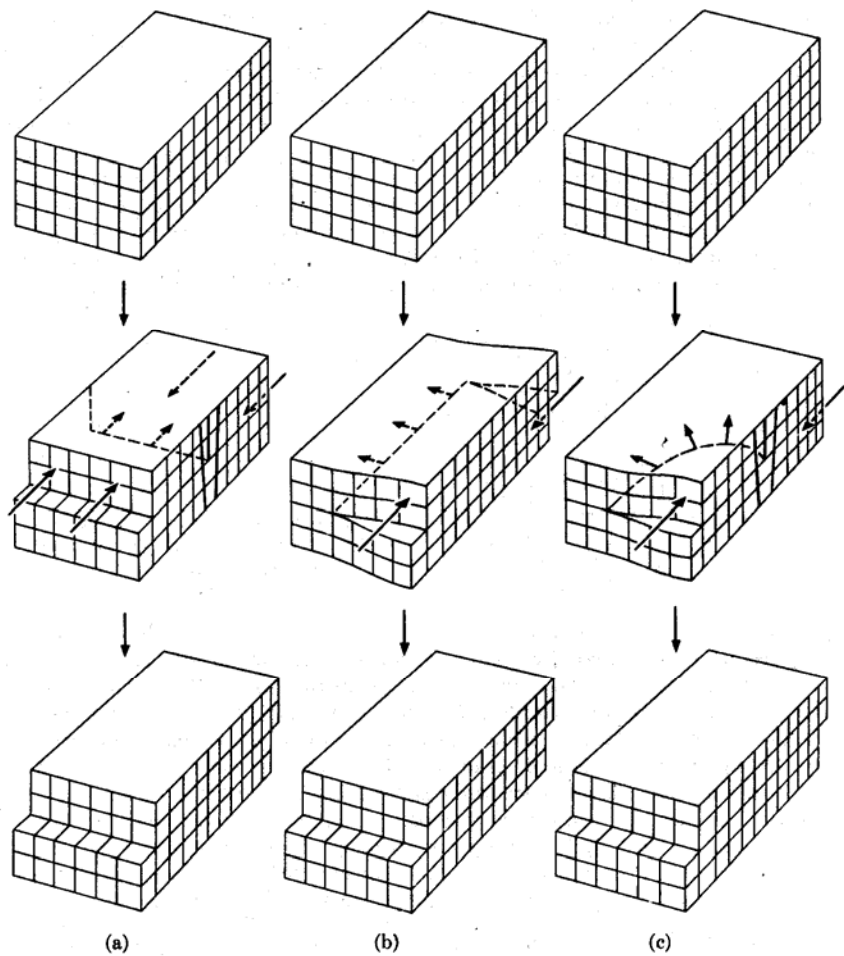


Fig. 4-13. Formação de discordância por cisalhamento. (a) Discordância em cunha. (b) Discordância helicoidal. (c) Discordância mista, com componentes em cunha e helicoidal.

