

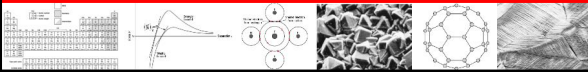


Materiais de Construção I

UNIDADE I

Estrutura dos Materiais, Defeitos e Propriedades Mecânicas

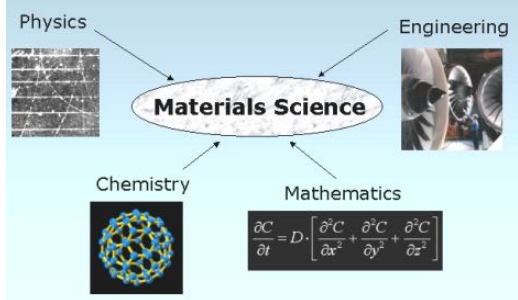
Prof. Dr. Daniel Vêras Ribeiro
verasribeiro@hotmail.com



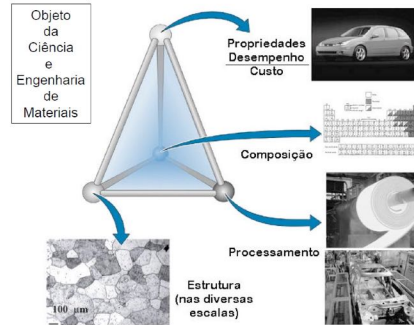
Introdução



Introdução



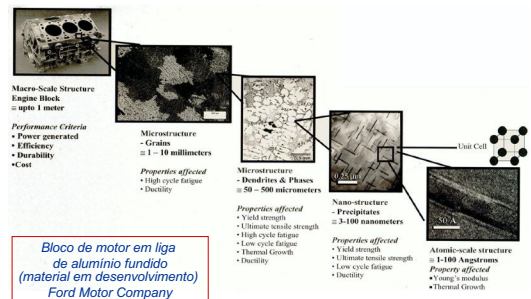
Introdução



Introdução



Introdução





Introdução

- **Propriedade:**
 - Tipo e intensidade da resposta a um estímulo que é imposto ao material.
- **Classes de Propriedades:**
 - Mecânicas;
 - Elétricas;
 - Térmicas;
 - Magnéticas;
 - Ópticas;
 - Químicas;
 - de Degradação (corrosão, oxidação, desgaste).



Introdução

- **Classes de Materiais:**
 - Cerâmicas;
 - Metais;
 - Polímeros;
 - Semicondutores;
 - Biomateriais;
 - Materiais em aplicações de alta tecnologia.
- } **Materiais básicos**
 } **Materiais intermediários**
 } **Materiais avançados**



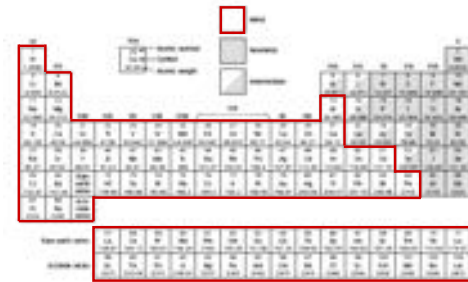
Introdução

- **Metais:**
- Geralmente uma combinação de elementos metálicos;
- Bons condutores de calor e eletricidade;
- Não são transparentes à luz visível;
- Têm aparência lustrosa quando polidos;
- Geralmente são resistentes e deformáveis;
- São muito utilizados para aplicações estruturais.



Introdução

- **Metais:**



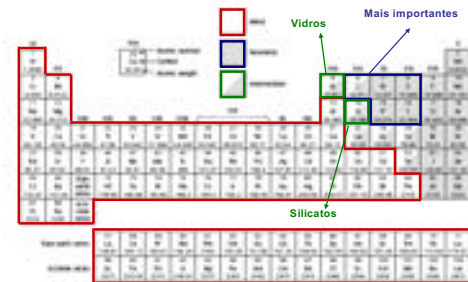
Introdução

- **Cerâmicas:**
- Uma combinação de elementos metálicos e não-metálicos;
- Exemplos: óxidos, nitretos e carbetos;
- Isolantes de calor e eletricidade;
- Resistentes a altas temperaturas e a ambientes severos que metais e polímeros;
- Duras e frágeis;
- Incluem os vidros.



Introdução

- **Cerâmicas:**





Introdução

- **Polímeros:**

- São constituídos por macromoléculas;
- Muitos polímeros são compostos orgânicos baseados em carbono, hidrogênio e outros elementos não-metálicos;
- Baixa densidade;
- Podem ser extremamente flexíveis;
- Materiais poliméricos incluem plásticos e borrachas.



Introdução

- **Polímeros:**



Introdução

- **Compósitos:**

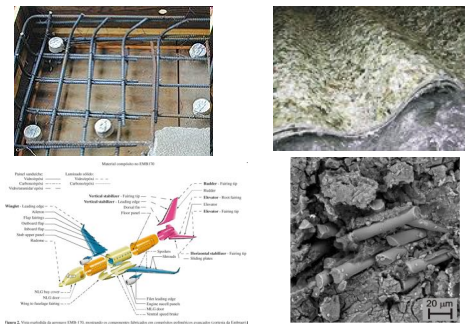
- Mais de um tipo de material (insolúveis entre si);
- Apresentam a combinação das melhores características de cada material constituinte;
- Muitos dos materiais desenvolvidos recentemente envolvem compósitos;
- Exemplo clássico

Compósito de matriz polimérica com fibra de vidro.
(resistência da fibra de vidro + flexibilidade do polímero).



Introdução

- **Compósitos:**



Introdução

- **Semicondutores:**

- Propriedades elétricas que são intermediárias entre metais e isolantes;
- Características elétricas são extremamente sensíveis à presença de pequenas quantidades de impurezas (dopagens);
- Possibilidade de circuito integrado: revolucionou as indústrias de eletrônica e computadores.

Ex: Si, Ge, GaAs, InSb, GaN, CdTe.



Introdução

- **Biomateriais:**

- Componentes para implantes de partes em seres humanos;
- Metais, cerâmicas, compósitos e polímeros podem ser empregados;
- Ausência de produção de substâncias tóxicas e biocompatíveis.





Introdução

- **Materiais Avançados:**
- Materiais utilizados em aplicações de tecnologia de ponta;
- Estes materiais são geralmente materiais tradicionais cujas propriedades são otimizadas ou no desenvolvimento de materiais alto desempenho.

Exemplos : equipamentos eletrônicos, sistemas de fibra óptica, foguetes e mísseis militares, detectores, lasers, displays de cristal líquido, indústria aeroespacial, etc.



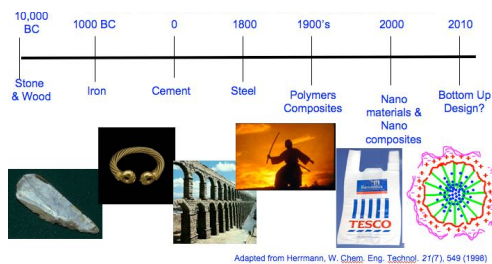
Introdução

- **Novos Materiais:**
- Alto desempenho;
- Alta resistência e baixa densidade;
- Resistentes a altas temperaturas;
- Voltados a fontes de energias novas e econômicas;
- Desenvolvimento de materiais que sejam menos prejudiciais ao meio ambiente e mais fáceis de serem reciclados ou regenerados.



Introdução

- **Evolução dos Materiais**



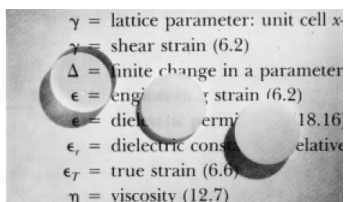
Introdução



Introdução

- **Exemplo:**
(processamento-estrutura-propriedades-desempenho)

Propriedade óptica: óxido de alumínio;



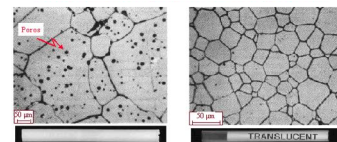
Da esquerda para direita: monocristal, monocristais pequenos e amostra porosa.



Introdução

- **Exemplo:**
(processamento-estrutura-propriedades-desempenho)

Propriedade óptica: óxido de alumínio;



A presença de poros causa espalhamento de luz e o material se torna opaco. A eliminação dos poros através da adição de 0.1% de MgO gera um material translúcido.

Limpada
 Evaporar de vidro
 O gás neônio impuro
 (100%) é gerado dentro
 de um cilindro translúcido de
 óxido.





Introdução

TIPOS DE INDÚSTRIA - INFLUÊNCIA DOS MATERIAIS

INDÚSTRIA DE PONTA

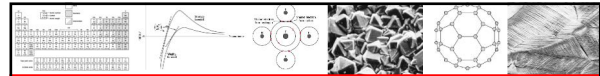
- Grande exigência tecnológica
- Utilização dos materiais nos limites

SELEÇÃO CUIDADOSA
(FATOR CUSTO SECUNDÁRIO)

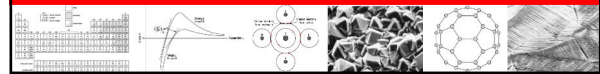
PRODUÇÃO EM MASSA

- Produtos não diferenciados
- Utilização de materiais abaixo dos limites

SELEÇÃO CUIDADOSA
(FATOR CUSTO PRIMORDIAL)



Ligações Químicas



Ligações Químicas

Importância das ligações químicas em ciência dos materiais:

“Para entender a natureza de um material deve-se entender a natureza química e sua extensão”.

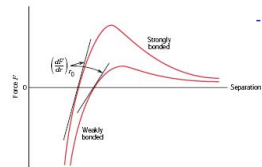


Tipos de ligações podem explicar as propriedades gerais dos materiais



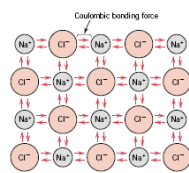
Tipos de Ligações

- Primárias
 - Iônicas;
 - Covalentes;
 - Metálicas.
- Secundárias
 - Van Der Waals;
 - Dipolo Induzido
 - Dipolo Permanente
 - Pontes de Hidrogênio.



