



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

DEFEITOS DO SÓLIDO CRISTALINO
DIFUSÃO NO ESTADO SÓLIDO

PMT 3100 - Fundamentos de Ciência e Engenharia dos Materiais
2º semestre de 2014

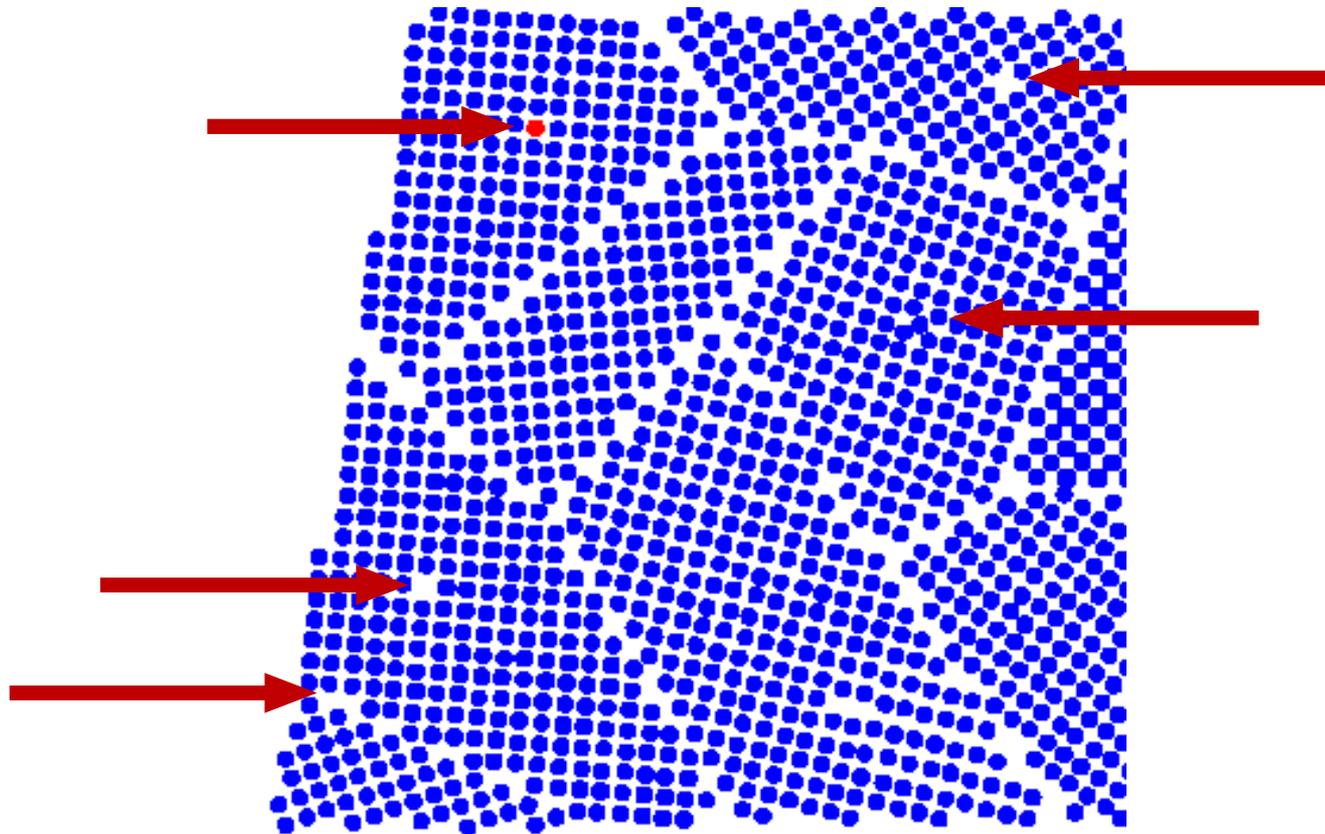
Defeitos do Sólido Cristalino

ROTEIRO

- Defeitos puntiformes
- Impurezas
- Soluções sólidas
- Defeitos de linha
- Defeitos bidimensionais
- Observação da Microestrutura
- Difusão
- História
- Conceitos
- Mecanismos
- Estado estacionário
- Estado não estacionário
- Efeito da temperatura

Defeitos do Sólido Cristalino

- DEFEITO DO CRISTAL: imperfeição do reticulado cristalino.



Defeitos do Sólido Cristalino

- *Classificação geométrica dos defeitos cristalinos:*
 - **DEFEITOS PONTUAIS** (associados com uma ou duas posições atômicas – 0D): lacunas e átomos intersticiais.
 - **DEFEITOS DE LINHA** (defeitos unidimensionais – 1D): discordâncias
 - **DEFEITOS BIDIMENSIONAIS** (fronteiras entre duas regiões com diferentes estruturas cristalinas ou diferentes orientações cristalográficas – 2D): contornos de grão, interfaces, superfícies livres, contornos de macla, defeitos de empilhamento.
 - **DEFEITOS VOLUMÉTRICOS** (defeitos tridimensionais – 3D): poros, trincas e inclusões.

Defeitos Puntiformes: *Lacunas*

- **LACUNA** (“*vacancy*”): ausência de um átomo em um ponto do reticulado cristalino.
- Podem ser formadas durante a deformação plástica ou como resultado de vibrações atômicas.
- Existe uma **CONCENTRAÇÃO DE EQUILÍBRIO** de lacunas.

$$N_L = N \exp\left(-\frac{Q_L}{kT}\right)$$

onde: N ≡ número total de posições atômicas

N_L ≡ número de lacunas

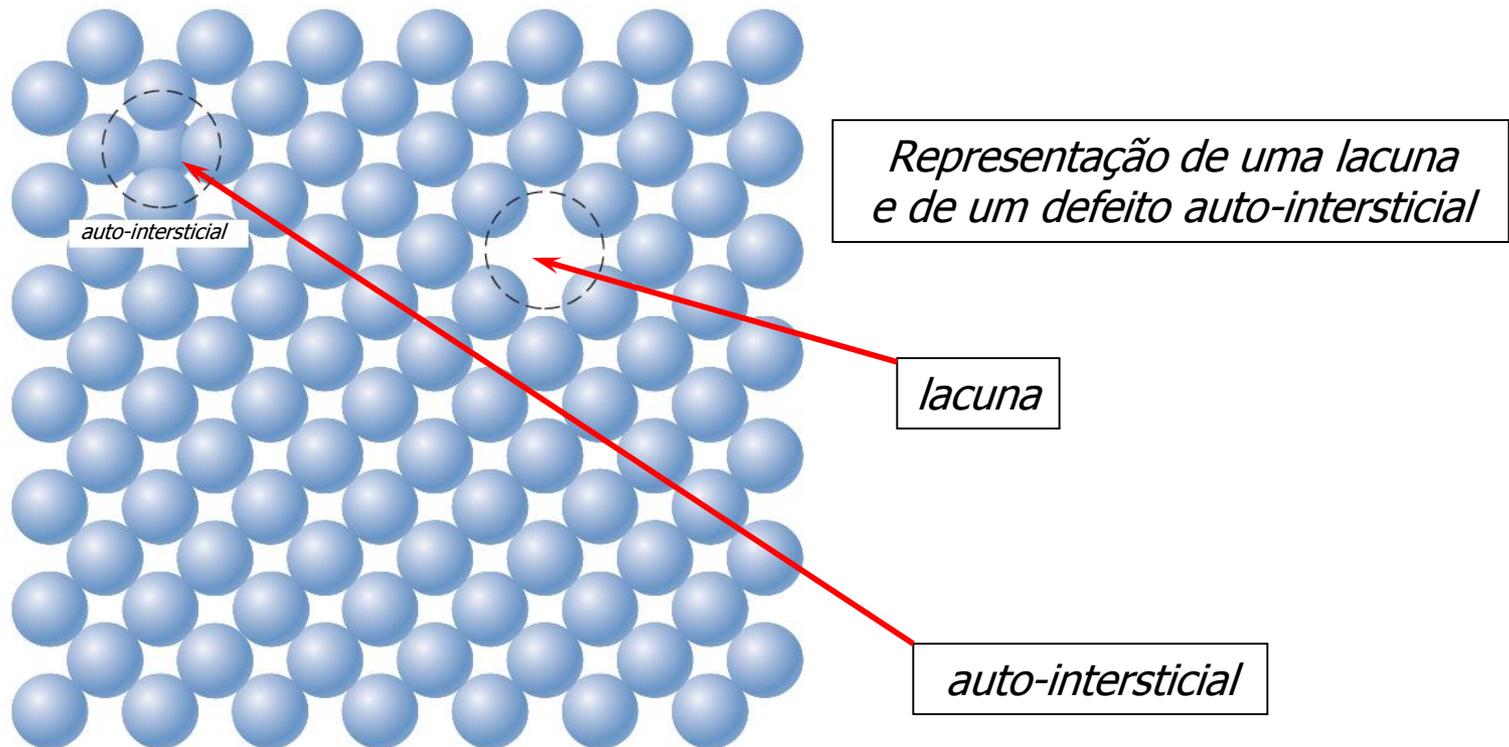
Q_L ≡ energia de ativação para formação de uma lacuna

k ≡ constante de Boltzmann ($k = 8,62 \times 10^{-5} \text{ eV/K} = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$)

