



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

## PROPRIEDADES TÉRMICAS E ÓTICAS

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

# PROPRIEDADES TÉRMICAS E ÓTICAS

## Tópicos da aula

### ✓ **Propriedades térmicas**

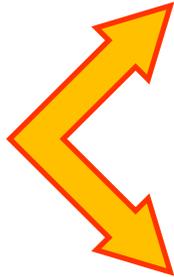
- Capacidade térmica
- Expansão térmica
- Condutividade térmica

### ✓ **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

## PROPRIEDADE TÉRMICA

É a resposta, ou reação, do material à aplicação de calor.

Energia térmica  Energia **vibracional** dos átomos da rede ao redor de suas posições de equilíbrio, e  
Energia **cinética** dos elétrons livres dos átomos.

Energia vibracional  Expansão térmica  
ou dilatação térmica

Energia cinética  Calor específico, e  
Condutividade térmica

## CONCEITOS FUNDAMENTAIS

**Temperatura (T)** – Medida da agitação atômica/molecular ( $^{\circ}\text{C}$ , K, F).

**Calor (Q)** – Energia térmica em trânsito (cal, J, BTU).

**Equilíbrio térmico** – Temperaturas iguais.

**1ª Lei da Termodinâmica** – A mudança na **energia interna (U)** de um sistema fechado é igual a **quantidade de calor** fornecida (**q**) ao sistema menos a **quantidade de trabalho** realizado (**w**) pelo sistema na sua vizinhança.

$$\Delta U = q - w$$

**Obs:** O calor sempre flui espontaneamente do corpo de maior temperatura para o de menor temperatura.

## CAPACIDADE TÉRMICA (C)

- É a razão entre o calor adicionado (ou removido) ( $q$ ) ao sistema e a mudança resultante da temperatura ( $T$ ).

$$C = \delta q/dT \text{ (J/K)}$$

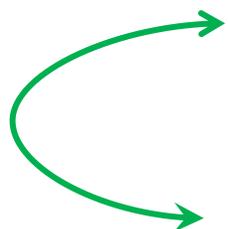
Onde,  $dT$  é a variação da temperatura **absoluta**, que para normalizar toma-se a variação de  $1K$ , e  $\delta q$  é o calor trocado, ou a quantidade de calor necessária para provocar uma variação na temperatura.

- Quantidades derivadas que especificam  $C$  como uma **propriedade intensiva** (independente do tamanho da amostra):
  - ✓ Capacidade térmica molar:  $C/mol$  ou seja,  $J/K \cdot mol$ .
  - ✓ Capacidade térmica específica ou calor específico:  $C/massa$ , ou seja,  $J/K \cdot g$ .

## CAPACIDADE TÉRMICA (C) cont.

- Ela caracteriza o **corpo**, e não a substância que o constitui.
- A grandeza que caracteriza uma **substância** é o **calor específico** (J/K·g).
- Termodinamicamente, ela é considerada em condições de pressão, ou volume, constante:

Capacidade Térmica



Volume constante  $C_V = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_V$

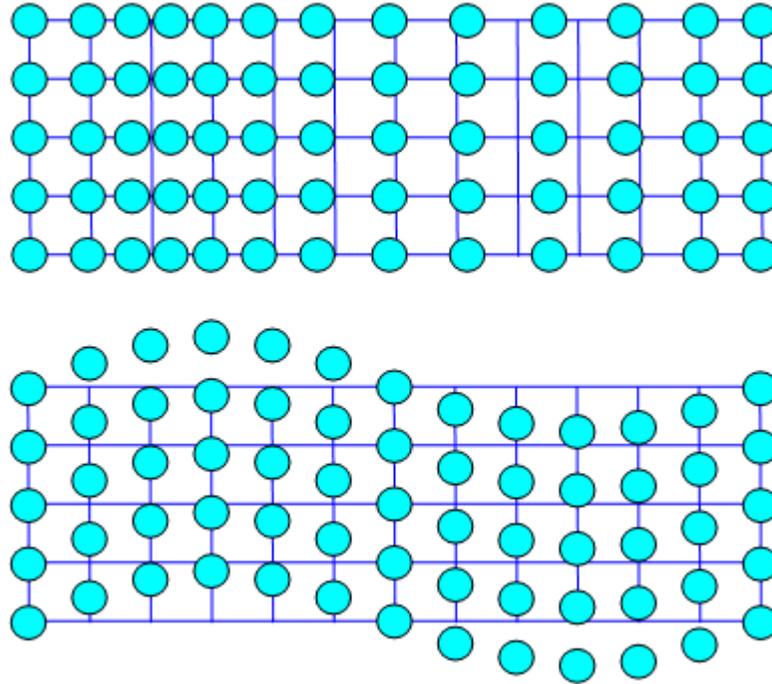
Pressão constante  $C_P = \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_P$

Onde,  $\partial U$  é a variação da energia interna e  
 $\partial H$  é a variação em entalpia.

Microscopicamente, o que absorve energia térmica dentro do material?