Ligação Iônica

- Elemento metálico + não metálico;
- Todos os átomos adquirem uma configuração estável;
- Predominam nos materiais cerâmicos;
- Ligação “forte” não-direcional: 600 - 1500 KJ/mol



Ligação Iônica

- Atração Coulombiana:

$$F_c = \frac{-K}{a^2}$$

F_c = força de atração coulombiana
 a = distância entre os íons opostos

$$K = k_0(z_1e)(z_2e)$$

k_0 = constante (9×10^9 V m/C)
 z = valência do íon
 e = carga do elétron isolado

- Força repulsiva (eletrônica e nuclear):

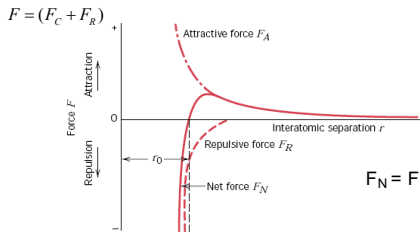
$$F_r = \lambda e^{-a/\rho}$$

F_r = força de repulsiva
 λ = constante experimental
 ρ = constante experimental



Ligação Iônica

- **Força de ligação:**

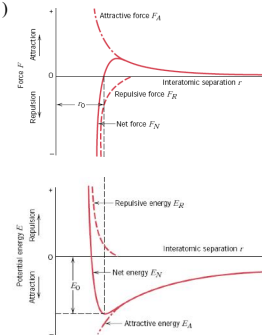


O comprimento de ligação ocorre onde as forças de atração e de repulsão são equilibradas



Ligação Iônica

$$F = (F_C + F_R)$$



$$F = \frac{dE}{dr}$$



Ligação Iônica

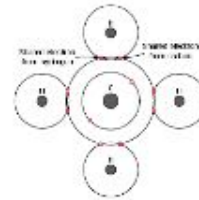
- **Consequências:**

- Forte coesão, dureza, elevados pontos de fusão;
- Frágil devido ao aumento da repulsão ao se deslocar da posição de equilíbrio;
- Condutividade térmica e elétrica baixa



Ligação Covalente

- Configuração estável por compartilhamento de elétrons entre átomos adjacentes;
- Ligação típica dos materiais poliméricos;
- Ligação com grande variação (forte - fraca) direcional.



Ligação Covalente

- **Caráter iônico das ligações covalentes;**

$$\% \text{ caráter iônico} = \{1 - \exp[-0,25(X_A - X_B)^2]\} \times 100$$

(X_A e X_B = eletronegatividades)

↓
Quanto maior a diferença de eletronegatividade, maior o caráter iônico da ligação.

TABLE 1.5 Electronegativity Values for Some Atoms (Pauling Scale)

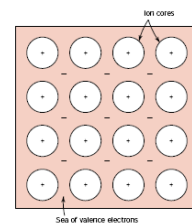
IA	IIA	III A										IV A	V A	VI A	VII A	VIII A	
Li	Be	B	C	N	O	F	Ne	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar		
1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0		0,9	1,2	1,5	1,8	2,1	2,5	3,0			
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	
0,8	1,0	1,3	1,5	1,6	1,6	1,5	1,8	1,8	1,9	1,6	1,6	1,8	2,0	2,4	2,8		
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	
0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,6	1,9	2,2	2,2	2,2	1,9	1,7	1,7	1,8	1,9	2,4	2,5	
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	
0,7	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2,2	2,2	2,2	2,4	1,9	1,8	1,8	1,9	2,0	2,2	

Legend: <math><0,0</math> (green), 1,0 - 1,4 (light blue), 1,5 - 1,9 (medium blue), 2,0 - 2,4 (dark blue), 2,5 - 2,9 (orange), 3,0 - 4,0 (red)



Ligação Metálica

- Configuração estável por formação de uma “nuvem” de elétrons de valência livres;
- Ligação típica dos materiais metálicos;
- Ligação com grande variação (forte - fraca) não-direcional: 68 - 850 KJ/mol.





Ligação Metálica

- **Conseqüências:**
- Alta condutividade térmica e eletrônica
- Brilho
- Dureza: extremamente duros (Fe e W) ou maleáveis (Na)

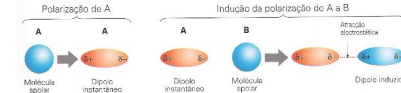


Ligações Secundárias

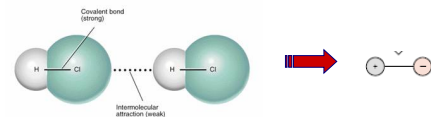
- **Van Der Waals**

- Dipolo Induzido

Moléculas neutras que ao se aproximarem sofrem distorções. Ex: H₂ e Cl₂

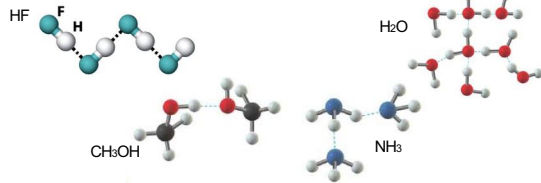


- Dipolo Permanente.

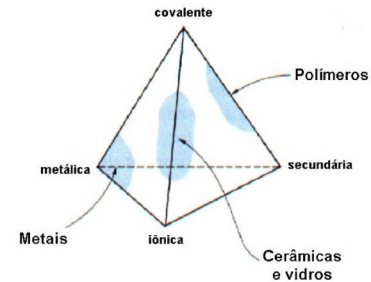


Ligações Secundárias

- **Pontes de Hidrogênio.**
- A Ligação de Hidrogênio ocorre quando o átomo de H fica entre dois átomos pequenos e altamente eletronegativos com um par de elétrons isolados (F, O e N);
- Mais fortes entre as ligações secundárias.



Materiais x Ligações

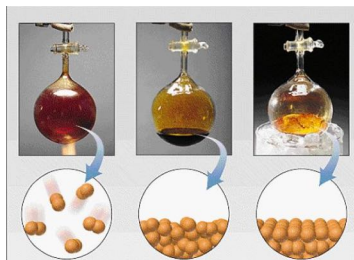


Tetraedro que representa a contribuição relativa dos diferentes tipos de ligação para categorias de materiais de engenharia (metais, cerâmicas e polímeros)



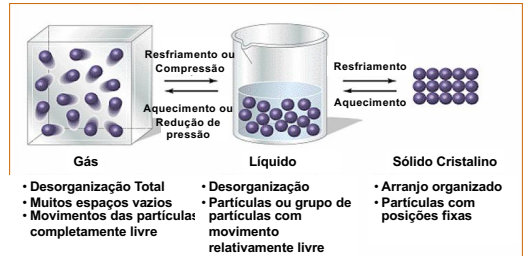
Forças Intermoleculares

- **Fase:** forma da matéria que é uniforme em composição química e estado físico;




Forças Intermoleculares

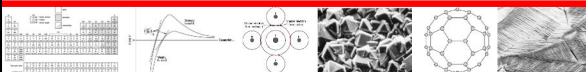

Comparação entre os estados físicos



Atração cai rapidamente com a distância
Gasosa < líquida << sólida




Estrutura Cristalina


Introdução

- As propriedades dos materiais estão diretamente ligadas as suas estruturas cristalinas;
- Ex. Mg e Be são quebradiços (fraturam em menor nível de deformação); Au e Ag se deformam em função de sua estrutura cristalina;
- Outras propriedades: comportamento magnético e ferroelétrico, transparência óptica.




Introdução

- **Material Cristalino:**
 - Os átomos estão situados de acordo com uma matriz que se repete, isto é, é periódica a longo alcance (ordem ao longo alcance)
 - Ex. todos os metais, materiais cerâmicos, alguns polímeros
- **Material Amorfo:**
 - materiais que não apresentam ordem ao longo alcance.
 - Ex. Vidros, alguns polímeros



Introdução

- **Estrutura Cristalina:**
 - Maneira segundo a qual os átomos ou íons estão arranjados espacialmente (geometria das células unitárias).
- **Microestrutura:**
 - Características estruturais encontradas nos materiais poligranulares (policristalinos ou polifásicos).



Introdução

- **Microestrutura:**
 - Tamanho do grão;
 - Forma e distribuição dos grãos;
 - Quantidade de fases;
 - Orientação dos grãos;
 - Porosidade.



Cristalinidade dos Materiais

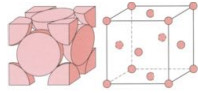
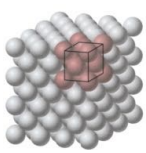
- **Monocristais:**
 - O arranjo periódico e repetido dos átomos é perfeito, se estendendo ao longo da amostra, sem interrupção;
- **Policristais:**
 - Estrutura da grande maioria dos sólidos cristalinos, é composto por diversos pequenos grãos, delimitados pelos contornos de grão ;






Célula Unitária

- Unidade básica de arranjo dos materiais;
- Forma regular e repetitiva em que os átomos se ordenam nas estruturas cristalinas.



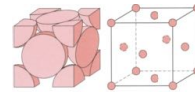
- Rede cristalina: matriz tridimensional de pontos que coincidem com as posições dos átomos (centros das esferas).



Célula Unitária

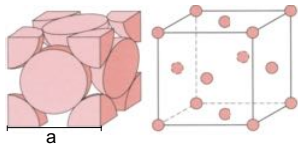
- Número de átomos inteiros por célula unitária;
- Número de coordenação: número de vizinhos mais próximos a um átomo;
- Fator de empacotamento atômico (FEA): fração de volume de uma célula unitária

$$\text{FEA} = \frac{\text{volume dos átomos em uma célula unitária}}{\text{volume da célula unitária}}$$



Célula Unitária - CFC

- Estrutura Cúbica de Faces Centradas (CFC);



$$a = 2R\sqrt{2}$$

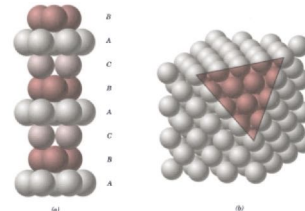
- Ex.: Cu, Al, Ag, Au.
- 4 átomos por célula unitária.
- Número de coordenação: 12.
- (FEA): 0,74.



Célula Unitária - CFC

- Estrutura Cúbica de Faces Centradas (CFC);

CFC: 3ª camada posicionada no centro C da primeira camada

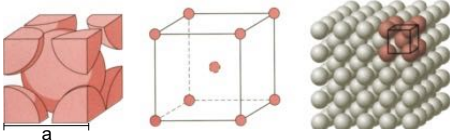


Sequência do tipo ABCABC...



Célula Unitária - CCC

- Estrutura Cúbica de Corpo Centrado (CCC);



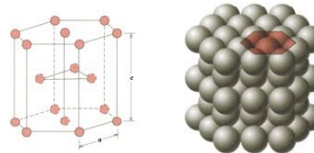
$$a = \frac{4R}{\sqrt{3}}$$

- Ex.: Fe, W, Mo.
- 2 átomos por célula unitária.
- Número de coordenação: 8.
- (FEA): 0,68.



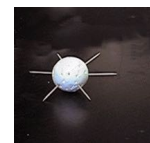
Célula Unitária - HC

- Estrutura Hexagonal Compacta (HC);



$$\frac{c}{a} \cong 1,633...$$

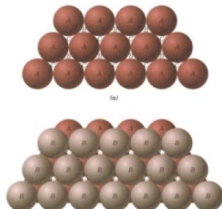
- Ex.: Cd, Mg, Ti, Zn.
- 6 átomos por célula unitária.
- Número de coordenação: 12.
- (FEA): 0,74.