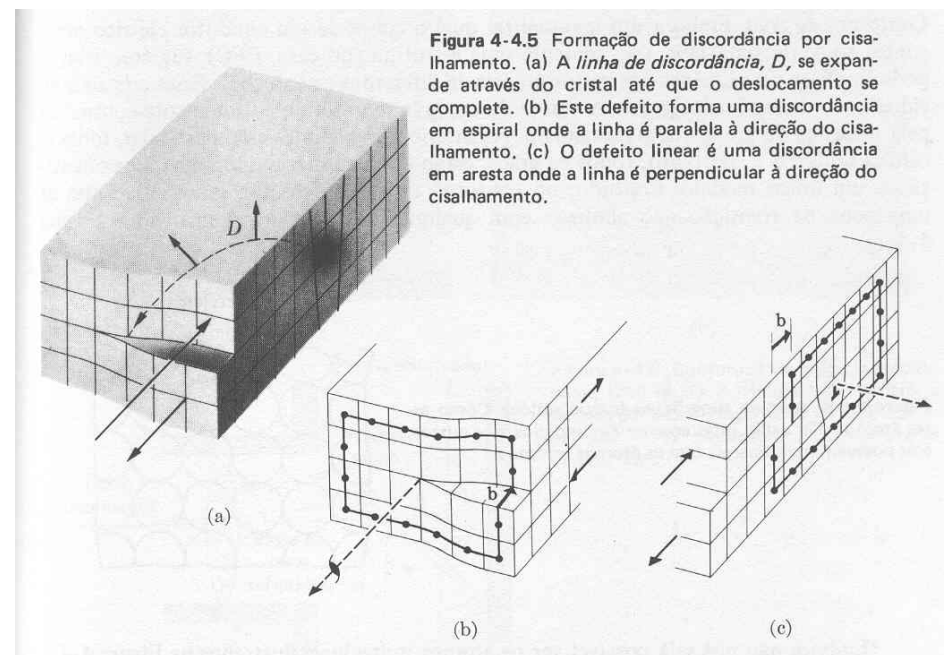


Figura 4-4.5 Formação de discordância por cisalhamento. (a) A linha de discordância,  $D$ , se expande através do cristal até que o deslocamento se complete. (b) Este defeito forma uma discordância em espiral onde a linha é paralela à direção do cisalhamento. (c) O defeito linear é uma discordância em aresta onde a linha é perpendicular à direção do cisalhamento.



# Discordância espiral

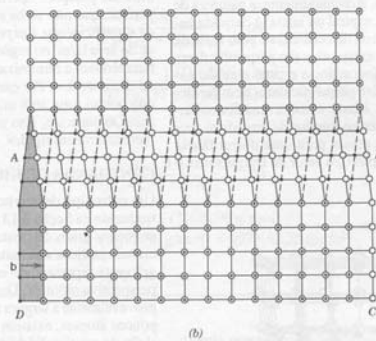
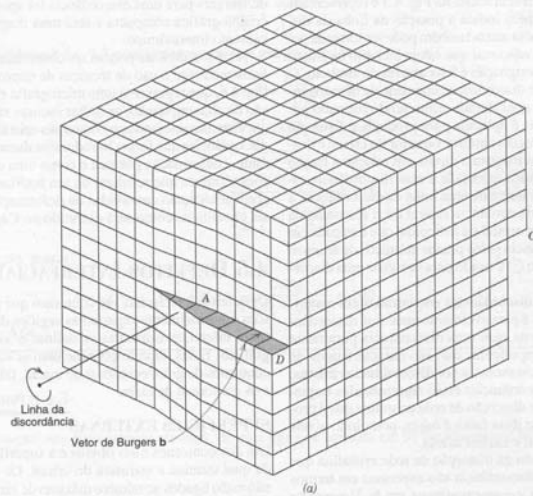


Fig. 4.4 (a) Uma discordância espiral no interior de um cristal. (b) A discordância espiral em (a) vista por cima. A linha de discordância se estende ao longo da linha AB. As posições atômicas acima do plano de deslizamento são designadas por círculos abertos, enquanto aquelas abaixo do plano são designadas por círculos pretos. (A Fig. (b) foi tirada de W. T. Read, Jr., *Dislocations in Crystals*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1953.)

