

LOM3036
Metalurgia Física

Aula 2
Fundamentos da Metalurgia
Física

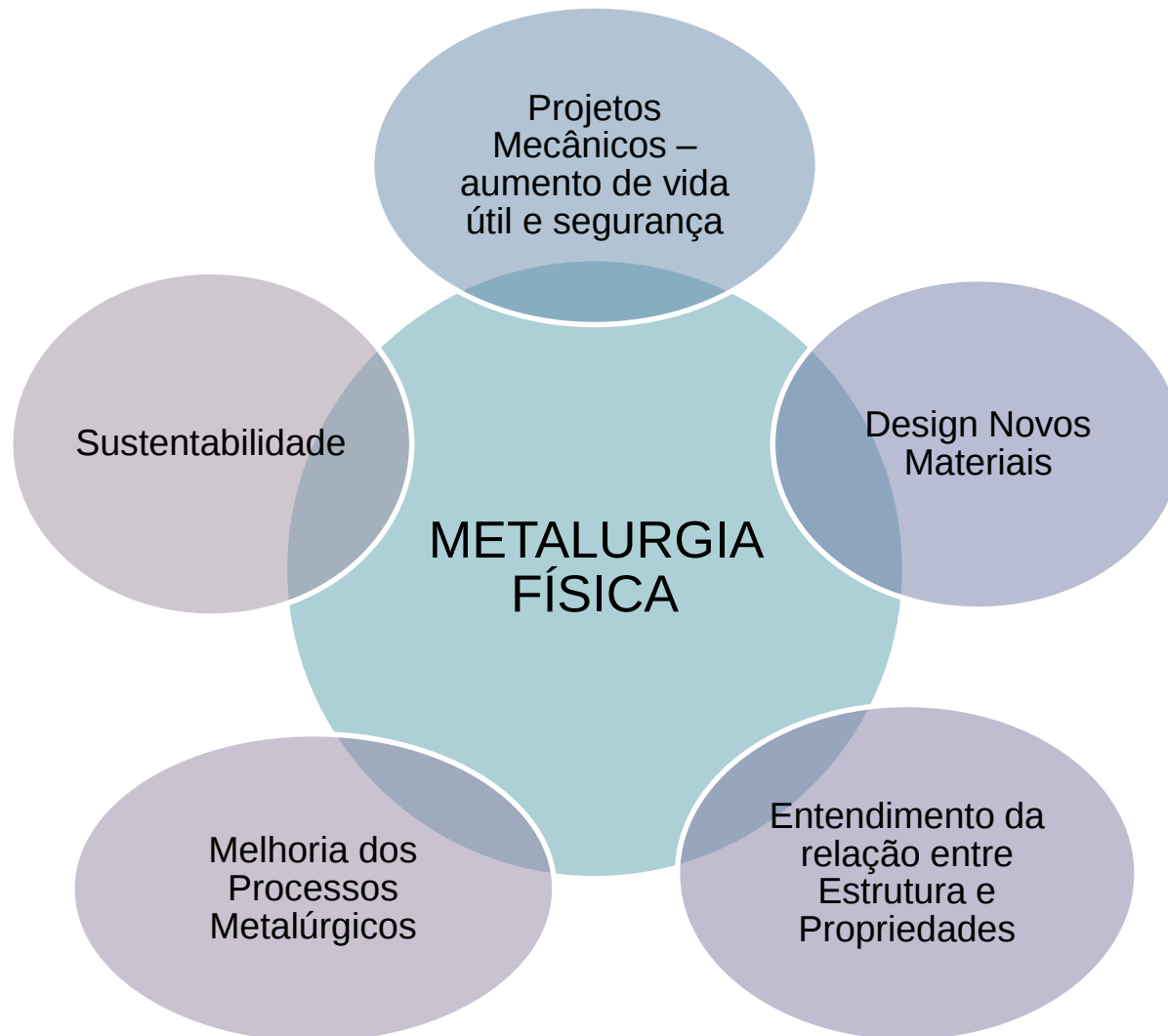
Profa. Maria Ismenia Sodero
maria.ismenia@usp.br

O que você vai aprender?

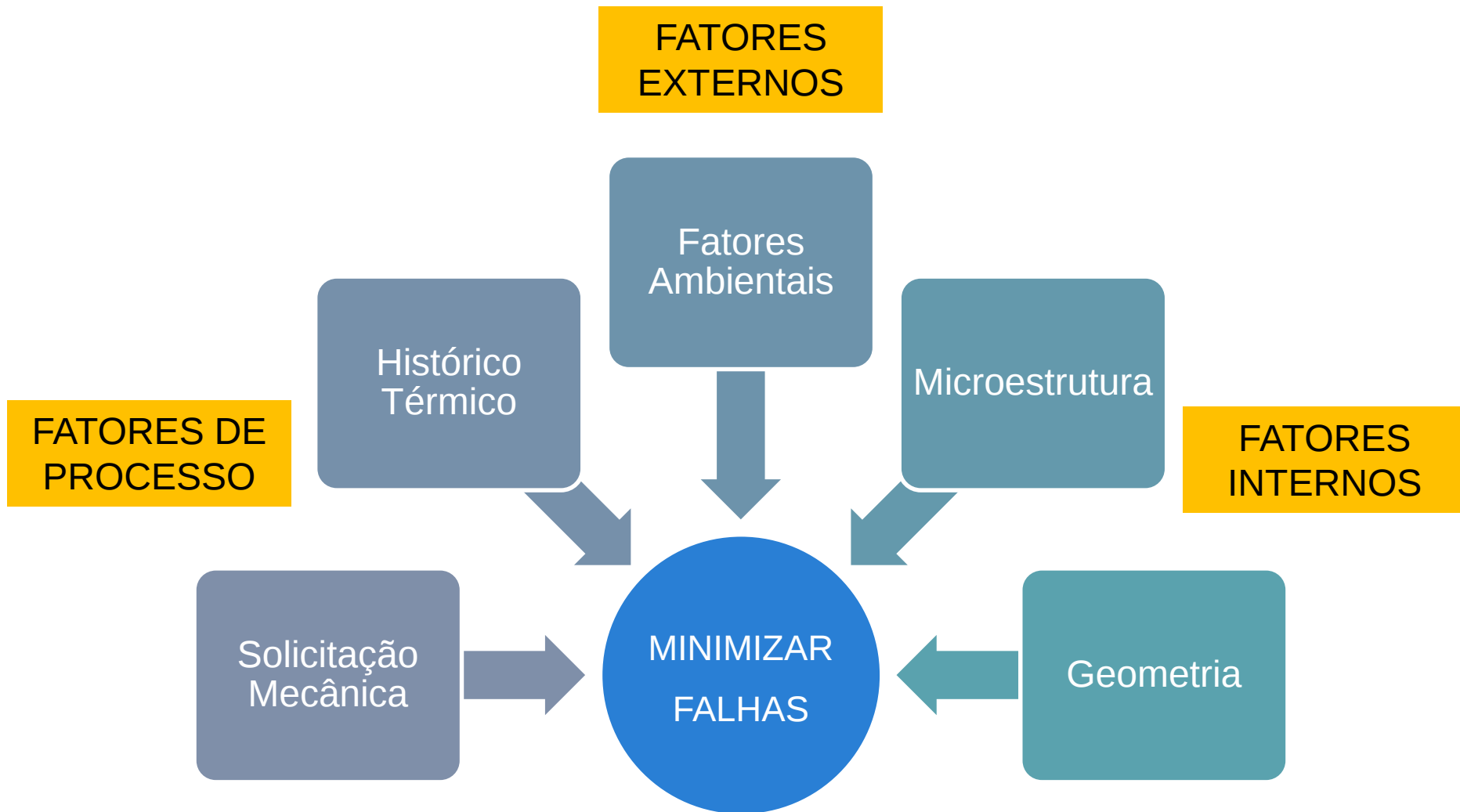
INTRODUÇÃO AO CONCEITO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS

