



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

PROPRIEDADES TÉRMICAS E ÓPTICAS DOS MATERIAIS



Fonte: sol.sci.uop.edu/~jfalward/physics17/chapter12/chapter12.html

PMT 3110 - Introdução à Ciência dos Materiais para Engenharia

Roteiro da Aula

➤ **Propriedades térmicas**

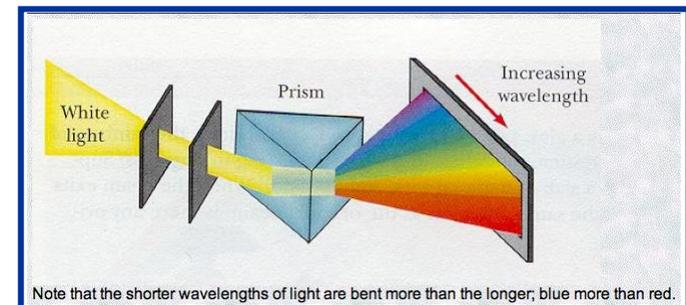
- ✓ Capacidade térmica
- ✓ Dilatação térmica
- ✓ Condutividade térmica



Fonte: sol.sci.uop.edu/~jfalward/physics17/chapter7/chapter7.html

➤ **Propriedades ópticas**

- ✓ Radiação eletromagnética
- ✓ Interação da luz com os sólidos
- ✓ Propriedades ópticas dos metais
- ✓ Propriedades ópticas dos materiais não-metálicos
- ✓ Opacidade e translucidez de isolantes
- ✓ Opacidade e translucidez de polímeros



Fonte: sol.sci.uop.edu/~jfalward/physics17/chapter12/chapter12.html

Introdução

- Entende-se por “*Propriedades Térmicas*” a resposta de um material a um estímulo térmico (aumento ou redução de temperatura).

- O que acontece quando mudamos a temperatura de um material ?
 - ✓ Variação dimensional
 - ✓ dilatação ou expansão térmica (em aquecimento);
 - ✓ contração (no resfriamento);
 - ✓ calor é absorvido ou transmitido;
 - ✓ transformações de fases.

Capacidade Térmica

CAPACIDADE TÉRMICA MOLAR: quantidade de energia (J) necessária para aumentar em um grau (K) a temperatura de um mol de um material. Esta propriedade representa a capacidade do material de absorver calor do meio circundante.

$$C = \frac{dQ}{dT}$$

onde: C é a capacidade térmica molar (J/mol.K)

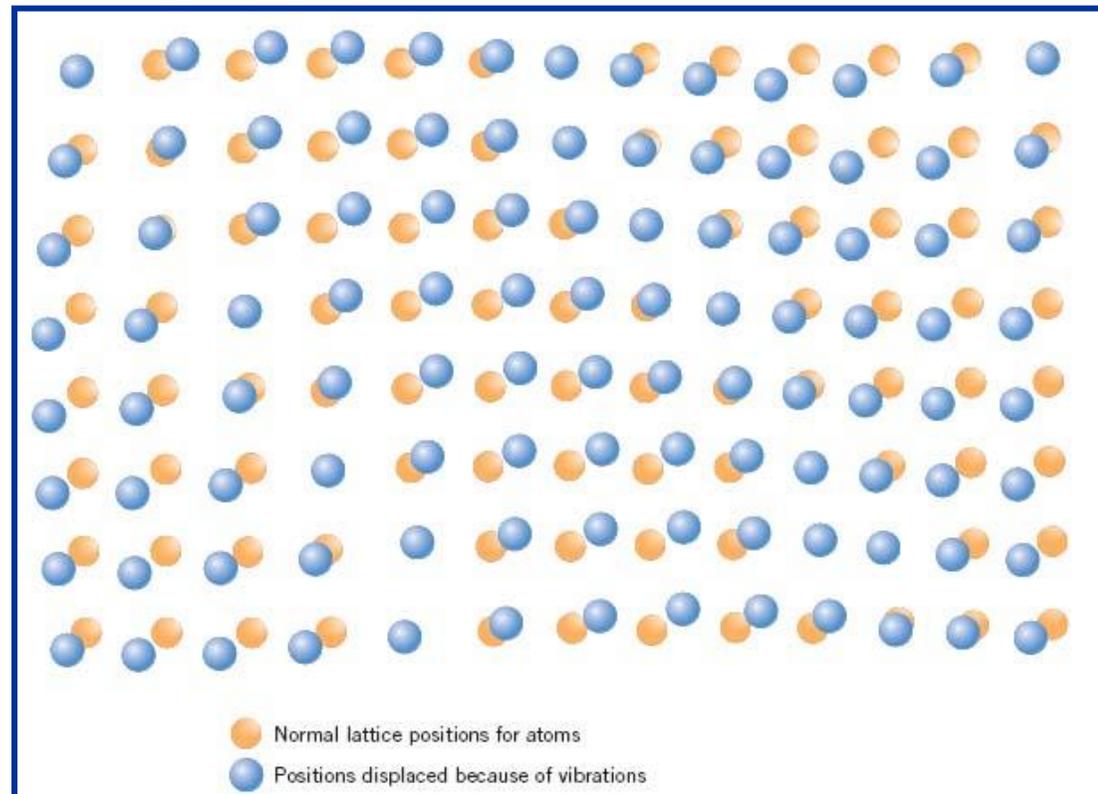
dQ é a variação de energia (J)

dT é a variação de temperatura (K)

- Frequentemente utiliza-se para essa grandeza o termo **CALOR ESPECÍFICO**, que é a capacidade térmica por unidade de massa (J / kg.K).
- A capacidade térmica molar pode ser medida a volume constante (C_V) e a pressão constante (C_P) com: $C_P > C_V$ (no entanto, esta diferença é pequena para a maioria dos materiais sólidos a temperaturas iguais ou abaixo da temperatura ambiente).