# Discordância mista

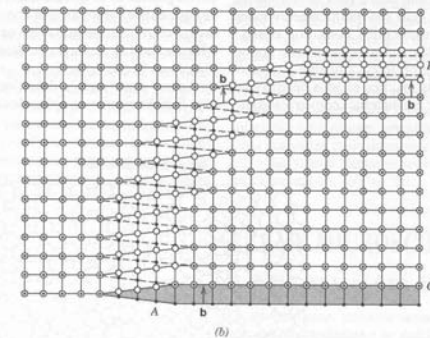
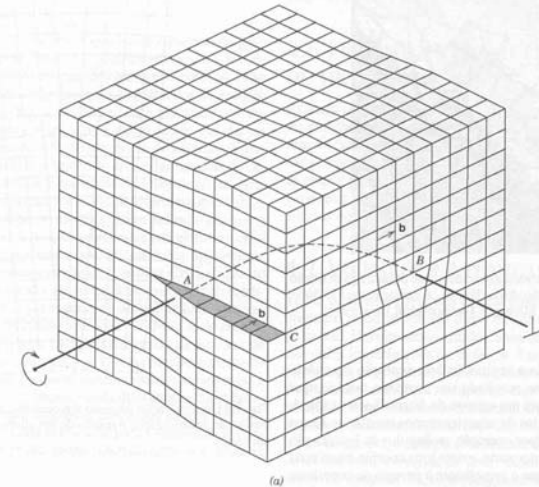
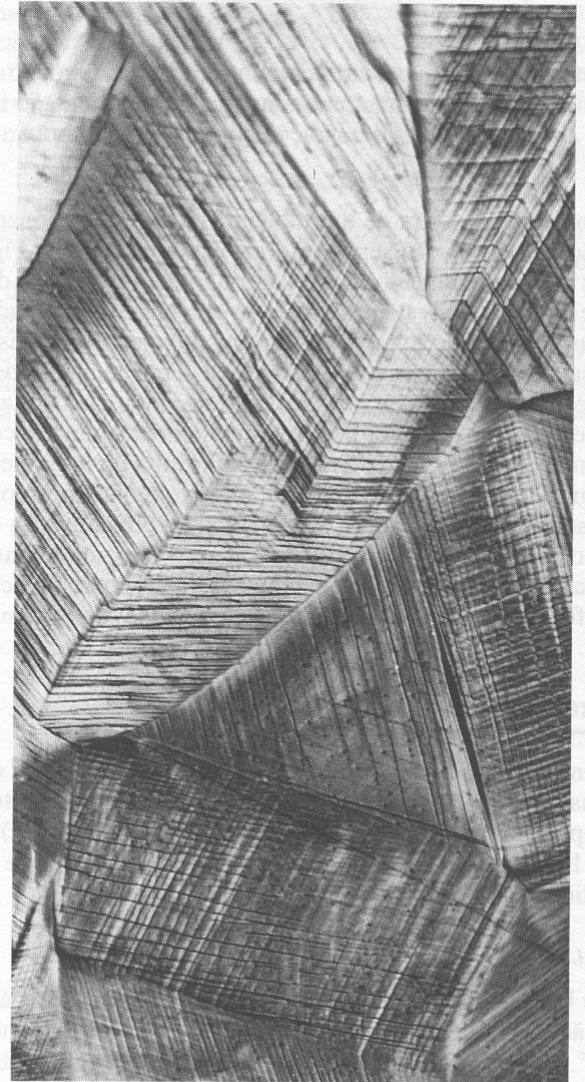


Fig. 4.5 (a) Representação esquemática de uma discordância que possui caracteres de discordância aresta, espiral e mista. (b) Vista superior, onde os círculos abertos representam posições atômicas acima do plano de deslizamento. Os círculos pretos representam átomos abaixo do plano. No ponto A, a discordância é puramente espiral, enquanto no ponto B ela é puramente aresta. Para as regiões localizadas entre esses pontos, onde existe uma curvatura na linha da discordância, o caráter é de uma discordância mista entre aresta e espiral. (A Fig. (b) foi tirada de W. T. Read, Jr., *Dislocations in Crystals*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1953.)



**Fig. 4.6** Uma micrografia eletrônica de transmissão de uma liga de titânio na qual as linhas escuras são discordâncias. Ampliação de  $51.450\times$ . (Cortesia de M. R. Plichta, Michigan Technological University.)



**Fig. 7.10** Linhas de escorregamento sobre a superfície de uma amostra policristalina de cobre que foi polida e subsequentemente deformada.  $173\times$ . (Esta fotomicrografia é uma cortesia de C. Brady, National Bureau of Standards.)

### **5.3.3. DEFEITOS DE FRONTEIRA (2 DIMENSÕES)**

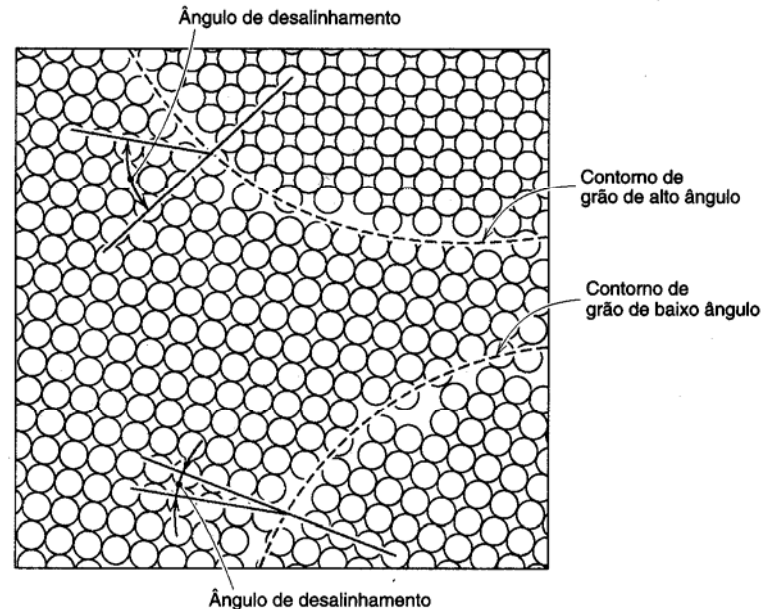
- As imperfeições cristalinas podem se estender em duas dimensões, como nas superfícies externas ou nos contornos de grãos.