Conceitos e relações entre microestrutura e propriedades mecânicas de materiais metálicos.
Comportamento elástico e plástico de metais suas ligas e materiais não ferrosos.

Qual a importância de estudar Metalurgia Física?



Fatores de influência nas propriedades dos materiais



Relação entre estrutura e propriedade

Os estudos metalúrgicos de Sorby sobre as relações entre estrutura e propriedade do ferro e do aço comerciais no final do século XIX são frequentemente considerados como o início da ciência moderna dos materiais.

CIÊNCIA DOS
MATERIAIS



Comportamento
macroscópico



Comportamento
microscópico

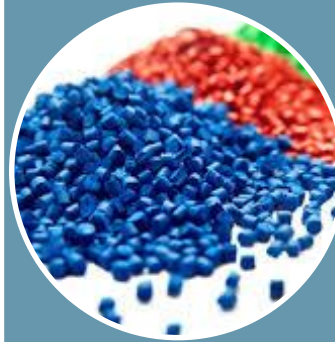
MATERIAIS DE ENGENHARIA



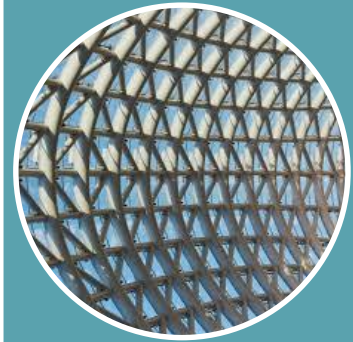
METAIS



CERÂMICOS



POLÍMEROS



COMPÓSITOS

MATERIAIS PARA APLICAÇÕES ESTRUTURAIS

Haddad admite que acordo com EUA sobre minerais críticos e terras-raras pode entrar na negociação do tarifaço

Minerais e terras-raras são essenciais para produção de baterias elétricas e setor de inteligência artificial

Por **Bernardo Lima** — Brasília

04/08/2025 17h02 · Atualizado agora



BBC NEWS BRASIL

Notícias Brasil Internacional Economia Saúde Ciência Tecnologia Vídeos Pc

Por que Trump mira terras raras e minerais no mundo todo - e qual o lugar do Brasil nesse xadrez



Paula Adamo Idoeta e Camilla Veras Mota
Da BBC News Brasil em Londres e São Paulo

27 julho 2025

As tensões entre Brasil e [EUA](#), elevadas por conta da expectativa de tarifas americanas de 50% sobre exportações brasileiras a partir de 1º de agosto, ganharam um novo elemento: o debate em torno de minérios que são produzidos no Brasil.

Em evento do governo federal em Minas Novas (MG) na quinta-feira (24/7), o presidente Luiz Inácio [Lula](#) da Silva (PT) fez, em tom de voz elevado, uma defesa da soberania mineral do país.

Brasil deveria usar nióbio como arma para negociar com Trump?



GETTY IMAGES
Lançamento do foguete Apollo 11 em 1969: nióbio é componente importante da indústria aeroespacial.

Camilla Veras Mota >
Da BBC News Brasil em São Paulo

25 julho 2025

Com o prazo para início da vigência da [tarifa de 50% sobre produtos brasileiros](#) imposta pela gestão [Donald Trump](#) cada vez mais próximo, o governo brasileiro continua conversando com diferentes setores para mapear alternativas para negociar ou [mesmo retaliar a medida](#).

A gestão do presidente Luiz Inácio [Lula](#) da Silva (PT) segue tentando discutir a derrubada do tarifaço antes da data prevista para que entre em vigor, 1º de agosto.

Diante da [dificuldade de interlocução com o governo americano](#), entretanto, também se prepara para diferentes cenários caso os [Estados Unidos](#) não voltem atrás, conforme declarou o ministro da Fazenda, [Fernando Haddad](#), à imprensa nos últimos dias.

CURVA TENSÃO X DEFORMAÇÃO

<https://www.youtube.com/watch?v=sKB0dB0x4gk>

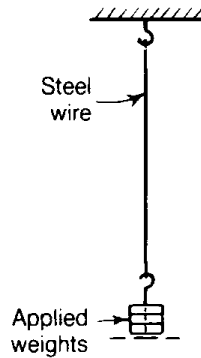


Figure 1.1 Stretching of a steel wire under end load.