- ✓ **Energia térmica** = energia **cinética** dos movimentos atômicos/moleculares + energia **potencial** das distorções das ligações interatômicas/moleculares.
- As **vibrações** de átomos individuais em um sólido não são independentes umas das outras.
- O acoplamento das vibrações atômicas de átomos adjacentes resultam em **ondas** de deslocamentos atômicos.
- A unidade de energia vibracional que surge das oscilações atômicas dentro de um cristal é chamada **fônon** (uma unidade discreta e definida (**quântica**) de energia mecânica vibracional).

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



**Tabela.** Capacidade térmica específica de alguns materiais.\*

Material	$C_p$ (J/kg·K)	Material	$C_p$ (J/kg·K)
PP	1925	Alumínio	900
HDPE	1850	Mármore	860
Madeira	1800	Vidro	840
Náilon 6,6	1670	Aço inox	500
PS	1170	Cobre	390
PTFE (Teflon)	1059	Ouro	133

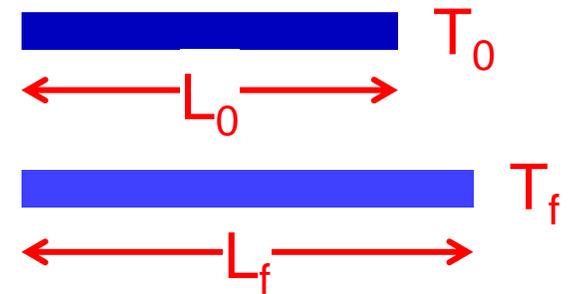
\* Valores a 1 atm e a 20° C. O valor da água é de 4186 J/kg·K e do gelo é de 2092 J/kg·K; o corpo humano apresenta um valor médio de 3470 J/kg·K.

## EXPANSÃO (OU DILATAÇÃO) TÉRMICA

Nos sólidos, ela é produzida pela assimetria das forças de ligação entre os átomos.

A variação do **comprimento** em função da **temperatura** para um dado sólido pode ser expressa por:

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \alpha_L \cdot \Delta T \quad \therefore \quad \alpha_L = \frac{\Delta L}{L \cdot \Delta T}$$



Onde,  $\Delta L = L_f - L_0$  sendo,  $L_0$  e  $L_f$ , os comprimentos inicial e final para uma variação inicial e final de temperatura  $T_0$ ,  $T_f$ , respectivamente.

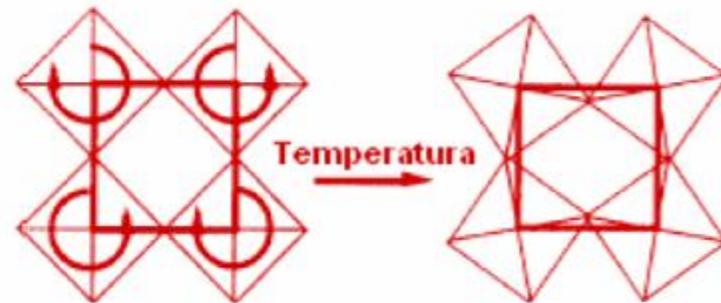
$\alpha_L$  é o coeficiente de expansão térmica **linear** ( $K^{-1}$ ).

A variação dimensional de um corpo com o aquecimento, ou resfriamento, pode ser **volumétrica** e neste caso coeficiente de expansão térmica volumétrico ( $\alpha_V$ ) é expresso por:

$$\alpha_V = \frac{\Delta V}{V \cdot \Delta T}$$

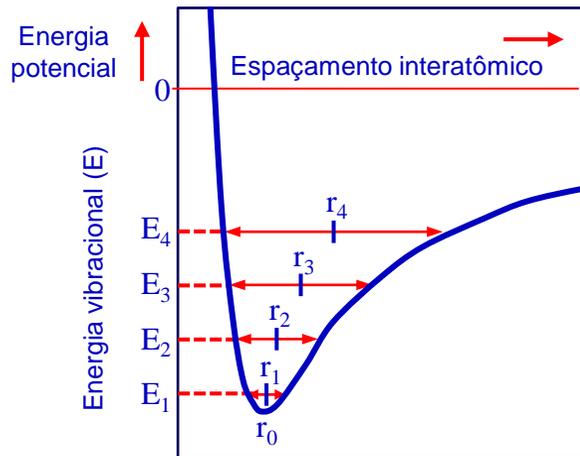
- Em muitos materiais o valor de  $\alpha_V$  é **anisotrópico**, ou seja, que depende da direção ao longo da qual é medida a propriedade.
- Para materiais **isotrópicos**      ➔       **$\alpha_V \approx 3\alpha_L$** .

- Geralmente, o valor de  $\alpha$  aumenta com a elevação da temperatura.
- Quanto maior for a energia da ligação atômica, menor será o aumento na separação interatômica em função da temperatura, produzindo também um menor valor de  $\alpha_L$ .
- Novos sistemas de **óxidos** cerâmicos apresentam  $\alpha$  **negativa**, os quais são de interesse tecnológico e científico (ex. Instrumentos de medição; Resistência ao choque térmico; Dispositivos ópticos; Circuitos eletrônicos, etc).