T ≡ temperatura absoluta

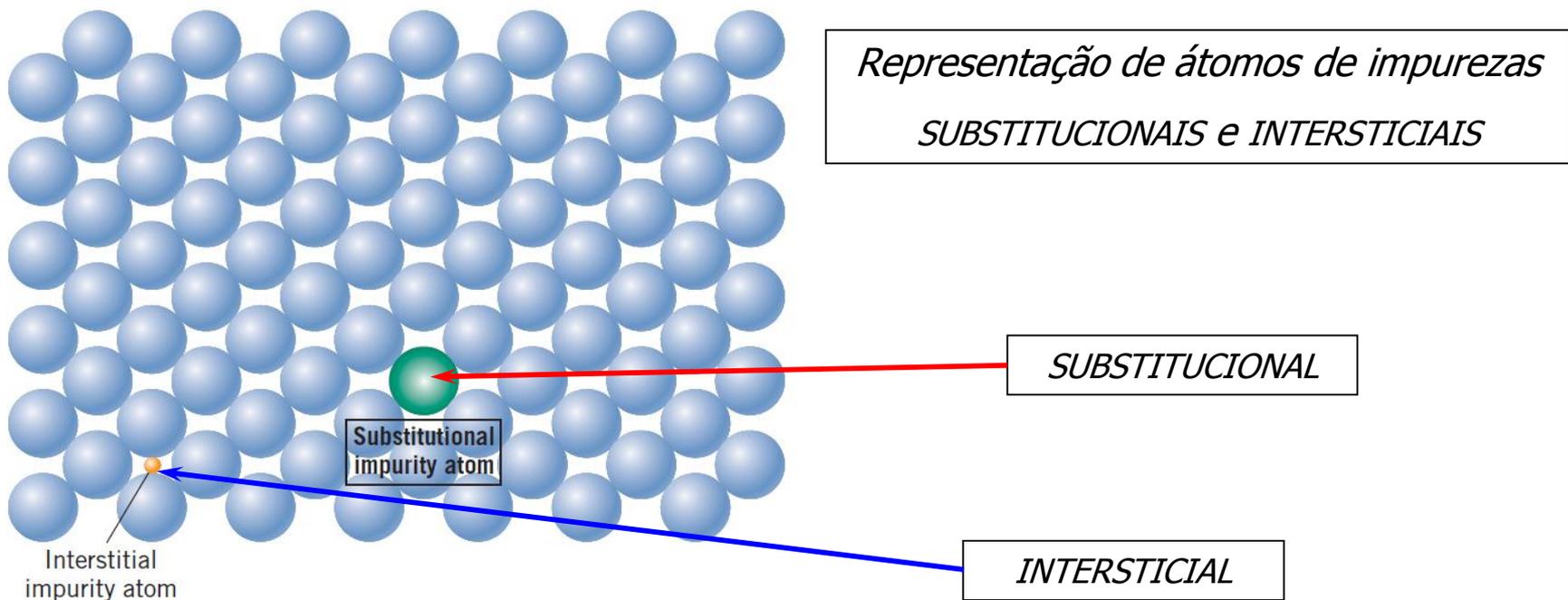
Defeitos Pontuais: *Auto-Intersticiais*

- **AUTO-INTERSTICIAL:** é um átomo da rede que ocupa uma posição que não é uma posição típica da rede.
- ✓ Os defeitos auto-intersticiais causam uma grande distorção do reticulado cristalino a sua volta.

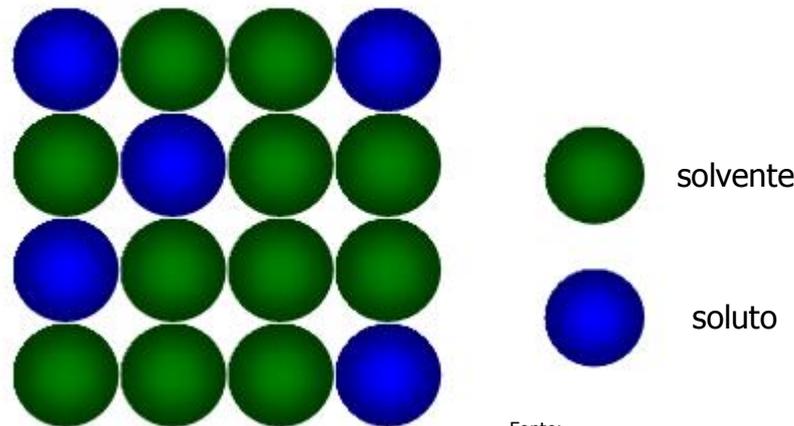


Impurezas

- É impossível existir um metal consistindo de um só tipo de átomo (metal puro).
- As técnicas de refino atualmente disponíveis permitem obter metais com um grau de pureza no máximo de 99,9999%.

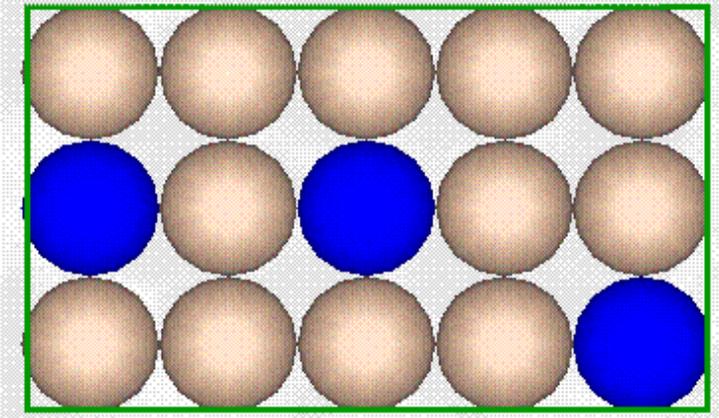


- As ligas são obtidas através da adição de *elementos de liga* (átomos diferentes do metal-base). Esses átomos adicionados intencionalmente podem ficar em ***solução sólida*** e/ou fazer parte de uma ***segunda fase***.
- Em uma liga, o elemento presente em menor concentração denomina-se **SOLUTO** e aquele em maior quantidade, **SOLVENTE**.

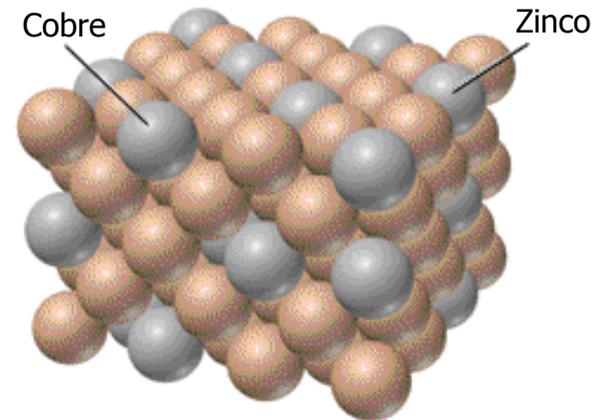


Fonte:
<http://www.substech.com>

- **SOLUÇÃO SÓLIDA:** ocorre quando a adição de átomos do soluto não modifica a estrutura cristalina do solvente, nem provoca a formação de novas estruturas.
- **SOLUÇÃO SÓLIDA SUBSTITUCIONAL :** os átomos de soluto substituem uma parte dos átomos de solvente no reticulado. Exemplos: latão (Cu e Zn), bronze (Cu e Sn), monel (Cu e Ni).

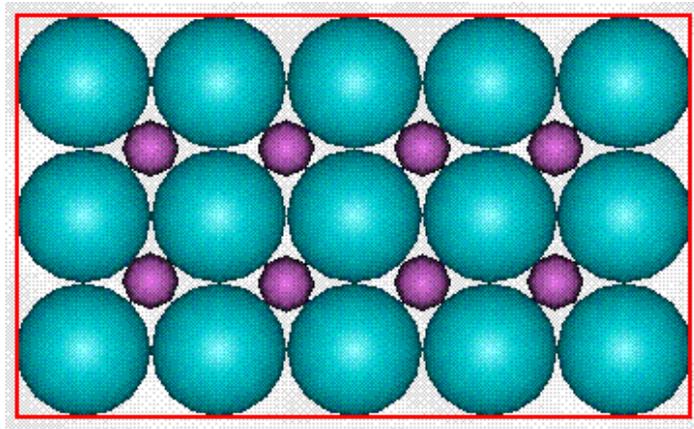


Fonte:
<http://www.rmutphysics.com/charud/s Cibook/crystal-structure/Solid%20solution.htm>



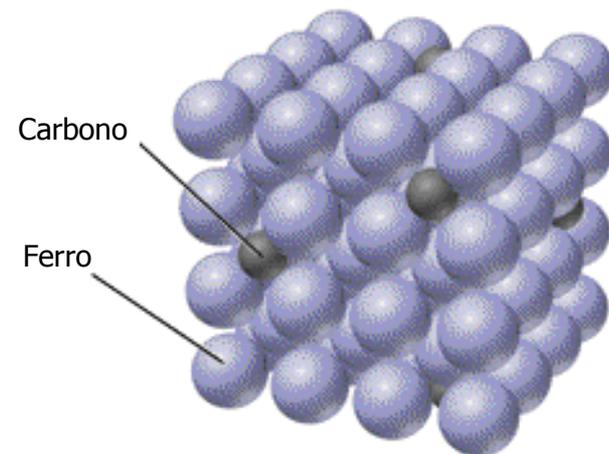
Fonte:
http://intranet.micds.org/upper/science/chem_02/chem_text_02/secondsemester/newchaps/solutionscolligativeprops/files/ch11text.html

- **SOLUÇÃO SÓLIDA:** ocorre quando a adição de átomos do soluto não modifica a estrutura cristalina nem provoca a formação de novas estruturas.
- **SOLUÇÃO SÓLIDA INTERSTICIAL:** os átomos de soluto ocupam os interstícios existentes no reticulado.



Fonte:
<http://www.rmutphysics.com/charud/s Cibook/crystal-structure/Solid%20solution.htm>

Exemplo: carbono em ferro.



Fonte:
http://intranet.micds.org/upper/science/chem_02/chem_text_'02/secondsemester/newchaps/solutionscolligativeprops/files/ch11text.html

Regras 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) tende a dissolver 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.

Composição de uma Liga

- **CONCENTRAÇÃO EM MASSA** (ou peso) - porcentagem em massa (ou peso):

$$C_A = \frac{m_A}{m_A + m_B} \times 100\%$$

onde m é a massa (ou peso) dos elementos.