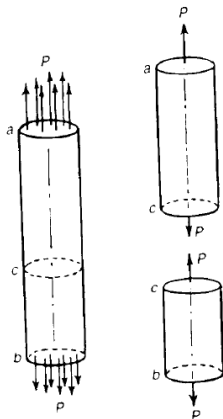
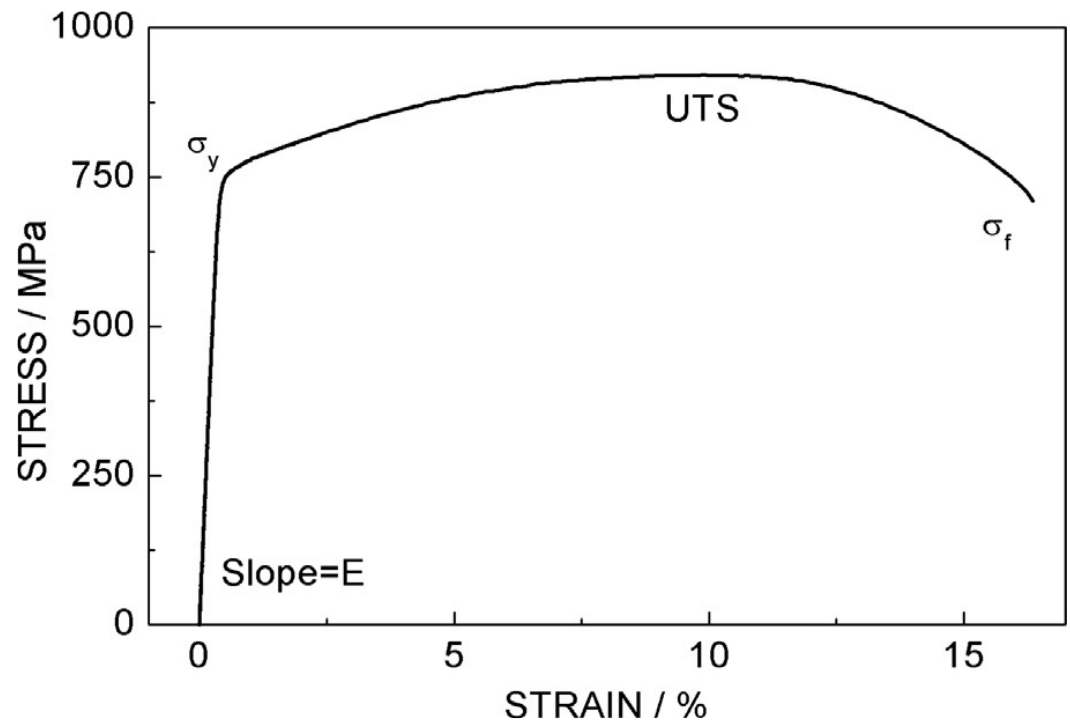
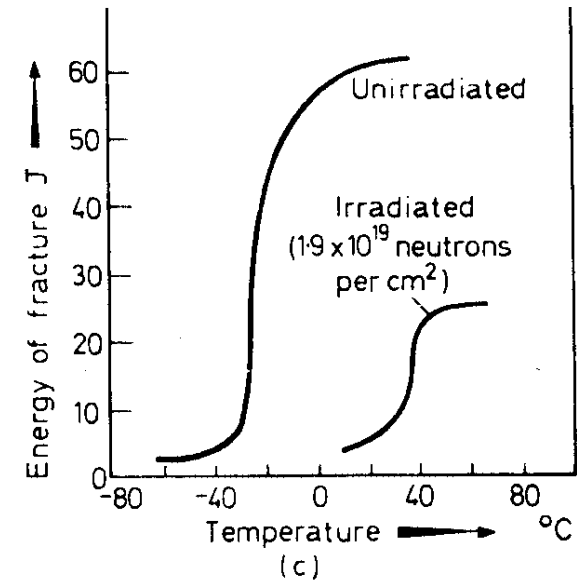
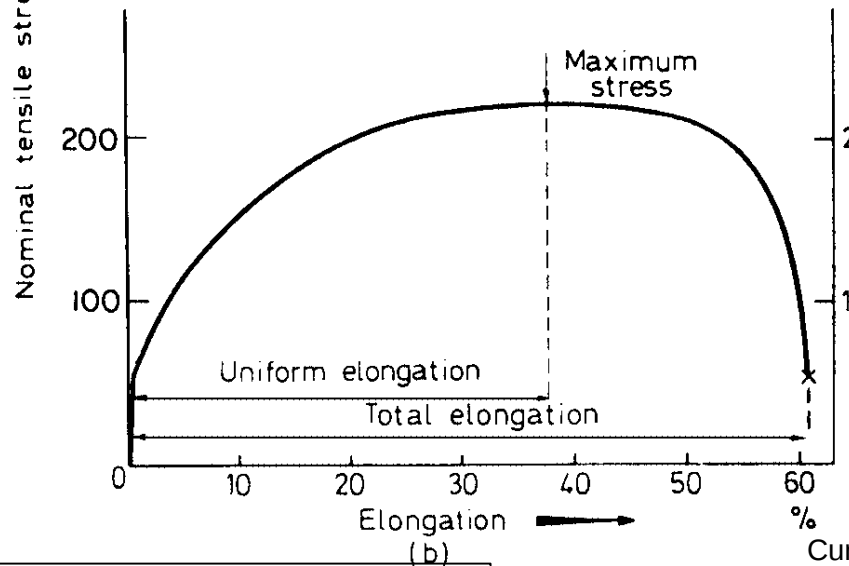
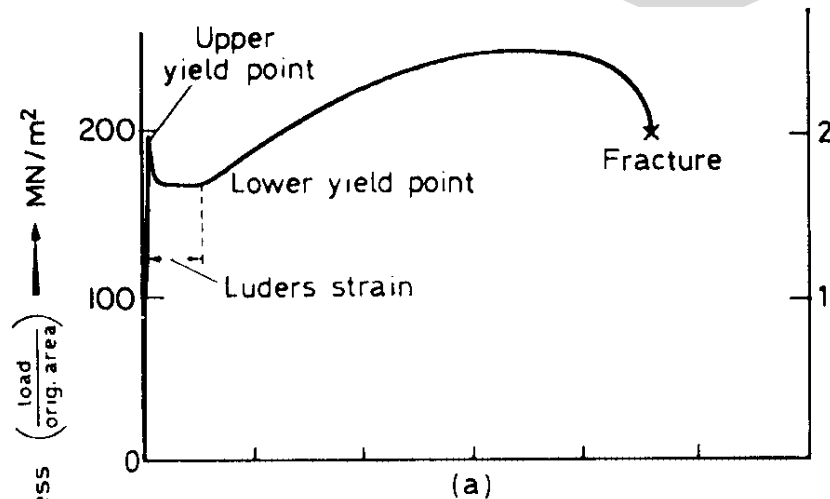


Figure 1.3 Cylindrical bar under uniform tensile stress; there is a similar state of tensile stress over any imaginary normal cross-section.