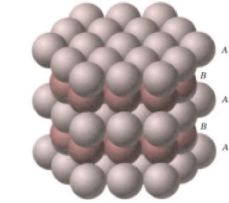


Célula Unitária – CCC x HC

- CFC e HC: diferença apenas na seqüência de empilhamento dos átomos;



Seqüências de empilhamento:
(a) 1 camada, (b) duas camadas.



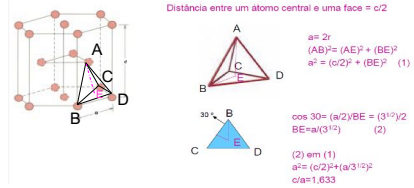
Hexagonal: diferença na terceira camada de empilhamento, a qual é concêntrica à posição original.
Seqüência ABABABAB... ou ACACAC...



Célula Unitária - HC

- Exemplo 1
- Demonstrar que o FEA para a estrutura Hexagonal Compacta (HC) é igual a 0,74.

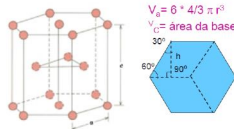
Resposta da hexagonal compacta:
n. de átomos por célula unitária: 3 inteiros (parte central) + 1/8*6 (vértices do hexágono) = 1/2*2*(faces) = 6
NC (com base no átomo do centro da face) = 6 vizinhos dos vértices, 3 no plano inferior e 3 no plano superior = 12.



Célula Unitária - HC

- Estrutura Hexagonal Compacta (HC);

Resposta da hexagonal compacta:



Altura do hexágono = c

$$c/a = 1,633$$

$$c = 1,633 \cdot a = 1,633 \cdot 2r$$

Logo:

$$V_c = 6 \cdot r^2 \cdot 3^{1/2} \cdot 1,633 \cdot 2r$$

$$V_c = 12 \cdot r^3 \cdot 3^{1/2} \cdot 1,633$$

$V_p = 6 \cdot 4/3 \cdot \pi \cdot r^3$
 $V_c = \text{área da base} \cdot \text{altura}$
 Área da base = 3 * área de um paralelepípedo = $2r \cdot h$
 $\cos 30^\circ = 2r/h$
 $3^{1/2}/2 = 2r/h$
 $h = 3^{1/2} \cdot r$
 Área da base = $2r \cdot 3^{1/2} \cdot r = 6 \cdot r^2 \cdot 3^{1/2}$

$$V_p/V_c = (6 \cdot 4/3 \cdot \pi \cdot r^3) / (12 \cdot r^3 \cdot 3^{1/2} \cdot 1,633)$$

$$V_p/V_c = 0,74$$



Célula Unitária

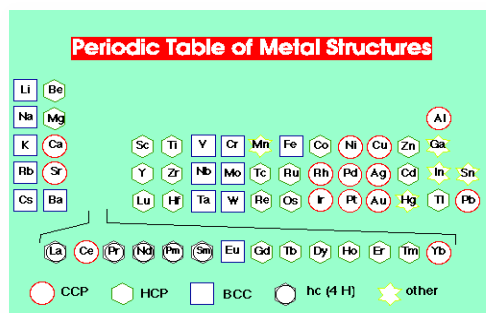
Table 3.1 Atomic Radii and Crystal Structures for 16 Metals

Metal	Crystal Structure ^a	Atomic Radius ^a (nm)	Metal	Crystal Structure	Atomic Radius (nm)
Aluminum	FCC	0.1431	Molybdenum	BCC	0.1363
Cadmium	HCP	0.1490	Nickel	FCC	0.1246
Chromium	BCC	0.1249	Platinum	FCC	0.1387
Cobalt	HCP	0.1253	Silver	FCC	0.1445
Copper	FCC	0.1278	Tantalum	BCC	0.1430
Gold	FCC	0.1442	Titanium (α)	HCP	0.1445
Iron (α)	BCC	0.1241	Tungsten	BCC	0.1371
Lead	FCC	0.1750	Zinc	HCP	0.1332

^a FCC = face-centered cubic; HCP = hexagonal close-packed; BCC = body-centered cubic.



Célula Unitária



Densidade

- Metais.
- Cálculo através da estrutura cristalina = densidade teórica

$$\rho = \frac{nA}{V_c NA}$$

n = nº de átomos associados a cada célula unitária
 A = massa molar
 V_c = volume da célula unitária
 NA = nº de Avogadro



Densidade

Exemplo 2

Calcular a densidade teórica e comparar a resposta com a densidade do cobre (CFC) medida experimentalmente (8,94 g/cm³).

Dados: raio atômico=0,128 nm; peso atômico = 63,5 g/mol.

Resposta:

$$\rho = \frac{nA_{Cu}}{V_c N_A} = \frac{nA_{Cu}}{(16R^3\sqrt{2})N_A}$$

$$= \frac{(4 \text{ atoms/unit cell})(63.5 \text{ g/mol})}{[16\sqrt{2}(1.28 \times 10^{-8} \text{ cm})^3/\text{unit cell}](6.023 \times 10^{23} \text{ atoms/mol})}$$

$$= 8.89 \text{ g/cm}^3$$



Polimorfismo e Alotropia

• **Polimorfismo:** A habilidade de um material em existir em mais do que uma forma ou estrutura cristalina.

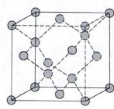
• **Alotropia:** Possibilidade de existência de duas ou mais estruturas cristalinas diferentes para uma substância (geralmente em sólido elementar).

- Fe: CCC (T ambiente) ou CFC (T= 912 °C)

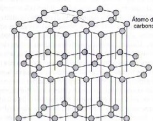


O Carbono (C)

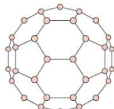
• Presente em várias fases polimórficas e também no estado amorfo.



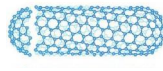
Diamante



Grafita



Fullerenos



Nanotubos



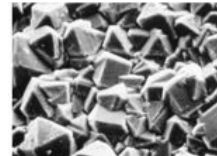
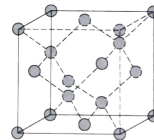
O Carbono (C)

• **Diamante**

- Estrutura é uma variação da blenda de zinco (ZnS) → estrutura cristalina cúbica do diamante;

- Ligações totalmente covalentes;

- Extremamente duro, condutividade elétrica baixa, condutividade térmica alta.



O Carbono (C)

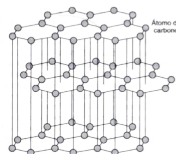
• **Grafita;**

- Ligações covalentes fortes dentro das camadas;

- Ligações fracas entre as camadas (Van der Waals).

Clivagem interplanar fácil (propriedades lubrificantes)

Condutividade elétrica elevada em direções cristalográficas paralelas às lâminas axiais.



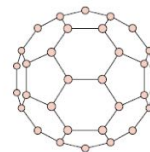
O Carbono (C)

• **Fullerenos (C₆₀);**

- Configurações geométricas hexagonais ou pentagonais;

- Ligações covalentes simples e duplas.

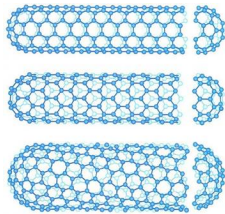
No estado puro são eletricamente isolantes





O Carbono (C)

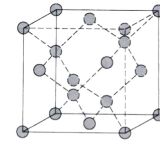
- Nanotubos de Carbono;
- Lâmina de grafite enrolada na forma de tubo com ambas as extremidades tapadas por hemisférios C₆₀ de fullerenos.



Densidade

- Exemplo 5
- Qual o FEA do diamante?

$$a = \frac{8r}{\sqrt{3}}$$



- Resposta:

FEA = 0,34

$$FEA = \frac{V_{\text{átomos}}}{V_{\text{cél.unid.}}} = \frac{8(\frac{4}{3}\pi r^3)}{a^3} =$$



Estrutura x Propriedades

- Anisotropia x Isotropia: f(simetria da estrutura cristalina)

- Anisotropia;

Propriedades dependem da direção cristalográfica na qual as medições são tomadas.

Ex.: módulo de elasticidade, condutividade elétrica, índice de refração, etc.

- Isotropia.

Propriedades independem da direção.



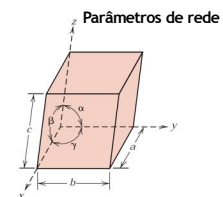
Sistemas Cristalinos

- Parâmetros de Rede

- A geometria da célula unitária é definida em termos de seis parâmetros: os comprimentos das três arestas (a, b e c) e os três ângulos entre os eixos (α, β e γ).

- Existem 7 possíveis combinações entre os parâmetros de rede, cada um dos quais representa um sistema cristalino distinto.

- Sistema Cúbico: + simétrico
- Sistema Triclínico: - simétrico



Sistemas Cristalinos

Crystal System	Axis Relationships	Interaxial Angles	Unit Cell Geometry
Cubic	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Hexagonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	
Tetragonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Rhombohedral	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	
Orthorhombic	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Monoclinic	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma \neq \beta$	
Triclinic	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma$	



Sistemas Cristalinos

- As 14 Redes de Bravais

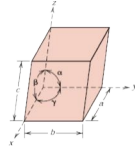
- Organização dos pontos de rede no espaço tridimensional.

Bravais lattice cells	Axis and interaxial angles	Examples
Cubic P, Cubic I, Cubic F	Three axes at right angles; all equal: $a = b = c; \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Copper (Cu), silver (Ag), sodium chloride (NaCl)
Tetragonal P, Tetragonal I	Three axes at right angles; one unequal: $a = b \neq c; \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	White tin (Sn), rutile (TiO ₂), zirconium (Zr), hafnium (Hf)
Orthorhombic	Three axes at right angles; all unequal: $a \neq b \neq c; \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Gallium (Ga), perovskite (CaTiO ₃)
Monoclinic P, Monoclinic C	Three axes, one pair not at right angles; all equal: $a = b \neq c; \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	Gypsum (CaSO ₄ · 2H ₂ O)
Rhombohedral	Three axes not at right angles; of any lengths: $a = b = c; \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	Potassium chromate (K ₂ CrO ₄)
Trigonal R (rhombohedral)	Rhombohedral: three axes equally inclined, not at right angles; all equal: $a = b = c; \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	Calcite (CaCO ₃), arsenic (As), bismuth (Bi)
Trigonal and hexagonal C (or P)	Hexagonal: three equal axes collinear at 120°; fourth axis at right angles to these: $a_1 = a_2 = a_3 \neq c; \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 120^\circ, \alpha_4 = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	Zinc (Zn), cadmium (Cd), quartz (SiO ₂)



Direções e Planos Cristalográficos

- Três números ou índices são designados para indicar a localização de pontos, direções e planos cristalográficos, o sistema de coordenadas cartesianas x, y e z, onde a origem é estabelecida em um dos vértices e as arestas coincidem com as arestas da célula unitária.



- Coordenadas de pontos:** representadas pelo conjunto dos pontos, sem vírgulas e sem parênteses.