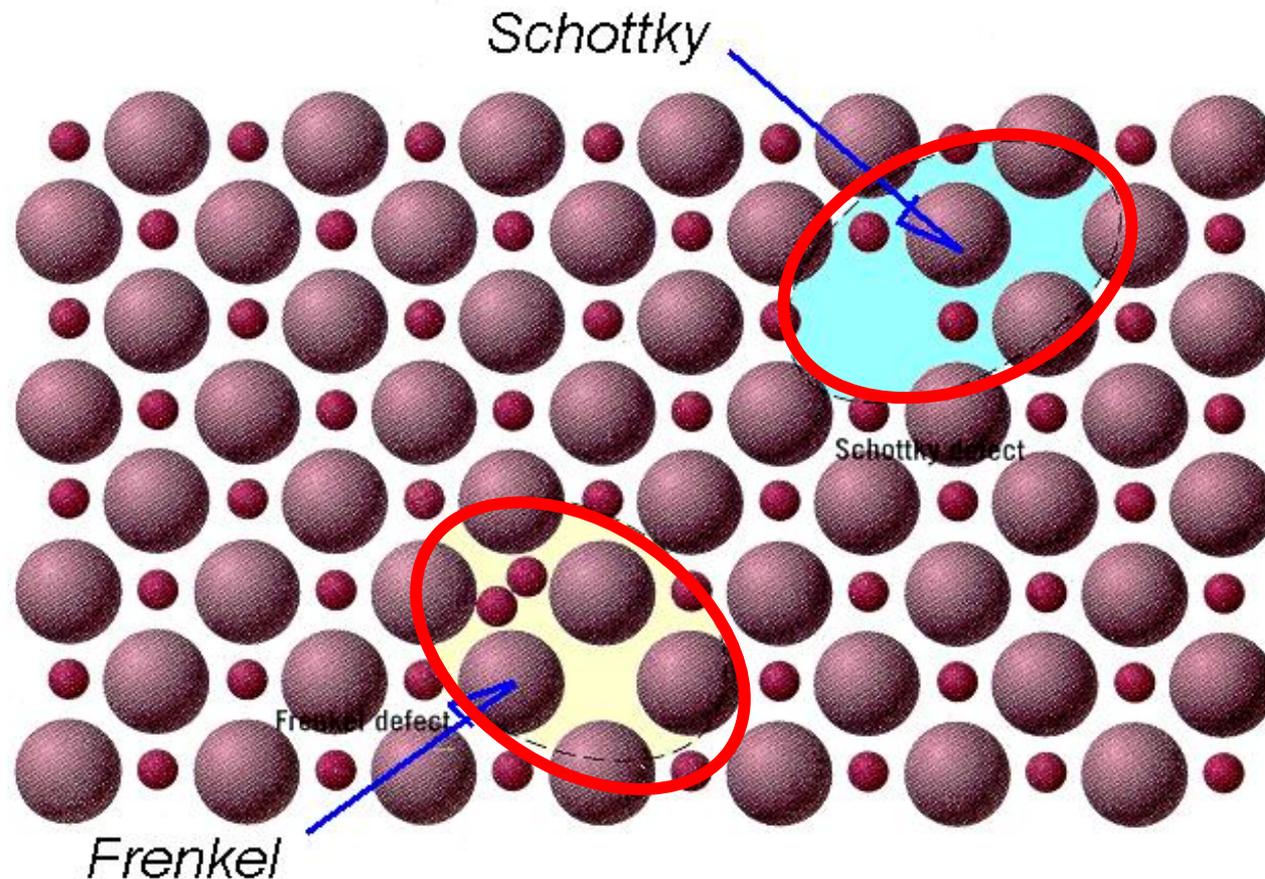
- **CONCENTRAÇÃO ATÔMICA** - porcentagem atômica (%-at.):

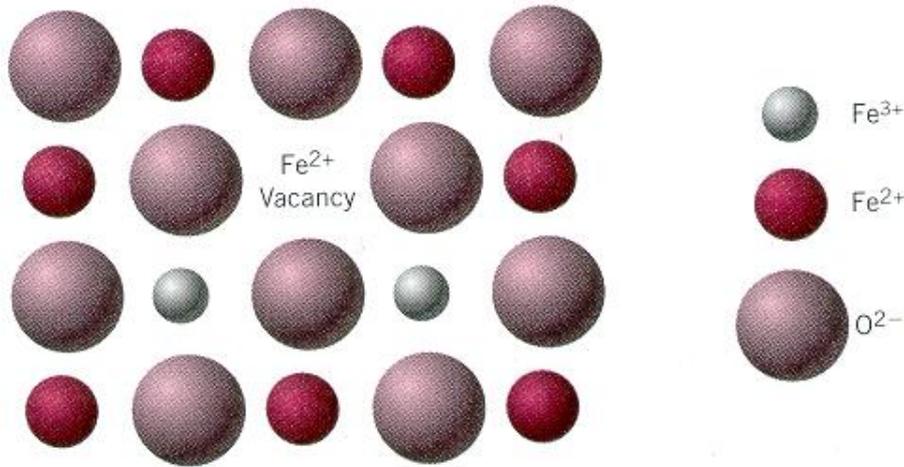
$$C_A^{\text{at}} = \frac{N_A}{N_A + N_B} \times 100\%$$

onde N_A e N_B são os números de moles dos elementos A e B.

Defeitos Puntiformes em Sólidos Iônicos

- *A neutralidade elétrica tende a ser respeitada.*
- DEFEITO SCHOTTKY: *lacuna aniônica + lacuna catiônica*
- DEFEITO FRENKEL: *cátion intersticial + lacuna catiônica*



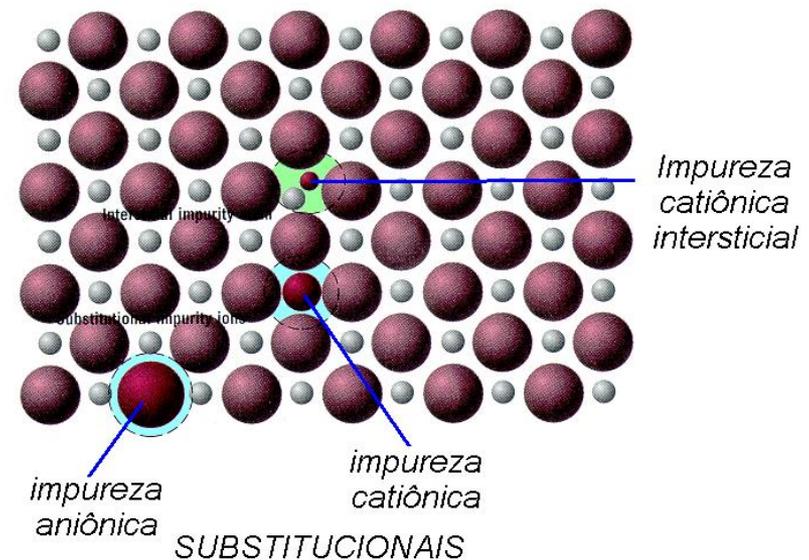


NÃO-ESTEQUIOMETRIA

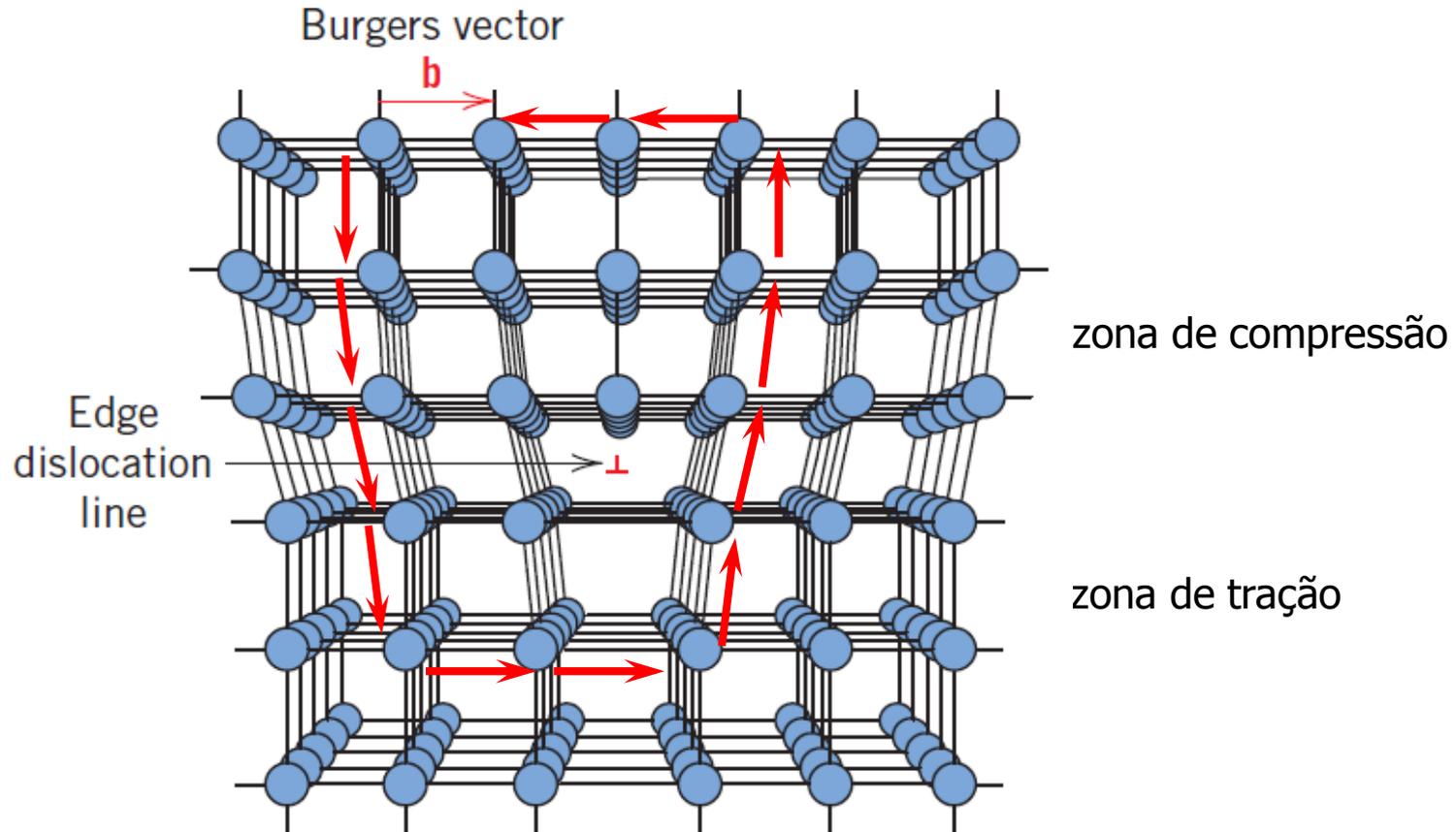
- *Exemplos de aplicação:*
 - Resistências de fornos elétricos (condutividade elétrica de cerâmicas em alta temperatura).
 - Sensores de gases.
 - Materiais com propriedades magnéticas interessantes.

Íons de ferro (Fe) no óxido de ferro podem apresentar dois estados de oxidação, Fe^{2+} e Fe^{3+} . Isso, aliado à necessidade de se manter a neutralidade elétrica do sólido iônico cristalino, leva à não-estequiometria do óxido de ferro.