Curvas indicativas de comportamento mecânico dos materiais



Curvas de tensão-deformação para (a) ferro impuro, (b) cobre, (c) transição dúctil-frágil em aço macio

Deformação elástica

Região Elástica da Curva Tensão x Deformação

reversível e obedece à lei de Hooke, com a tensão linearmente proporcional à deformação.

A constante de proporcionalidade que liga a tensão e a deformação é conhecida como módulo de elasticidade e pode ser (a) o módulo de elasticidade ou módulo de Young, E , (b) o módulo de rigidez ou cisalhamento G (μ) ou (c) o módulo de compressibilidade K , dependendo se a deformação é por tração, cisalhamento ou compressão hidrostática, respectivamente.

$$K = \frac{E}{2(1 - 2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1 + \nu)}, \quad E = \frac{9K\mu}{3K + \mu}$$

Conceitos importantes da curva $\sigma \times \epsilon$

- **DUCTILIDADE**: capacidade de mudar de forma plasticamente (Sem danos estruturais)

↳ valores baixos = fragilidade! (falha sem deformação)

↳ Pode induzir danos estruturais ou retardar o processo de falha (DUALIDADE - ajudar ou atrapalhar)

- **TENACIDADE**: capacidade de absorver energia até a fratura final (retardar a falha)

↳ valores baixos = fragilidade! (falha sem deformação)

- **RESILIÊNCIA**: capacidade do corpo de resistir a danos estruturais e manter a estabilidade estrutural.

- **Deformação elástica**: reversível / Linear

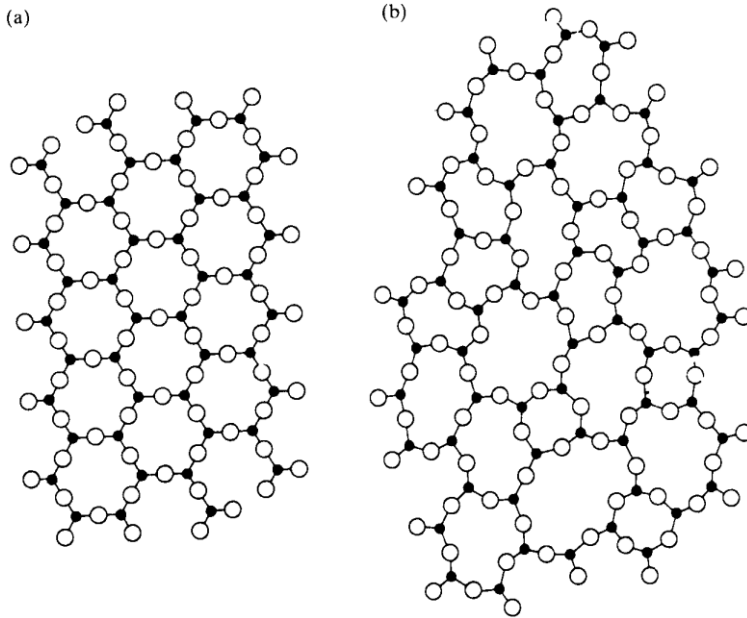
↳ Diretamente relacionada com as interações interatômicas (densidade e intensidade das ligações atômicas).

↳ Lei de Hooke e Módulo de Young (E)

- **Deformação plástica**: irreversível / Permanente / Não Linear

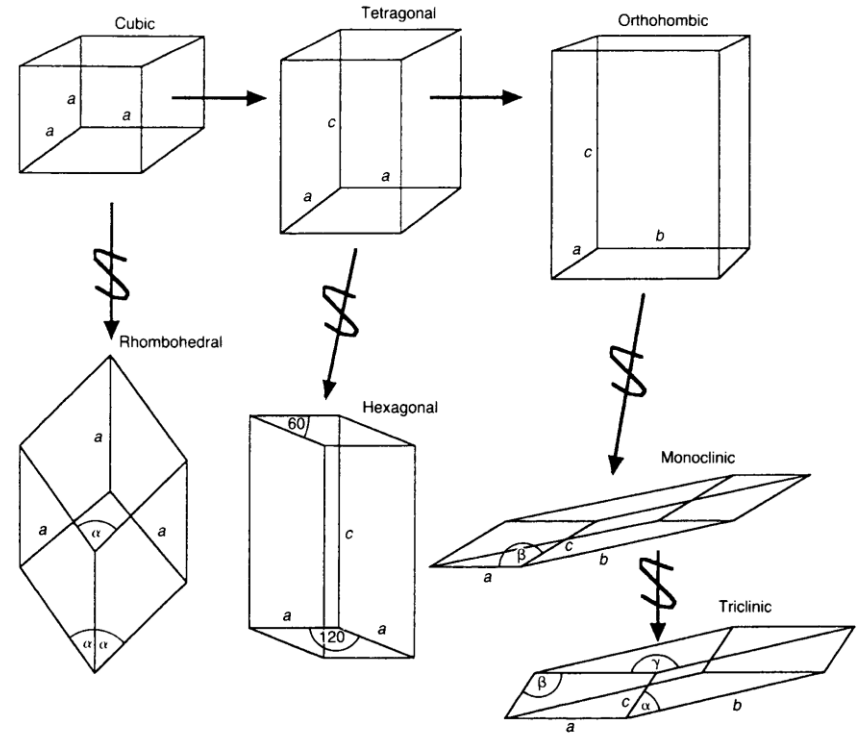
Arranjo atômico dos materiais

Conceito de Ordenação



Atomic ordering in (a) crystals and (b) glasses of the same composition (from Kingery, Bowen and Uhlmann, 1976; by permission of Wiley-Interscience).