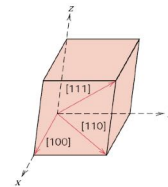
Ex.: 000, $\frac{1}{2}\frac{1}{2}\frac{1}{2}$, 001.



Sistemas Cristalinos

Direções Cristalográficas

- o vetor passa através da origem do sistema de coordenadas;
- projeção em cada um dos eixos em termos de a, b e c;
- multiplicados ou divididos por um fator comum para terem o menor valor de inteiros;
- representados por [uvw];
- Índices negativos, π.



Sistemas Cristalinos

Direções Cristalográficas (HC)

- Sistema de coordenadas de quatro eixos ou de Miller-Bravais;
- Sistema [uvtw] que diz respeito as projeções ao longo de a_1 , a_2 e a_3 .

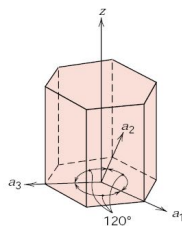
$$[u'v'w'] \rightarrow [u \ v \ t \ w]$$

$$u = n/3(2u' - v')$$

$$v = n/3(2v' - u')$$

$$t = -(u+v)$$

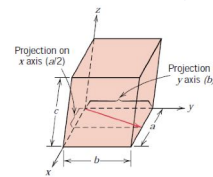
$$w = nw'$$



Sistemas Cristalinos

Exemplo 6

Determinar os índices para a direção mostrada na Figura abaixo



Resposta

	x	y	z
Projections	a/2	b	0c
Projections (in terms of a, b, and c)	$\frac{1}{2}$	1	0
Reduction	1	2	0
Enclosure	[120]		

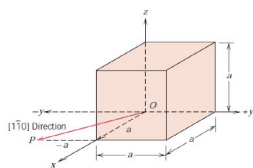


Sistemas Cristalinos

Exemplo 7

Esboce a direção $[1\bar{1}0]$ dentro de uma célula unitária cúbica.

Resposta



Sistemas Cristalinos

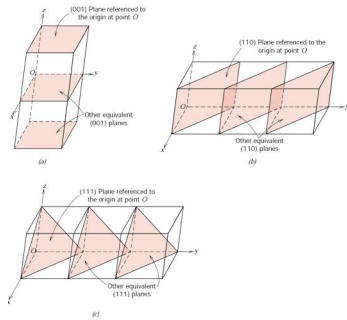
Planos Cristalográficos

- Índices de Miller (hkl);
- A origem deve ser estabelecida no vértice de uma célula unitária;
- Os números inversos (recíprocos) das direções a, b e c são obtidos;
- Nem sempre os números podem ser modificados através de divisão e multiplicação. Por ex., (001) pode ser diferente de (002) em materiais cerâmicos.



Sistemas Cristalinos

Planos Cristalográficos



Sistemas Cristalinos

Planos Cristalográficos (Regras)

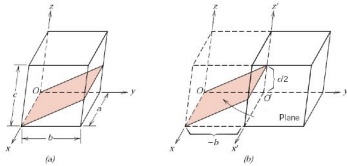
- Se o plano passa através da origem, um novo plano deve ser criado pela translação do plano original, ou então, selecionar uma nova origem numa célula unitária adjacente;
- Observa-se onde o plano cristalográfico intercepta ou é paralelo a cada um dos três eixos. Essas condições determinam os termos dos parâmetros de rede a , b , e c ;
- Toma-se os valores inversos de a , b e c . Se o plano cristalográfico é paralelo ao eixo, então considera-se que o encontro ocorre no infinito, neste caso: $\frac{1}{\infty} = 0$
- Se necessário, pode-se modificar os três números para que apresentem valores menores e inteiros pela multiplicação ou divisão por um fator comum;
- São apresentados entre parênteses e não separados por vírgula: (h k l). Família de planos entre chaves $\{ \}$.



Sistemas Cristalinos

Exemplo 8

Determinar os índices de Miller para o plano da figura abaixo



Resposta

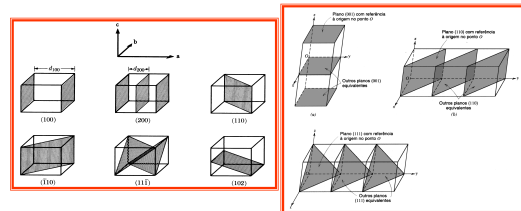
	x	y	z
Intercepts	∞, a	$-b$	$c/2$
Intercepts (in terms of lattice parameters)	∞	-1	$\frac{1}{2}$
Reciprocals	0	-1	2
Reductions (unnecessary)			
Enclosure			$(0\bar{1}2)$



Sistemas Cristalinos

Exemplo 9 (casa)

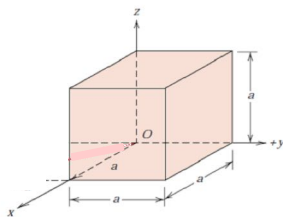
Determinar os índices de Miller para o plano das figuras abaixo



Sistemas Cristalinos

Exemplo 10

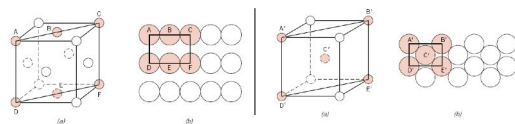
Esboce os planos $(1\ 1\ 2)$, $(0\ \bar{1}\ 0)$, $(1\ 0\ 1)$ e $(2\ \bar{2}\ \bar{2})$ em uma célula unitária cúbica.



Arranjos Atômicos

Arranjo atômico para um plano cristalino = dependente da estrutura cristalográfica

Ex. (110) para CFC e CCC: diferentes compactações.



(110) CFC

(110) CCC



Arranjos Atômicos

- Densidades Linear e Planar
- Direções ou planos equivalentes possuem densidades lineares ou planares idênticas;

Densidade linear: número de átomos centrados sobre o vetor de direção
comprimento do vetor de direção

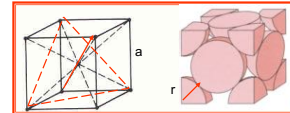
Densidade planar: número de átomos centrados sobre um plano
Área do plano



Arranjos Atômicos

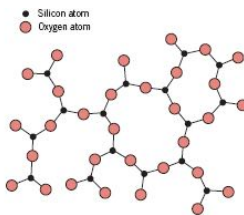
- Exemplo 11
- Calcule as densidades linear (d_l) e planar (d_p) dos átomos na direção $[1\ 1\ 1]$ e no plano $(1\ 1\ 1)$ da célula unitária da estrutura abaixo, CFC.

Dado: Raio do átomo = 0,137 nm



Sólidos Não-Cristalinos

- Também conhecidos como amorfos ou líquidos super-resfriados;
- Estruturas relativamente complexas.



Estrutura não-cristalina:
Pequenas variações em comprimentos e ângulos de ligação que implicam em ausência de ordem a longo alcance



Sólidos Não-Cristalinos

- Vidros: Material não-cristalino, formado por SiO_2 ou outros estruturadores de rede, tais como B_2O_3 , P_2O_5 e GeO_2 , os quais são conhecidos como *formadores de rede*. Apresentam ainda *modificadores de rede*, sendo que os cátions modificam as redes formadas (Ex. de modificadores: CaO e Na_2O). Há também os *intermediários* que sozinhos não formam rede, mas podem substituir algumas das posições dos formadores (Ex. de intermediários: TiO_2 e Al_2O_3).

Vidros: definição: "um vidro é um sólido não-cristalino, portanto, com ausência de simetria e periodicidade translacional, que exhibe o fenômeno de transição vítrea (...), podendo ser obtido a partir de qualquer material inorgânico, orgânico ou metálico e formado através de qualquer técnica de preparação".

Defeitos e Imperfeições nos Metais



Introdução

- Importância
- As propriedades dos materiais são fortemente influenciadas pela presença de defeitos. Controlando-se a quantidade e o arranjo das imperfeições é possível desenvolver (melhorar/criar) materiais com propriedades desejadas.

Exemplos:

- Dopagem em semicondutores;
- Alteração da resistência mecânica, da dureza e da resistência à corrosão;
- Transparência;
- Favorecimento do processo de difusão.



Introdução

- Como os defeitos podem ser gerados:
 - Durante a solidificação;
 - Deslocamento de átomo por agitação térmica (aumento da probabilidade de átomo em deixar sua posição);
 - Processo de fabricação.

Obs.: As imperfeições nos cristais são resultantes tanto da variação na composição química (solvente x soluto) quanto de falhas no arranjo atômico. Existe ainda a ocorrência de movimentação atômica.



Introdução

- **Materiais Puros x Impuros**
 - Alguns materiais utilizados comercialmente precisam ser puros (cobre em condutores, Zn na galvanização, Al_2O_3 , etc. - pureza máxima de 99,999%);
 - Em casos específicos, alguns elementos estranhos são adicionados propositalmente na estrutura para melhorar/alterar determinadas propriedades (adição de zinco no cobre “latão”, carbono no ferro “aço”, etc.);

Obs.: Observação: Se a adição do elemento “estranho” fizer parte integral da fase sólida, a fase resultante é denominada de solução sólida.



Tipos de Defeitos

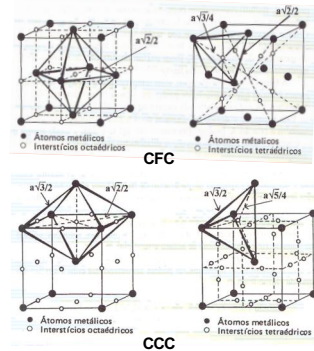
- Defeitos puntiformes (associados com uma ou duas posições atômicas); lacunas e átomos intersticiais
- Defeitos de linha (defeitos unidimensionais); discordâncias
- Defeitos bidimensionais (fronteiras entre duas regiões com diferentes estruturas cristalinas ou diferentes orientações cristalográficas); contornos de grão, interfaces, superfícies livres, contornos de macla, defeitos de empilhamento.
- Defeitos volumétricos (defeitos tridimensionais). poros, trincas e inclusões.



Interstícios

Espaços vazios entre os átomos que formam a rede cristalina.