IMPUREZAS



Defeitos de Linha : *Discordância em Cunha*

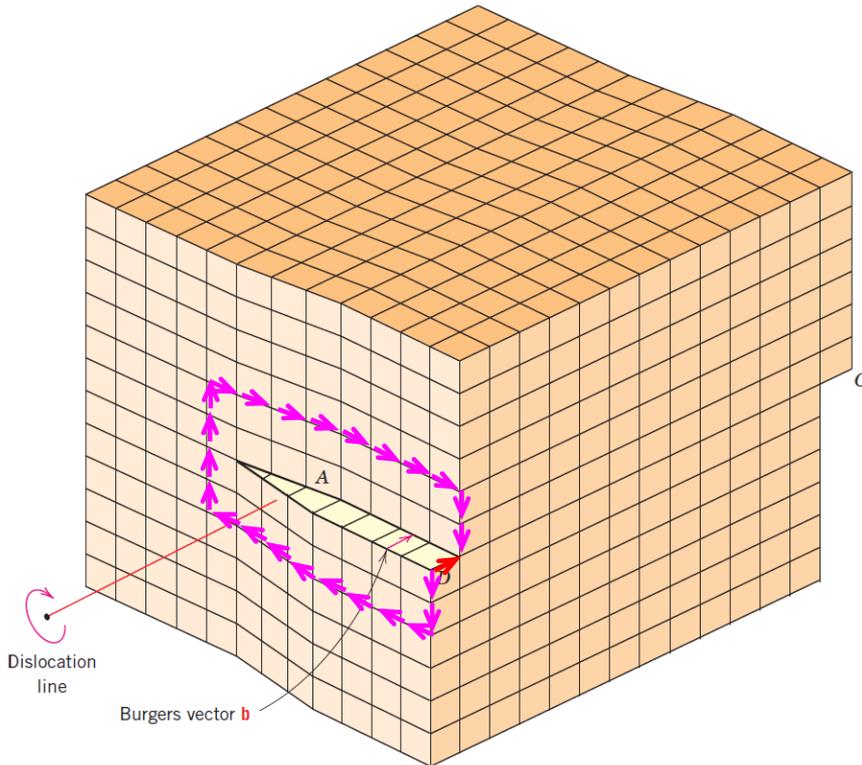


Arranjo dos átomos em torno de uma **DISCORDÂNCIA EM CUNHA** ("edge dislocation").

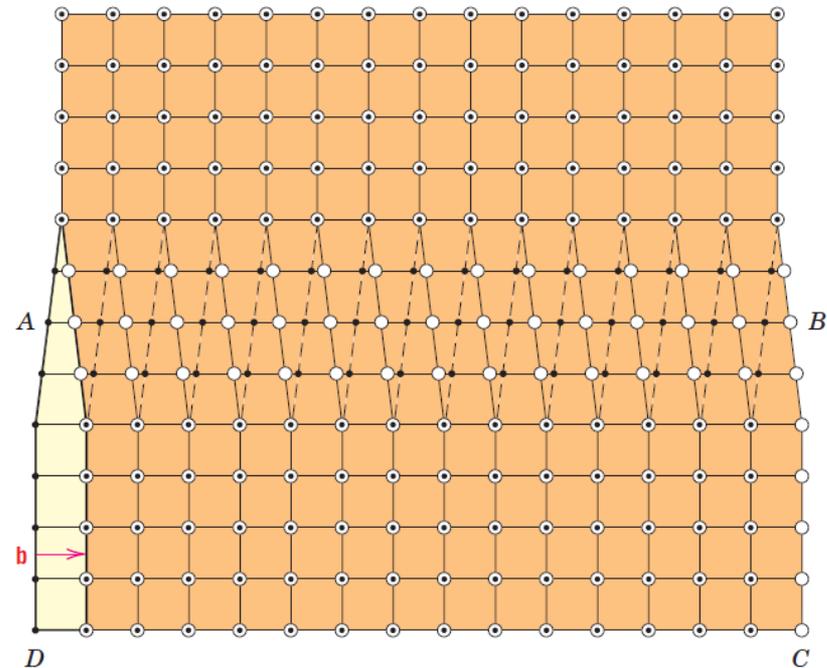
Defeitos de Linha :

Discordância em Hélice (ou Espiral)

DISCORDÂNCIA EM HÉLICE
("screw dislocation")



Arranjo dos átomos em torno de uma discordância em hélice.



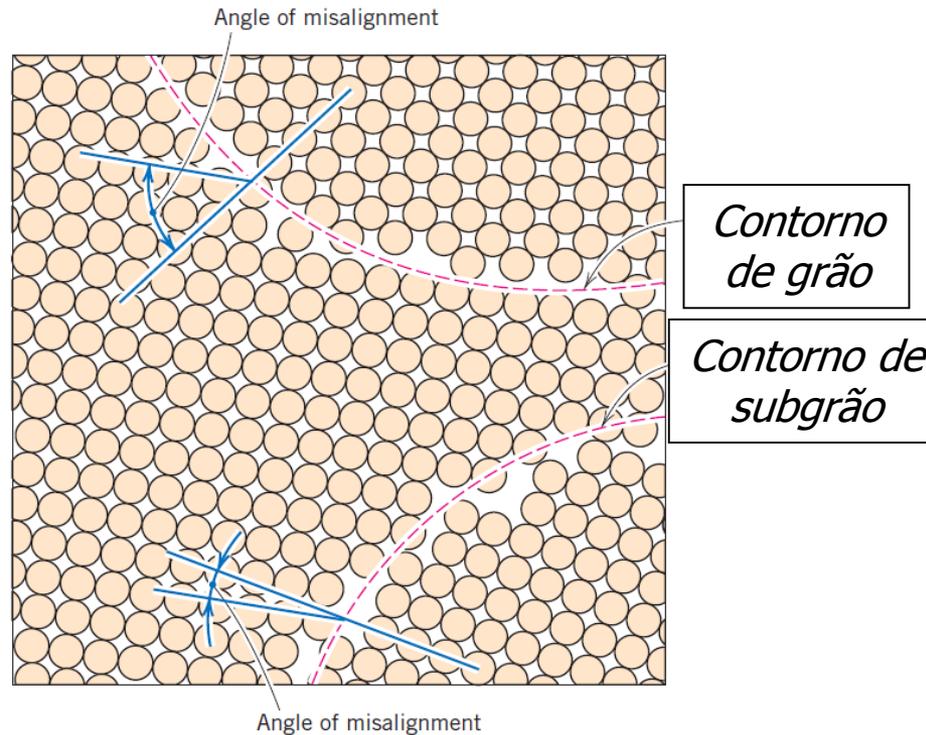
Tensões de cisalhamento estão associadas aos átomos adjacentes à linha da discordância em hélice.

Defeitos Bidimensionais

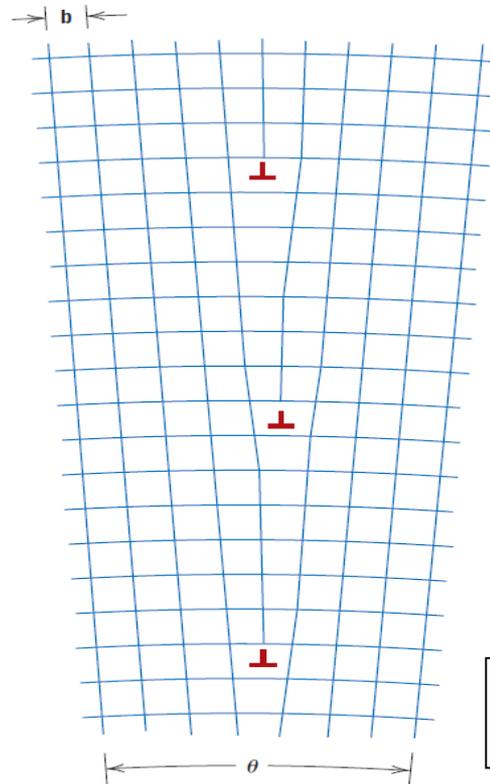
- **INTERFACE:** Fronteira entre duas regiões diferentes.
- **CONTORNOS DE GRÃO:** contornos entre dois cristais sólidos da mesma fase.
- **SUPERFÍCIE EXTERNA:** superfície entre o cristal e o meio que o circunda
- **CONTORNO DE MACLA:** tipo especial de **contorno de grão** que separa duas regiões com uma simetria tipo "espelho".
- **DEFEITOS DE EMPILHAMENTO:** ocorre nos materiais quando há uma interrupção na seqüência de empilhamento, por exemplo na seqüência ABCABCABC.... dos planos compactos dos cristais CFC.

Defeitos Bidimensionais: Contornos de Grão

- Quando o desalinhamento entre os **GRÃOS** vizinhos é grande (maior que $\sim 15^\circ$), o contorno formado é chamado **CONTORNO DE GRÃO** ou **CONTORNO DE ALTO ÂNGULO**.



- Se o desalinhamento é pequeno (em geral, menor que 5°), o contorno é chamado **CONTORNO DE PEQUENO ÂNGULO**, e as regiões que tem essas pequenas diferenças de orientação são chamadas de **SUBGRÃOS**. Os contornos de pequeno ângulo podem ser representados por arranjos convenientes de discordâncias.



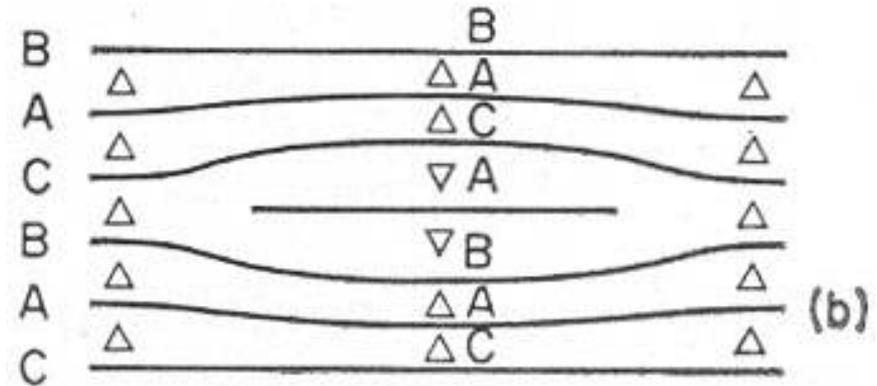
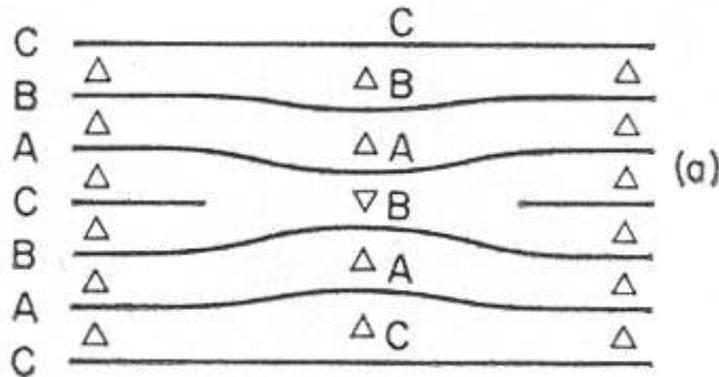
Contorno de pequeno ângulo resultante do alinhamento de discordâncias em cunha

DEFEITOS BIDIMENSIONAIS:

Defeitos de Empilhamento

- DEFEITOS DE EMPILHAMENTO são encontrados em metais CFC e HC.