Os sete sistemas de simetria cristalina



System	Axes	Axial angles
Cubic	$a_1 = a_2 = a_3$	All angles = 90°
Tetragonal	$a_1 = a_2 \neq a_3$	All angles = 90°
Orthorhombic	$a \neq b \neq c$	All angles = 90°
Monoclinic	$a \neq b \neq c$	Two angles = 90° ; 1 angle $\neq 90^\circ$
Triclinic	$a \neq b \neq c$	All angles different; none equal 90°
Hexagonal	$a_1 = a_2 = a_3 \neq c$	Angles = 90° and 120°
Rhombohedral	$a_1 = a_2 = a_3$	All angles equal, but not 90°

MATERIAIS DE ENGENHARIA

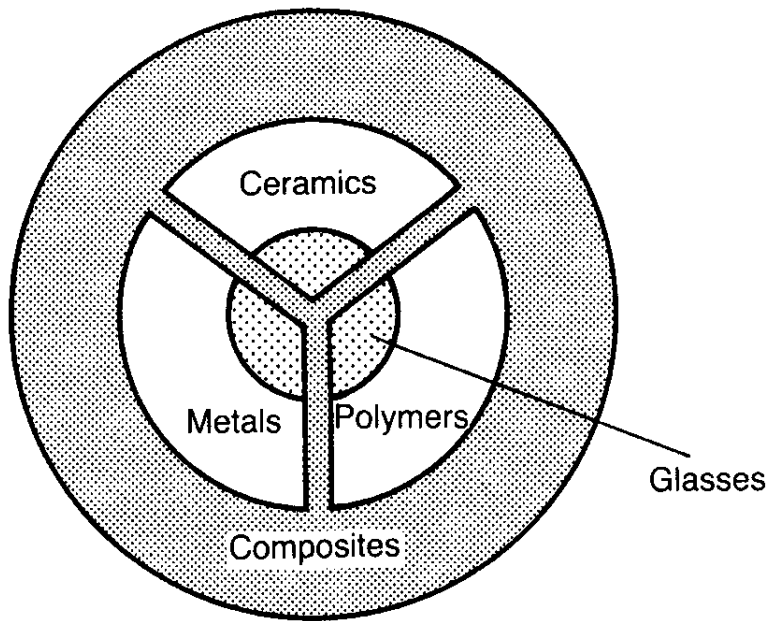


Figure 1.1 The principal classes of materials (after Rice, 1983).

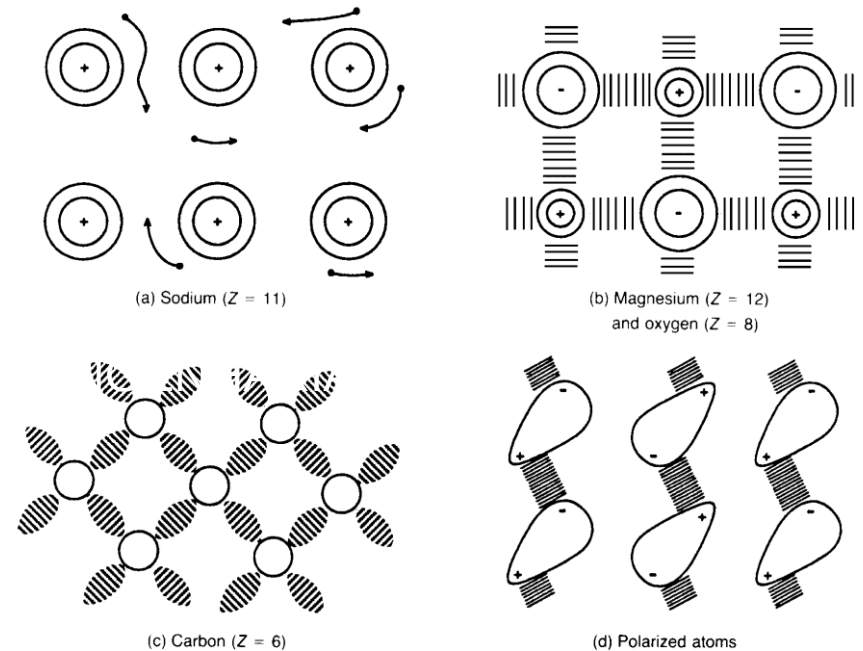
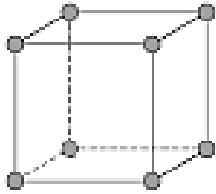
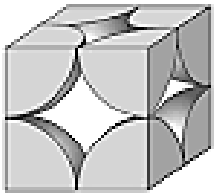


Figure 1.3 Schematic representation of (a) metallic bonding, (b) ionic bonding, (c) covalent bonding and (d) van der Waals bonding.

Cristais Perfeitos

Estrutura cristalina cúbica

Cubica Simples

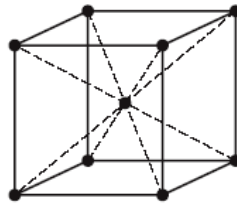


Número de átomos na célula unitária

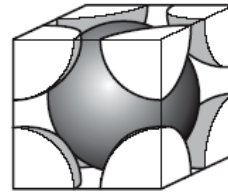
$$N_a = 8 \times (1/8) = 1$$

NC (numero de vizinhos) = 6

Cubica Corpo Centrado



(a)



(b)

Número de átomos na célula unitária

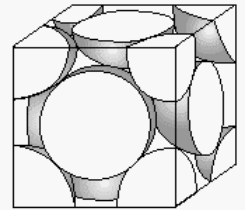
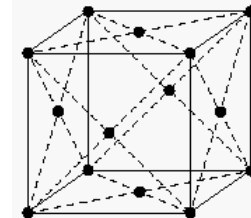
$$N_a = 8 \times 1/8 + 1 = 2$$

Relação entre a e r

$$4R = a \sqrt{3} \Rightarrow a = 4R\sqrt{3} \quad NC = 8$$

$$FEA_{ccc} = \frac{2 \times \frac{4}{3} \pi R^3}{\left(\frac{4R}{\sqrt{3}}\right)^3} = \frac{\frac{8}{3} \pi R^3}{\frac{64R^3}{3\sqrt{3}}} = \frac{\sqrt{3}}{8} \pi \approx 0,68$$

Cubica Face Centrada



Número de átomos na célula unitária

$$N_a = 6 \times 1/2 + 8 \times (1/8) = 4$$

Relação entre a e r

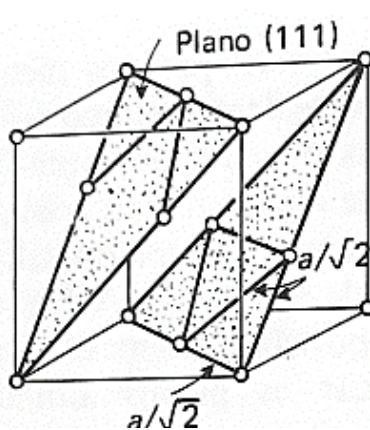
$$4R = a \sqrt{2} \Rightarrow a = 4R\sqrt{2} \quad NC = 12$$