Capacidade Térmica

- Na maioria dos sólidos, o conteúdo térmico e a energia vibracional dos átomos estão diretamente relacionados. A contribuição eletrônica para a capacidade térmica é, em geral, insignificante, a não ser para temperaturas próximas a zero graus Kelvin.
- A energia vibracional de um material consiste de uma série de ondas elásticas de comprimento de onda muito pequeno e frequências muito altas, que se propagam através do material com a velocidade do som.
- A energia vibracional é quantizada, e um quantum desta energia é chamado **FÔNON**.
- O fônon é análogo ao quantum de radiação eletromagnética, o **FÓTON**.
- O espalhamento dos elétrons livres que ocorre durante a condução elétrica é devido às ondas vibracionais.



Geração de ondas elásticas em um cristal por meio de vibração atômica.

Dilatação Térmica

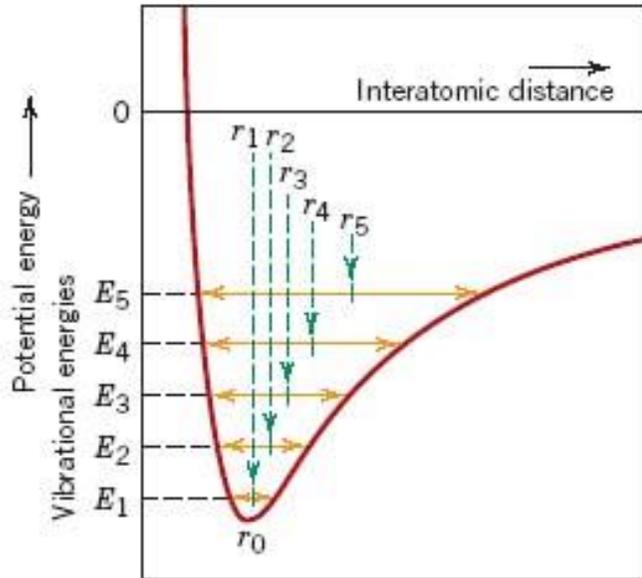
- A maioria dos materiais sólidos se expande com o aumento da temperatura e se contrai com a sua diminuição.
- A variação do comprimento de um sólido com a temperatura segue a relação:

$$\frac{l_f - l_0}{l_0} = \alpha_\ell (T_f - T_0) \quad \text{ou} \quad \frac{\Delta l}{l_0} = \alpha_\ell \Delta T$$

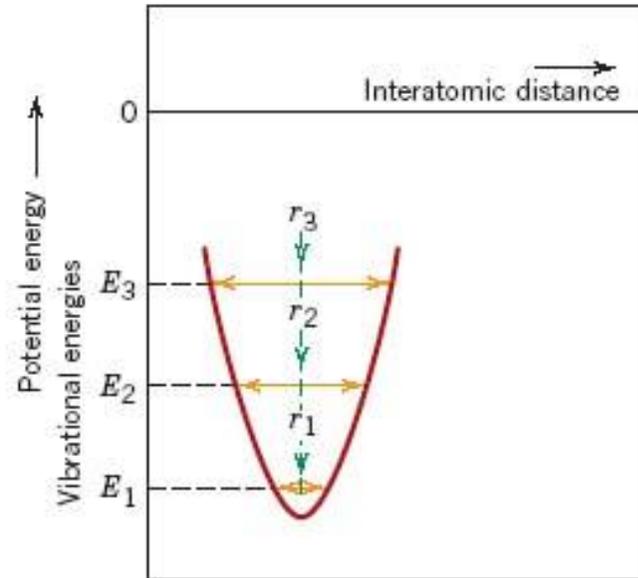
onde: l_0 e l_f são o comprimento inicial e final respectivamente
 T_0 e T_f são a temperatura inicial e final respectivamente
 α_ℓ é o coeficiente linear de expansão térmica (K^{-1})

- α_ℓ é uma propriedade que representa a capacidade do material de dilatar-se com o aumento da temperatura.

Dilatação Térmica



(a)



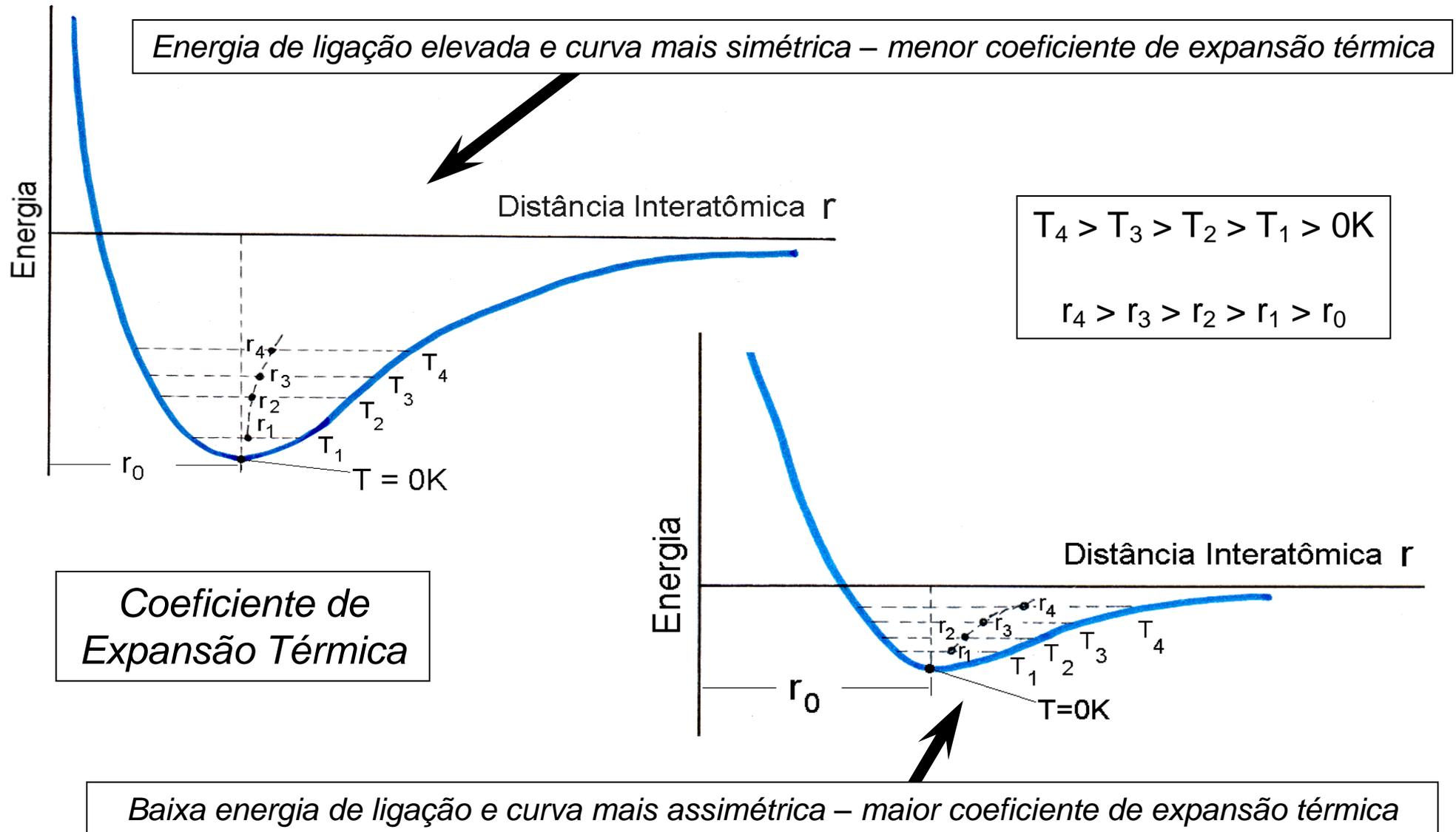
(b)