#### **SUPERFÍCIES EXTERNAS**

- Na superfície externa, os átomos superficiais têm vizinhos de apenas um lado, portanto têm energia mais alta que os átomos internos. Se átomos adicionais forem depositados na superfície, deve haver desprendimento de energia, tal como na combinação de 2 átomos individuais (ver Energia de ligação, Unidade 3).
- As ligações interatômicas destes átomos de superfície não estão completadas e dão origem a uma energia de superfície.
- Para reduzir esta energia os materiais tentam minimizar a área total da superfície, como as superfícies esféricas de gotículas de líquidos. O mesmo não é possível em sólidos.

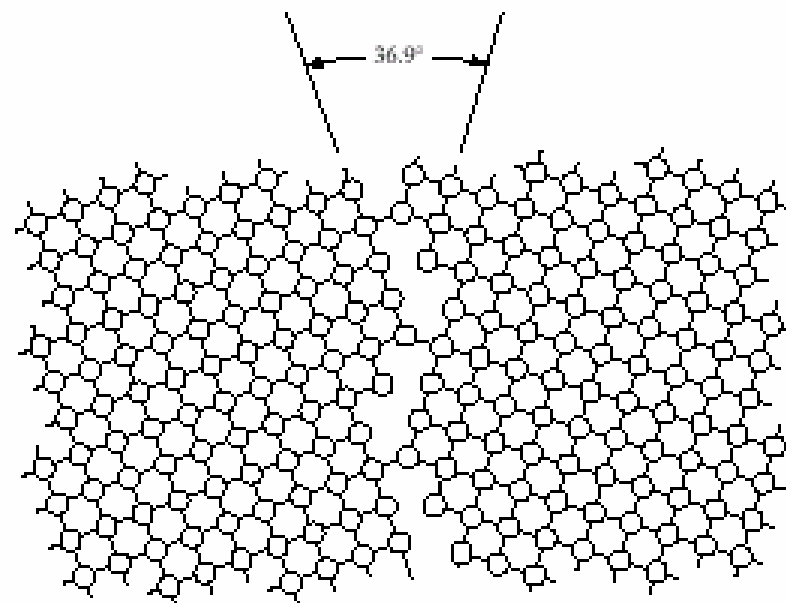
## CONTORNOS DE GRÃOS

- O contorno de grão é uma interface que separa dois grãos ou cristais que possuem diferentes orientações cristalográficas em materiais policristalinos.
- Dentro da região do contorno (espessura do contorno) existem alguns desencontros atômicos na transição da orientação cristalina de um grão para aquela de outro grão adjacente.
- São possíveis vários graus de desalinhamento cristalográfico entre grãos adjacentes.

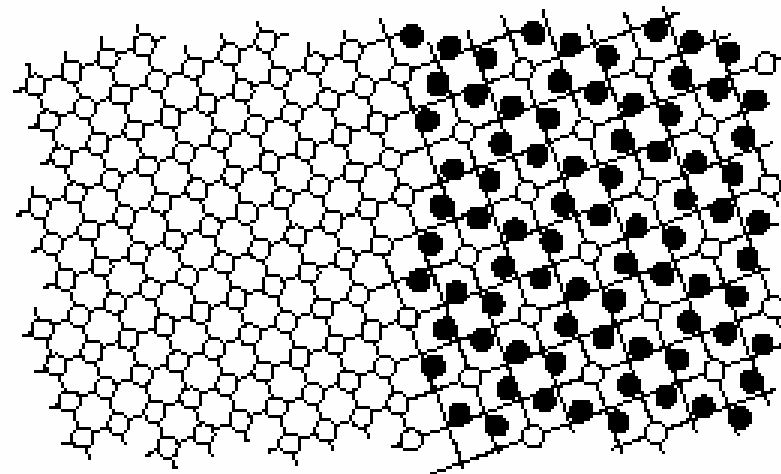


**Fig. 4.7** Diagrama esquemático mostrando contornos de grão de baixo e de alto ângulos, bem como as posições atômicas adjacentes.