Fator de empacotamento atômico

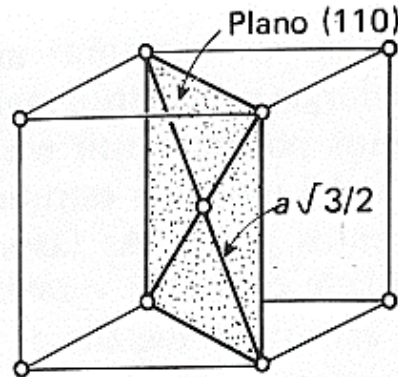
$$FEA_{cfc} = \frac{\text{Volume dos átomos}}{\text{Volume da célula}} = 0.74$$

A rede cfc é a mais compacta

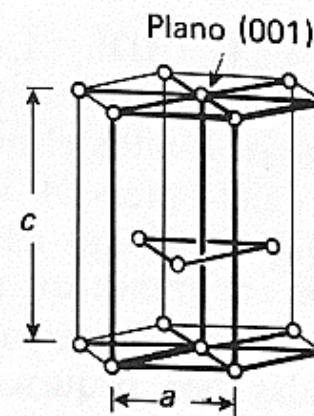
Sistemas de Escorregamento



Cubica de Face Centrada



Cubica de Corpo Centrado



Hexagonal Compacto

Planos de maior empacotamento sombreados (a) CFC, (b) CCC e c (HC)

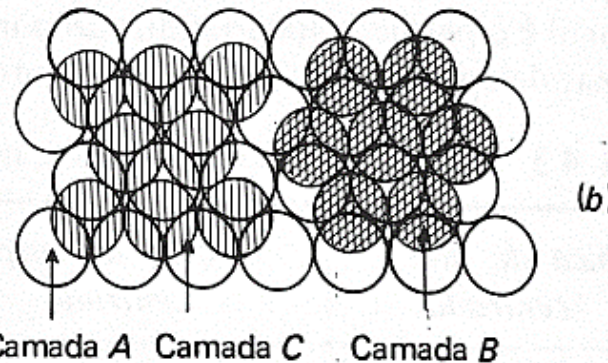
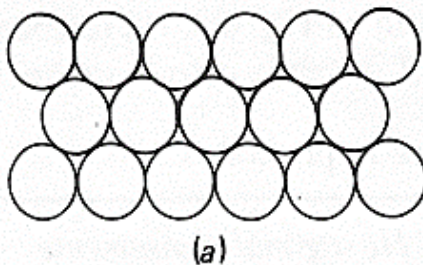
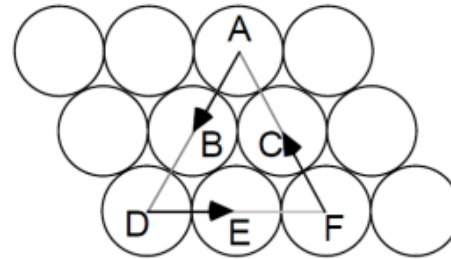
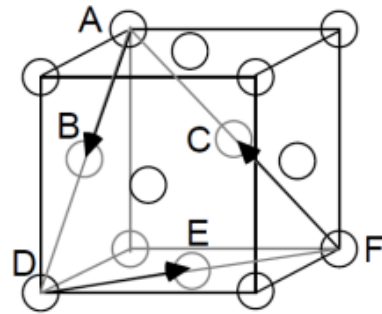


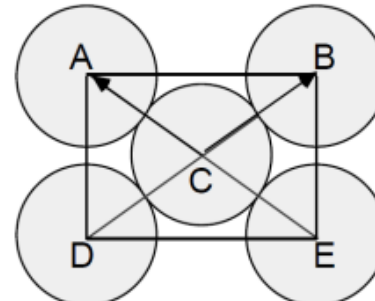
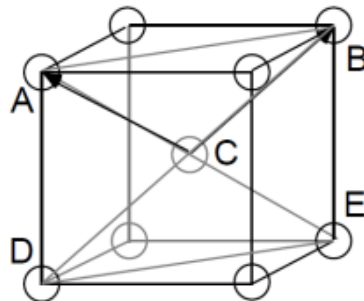
Figura 4.4 – (a) Camada de átomos densamente empacotada correspondendo a (111) em CFC e (00.1) em HDE; e (b) empilhamento dos planos A, B e C

Sistemas de Escorregamento



Estrutura cfc

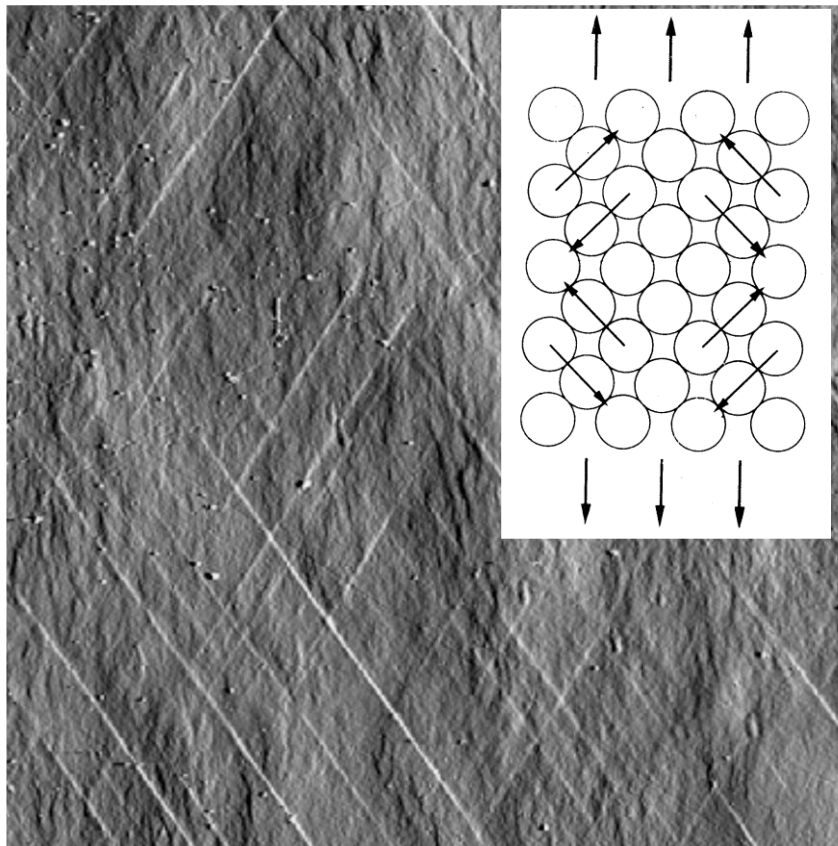
4 planos $\{111\}$ x 3 direções $\langle 110 \rangle$ = 12 sistemas de escorregamento