As energias vibracionais E_1, E_2, \dots, E_5 representam a energia mecânica do átomo, ou seja, a soma das energias cinética e potencial.

As distâncias r_1, r_2, \dots, r_5 correspondem às distâncias médias entre dois átomos vizinhos para os casos das energias vibracionais E_1, E_2, \dots, E_5

- (a) Energia potencial em função da distância interatômica, mostrando o aumento da distância interatômica média com o aumento da temperatura ($r_0 < r_1 < r_2$)
- (b) Se a curva de energia potencial em função da distância interatômica fosse simétrica em relação ao ponto de equilíbrio, não ocorreria aumento da distância interatômica média entre átomos vizinhos com o aumento da temperatura ($r_1 = r_2 = r_3$).

Relação entre dilatação térmica e a curva de energia de ligação



Condutividade Térmica

- **CONDUÇÃO TÉRMICA:** fenômeno pelo qual o calor é transportado em um material de regiões de alta temperatura para regiões de baixa temperatura.
- **CONDUTIVIDADE TÉRMICA:** capacidade de um material de conduzir calor.
- A condutividade térmica pode ser definida em termos de:

$$q = -k \frac{dT}{dx}$$

onde: q é o fluxo de calor por unidade de tempo por unidade de área perpendicular ao fluxo (W/m²)

k é a condutividade térmica (W/m-K)

dT/dx é o gradiente de temperatura (K/m).

- O sinal de menos na equação significa que o escoamento de calor ocorre da região quente para a região fria.
- A equação acima só é válida quando o fluxo de calor for **ESTACIONÁRIO** (fluxo de calor que não se altera com o tempo).

Mecanismos de Condutividade Térmica

➤ CONDUTIVIDADE TÉRMICA POR ELÉTRONS (k_e)

- ✓ Os elétrons livres que se encontram em regiões quentes ganham energia cinética e migram para regiões mais frias. Em consequência de colisões com fônons, parte da energia cinética dos elétrons livres é transferida (na forma de energia vibracional) para os átomos contidos nessas regiões frias, o que resulta em aumento da temperatura.
- ✓ Quanto maior a concentração de elétrons livres, maior a condutividade térmica.

➤ CONDUTIVIDADE TÉRMICA POR FÔNONS (k_q)

- ✓ A condução de calor pode ocorrer também através de vibrações da rede atômica. O transporte de energia térmica associada aos fônons se dá na mesma direção das ondas de vibração.

- A **CONDUTIVIDADE TÉRMICA (k)** de um material é a soma da condutividade por elétrons (k_e) e a por fônons (k_q):

$$k = k_e + k_q$$

Propriedades Térmicas de Alguns Materiais

Material	C_p (J/kg-K)	α [(°C)⁻¹ x 10⁻⁶]	k (W/m-K)
Alumínio	900	23,6	247
Ferro	448	11,8	80
Aço inoxidável AISI 316	502	16,0	15,9
Tungstênio	138	4,5	178
Alumina (Al₂O₃)	775	7,6	39
Vidro comum	840	9,0	1,7
Vidro Pyrex	850	3,3	1,4
Polietileno (PE)	1850	106 - 198	0,46 - 0,50
Teflon (PTFE)	1050	126 – 216	0,25

C_p – calor específico, α – coeficiente linear de expansão térmica, e

k – condutividade térmica

Tensões Térmicas

- **Tensões térmicas são introduzidas no material pela variação de temperatura.**

Um corpo que encontra-se preso sofre tensão devida a restrições de expansão e contração. A variação de temperatura ocasiona uma variação no seu comprimento:

$$\varepsilon = \alpha(T_o - T_f)$$

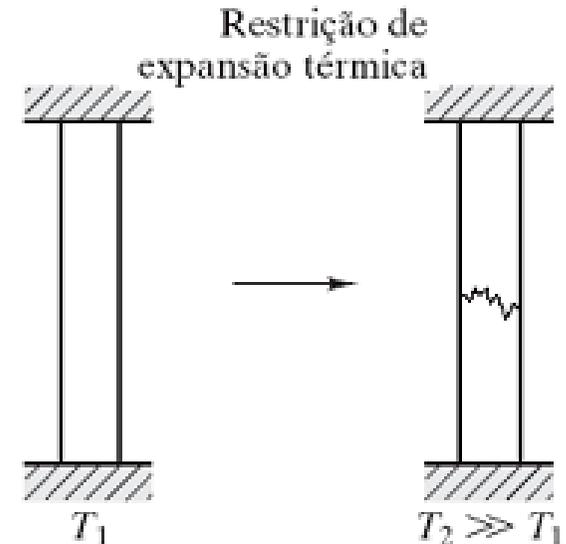
A tração (+ σ) ou a compressão (- σ) resultante é:

$$\sigma = E\varepsilon$$

- **O choque térmico é a fratura do material devido à variação de temperatura**

Pode ocorrer devido à **restrição à expansão** e à **condutividade térmica k limitada**, numa mudança rápida de temperatura, gerando gradientes de temperatura no material.