- Octaédricos
- Tetraédricos

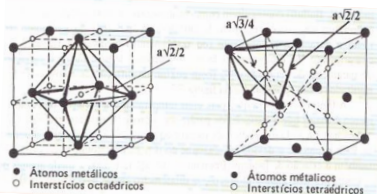


Interstícios - CFC

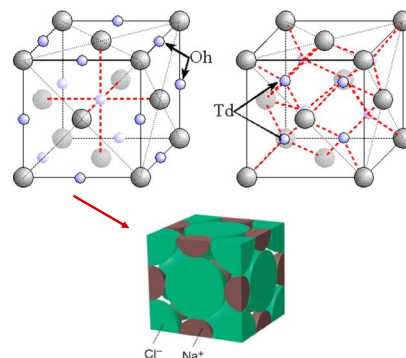
- N° de interstícios.
 - Octaédricos = $12 \cdot (1/4) + 1 = 4$
 - Tetraédricos = $8 \cdot 1 = 8$

Razão entre o raio do interstício (r) e o raio do átomo da rede (R):

- Octaédrico $r/R = 0,4142$
- Tetraédrico $r/R = 0,2247$



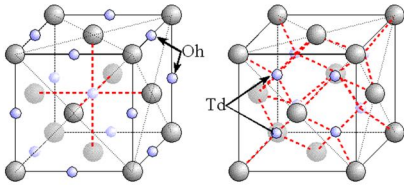
Interstícios - CFC





Interstícios - CFC

- Exemplo 12
- Demonstre que a relação entre o raio do interstício (r) e o raio do átomo de rede é igual a 0,4142 (octaédrico) e 0,2247 (tetraédrico) na estrutura CFC.

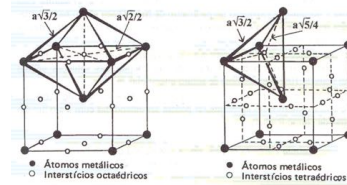


Interstícios - CCC

- Nº de interstícios.
- Octaédricos = $6 \cdot (1/2) + 12 \cdot (1/4) = 6$
- Tetraédricos = $24 \cdot (1/2) = 12$

Razão entre o raio do interstício (r) e o raio do átomo da rede (R):

- Octaédrico $r/R = 0,154$
- Tetraédrico $r/R = 0,291$



Defeitos Pontuais

- Lacunas ou vacâncias ("vacancy"): ausência de um átomo em um ponto do reticulado cristalino.
- Podem ser formadas durante a solidificação ou como resultado de vibrações atômicas;
- Existe uma concentração de equilíbrio de lacunas.

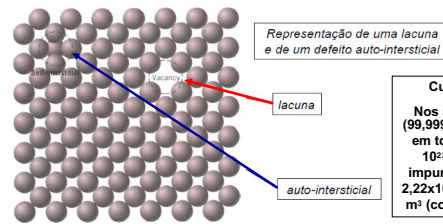
$$N_L = N \exp\left(-\frac{Q_L}{kT}\right)$$

onde: N = número total de posições atômicas
 N_L = número de lacunas
 Q_L = energia de ativação para formação de lacunas
 k = constante de Boltzmann
 T = temperatura absoluta



Defeitos Pontuais

- Auto-intersticial: é um átomo que ocupa um interstício da estrutura;
- Os defeitos auto-intersticiais causam uma grande distorção do reticulado cristalino a sua volta.



Curiosidade:
 Nos metais puros (99,999%) existe algo em torno de 10^{22} a 10^{23} átomos de impurezas por m^3 e $2,22 \times 10^{25}$ lacunas por m^3 (cobre a $1000^\circ C$)



Defeitos Pontuais

- Exemplo 13
- Calcule o número de lacunas em equilíbrio por metro cúbico de cobre a uma temperatura de $1000^\circ C$. A energia para a formação de uma lacuna é de $0,9$ eV/átomo.

Dado: O peso atômico e a densidade (a $1000^\circ C$) para o cobre são $63,5$ g/mol e $8,4$ g/cm³, respectivamente e $K = 8,62 \cdot 10^{-5}$ eV/átomo.K.

- Resposta

$$N = \frac{N_{Av}}{A_{Cu}} = \frac{(6,023 \times 10^{23} \text{ atoms/mol})(8,40 \text{ g/cm}^3)(10^6 \text{ cm}^3/\text{m}^3)}{63,5 \text{ g/mol}} = 8,0 \times 10^{28} \text{ atoms/m}^3$$

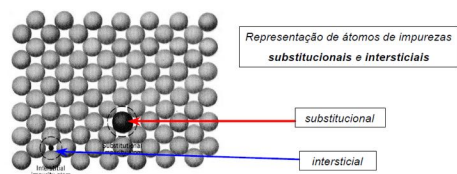
Thus, the number of vacancies at $1000^\circ C$ (1273 K) is equal to

$$N_L = N \exp\left(-\frac{Q_L}{kT}\right) = (8,0 \times 10^{28} \text{ atoms/m}^3) \exp\left[-\frac{(0,9 \text{ eV})}{(8,62 \times 10^{-5} \text{ eV/K})(1273 \text{ K})}\right] = 2,2 \times 10^{21} \text{ vacancies/m}^3$$



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 $99,9999\%$.





Solução Sólida

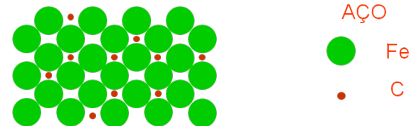
- Ocorre quando a adição de átomos do soluto não modifica a estrutura cristalina nem provoca a formação de novas estruturas.
- Solução Sólida Substitucional: os átomos de soluto substituem uma parte dos átomos de solvente no reticulado;
- Solução Sólida Intersticial: os átomos de soluto ocupam os interstícios existentes no reticulado

Obs.: Em uma liga, o elemento presente em menor concentração denomina-se soluto e aquele em maior quantidade, solvente.



Solução Sólida

- **Soluções Sólidas Intersticiais:**
- É uma solução no estado sólido contendo o átomo do soluto localizado no interstício do solvente;



Solução Sólida

- **Soluções Sólidas Substitucionais:**
- É uma solução no estado sólido contendo a localização do átomo do solvente preenchida (substituída) pelo átomo do soluto;



Solução Sólida

- **Para a formação de uma solução sólida, os seguintes critérios devem ser observados/obedecidos:**
- Os raios atômicos dos dois elementos (soluto e solvente) não devem diferir de 15%;
- Ex.: $\text{Cu/Ni} = 1,278/1,246 = 1,026$ (ou 2,6%);
- A estrutura cristalina (arranjo) do solvente e do soluto deve ser a mesma;
- Ex.: Ni e Cu são CFC.
- As eletronegatividades devem ser semelhantes - evitar a formação de composto intermetálico ou iônico;
- As valências devem ser as mesmas ou a valência da impureza deve ser um pouco maior.



Solução Sólida

- **Solubilidade Completa:**
- Os 4 critérios de Hume-Rothery devem ser atendidos
- **Solubilidade Incompleta:**
- Pelo menos 2 dos critérios de Hume-Rothery devem ser atendidos



Solução Sólida

- **Composição de uma liga:**
- Concentração em massa (porcentagem em massa):

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

onde m é a massa (ou peso) dos elementos

- Concentração atômica (porcentagem atômica, %-at.):

$$C_A^{at} = \frac{N_A}{N_A + N_B} \times 100\% \quad \Leftrightarrow \quad C_A^a = \frac{C_A^m \cdot A_B}{C_A^m \cdot A_B + C_B^m \cdot A_A} \times 100$$

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



Defeitos Pontuais

Exemplo 14

- Determine a composição, em porcentagem atômica, de uma liga que consiste em 97%p alumínio e 3%p cobre.

Dados: $A_{Al} = 26,98 \text{ g/mol}$ e $A_{Cu} = 63,55 \text{ g/mol}$

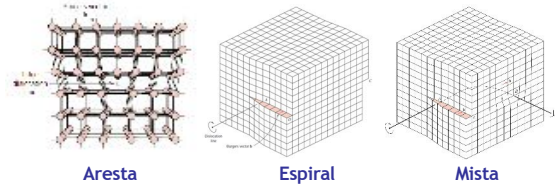
Resposta

- 98,7 %a de Al e 1,3%a de Cu.



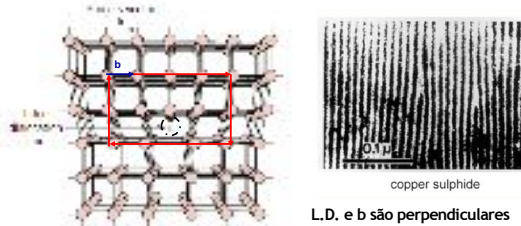
Defeitos Lineares

- Discordância Aresta (ou “em cunha”)
- Discordância Espiral (ou “em hélice”)
- Discordâncias Mistas



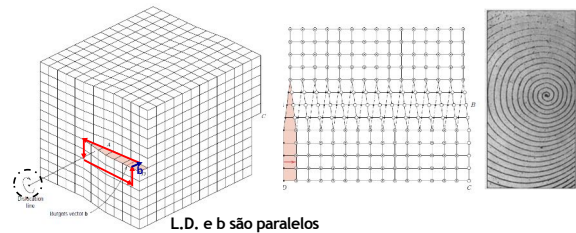
Defeitos Lineares

- Discordância Aresta (ou “em cunha”).
- Centralizado em torno da linha que fica definida ao longo da extremidade do semi-plano adicional de átomos.



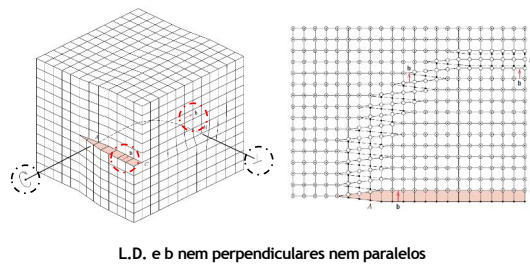
Defeitos Lineares

- Discordância Espiral (ou “em hélice”).
- Formada por uma tensão cisalhante;
- A região anterior superior do cristal é deslocada uma distância atômica em relação à fração inferior.



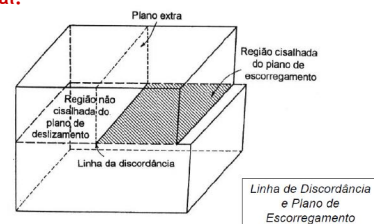
Defeitos Lineares

- Discordância Mista.



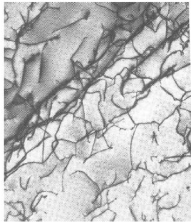
Defeitos Lineares

- A linha de discordância delimita as regiões cisalhada e não cisalhada;
- Uma discordância não pode terminar no interior de um cristal.

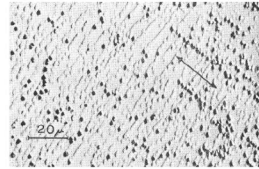




Defeitos Lineares



Microscopia eletrônica de transmissão de uma lâmina fina de uma liga metálica contendo discordâncias



Microscopia óptica de uma liga de cobre. Observam-se pites de corrosão, nos locais onde as discordâncias interceptam a superfície



Defeitos Bidimensionais

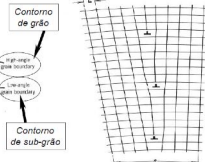
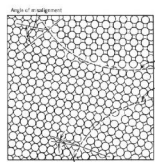
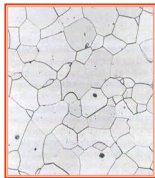
- **Superfície Externa:** superfície entre o cristal e o meio que o circunda;
- **Interface:** contorno entre duas fases diferentes;
- **Contornos de Grão:** contornos entre dois cristais sólidos da mesma fase;
- **Contorno de Macla:** tipo especial de contorno de grão que separa duas regiões com uma simetria tipo espelho”;
- **Falhas 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 ($> 15^\circ$), o contorno formado é chamado contorno de grão de **alto ângulo**;
- Se o desalinhamento é pequeno (em geral, $< 5^\circ$), o contorno é chamado contorno de **baixo ângulo**, e as regiões que tem essas pequenas diferenças de orientação são chamadas de subgrãos.