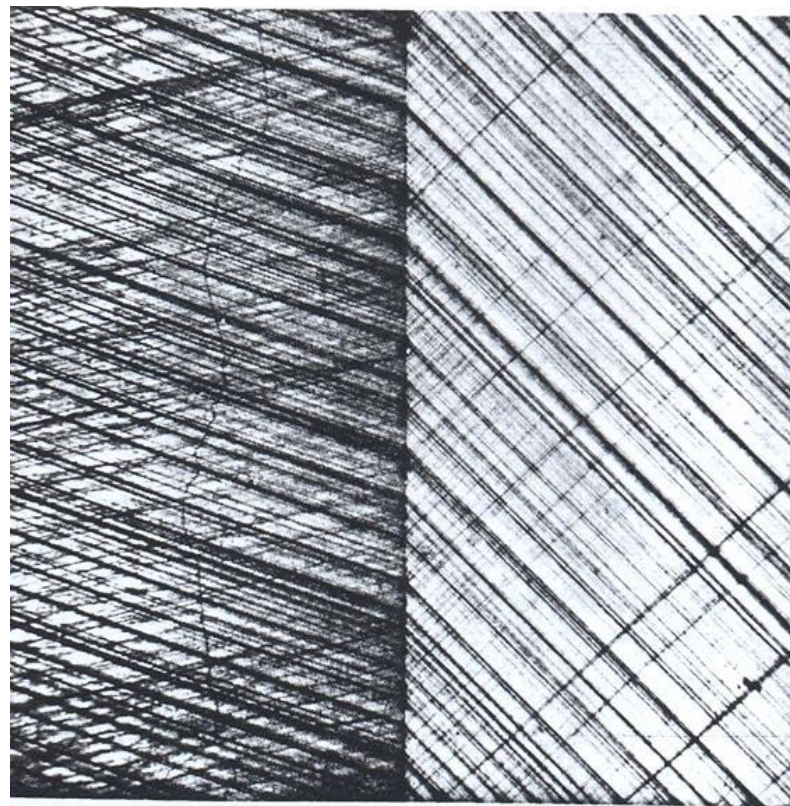
Estrutura ccc

6 planos $\{110\}$ x 2 direções $\langle 111 \rangle$ = 12 sistemas de escorregamento

Linhas de Escorregamento



Linhas de
Escorregamento em um
cristal de Nb



Linhas de
Escorregamento em bi
cristal de Fe-3%Si

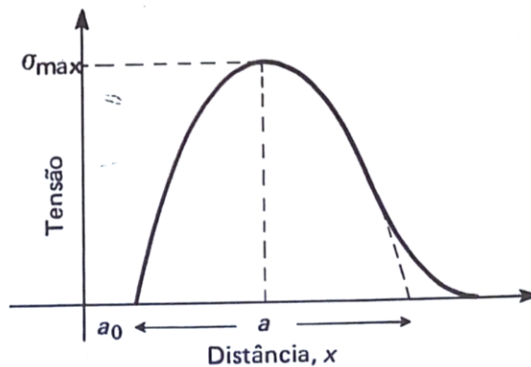
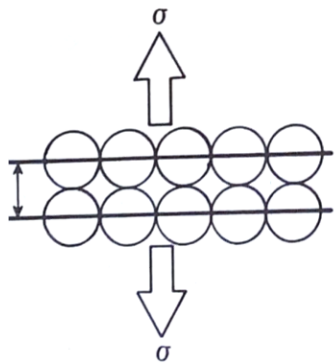
Resistência Teórica dos Materiais

Clivagem

Um material cliva quando se rompe por tensões normais, ou seja, pela pura e simples separação dos átomos na direção da tensão aplicada.

Tensão de clivagem

$$\sigma_{max} = \sqrt{\frac{E \gamma}{a_0}}$$

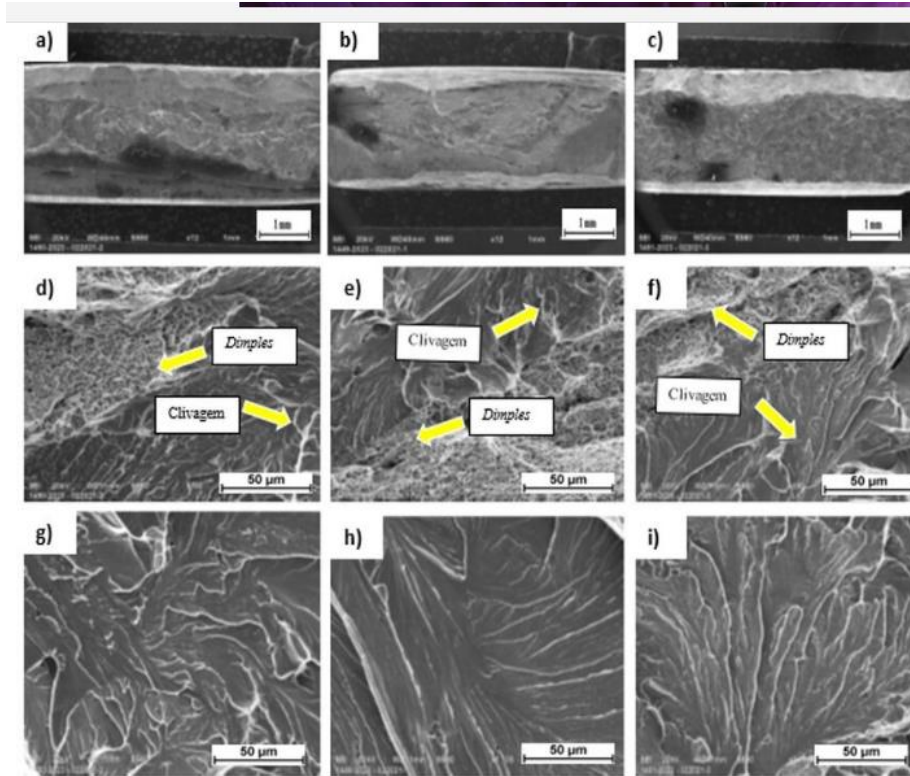


Tensão para separa dois planos atômicos

Tabela indicando a energia de superfície e tensões teóricas de clivagem calculadas segundo a teoria de Orowan