No aquecimento
 $T_f > T_o$, sendo o
oposto no
resfriamento



Radiação Eletromagnética

- A velocidade de propagação no vácuo de qualquer tipo de radiação eletromagnética é igual a 3×10^8 m/s (Einstein).
- A radiação eletromagnética pode ser considerada como:
 - (1) um fenômeno ondulatório. Segundo essa abordagem, a velocidade de propagação de radiação eletromagnética num meio específico é:

$$C = \lambda \nu$$

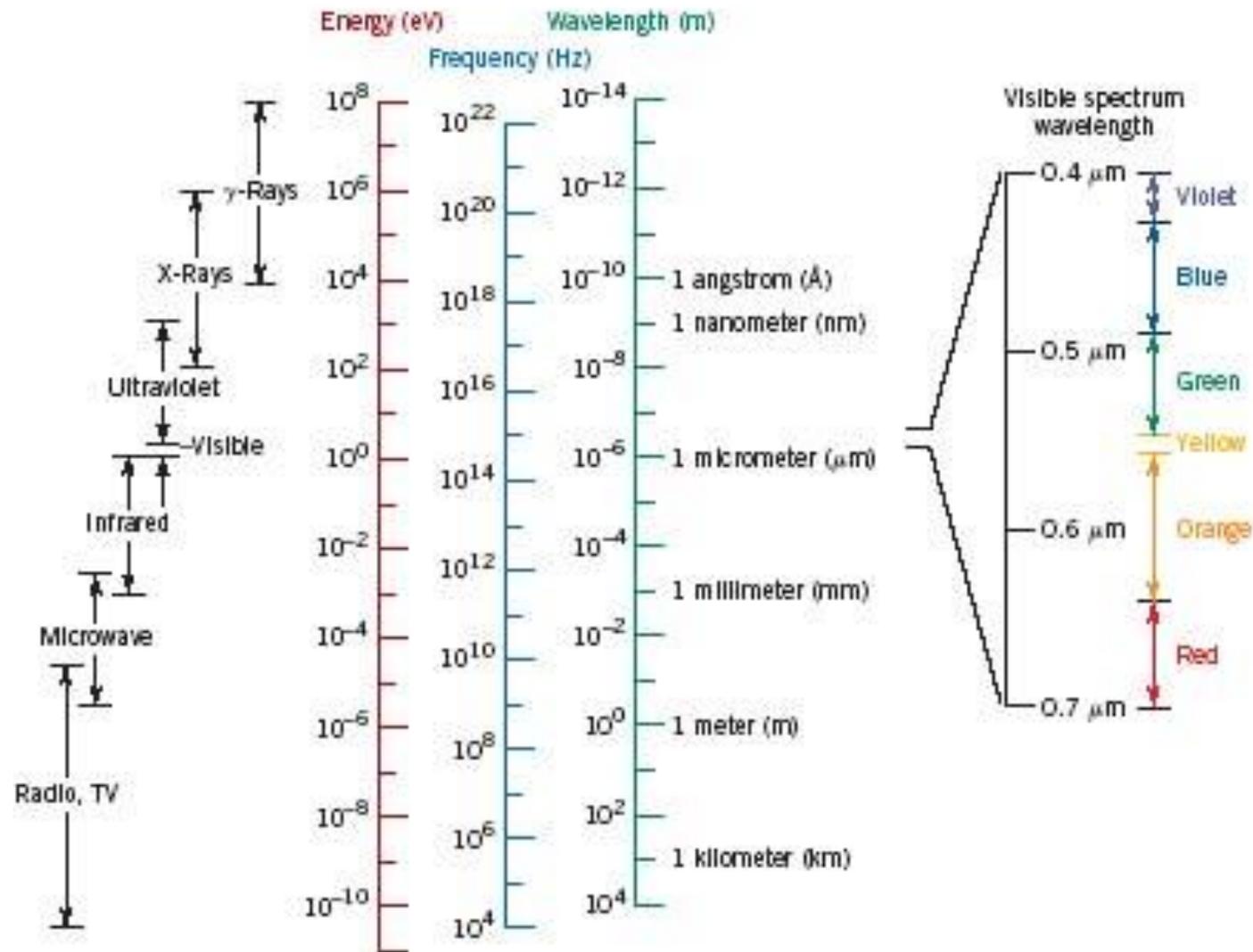
onde: c é a velocidade da radiação eletromagnética
 λ é comprimento de onda
 ν é frequência

(2) constituída por pacotes de energia (mecânica quântica) chamados *fótons*. Os valores de energia possíveis dos fótons são definidos pela expressão:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