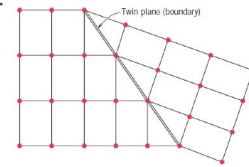
Contorno de pequeno ângulo resultante do alinhamento de discordâncias em cadeia



Defeitos Bidimensionais

• Contornos de Macla

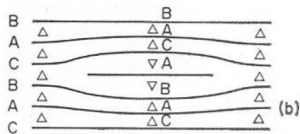
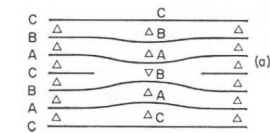
- Tipo especial de contorno de grão através do qual existe uma simetria específica em espelho da rede cristalina;
- A macla é um tipo de defeito cristalino que pode ocorrer durante a solidificação, deformação plástica, recristalização ou crescimento de grão;
- Tipos de macla: **maclas de recozimento (CFC)** e **maclas de deformação (CCC e HC)**.



Defeitos Bidimensionais

• Falhas de Empilhamento

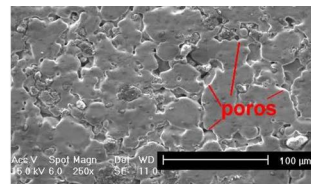
- Encontradas nos metais CFC.



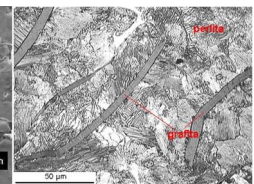
Defeitos Volumétricos

- Esses defeitos normalmente são introduzidos nos processos de fabricação, e podem afetar fortemente as propriedades dos produtos;

- Exemplos: inclusões, poros, trincas, precipitados.



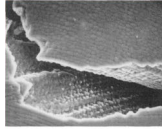
Poros



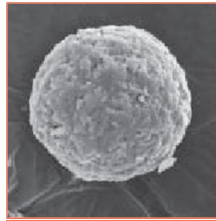
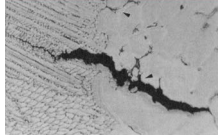
Precipitado



Defeitos Volumétricos



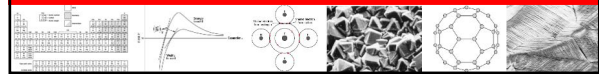
Trincas



Inclusões

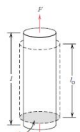


Propriedades Mecânicas

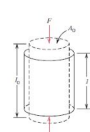


Introdução

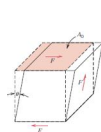
- Conceitos de Tensão e Deformação.
- Tensões : tração, compressão, cisalhamento e torção
- Deformações: elásticas e plásticas.



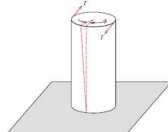
Tração



Compressão



Cisalhamento



Torção

Tensão de Engenharia: $\sigma = \frac{F}{A_0}$

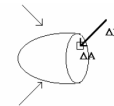
Deformação de Engenharia: $\varepsilon = \frac{L_t - L_0}{L_0}$



Tensão

- Grandeza que representa a relação da força interna no corpo deformável pela área em que atua;
- As tensões que se desenvolvem entre as partículas de um corpo são consequência dos esforços internos desenvolvidos;
- Esforços são elementos vetoriais (módulo, direção e sentido) → a tensão também é vetorial.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$



Deformação

- Deformação é a alteração da forma que sofre um corpo submetido a solicitações, devido ao movimentos das partículas que o constituem;
- Relação entre o alargamento (δ) e o comprimento (L) da peça;
- Tendência dos corpos de voltarem a forma original → força de atração entre as partículas.

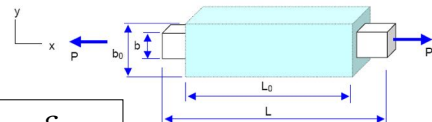
$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} = \frac{d\delta}{dL}$$



Deformação

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \varepsilon = \frac{P \cdot L}{E \cdot A}$$

- **Coefficiente de Poisson (ν):**



$$\nu = - \frac{\varepsilon_{lateral}}{\varepsilon_{axial}}$$

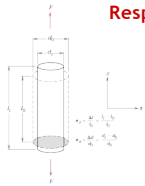


Deformação

Exemplo 17

- Uma tensão de tração é aplicada ao longo do eixo referente ao comprimento de uma haste cilíndrica de latão, que possui um diâmetro de 10mm. Determine a magnitude da carga exigida para produzir uma alteração de $2,5 \cdot 10^{-3}$ mm no diâmetro.

Dados: Coeficiente de Poisson e o módulo de elasticidade do latão são iguais a 0,34 e 97GPa, respectivamente.



Resposta:

$$\epsilon_x = \frac{\Delta d}{d_0} = \frac{-2,5 \times 10^{-3} \text{ mm}}{10 \text{ mm}} = -2,5 \times 10^{-4}$$

$$\epsilon_z = -\frac{\epsilon_x}{\nu} = -\frac{(-2,5 \times 10^{-4})}{0,34} = 7,35 \times 10^{-4}$$

$$\sigma = \epsilon_z E = (7,35 \times 10^{-4})(97 \times 10^3 \text{ MPa}) = 71,3 \text{ MPa}$$

$$F = \sigma A_0 = \sigma \left(\frac{d_0}{2}\right)^2 \pi = (71,3 \times 10^6 \text{ N/m}^2) \left(\frac{10 \times 10^{-3} \text{ m}}{2}\right)^2 \pi = 5600 \text{ N}$$



Diagrama Tensão-deformação

Gráfico $\sigma \times \epsilon$

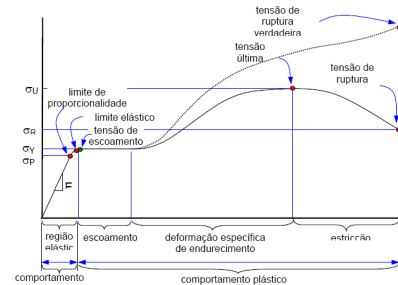


Diagrama Tensão-deformação

Curva Típica Tensão x Deformação ($\sigma \times \epsilon$)

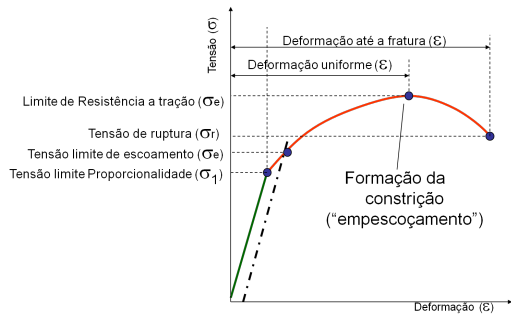


Diagrama Tensão-deformação

Comportamento Plástico:

- Para a maioria dos materiais metálicos, as deformações puramente elásticas ocorrem até deformações de ~0,5%.
- Quando as deformações ultrapassam esse limite, a relação entre a tensão e a deformação deixa de ser linear (lei de Hooke), produzindo-se deformação permanente (não recuperável), chamada deformação plástica.

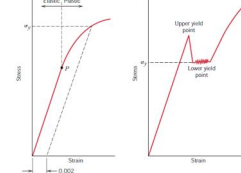


Diagrama Tensão-deformação

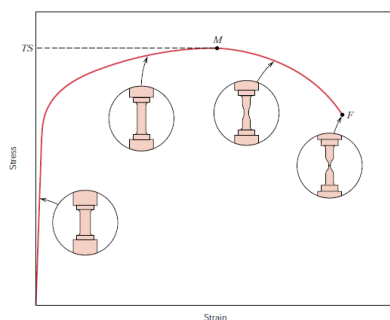
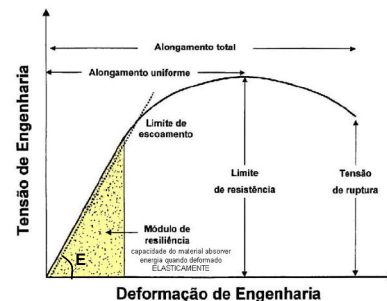


Diagrama Tensão-deformação



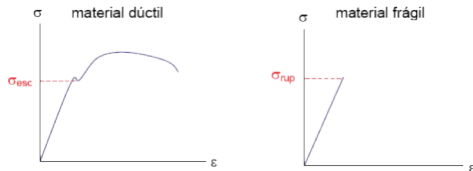
Porcentagem de Alongamento $\% \epsilon_T = \left(\frac{L_T - L_0}{L_0} \right) \times 100$

Porcentagem de redução de área $\% RA = \left(\frac{A_0 - A_f}{A_0} \right) \times 100$

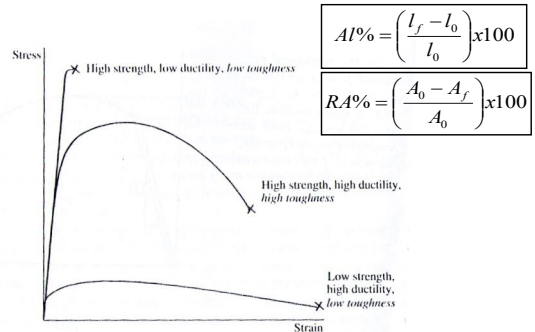


Ductilidade

- Representa a medida do grau de deformação plástica que foi suportado quando da fratura;
- Pequena deformação plástica ao romper : frágil
- Grande deformação plástica ao romper: dúctil



Ductilidade



Elasticidade e Plasticidade



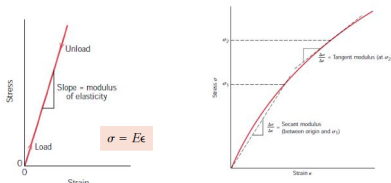
Deformação Elástica

- Em uma escala atômica, é manifestada como pequenas alterações no espaçamento interatômico e na extensão de ligações interatômicas;
- A magnitude do módulo de elasticidade representa uma medida da resistência à separação de átomos adjacentes;
- Antecede a deformação plástica;
- É reversível, cessando quando a tensão é removida;



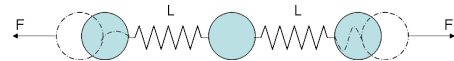
Deformação Elástica

- Normalmente é proporcional à tensão aplicada (obedece à Lei de Hooke);
- Em alguns materiais é não linear (módulo tangencial ou secante).