Substância	Direção	γ (GPa)	Energia de superfície (mJm ⁻²)	σ_{max} (GPa)	σ_{max}/E
Ferro α	$\langle 100 \rangle$	132	2 000	30	0,23
Ferro α	$\langle 111 \rangle$	260	2 000	46	0,18
Prata	$\langle 111 \rangle$	121	1 130	24	0,20
Ouro	$\langle 111 \rangle$	110	1 350	27	0,25
Cobre	$\langle 111 \rangle$	192	1 650	39	0,20
Cobre	$\langle 100 \rangle$	67	1 650	25	0,38
Tungstênio	$\langle 100 \rangle$	39	3 000	86	0,22
Diamante	$\langle 111 \rangle$	121	5 400	205	0,17

Fratura por Clivagem



(a) Superfície da fratura, aporte 4,2 KJ/Cm (12x); (b) Superfície da fratura, aporte 6,7 KJ/Cm (12x); (c) Superfície da fratura, aporte 9,1 KJ/Cm (12x); (d) Clivagens e dimples, 4,2 kJ/cm (850x); (e) Clivagens e dimples, 6,7 kJ/cm (850x); (f) Clivagens e dimples, 9,1kJ/cm (850x); (g) Detalhes de clivagens, 4,2 kJ/cm (1100x); (h) Detalhes de clivagens, 6,7 kJ/cm (1100x); (i) Detalhes de clivagens, 9,1 kJ/cm (1100x). Fonte: Autor.

A forma mais frágil de fratura em materiais é a fratura por clivagem;

Tendência aumenta com aumento da taxa de deformação ou baixa temperatura – TTDF (Charpy);

A clivagem acontece por separação direta ao longo de planos cristalinos específicos por simples arrancamento de ligações atômicas. Exemplo: Fe sofre clivagem ao longo dos planos (100);

Sob condições normais, metais CFC não mostram clivagem

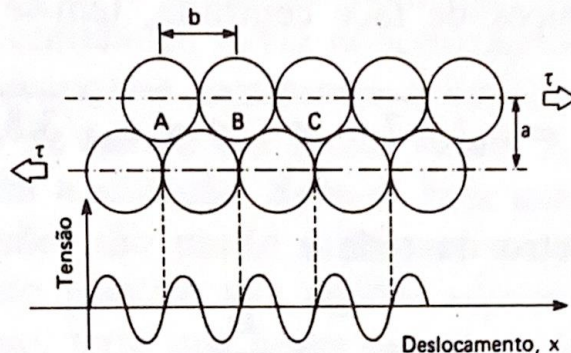
Resistência Teórica dos Materiais

Cisalhamento

- ✓ Frenkel realizou um cálculo simples da tensão teórica de cisalhamento de um cristal.
- ✓ Considerando duas filas de átomos superpostos e submetidas a uma tensão de cisalhamento.
- ✓ A figura mostra a configuração onde:
 a = distância Interplanar e b = distância interatômica.
- ✓ Sob a tensão de cisalhamento τ , os átomos movem-se, uns sob os outros, passando por sucessiva posições de equilíbrio A, B, C, nas quais a tensão necessária é zero, como pode ser visto no gráfico.
- ✓ A tensão também é nula quando os átomos estão exatamente superpostos, mas neste caso, o equilíbrio é instável

Tabela 4.5 – Tensões teóricas de cisalhamento calculadas segundo o método de Mackenzie¹³ (adaptada da Ref. 7).

Substância	G (GPa)	γ_{max} (GPa)	τ_{max}/G
Ferro	60,0	6,6	0,11
Prata	19,7	0,77	0,039
Ouro	19,0	0,74	0,039
Cobre (20°C)	30,8	1,2	0,039
Tungstênio	150,0	16,5	0,11
Diamante	505,0	121,0	0,24
NaCl	23,7	2,8	0,12



Força para cisar cristal ideal

Tensão de cisalhamento
Frenkel

$$\tau_{max} = \frac{G b}{2\pi a}$$

Resistência Real dos Cristais

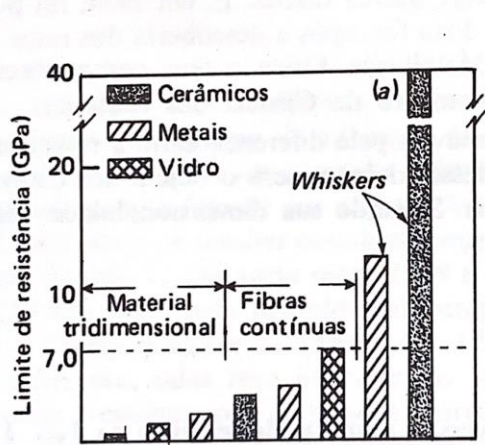


Figura 4.8 – Resistência de materiais tridimensionais, fibras contínuas e whiskers. A resistência de um whisker de SiC produzido pelos laboratórios Philips de Eindhoven está indicada por (a)

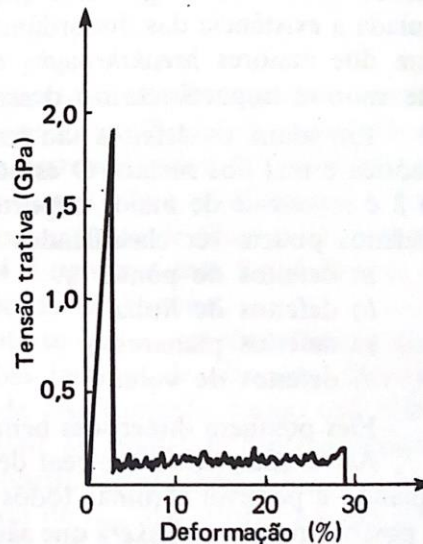


Figura 4.9 – Curva tensão-deformação de um whisker de cobre com direção de fibra 100 (adaptada da Ref. 15).

A resistência teórica é da ordem de grandeza de GPa, mas na realizada os metais apresentam limites de resistência bem inferiores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ✓ Princípios da Metalurgia Mecânica - Meyers e Chawla;
- ✓ Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering, Smallman and Bishop
- ✓ Dieter, G.E. Metalurgia Mecânica, Ed. Guanabara Dois, 1981