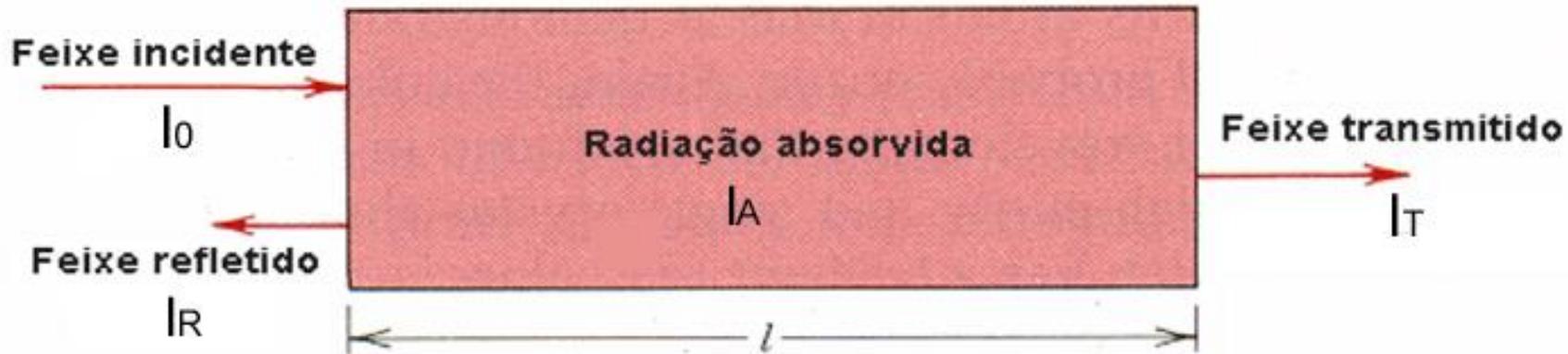
onde: h é a constante de Planck (6.63×10^{-34} J-s)
 E é a energia de um fóton

Espectro das Radiações Eletromagnéticas



INTERAÇÃO DA LUZ COM OS SÓLIDOS

Depende do Comprimento de Onda



$$I_0 = I_T + I_A + I_R \quad (\text{unidades: } W / m^2)$$

- Transmitância ou Transmissividade (T): I_T / I_0
- Absorbância ou Absortividade (A): I_A / I_0
- Refletância ou Refletividade (R): I_R / I_0

$$T + A + R = 1$$

- Materiais Transparentes: $T \gg A + R$ e $T \approx 1$.
- Materiais Opacos: $T \ll A + R$ e $T \approx 0$.
- Materiais Translúcidos: T é pequeno (pouca radiação transmitida)

INTERAÇÃO DA LUZ COM OS SÓLIDOS

Depende do Comprimento de Onda

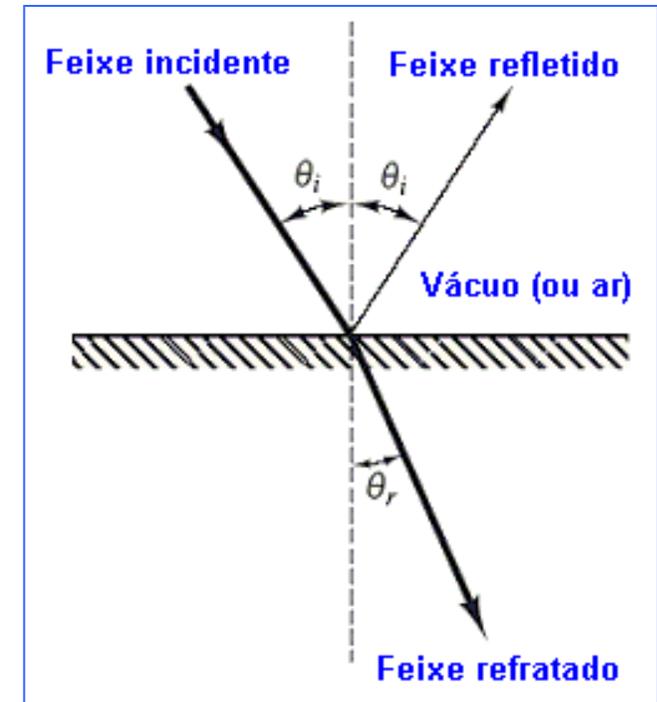
PENETRAÇÃO DA LUZ EM SÓLIDOS

- **Metais** – centenas de nanômetros

Na superfície a luz é absorvida pelos elétrons e 90-95 % é reemitida (5-10 % é transformada em calor)

- **Vidros e polímeros** – dezenas de centímetros

A luz é refratada e pode ser absorvida ou transmitida



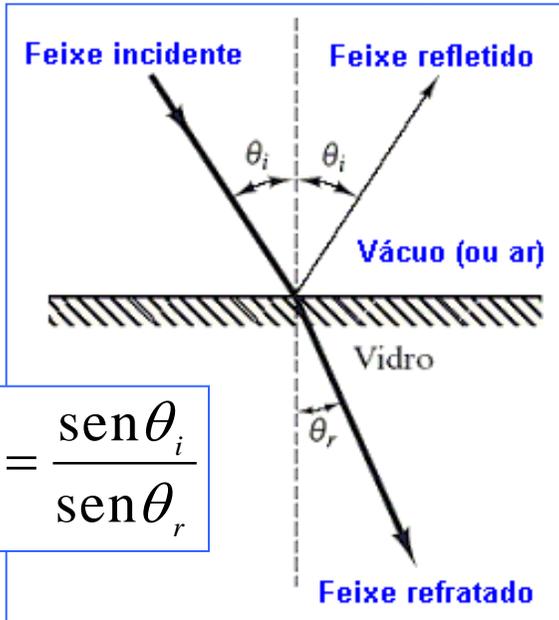
- Índice de refração n

$$n = \frac{\text{sen } \theta_i}{\text{sen } \theta_r}$$

INTERAÇÃO DA LUZ COM OS SÓLIDOS

Depende do Comprimento de Onda

• Índice de refração n



ÍNDICE DE REFRAÇÃO DE ALGUNS MATERIAIS

VIDROS SILICATOS	~1,5
POLÍMEROS	~1,4-1,6
CHUMBO	2,6
COBRE	0,14
PRATA	0,05
OURO	0,21
ALUMÍNIO	0,97
SILÍCIO	3,94
DIAMANTE	2,42