CFC



IMPERFEIÇÕES TRIDIMENSIONAIS – Defeitos em Volume

- Além dos defeitos apresentados nas transparências anteriores, os materiais podem apresentar outros tipos de defeitos, que se apresentam, *usualmente*, em escalas muito maiores.
- Esses defeitos normalmente são introduzidos nos processos de fabricação, e podem afetar fortemente as propriedades dos produtos.
- Exemplos: INCLUSÕES, POROS, TRINCAS, PRECIPITADOS, ALÉM DOS SÓLIDOS AMORFOS OU REGIÕES AMORFAS DOS SÓLIDOS SEMI-CRISTALINOS.

OBSERVAÇÃO MICROESTRUTURAL

- Observação estrutural: macroestrutura e microestrutura.
- Observação da macroestrutura: a olho nu ou com baixos aumentos (até ~10X).
- Observação da microestrutura: microscopia óptica e microscopia eletrônica.



Macroestrutura de um lingote de chumbo apresentando os diferentes grãos.

Observação Microestrutural (microscopia óptica)

25

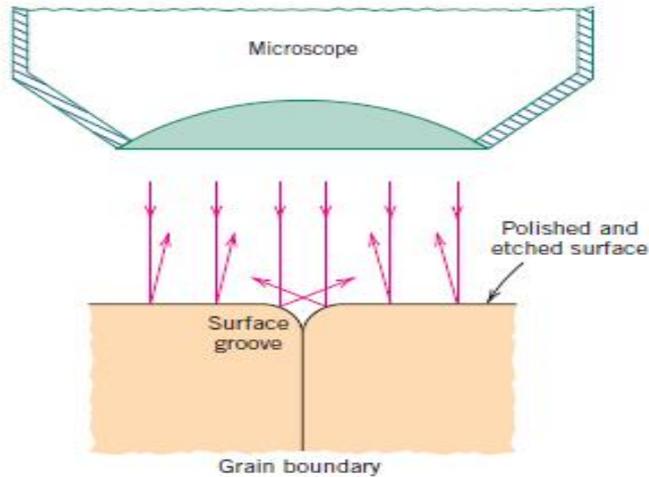
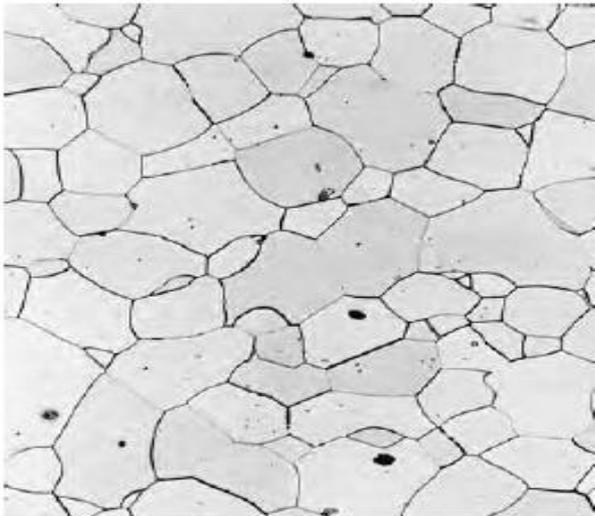


Ilustração do processo de formação da imagem dos contornos de grão em microscopia óptica.



*Micrografia óptica de uma liga Fe-Cr.
Aumento: 100X.*

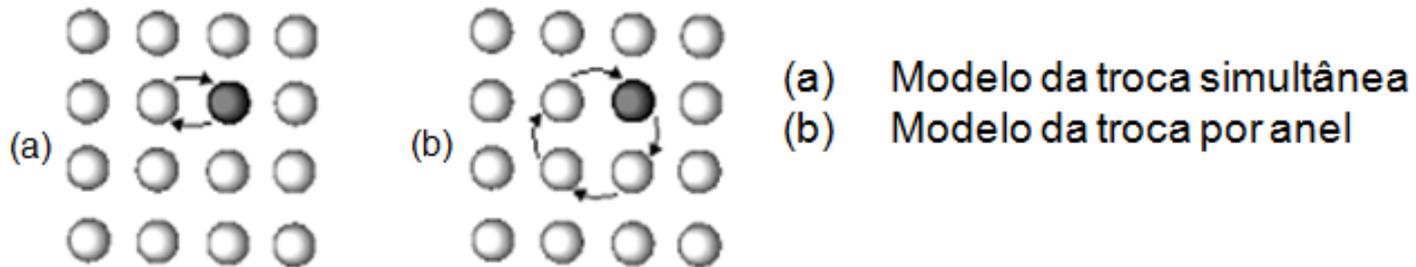
Difusão: história

- Robert Boyle (1627-1691) foi o primeiro a reportar que um sólido (zinco) penetrou em uma moeda de cobre e formou um material dourado (latão = liga cobre-zinco)
- O fenômeno da difusão em sólidos foi formalmente comunicado em 1896 por Sir Roberts-Austen*, estudando a difusão do ouro em chumbo. Ele determinou o coeficiente de difusão do Au no Pb e a difusividade do ouro em função do inverso da temperatura.

* A fase austenita nos aços carbono foi batizada com o seu nome.

Difusão: história

- Mecanismos que explicavam o fenômeno da difusão no passado (até aproximadamente 1950): a troca simultânea de átomos ou o modelo da troca por anel (não existia ainda o conceito de lacuna).



Conceito de difusão: transporte de massa

Da mesma forma que a **corrente elétrica** está associada ao **transporte de cargas** elétricas através de um fio condutor quando este está sujeito a uma diferença de potencial elétrico, a **DIFUSÃO** está associada ao **transporte de massa** que ocorre em um sistema quando nele existe diferença de potencial termodinâmico (que pode ser proporcional à diferença de concentração química, quando o sistema está em equilíbrio térmico).

Conceito de difusão: estados da matéria

Governada por diferentes mecanismos e manifestando-se com magnitudes bastante distintas, a difusão ocorre no interior de **sólidos**, **líquidos** e **gases**. Uma gota de tinta que se dilui na água, é um exemplo de difusão no interior de um líquido*. O odor de um perfume que se espalha por uma sala, é um exemplo de transporte de massa (convecção e difusão) no interior de um gás*.



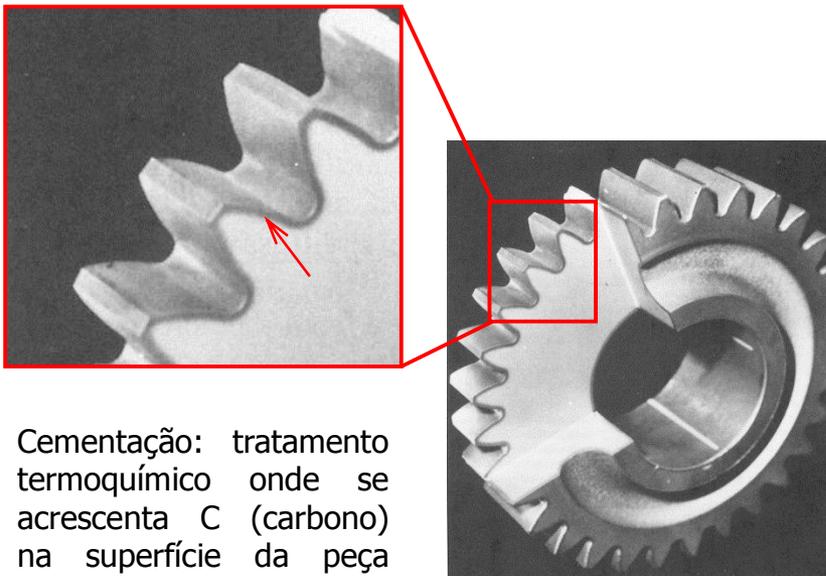
Tinta difundindo em água

* Nestes exemplos, a convecção tem um papel maior que a difusão no transporte de massa dos fenômenos citados. Se fosse somente difusão levaríamos muito mais tempo para perceber o perfume ou colorir a água. Nos sólidos não existe a convecção e pode-se afirmar que o transporte de massa é tipicamente por difusão.

- No interior dos sólidos, a difusão ocorre por movimentação atômica (no caso de metais), de cátions e ânions (no caso de cerâmicas) e de macromoléculas (no caso de polímeros).
- Daremos aqui atenção especial ao caso da difusão em materiais metálicos sólidos e reticulados cristalinos cúbicos.

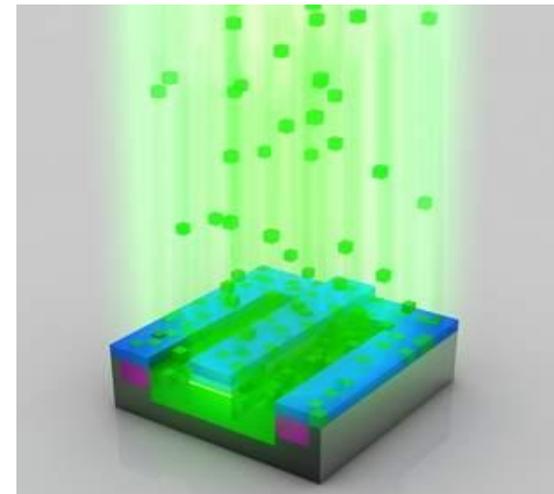
Conceito de difusão: aplicações

A presença da difusão em nosso cotidiano não é tão rotineira, mas é grande sua importância para a fabricação de componentes ou estruturas de engenharia.



Cementação: tratamento termoquímico onde se acrescenta C (carbono) na superfície da peça para aumento de dureza.