- Os átomos estão ligados de maneira menos regular ao longo de um contorno de grão (p. ex. ângulos de ligação maiores).
- Conseqüentemente, existe uma energia interfacial, ou do contorno de grão, que é semelhante à energia de superfície descrita anteriormente. A magnitude desta energia é uma função do grau de desorientação, sendo maior para contornos de alto ângulo.
- Os contornos são quimicamente mais reativos do que os grãos propriamente ditos, como consequência desta energia de contorno. Além disso, os átomos de impurezas com frequência se segregam preferencialmente ao longo desses contornos, devido aos seus maiores estados de energia.
- A energia interfacial total é menor em materiais com grãos grandes ou grosseiros do que em materiais com grãos finos, devido à menor área de contorno total naqueles primeiros.
- Os grãos crescem quando se encontram a temperaturas elevadas, a fim de reduzir a energia de contorno total.



(a)



(b)

- Os contornos de grãos de baixo ângulo podem ser descritos em termos de arranjos de discordâncias. Um contorno de baixo ângulo simples é formado quando discordâncias tipo cunha estão alinhadas como na figura abaixo. Este tipo é chamado de um contorno inclinado.
- Quando o ângulo de desorientação é paralelo ao contorno tem-se o contorno torcido, que pode ser descrito mediante um arranjo de discordâncias tipo espiral (ou helicoidal).

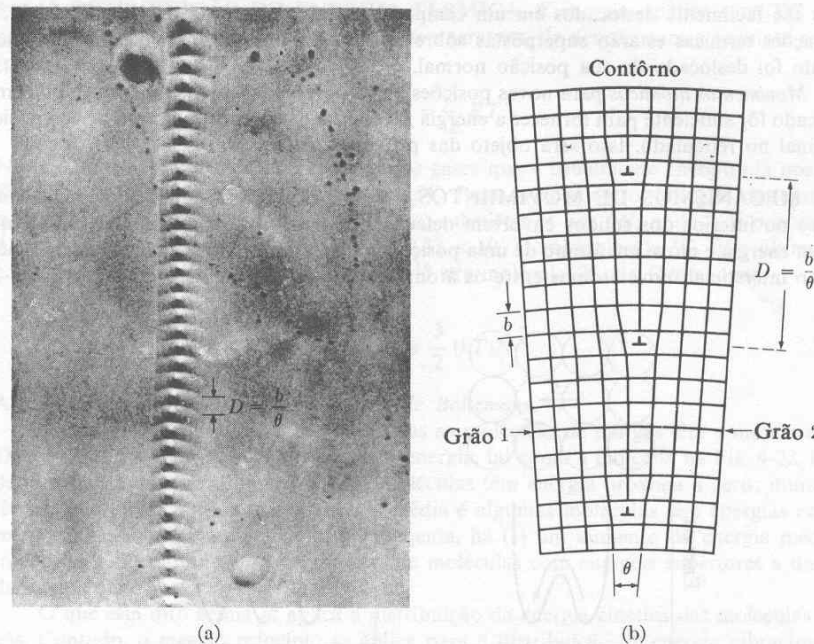


Fig. 4-18. Contorno de pequeno ângulo (a) cristal de germânio atacado para mostrar as extremidades das discordâncias em cunha ( $1000\times$ ). (b) Representação esquemática, mostrando apenas as células unitárias. O ângulo  $\theta$  foi exagerado. (Cortesia de F. L. Vogel Jr.).