Módulo de Elasticidade (E)

- Propriedade Intrínseca do Material;
- f (rigidez e densidade das ligações atômicas)
- Ligação atômica ↔ mola (L)



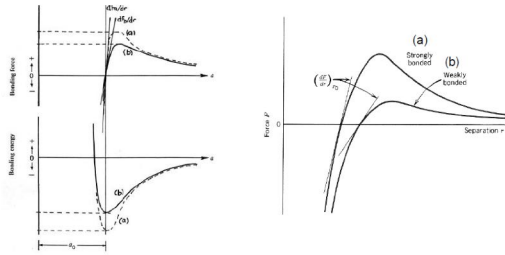
Tipo de Ligação	L (N/m)
Covalente	20 - 200
Metálica e Iônica	15 - 100
Van der Waals	0,5 - 2

$$E = \frac{L}{r_0}$$

r_0 = comprimento da ligação atômica = $2 \cdot 10^{-10}$ m



Diagrama Tensão-deformação



O módulo de elasticidade aumenta com a tangente da curva de força de ligação no ponto onde a força é nula, (dF_{ij}/dr) , para $F_{ij}=0$

Força de ligação em função da distância interatômica para: (a) átomos fortemente ligados e (b) átomos fracamente ligados.



Módulo de Elasticidade (E)

- Faixa de Valores: 1 a 1.000 GPa
- $E < 1 \text{ GPa} \rightarrow$ presença de poros ou vazios (elastômeros, espumas e madeiras).

Composto	Módulo de elasticidade médio (10^6 psi)	Temperatura de fusão ($^{\circ}\text{C}$)
Carbeto de titânio	45	3180
Tungstênio	60	2996
Carbeto de silício	50	> 2800
Periclásio (MgO)	30	2800
Berílio (BeO)	45	2585
Espinelho (MgAl_2O_4)	35	2160
Coríndon (Al_2O_3)	53	2030
Ferro	30	1539
Cobre	16	1083
Halita (NaCl)	5	801
Alumínio	10	660
Magnésio	6	650
Poliestireno	0,4	< 300
Nylon	0,4	< 300
Borracha	0,01	< 300



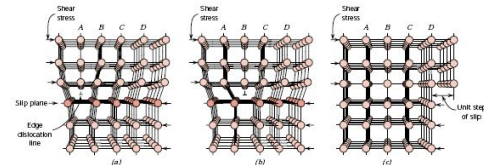
Anelasticidade

- A deformação elástica permanece após a aplicação da tensão, e com a liberação da carga será necessária a passagem de um tempo finito para que se dê a recuperação completa;
- Metais: Desprezível
- Polímeros: Significativa (comportamento viscoelástico)



Deformação Plástica

- Quebra e formação de ligações;
- Escorregamento
- Processo pelo qual a deformação plástica ocorre;
- Sistemas de escorregamento;
- "a habilidade de um material para se deformar plasticamente depende da habilidade das discordâncias se moverem".

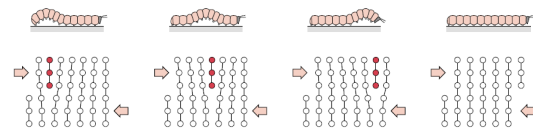


Deformação Plástica

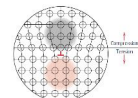
- Sistemas de Escorregamento
- As discordâncias não se movem com a mesma facilidade em todos os planos cristalinos e em todas as direções cristalinas;
- A movimentação das discordâncias se dá preferencialmente através de planos específicos e, dentro desses planos, em direções específicas, ambos com a maior densidade atômica de um dado reticulado cristalino;
- Essa combinação de um plano e uma direção é chamada de sistema de escorregamento ("slip system").



Deformação Plástica



- Metais (CFC e CCC) possuem um número relativamente grande de sistemas de escorregamento (pelo menos 12) \rightarrow DÚCTEIS
- Metais (HC) possuem poucos sistemas de escorregamento \rightarrow FRAGÉIS





Deformação Plástica

• Policristais

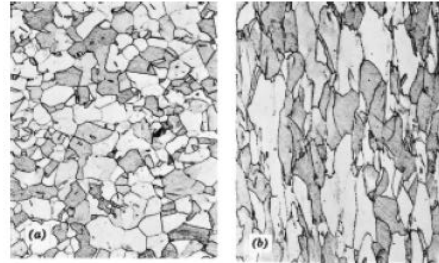
- Orientações cristalográficas aleatórias dos grãos → Direção do escorregamento varia de um grão para outro;

- A integridade mecânica e a coesão são mantidas nos contornos de grão → restrição à deformação → maior resistência.



Deformação Plástica

• Policristais



Tipos e Mecanismos de Fratura

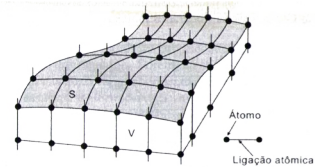


Fratura

• Energia de fratura (G) X Energia Superficial (γ)

$$G_c \geq 2 \cdot \gamma$$

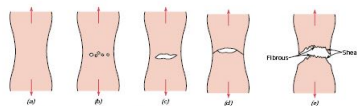
• γ tem origem nas ligações atômicas de ligação interrompidas, isto é, f (densidade atômica)



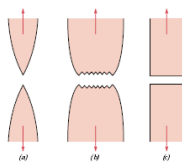
Fratura

• Fratura:

- Formação;
- Propagação.



• Fratura Dúctil x Fratura Frágil



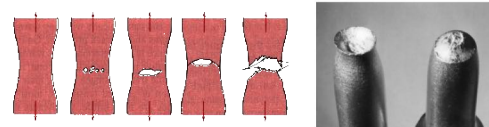
Fratura

• Fratura Dúctil:

- o material se deforma substancialmente antes de fraturar;

- O processo se desenvolve de forma relativamente lenta à medida que a trinca propaga;

- Este tipo de trinca é denominada estável, pois ela resiste a qualquer extensão adicional a menos que exista um aumento na tensão aplicada.





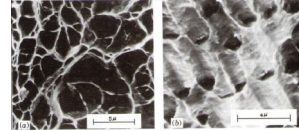
Fratura

- **Fratura Frágil:**
 - o material se deforma pouco, antes de fraturar;
 - O processo de propagação pode ser muito veloz, gerando situações catastróficas;
 - A partir de um certo ponto, a trinca é dita instável, pois ela se propagará mesmo sem aumento na tensão aplicada.



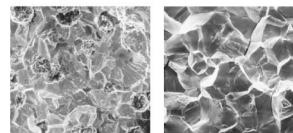
Fratura

- **Fratura Dúctil**



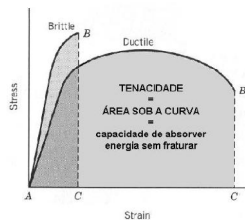
- **Fratura Frágil**

Transgranular (clivagem) x Intergranular



Tenacidade

- **Medida da habilidade de um material em absorver energia até a sua fratura;**
- **f (geometria do CP e forma como a carga é aplicada)**
- **Tenacidade ao entalhe: ensaio de impacto**

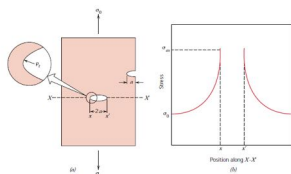


Mecânica da Fratura

- **A resistência à fratura de um material sólido é uma função das forças de coesão que existem entre os átomos;**
- **Resistência coesiva teórica = E/10**
- **Valor real = 10 a 1000 vezes menor**
- **Concentração de Tensões**
- **Presença de Defeitos (poros, trincas ou imperfeições);**
- **f (geometria e orientação da trinca).**



Mecânica da Fratura



- **Trinca com formato elíptico;**
- **Fator de concentração de tensões (K_t).**

$$\sigma_m = 2\sigma_0 \left(\frac{a}{\rho_t}\right)^{1/2}$$

$$K_t = \frac{\sigma_m}{\sigma_0} = 2 \left(\frac{a}{\rho_t}\right)^{1/2}$$



Mecânica da Fratura

- **Teoria de Griffith**

- **Todos os materiais frágeis possuem uma grande quantidade de defeitos e trincas;**
- **A fratura ocorrerá quando a resistência à tração teórica do material for excedida na extremidade de um desses defeitos;**
- **A tensão crítica exigida para a propagação da trinca:**

$$\sigma_c = \left(\frac{2E\gamma_s}{\pi a}\right)^{1/2}$$

E = módulo de elasticidade
 γ_s = energia superficial específica
 a = metade do comprimento de uma trinca interna



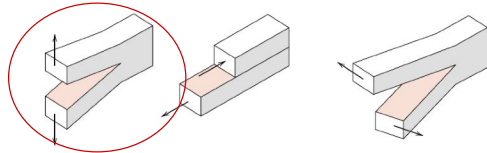
Mecânica da Fratura

• Modos, segundo os quais a carga pode operar sobre uma trinca:

- **Modo I: Abertura ou Tração;**

- **Modo II: Deslizamento;**

- **Modo III: Rasgamento.**



Fadiga

• Falha que ocorre em estruturas que estão sujeitas a tensões dinâmicas e oscilantes;

• É possível a ocorrência de uma falha em um nível de tensão consideravelmente abaixo do LRT e ao limite de escoamento para uma carga estática;

• Ocorre normalmente após um longo período de tensão repetitiva ou ciclo de deformação;

• É responsável por cerca de 90% das falhas metálicas;

• É catastrófica e traiçoeira (frágil).



Fadiga

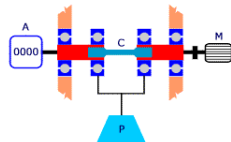
• Os esforços alternados que podem levar à fadiga podem ser:

- Tração;

- Tração e compressão;

- Flexão;

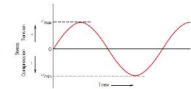
- Torção.



Fadiga

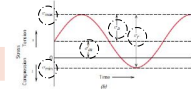
• Modalidades de tensão oscilante-tempo.

- Ciclo de Tensões Alternadas (simetria)

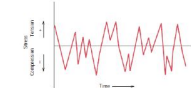


- Ciclo de Tensões Repetidas (assimetria)

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$



- Ciclo de Tensões Aleatórias



Fadiga

• Etapas da Falha por Fadiga

- Iniciação da Trinca;

- Propagação da Trinca;

- Fratura Final.

• Vida em Fadiga (iniciação + propagação)

$$N_f = N_i + N_p$$

• Comumente se iniciam na superfície devido a um concentrador de tensões.



Fadiga

• Estágios de Propagação da Trinca

- Propagação de Estágio I;

- Propagação lenta;

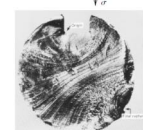
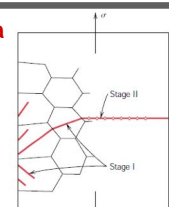
- Superfície de Fadiga possui aparência plana.

- Propagação de Estágio II.