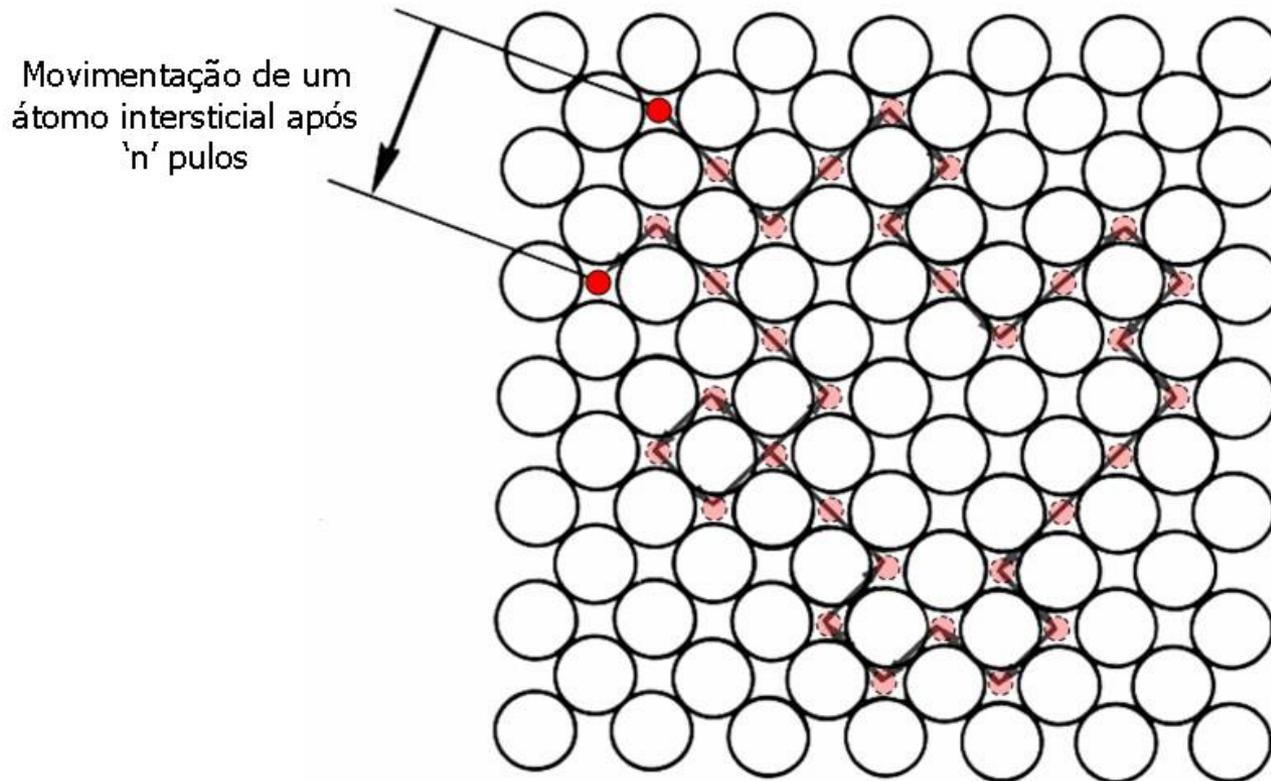
Corte de uma engrenagem cementada



Esquema da dopagem de boro (verde) no silício (cinza escuro)

Conceito de difusão: movimentação dos átomos

- A movimentação de cada átomo pode ser descrita como sendo um caminho aleatório (random-walk) no espaço. Por simplicidade será assumida uma movimentação unidimensional.

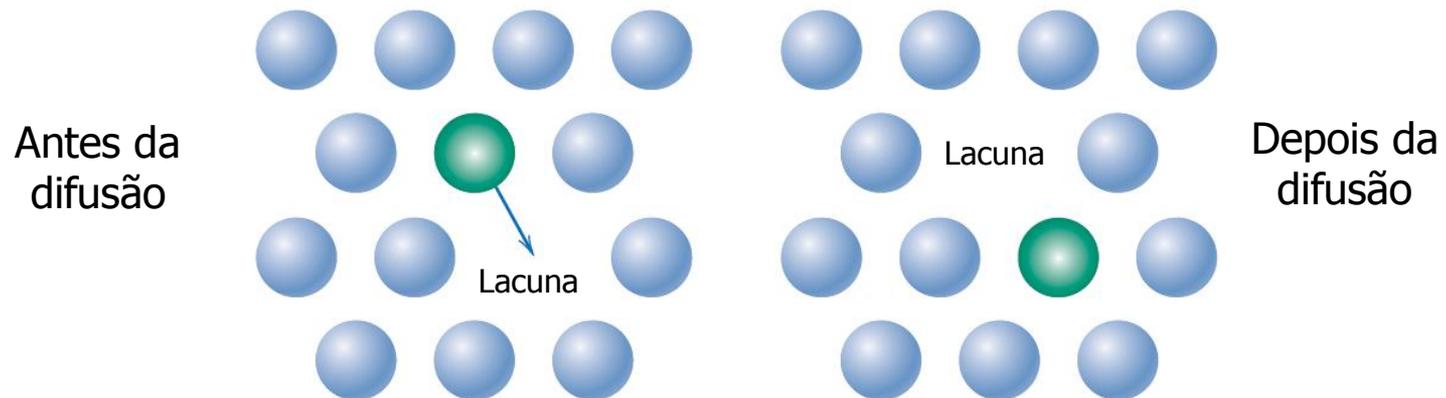


Mecanismos de difusão

- De uma perspectiva atômica, a difusão é a migração passo a passo dos átomos de determinadas posições do reticulado cristalino para outras.
- Para ocorrer a movimentação de átomos são necessárias duas condições:
 - (1) deve existir um espaço livre adjacente ao átomo;
 - (2) o átomo deve possuir energia suficiente para quebrar as ligações químicas que o une a seus átomos vizinhos; causar uma distorção no reticulado cristalino durante seu deslocamento para a nova posição e formar ligações químicas com os átomos de sua nova vizinhança.
- Foram propostos vários mecanismos diferentes para explicar o movimento atômico durante a difusão; deles, dois são dominantes para a *difusão em metais*, a **DIFUSÃO POR LACUNAS** (ou **DIFUSÃO SUBSTITUCIONAL**) e a **DIFUSÃO INTERSTICIAL**.

Difusão por lacunas (Difusão substitucional)

- Na **DIFUSÃO POR LACUNAS** um átomo (hospedeiro ou substitucional) se desloca de uma posição normal da rede cristalina para um sítio vago, ou lacuna, adjacente.

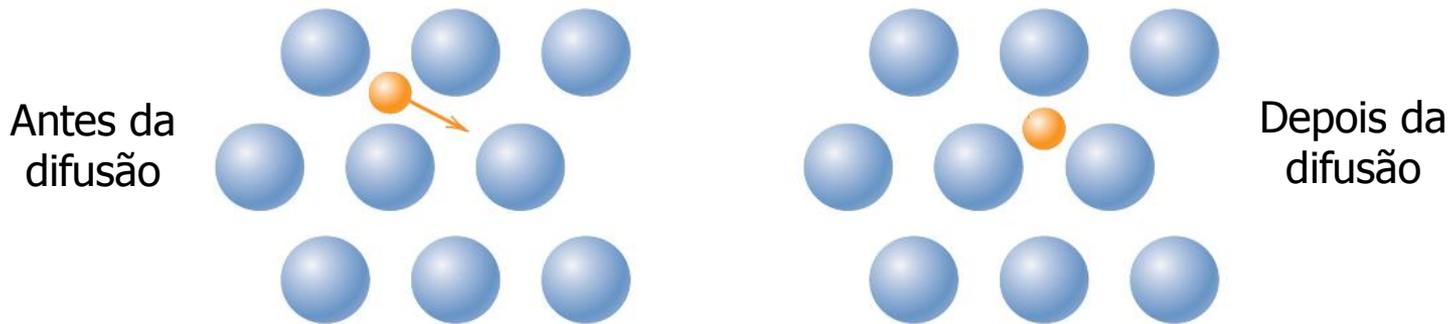


Difusão por lacunas (Difusão substitucional)

- A movimentação dos átomos ocorre em uma direção e a das lacunas ocorre na mesma direção em sentido oposto.
- A extensão segundo a qual a difusão por lacunas pode ocorrer é função da concentração de lacunas presente no metal.
- A concentração de lacunas aumenta com a temperatura.
- Quando átomos hospedeiros se difundem, ocorre o processo de **AUTODIFUSÃO** e quando átomos de impurezas substitucionais se difundem, ocorre o processo de **INTERDIFUSÃO**.

Difusão intersticial

- Na **DIFUSÃO INTERSTICIAL** átomos intersticiais migram para posições intersticiais adjacentes não ocupadas do reticulado.



- Em metais e ligas, a difusão intersticial é um mecanismo importante para a difusão de impurezas de raio atômico pequeno em relação aos do hospedeiro.
 - ✓ Exemplos: hidrogênio, carbono, nitrogênio e oxigênio no aço.
- Geralmente, a difusão intersticial é muito mais rápida que a difusão por lacunas.
 - ✓ Exemplo: No caso do Fe-a a 500°C, a difusão dos átomos de carbono é quase 10^9 vezes mais rápida do que a autodifusão dos átomos de ferro.

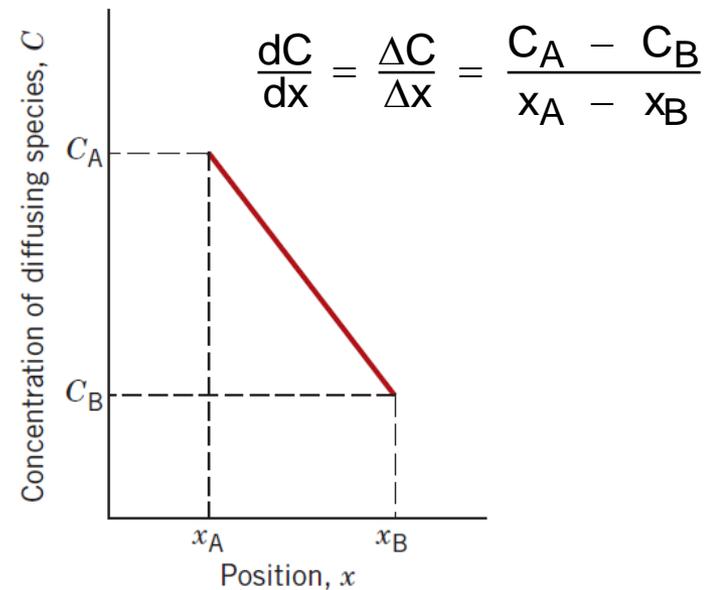
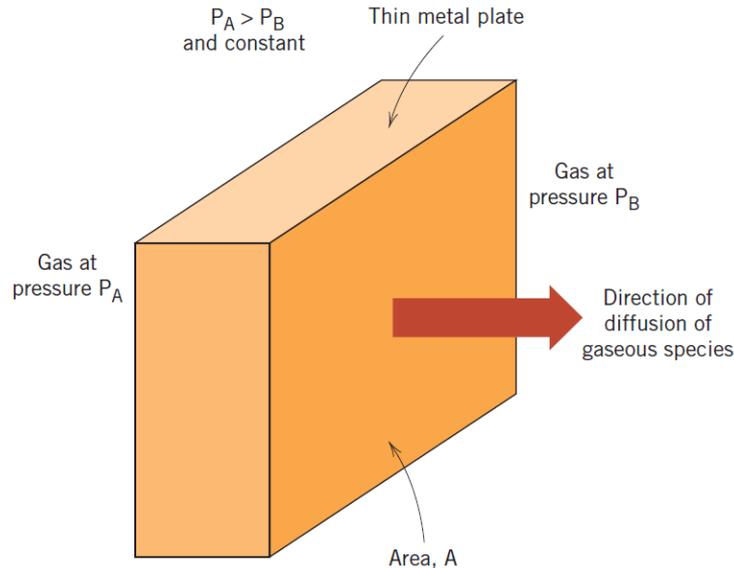
Algumas aplicações