• Refletância ou Refletividade (R): I_R / I_0

Para isolantes

Equação de Fresnel para $\theta_i = 0$

Incidência perpendicular

- do meio 1 (n_1) para o meio 2 (n_2)

$$R = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2$$

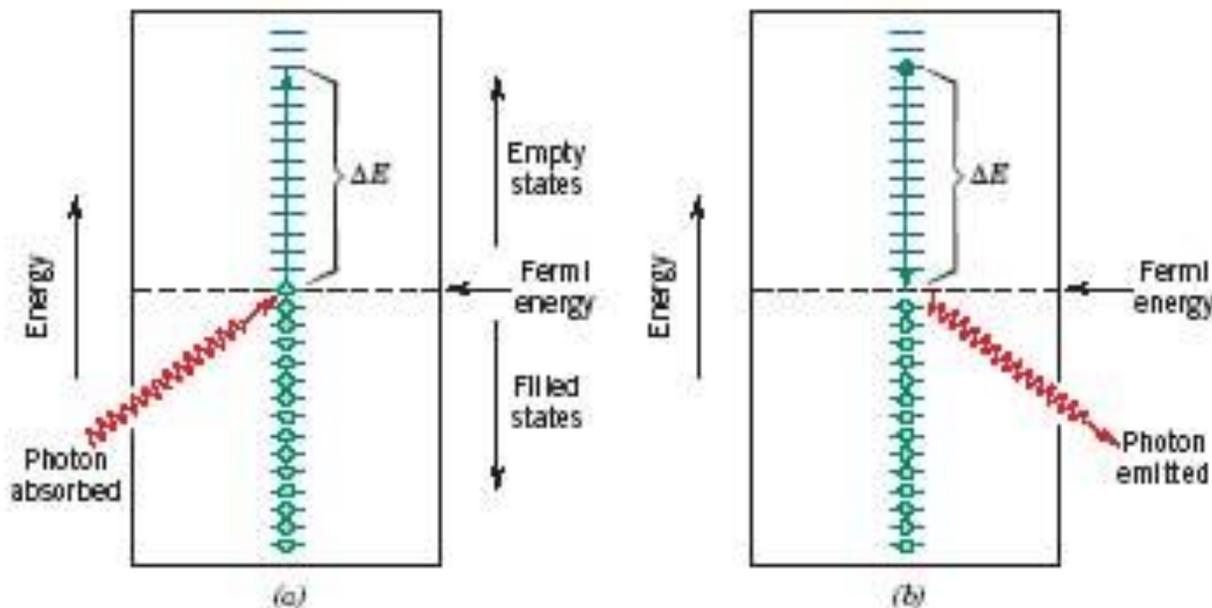
- do vácuo (ou ar) para o meio sólido (n)

$$R = \left(\frac{n - 1}{n + 1} \right)^2$$

Quanto maior n_2 em relação a n_1 maior a refletância R

Propriedades Ópticas dos Metais

- (i) Ao incidirem na superfície de um metal ($\sim 1 \mu\text{m}$), os fótons são absorvidos.
- (ii) A absorção de fótons é acompanhada de excitação de elétrons que passam de níveis energéticos preenchidos para níveis não preenchidos (de maior energia).
- (iii) Os elétrons excitados voltam para os níveis de menor energia (níveis preenchidos), reemitindo fótons.
- (iv) Transições eletrônicas de absorção e emissão de fótons são processos conservativos (isto é, a energia se conserva).
- (v) 90 a 95 % dos fótons incidentes são refletidos e a energia restante é dissipada na forma de calor.

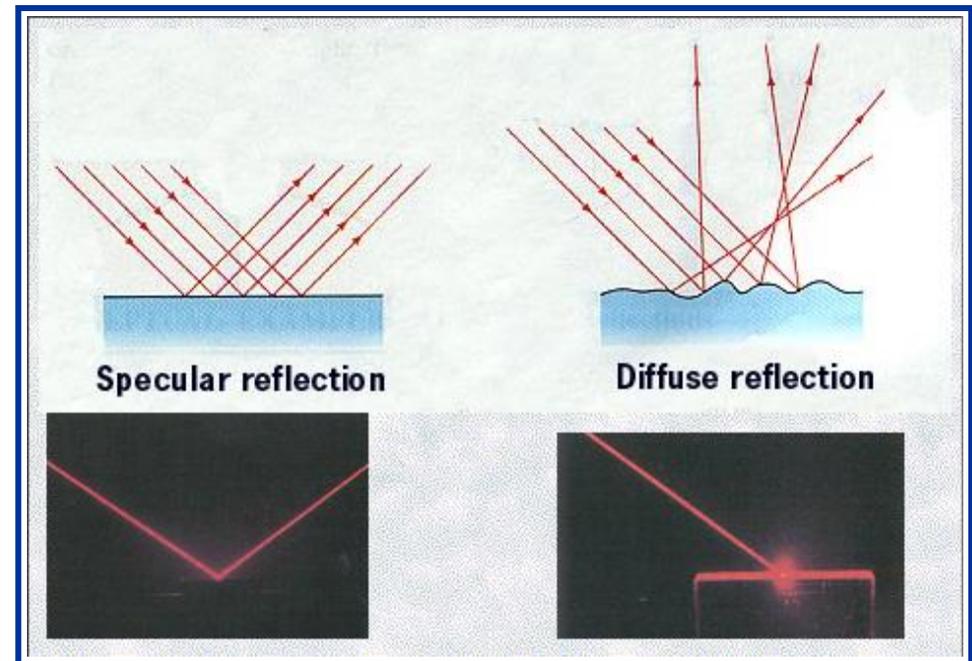


(a) O elétron excitado passa para um nível energético não preenchido. A variação de energia desse elétron, ΔE , é igual à energia do fóton.

(b) Passagem de um elétron de um nível de alta para um nível de baixa energia e conseqüente reemissão de um fóton.