- A taxa de extensão da trinca aumenta drasticamente;

- Direção de propagação aproximadamente perpendicular à tensão de tração aplicada;

- Processo repetitivo de abaulamento plástico e afilamento da ponta da trinca.



Marcas de praia ou estrias



Fadiga

• Fatores que influenciam a Vida em Fadiga

- Tensão Média

$\uparrow \sigma_m \rightarrow \downarrow N_f$

- Efeitos da Superfície

- Concentradores de Tensões \rightarrow Polimento, adoçamento de arestas e jateamento, endurecimento da camada superficial;

- Irregularidades estruturais.

- Efeitos do Ambiente

- Fadiga térmica;

- Fadiga associada à corrosão.



Fluência

• Os materiais são colocados em serviço sob temperaturas elevadas e ficam expostos a tensões mecânicas estáticas:

- A deformação plástica progride lentamente com o tempo (fluência) até haver um estrangulamento e ruptura do material;

- A velocidade de fluência (relação entre deformação plástica e tempo) aumenta com a temperatura;

- Esta propriedade é de grande importância especialmente na escolha de materiais que trabalham a altas temperaturas.



Fluência

• Deformação permanente, dependente do tempo e da temperatura, quando o material é submetido à uma carga constante;

• Este fator muitas vezes limita o tempo de vida de um determinado componente ou estrutura;

• Este fenômeno é observado em todos os materiais, e torna-se importante às altas temperaturas ($> 0,4.T_f$).



Fluência

• Fatores que afetam a Fluência.

- Temperatura;

- Módulo de elasticidade;

- Tamanho de grão.

Em geral:

- Quanto maior o ponto de fusão, maior o módulo de elasticidade e maior é a resistência à fluência;

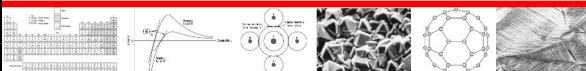
- Quanto maior o tamanho de grão maior é a resistência à fluência.



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
Escola Politécnica
DCTM - Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais

Mecanismos de Aumento da Resistência

“restringir ou impedir o movimento de discordâncias confere maior dureza e mais resistência ao material”.



Introdução

• Por que a resistência medida dos materiais é muito menor do que aquela predita pelos cálculos teóricos, baseados na força de ligação dos átomos de um cristal perfeito do material?

- Ex: a resistência ao cisalhamento teórica do cobre é maior que 1000 MPa, mas o valor medido é uma ordem de grandeza menor que este.

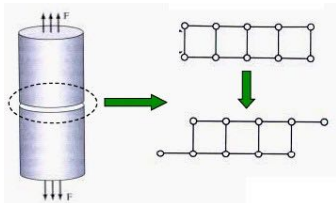
• Por que os metais se deformam plasticamente?

• Por que a deformação plástica dos metais pode resultar em profundas alterações nas propriedades mecânicas do material?



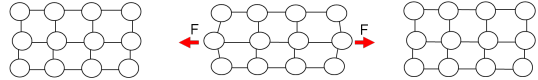
Introdução

- **Resposta: Por conta da existência de discordâncias e defeitos na rede cristalina dos materiais!**

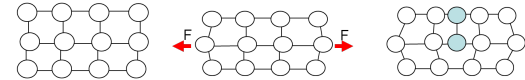


Introdução - Deformação

Deformação Elástica:
Retorno à condição Inicial



Deformação Plástica:
Não retorna à condição Inicial (formação de discordâncias ou maclas)

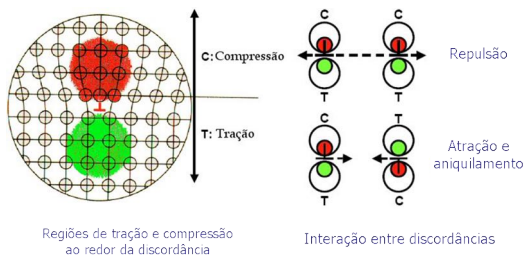


F= tensão de escoamento:
Precisa levar em conta o tamanho de grão (TG)!
Quanto menor TG mais força pra deformar.



Deformação Plástica

- **Discordâncias: esforços envolvidos.**



Mecanismos

- **Aumento da resistência por redução do tamanho de grão;**
- **Aumento da resistência por adição de elemento de liga (formação de solução sólida ou precipitação de fases);**
- **Aumento da resistência por encruamento;**
- **Aumento da resistência por tratamento térmico (transformação de fase).**



Redução do Tamanho do Grão

- O contorno de grão interfere no movimento das discordâncias;
- Devido as diferentes orientações cristalinas presentes, resultantes do grande número de grãos, as direções de escorregamento das discordâncias variam de grão para grão.

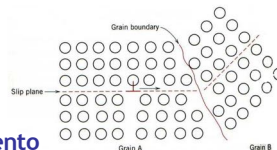
↓ Tamanho de grão



↑ Contorno de grão



↑ Restrição ao movimento



Redução do Tamanho do Grão

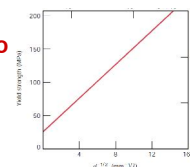
- O contorno de grão → barreira para a continuação do movimento das discordâncias.

- Diferentes orientações presentes e também devido às inúmeras descontinuidades presentes no contorno de grão.

- **Redução do tamanho do grão**

- Equação de Hall-Petch

$$\sigma_y = \sigma_0 + K \cdot d^{-1/2}$$

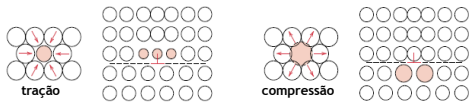


Essa equação não é válida para grãos muito grosseiros ou muito pequenos



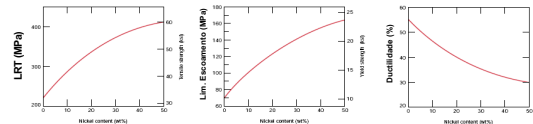
Solução Sólida

- Quando um átomo de uma impureza está presente, o movimento da discordância fica restringido, ou seja, deve-se fornecer energia adicional para que continue havendo escorregamento;
- Por isso soluções sólidas de metais são sempre mais resistentes que seus metais puros constituintes.



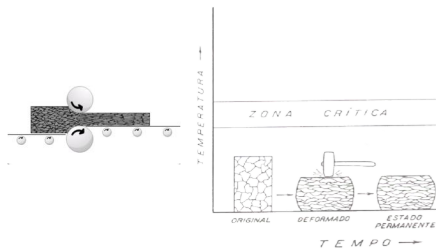
Solução Sólida

- Formação de Ligas por Solução Sólida
 - Formação de ligas com átomos de impurezas que entram em solução sólida intersticial ou substitucional;
 - Os átomos de soluto tendem a se difundir e a se agregar ao redor das discordâncias, de modo a reduzir a energia de deformação global.



Encruamento

- Conhecido como *Trabalho a frio*.
- Ocorre abaixo da temperatura de recristalização (próximo à temperatura ambiente);



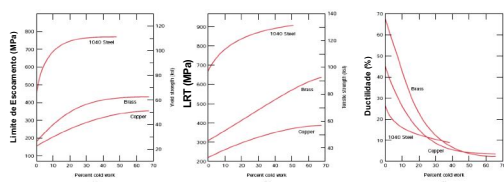
Encruamento

- Aumento da resistência por deformação plástica;
- A densidade de discordâncias aumenta com a deformação, devido à multiplicação das existentes ou à formação de novas discordâncias;
- O aumento de discordâncias impede o escorregamento dos planos atômicos.
- Quanto maior o encruamento, maior é a força necessária para produzir uma maior deformação.



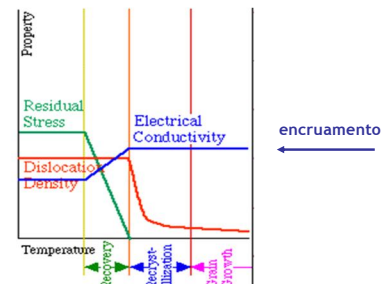
Encruamento

- Melhor controle dimensional;
- Produz melhor acabamento superficial;
- O encruamento pode ser removido por tratamento térmico (recristalização).



Encruamento

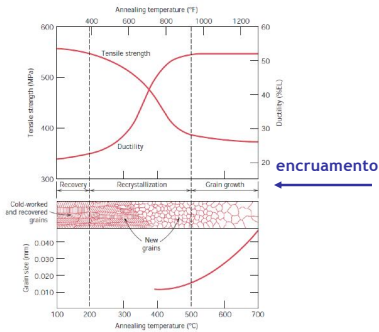
- Variação das propriedades em função do encruamento.





Encruamento

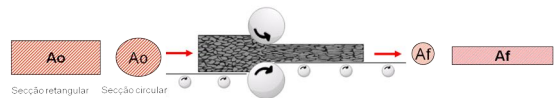
• Tratamento Térmico



Encruamento

- Expressa-se o grau de deformação plástica com um percentual de trabalho a frio (%TF), definido como:

$$\%TF = \left(\frac{A_0 - A_f}{A_0} \right) \cdot 100$$

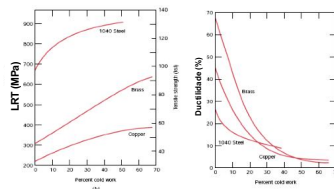


Deformação Plástica

• Exemplo 19

- Calcule o limite de resistência à tração e a ductilidade (AL%) de um bastão cilíndrico de cobre quando ele é trabalhado a frio de tal modo que seu diâmetro seja reduzido de 15,2mm para 12,2 mm.

$$\%TF = \left(\frac{A_0 - A_f}{A_0} \right) \cdot 100$$



Encruamento

- Resolução:

$$\%TF = \left[\frac{\pi \cdot \left(15,2/2\right)^2 - \pi \cdot \left(12,2/2\right)^2}{\pi \cdot \left(15,2/2\right)^2} \right] \cdot 100$$

$$\%TF = 35,6\%$$

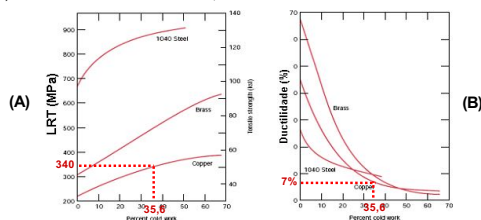


Encruamento

- Resolução:

a) O LRT pode ser lido diretamente da curva (A) para o cobre para %TF igual a 35,6%: **340 MPa**

b) A ductilidade a 35,6 %TF é de: **7 %**



Encruamento

- Processos: laminação, trefilação, extrusão e forjamento;

- Aplicação: perfis estruturais, chapas, fios, cabos, etc.





UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
Escola Politécnica
DCTM - Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais

Materiais de Construção I

UNIDADE I

Estrutura dos Materiais, Defeitos e Propriedades Mecânicas

Prof. Dr. Daniel Vêras Ribeiro
verasribeiro@hotmail.com