- Filtros para purificação de gases
- Homogeneização de ligas com segregação
- Modificação superficial de peças por alteração de composição química
- Dopagem de semicondutores
- Processadores de microcomputadores
- Sinterização

Difusão em estado estacionário

- Quando J não varia com o tempo (C também não varia com o tempo) e temos a **DIFUSÃO EM ESTADO ESTACIONÁRIO** (ou **DIFUSÃO EM REGIME PERMANENTE**).
- Para que J não varie com o tempo é necessário que J também não varie com a posição. Assim, para o eixo x ,

$$\frac{dC}{dx} = \text{cte} \Rightarrow C = f(x) \text{ é uma função linear de } x.$$



Primeira lei de Fick

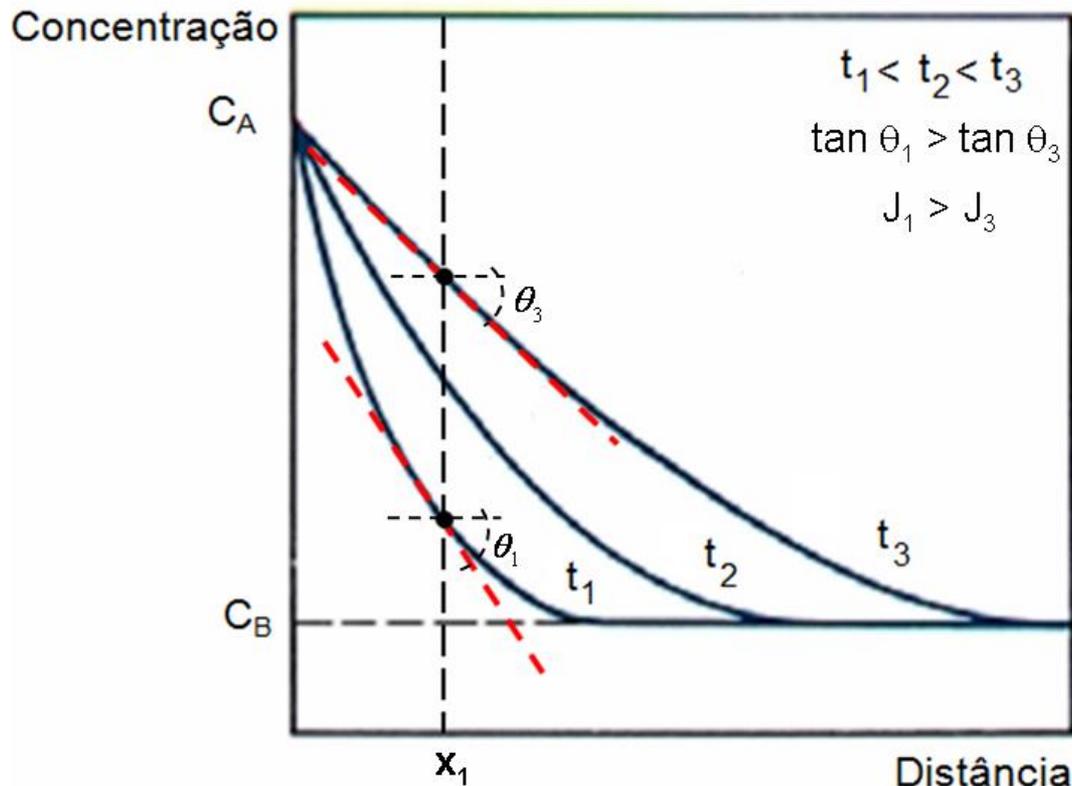
- Para processos de **difusão em estado estacionário**, a equação que correlaciona o fluxo de difusão J com o gradiente de concentração dC/dx é chamada de **PRIMEIRA LEI DE FICK**,

$$J = -D \frac{dC}{dx}$$

- O sinal negativo na equação acima indica que o fluxo ocorre na direção contrária à do gradiente de concentração, isto é, no sentido das concentrações altas para as concentrações baixas.

Difusão em estado não-estacionário

- A maioria das situações práticas envolvendo difusão ocorre em condições de **ESTADO NÃO-ESTACIONÁRIO** (ou **REGIME TRANSITÓRIO** ou **CONDIÇÕES TRANSIENTES**).
- Na difusão em estado não-estacionário tanto o fluxo de difusão, quanto o gradiente de concentração, numa dada posição x , variam com o tempo t . Como resultado, ocorre um acúmulo ou esgotamento líquido do componente que se encontra em difusão.



Concentração em três instantes de tempo diferentes do processo de difusão em estado não-estacionário.

Segunda lei de Fick

- Para descrever a **difusão em estado não-estacionário unidimensional**, é utilizada a equação diferencial parcial

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right)$$

conhecida por **SEGUNDA LEI DE FICK**.

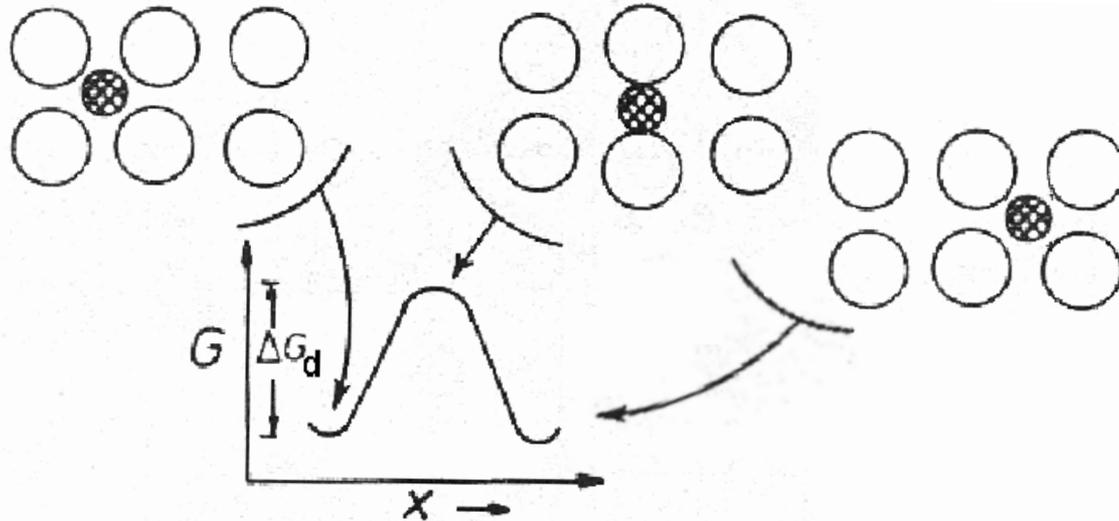
- Se o coeficiente de difusão não depende da composição (portanto, da posição), a segunda lei de Fick se simplifica para

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

- Quando são especificadas condições de contorno correspondentes a um fenômeno físico, é possível se obter soluções para segunda lei de Fick. Essas soluções são funções $C = f(x,t)$ que representam as concentrações em termos tanto da posição quanto do tempo.

Efeito da temperatura – ATIVAÇÃO TÉRMICA

43



$$D = D_0 \exp\left(-\frac{\Delta G_d}{RT}\right)$$

onde: D_0 é uma constante (m^2/s), ΔG_d é a energia de ativação para difusão (J/mol), R é a constante universal dos gases ($8,31 \text{ J/mol.K}$) e T é a temperatura absoluta (K).

Fatores que influem no Coeficiente de Difusão (D):

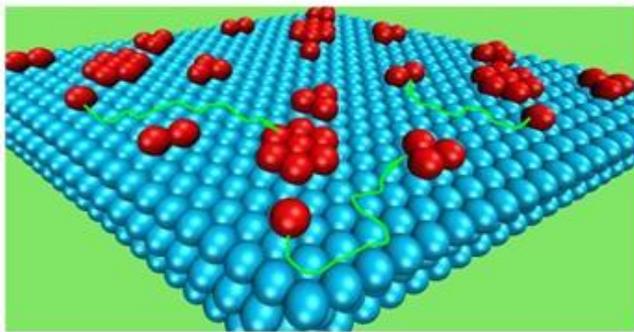
- Espécie que se difunde
- Meio onde ocorre a difusão
- Temperatura

Exemplos de constantes de difusão típicas

<i>Diffusing Species</i>	<i>Host Metal</i>	$D_0(m^2/s)$	<i>Activation Energy Q_d</i>		<i>Calculated Values</i>	
			<i>kJ/mol</i>	<i>eV/atom</i>	<i>T(°C)</i>	<i>D(m²/s)</i>
Fe	α -Fe (BCC)	2.8×10^{-4}	251	2.60	500	3.0×10^{-21}
					900	1.8×10^{-15}
Fe	γ -Fe (FCC)	5.0×10^{-5}	284	2.94	900	1.1×10^{-17}
					1100	7.8×10^{-16}
C	α -Fe	6.2×10^{-7}	80	0.83	500	2.4×10^{-12}
					900	1.7×10^{-10}
C	γ -Fe	2.3×10^{-5}	148	1.53	900	5.9×10^{-12}
					1100	5.3×10^{-11}
Cu	Cu	7.8×10^{-5}	211	2.19	500	4.2×10^{-19}
Zn	Cu	2.4×10^{-5}	189	1.96	500	4.0×10^{-18}
Al	Al	2.3×10^{-4}	144	1.49	500	4.2×10^{-14}
Cu	Al	6.5×10^{-5}	136	1.41	500	4.1×10^{-14}
Mg	Al	1.2×10^{-4}	131	1.35	500	1.9×10^{-13}
Cu	Ni	2.7×10^{-5}	256	2.65	500	1.3×10^{-22}

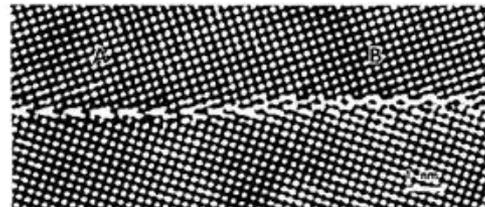
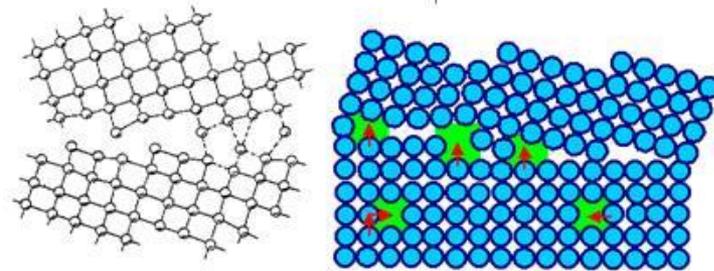
- A movimentação de átomos pode ocorrer:
 - 1) No volume do material
 - 2) Ao longo de defeitos lineares: discordâncias
 - 3) Ao longo de defeitos bidimensionais: contornos de grão, superfícies externas.
- A movimentação de átomos pelos defeitos cristalinos é muito mais rápida que pelo volume.
- Em alguns casos, a contribuição do fluxo de átomos através dos defeitos cristalinos é insignificante (os seus volumes são muito pequenos em comparação com o resto do cristal isento de defeitos).