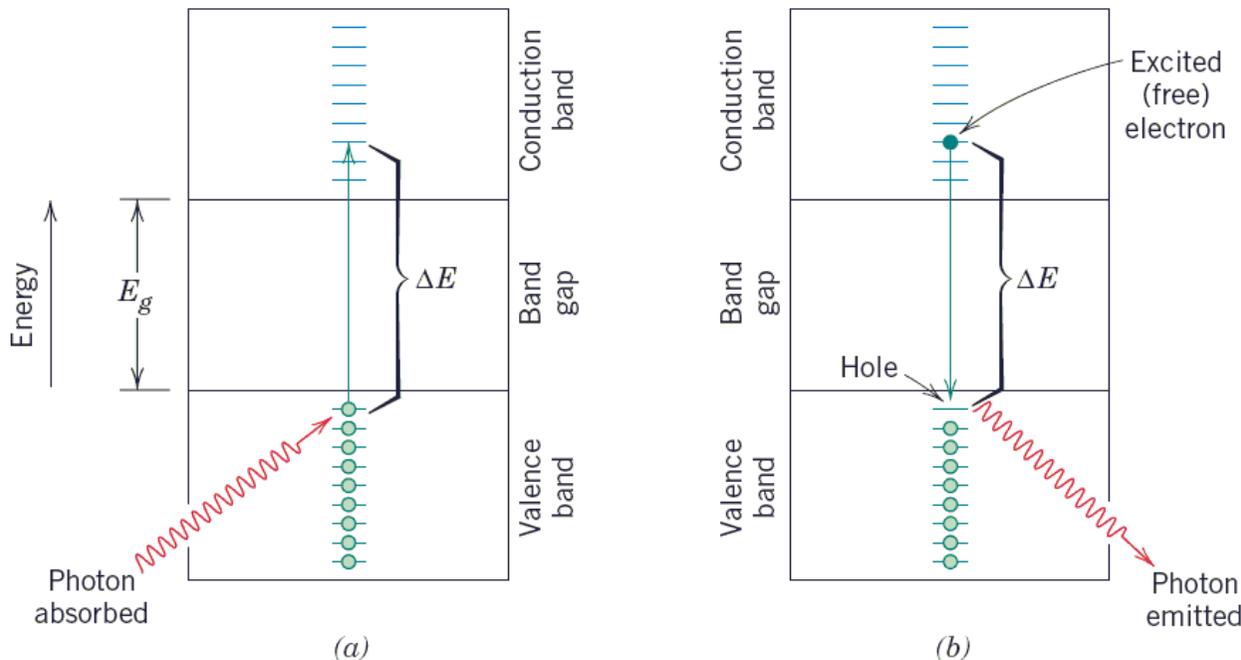
Propriedades Ópticas dos Metais

- Uma vez que os metais são opacos e altamente refletivos, a cor percebida é determinada pela distribuição de comprimentos de onda da radiação que é refletida e não absorvida.
- Os **metais brancos** (Ag, Pt, Al, Zn) **refletem** aproximadamente o mesmo número de **fótons** com as mesmas frequências encontradas no **feixe de luz incidente**.
- Nos **metais vermelhos e amarelos**, tais como Cu e Au, os fótons com pequeno comprimento de onda são absorvidos e a **radiação refletida** é composta preferencialmente de fótons com **comprimentos de onda maiores**.
- Tanto mais efetiva é a absorção quanto mais denso for o material.
- Tanto mais especular é a reflexão quanto mais polida for a superfície.



Propriedades Ópticas dos Materiais Não-Metálicos

- (i) Ao incidirem na superfície de um material não-metálico, somente alguns fótons são absorvidos, pois há um poço de energia que separa as bandas preenchidas das bandas não preenchidas.
- (ii) Os fótons não absorvidos (os que possuem uma energia menor que a do poço de energia) são transmitidos.
- (iii) Os fótons absorvidos são refletidos de forma similar aos metais.
- (iv) No caso das cerâmicas, onde o poço de energia é grande, domina a transmitância.
- (v) Para os materiais semicondutores, o poço de energia é pequeno e domina a refletividade.



(a) O elétron excitado passa para um nível energético não preenchido atravessando o poço de energia. A energia do fóton absorvido, ΔE , é necessariamente maior que a do poço de energia.

(b) Passagem de um elétron de um nível de alta para um nível de baixa energia através do poço de energia e conseqüente reemissão de um fóton.

Propriedades Ópticas dos Materiais Não-Metálicos

- Os fótons da radiação visível possuem energias entre 1,8 eV (vermelho) e 3,1 eV (violeta).

$E_g < 1,8$ - opacos à luz visível (absorção), transparentes p/ energias $< 1,8$

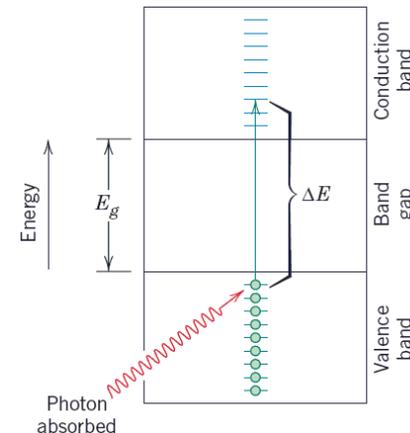
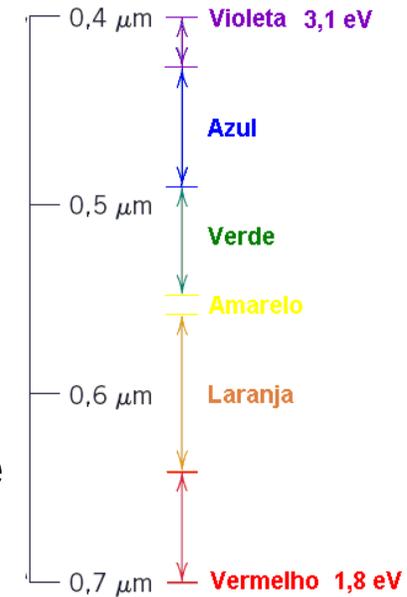
- Os materiais **semicondutores** que têm poço de energia **menor que 1,8 eV** são sempre opacos à luz e possuem um “**aspecto metálico**”.

$3,1 > E_g > 1,8$ - transparentes à luz visível, coloridos

- Os materiais que têm poço de energia entre 1,8 e 3,1 eV são transparentes à luz. Esses materiais são, entretanto, coloridos devido à absorção dos fótons de maior energia.