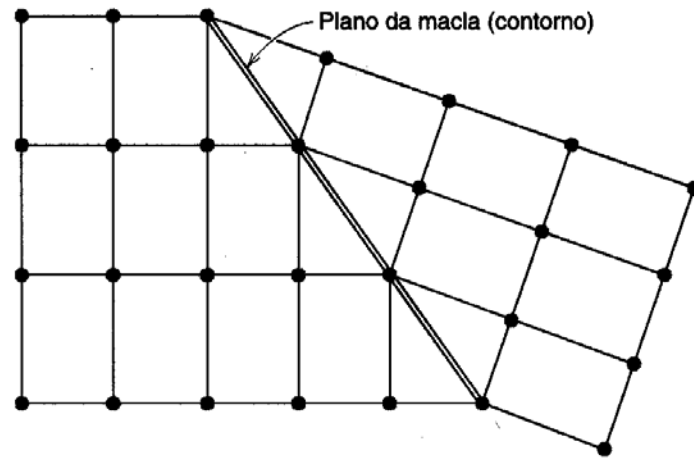


**Fig. 4.10** Um lingote de chumbo policristalino de elevada pureza, onde os grãos individuais podem ser identificados. Ampliação de  $0,7\times$ . (Reproduzido com permissão do *Metals Handbook*, Vol. 9, 9th edition, *Metallography and Microstructures*, American Society for Metals, Metals Park, OH, 1985.)

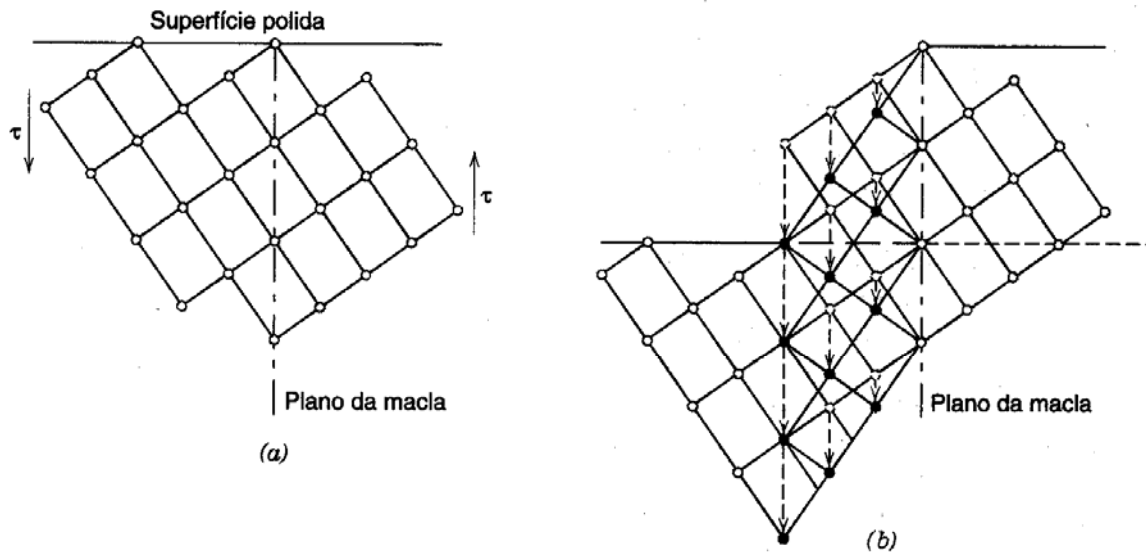


## **CONTORNOS DE MACLA (“TWIN BOUNDARIES”)**

- Um contorno de macla é um tipo especial de contorno de grão através do qual existe uma simetria específica em espelho da rede cristalina, isto é, os átomos em um dos lados do contorno estão localizados em posições de imagem em espelho dos átomos no outro lado do contorno.
- As maclas 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 maclagem ocorre em um plano cristalográfico definido e em uma direção específica, ambos dependendo da estrutura cristalina do material.



**Fig. 4.9** Diagrama esquemático mostrando um plano ou contorno de macla e as posições atômicas adjacentes (círculos escuros).



**Fig. 7.12** Diagrama esquemático mostrando como a maclagem resulta da aplicação de uma tensão de cisalhamento  $\tau$ . Em (b), os círculos abertos representam átomos que não mudaram de posição; os círculos tracejados e cheios representam as posições original e final dos átomos, respectivamente. (De G. E. Dieter, *Mechanical Metallurgy*, 3rd Edition. Copyright © 1986 por McGraw-Hill Book Company, New York. Reproduzido sob permissão de McGraw-Hill Book Company.)