Difusão superficial



http://iramis.cea.fr/Images/astimg308_1.jpg

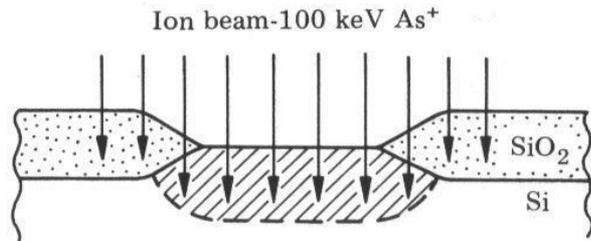
Difusão em contorno de grão



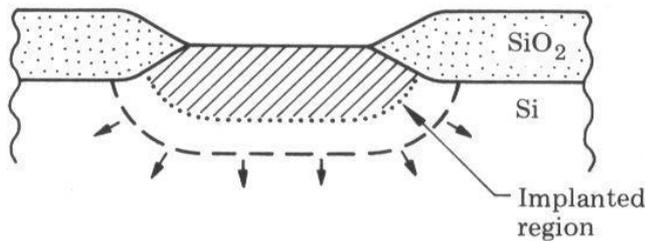
Microscopia de ultra alta resolução

<http://www.ccp14.ac.uk/ccp/web-mirrors/arme/egypte/conf2/theory.html>

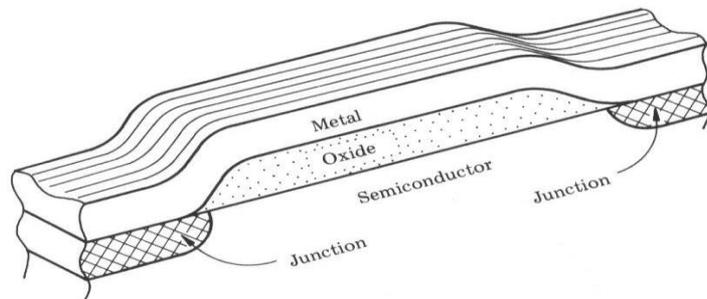
APLICAÇÃO: produção de circuitos integrados



(a) Ion implantation of dopants (As)



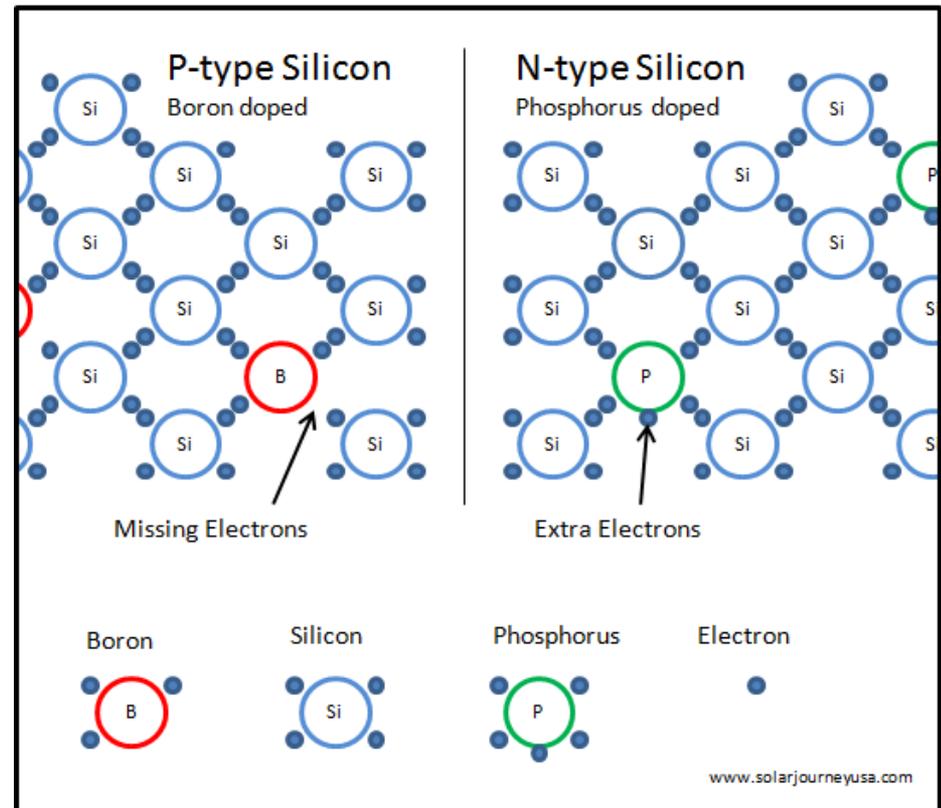
(b) Drive-in diffusion-950-1050°C



ESQUEMA DA CONEXÃO ENTRE DUAS JUNÇÕES E UMA CONEXÃO METÁLICA

•Junção tipo n:
 $\text{Si}^{4+} + (\text{P}^{5+} \text{ ou } \text{As}^{5+} \text{ ou } \text{Sb}^{5+})$

•Junção tipo p:
• $\text{Si}^{4+} + (\text{Al}^{3+} \text{ ou } \text{B}^{3+} \text{ ou } \text{Ga}^{3+})$



- Os defeitos influem nas propriedades macroscópicas dos materiais.
- Os principais defeitos do cristal podem ser classificados em termos geométricos em: **puntiformes**, **lineares (unidimensionais)**, **planares (bidimensionais)** e **volumétricas (tridimensionais)**. E classificam-se termodinamicamente em: **de equilíbrio** e **de não-equilíbrio**.
- Usualmente, os defeitos tridimensionais apresentam dimensões muito maiores que os outros tipos de defeitos geométricos.
- Nos defeitos de equilíbrio, o aumento da entalpia é compensado pelo aumento da entropia. Para um dado material em cada temperatura é observada um número relativo de defeitos em equilíbrio.
- Em metais, a solução sólida ocorre com a adição de um segundo tipo de átomo **sem** alteração da estrutura cristalina e classifica-se em: **substitucional** e **intersticial**.
- A análise microestrutural permite a observação e o estudo de defeitos.

- A Difusão descreve o transporte de massa através de um sólido
- A Difusão depende de vários fatores: **a espécie que se difunde, o meio de difusão e a temperatura.**
- A movimentação de átomos pode ocorrer: (1) através do volume do material, (2) ao longo de defeitos lineares (discordâncias) e (3) ao longo de defeitos bidimensionais (contornos de grão, superfícies externas).
- Embora a movimentação dos átomos através dos defeitos seja mais rápida, a sua contribuição na Difusão no material como um todo é pequena.
- A dopagem de silício para produção de circuitos integrados é um exemplo de aplicação tecnológica da Difusão.

Exercício

Um aço tem 1,3% em massa de carbono. Calcule sua porcentagem atômica. Explique a diferença entre os números.

Dados:

- 1 mol de ferro: 56 g
- 1 mol de carbono: 12 g
- 1 mol: $6,02 \times 10^{23}$ átomos

Tomemos 100 g de material:

Em 100 g, há:

1,3 g de carbono;

98,7 g de ferro

1 mol C → 12 g

x mol C → 1,3 g

x = 0,108 mol C

Multiplicado pelo número de Avogadro:

Átomos de carbono: $0,65 \times 10^{23}$

1 mol Fe → 56 g

y mol Fe → 98,7 g

y = 1,762 mol C

Multiplicado pelo número de Avogadro:

Átomos de Ferro: $10,61 \times 10^{23}$

Total de átomos: $(10,61 + 0,65) \times 10^{23}$
 $= 11,26 \times 10^{23}$

$$\%_{\text{át.}}^{\text{C}} = \frac{\text{átomos de carbono}}{\text{total de átomos}} \times 100$$

$$\%_{\text{át.}}^{\text{C}} = \frac{0,65 \times 10^{23}}{11,26 \times 10^{23}} \times 100$$

$$\%_{\text{át.}}^{\text{C}} = 0,0577 \times 100 = 5,77\%$$

Essa diferença é devida ao fato de o carbono ser um átomo muito menor que o ferro e muito leve. Por conta disso, um número muito grande de átomos é necessário para que se obtenha uma fração em massa relativamente baixa.

- **Capítulos do Callister (7ª Ed., 2008) tratados nesta aula**
 - Capítulo 4 : completo
 - Capítulo 7 : Maclas, item 7.7 .
 - Capítulo 12: Defeitos em sólidos iônicos, item 12.5 .
- Outras referências importantes
 - Callister – Ciência e Eng. Mat: Uma introdução, 5ª ed. Capítulo 4 completo; Capítulo 7 : Maclas, item 7.7; e Capítulo 13: Defeitos em sólidos iônicos, item 13.5.
 - Shackelford, J. F. – Ciência dos Materiais, 6ª ed., 2008. Cap. 4
 - Van Vlack , L. - Princípios de Ciência dos Materiais, 3ª ed.
 - Capítulo 4 : itens 4-1 a 4-9
 - Padilha, A.F. – Materiais de Engenharia. Hemus. São Paulo. 1997.
 - Capítulos 9 e 10.