$E_g > 3,1$ - transparentes à luz visível e incolores

- Os materiais não-metálicos com valores de energia de poço muito altos (maiores que 3,1 eV) são transparentes e incolores para todo o espectro da luz visível.

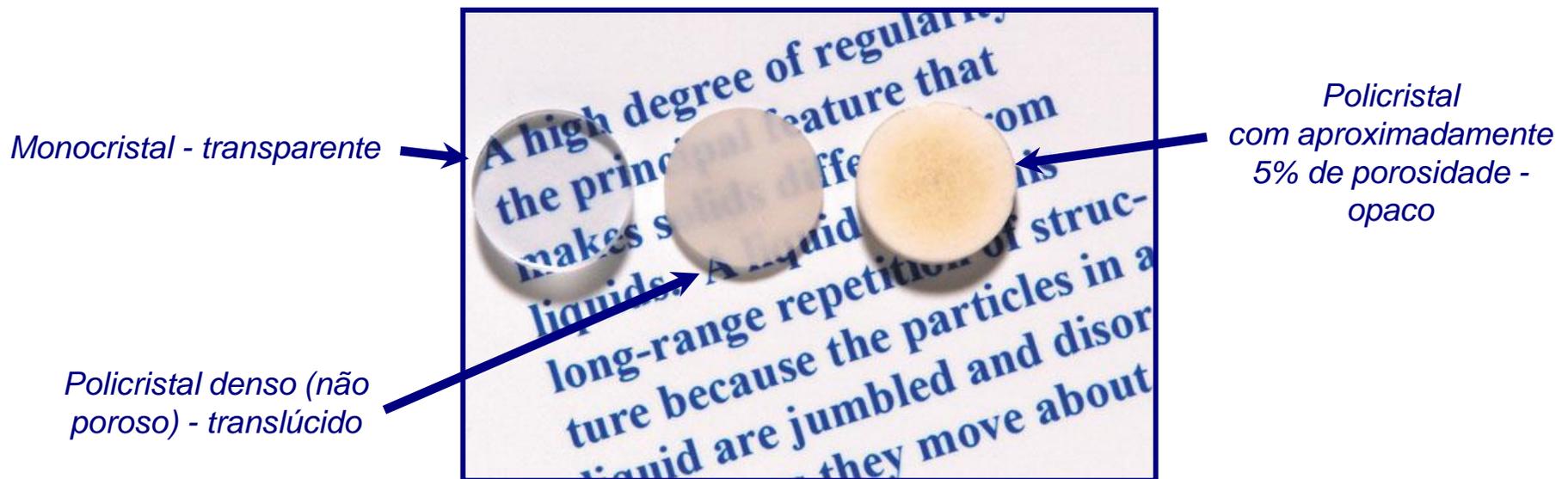


Opacidade e Translucidez de **Materiais Isolantes**

Muitos materiais dielétricos intrinsecamente transparentes podem ser translúcidos ou opacos em razão da reflexão interna e da refração do feixe transmitido. Isso ocorre devido a múltiplos eventos de espalhamento durante interação da luz:

- (i) com contornos de grão
- (ii) com partículas finas dispersas na matriz
- (iii) com a porosidade
- (iv) em materiais com índice de refração anisotrópico

Três amostras de óxido de alumínio (Al_2O_3) com diferentes transmitâncias.



Opacidade e Translucidez de **Polímeros**

Nos polímeros, o grau de translucidez é determinado principalmente pelo grau de cristalinidade. O espalhamento da luz visível ocorre *nos contornos* entre as regiões cristalina e amorfa.

- (i) Em polímeros de alta cristalinidade, os fenômenos de espalhamento são intensos, tornando-os translúcidos ou opacos.
- (ii) Os polímeros amorfos são completamente transparentes.

Por exemplo, o polietileno de alta densidade (de maior grau de cristalinidade) é mais opaco e o polietileno de baixa densidade (mais amorfo) é translúcido.

- As propriedades térmicas, calor específico (C_p), coeficiente linear de expansão (α) e condutividade (k), dos materiais permitem a previsão de seu comportamento quando aquecidos.
- O transporte de energia térmica ocorre através dos elétrons e dos fônons.
- O fluxo de calor q no estado estacionário pode ser descrito por uma equação de difusão:

$$q = -k \frac{dT}{dx}$$

- Os materiais sofrem tensões térmicas devido à expansão/contração. O choque térmico ocorre devido à restrição de variação dimensional e à condutividade térmica k limitada.
- O resultado das interações entre a luz e o sólido depende do comprimento de onda da luz e pode ser resumido em: $I_O = I_T + I_A + I_R$
- A penetração da luz no vidro e em polímeros é sete ordens de grandeza maior que no metal.
- A luz na superfície do metal é absorvida pelos elétrons e reemitida (90-95 %).
- A luz que penetra nos isolantes e semicondutores é refratada e absorvida e/ou transmitida. Radiações com energia inferior ao E_g do semicondutor, são transmitidas, e com energia superior a E_g são absorvidas, tornando o semicondutor opaco.
- Isolantes são translúcidos ou opacos devido a contornos de grão, partículas finas dispersas na matriz, porosidade, índice de refração anisotrópico, etc.

- Capítulos do Callister, 7ª ed., 2008, tratados nesta aula
 - Propriedades Térmicas : Capítulo 19
 - Propriedades Ópticas : Capítulo 21 (seções 1 a 10)

- Outras referências importantes
 - Callister, 5ed, Propriedades Térmicas : Cap. 20; Propriedades Ópticas : Cap. 22 (seções 1 a 4, 7, 9 e 10)
 - Shackelford, 6ª ed., 2008, Comportamento térmico: Cap.07, Comportamento óptico: Cap. 10: seções 1 e 2.
 - Padilha, A.F. – Materiais de Engenharia. Hemus. São Paulo. 1997. Caps.17 e 18.
 - Van Vlack , L. - Princípios de Ciência dos Materiais, 3ª ed.
 - Seções 5-14 e 5-15 (comportamento óptico)
 - Seção 1-3 (comportamento térmico)