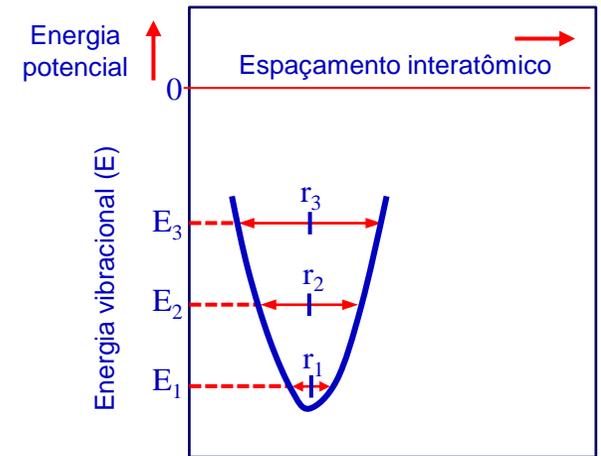


## CONSIDERAÇÕES ATÔMICAS DA EXPANSÃO TÉRMICA

A expansão térmica ( $\alpha$ ) é caracterizada por um aumento na distância média entre átomos.

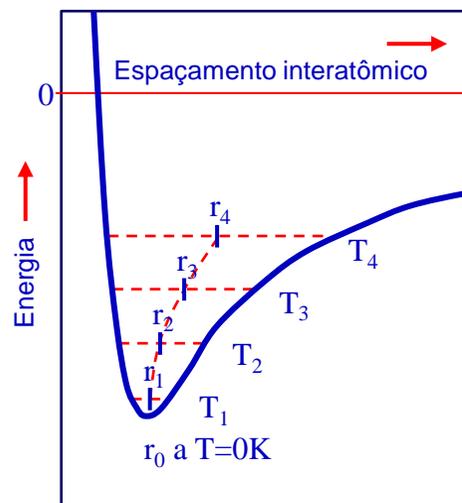


Se  $T_1 > T_2 > T_3 > \dots$   
então,  
 $E_1 > E_2 > E_3 > \dots$

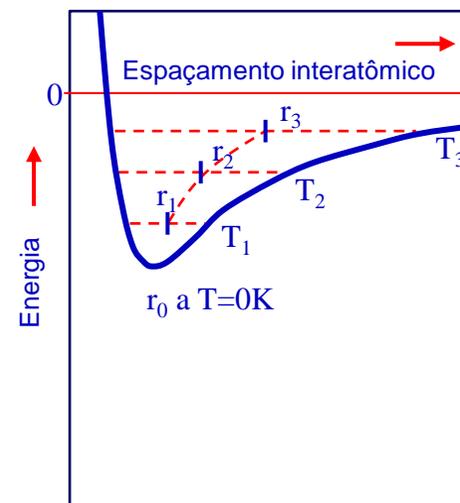


- $r_n$  são as distâncias interatômicas médias representadas pela posição média no poço de potencial.
- $\alpha$  é devida a curvatura assimétrica do poço de energia potencial, porque é requerida mais energia para aproximar os átomos do que para afastá-los (gráfico a esquerda).

A ligação atômica (metal, cerâmica e polímero; forte ou fraca) define a profundidade e largura do poço de potencial, portanto define o coeficiente de dilatação térmica.



> energia de ligação, curva mais **simétrica** <  $\alpha$



< energia de ligação, curva mais **assimétrica** >  $\alpha$

**Tabela.** Coeficiente de expansão térmica de alguns materiais.

<b>Material</b>	$\alpha_L [(\text{°C})^{-1} \cdot 10^{-6}]$	<b>Material</b>	$\alpha_L [(\text{°C})^{-1} \cdot 10^{-6}]$
PP	145-180	Alumínio	23,6
HDPE	106-198	Cobre	17,0
Náilon 6,6	144	Ouro	14,2
PTFE (Teflon)	126-216	Ferro	11,8
Fenol-formaldeído	122	Vidro	9,0
PS	90-150	Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	7,6
		Pirex	3,3

O conhecimento da expansão térmica de um material é muito importante para a projeto de materiais, componentes, e estruturas em materiais de engenharia.

**Exemplo 1:** Materiais revestidos com filmes ou lâminas.

Quando o coeficiente de expansão térmica do substrato for acentuadamente diferente daquele do revestimento, pode ocorrer o descolamento da camada ou trincar.

**Exemplo 2:** Peças em contato que possuem movimento relativo entre si.

Durante o serviço ocorre aquecimento devido ao atrito, ocasionando variações dimensionais nos componentes. Um coeficiente de expansão térmica distinto entre as peças em contato acarreta desajuste dimensional.

**Consequência:** engripamento, vibrações e ruído; desgaste acelerado em pontos específicos.

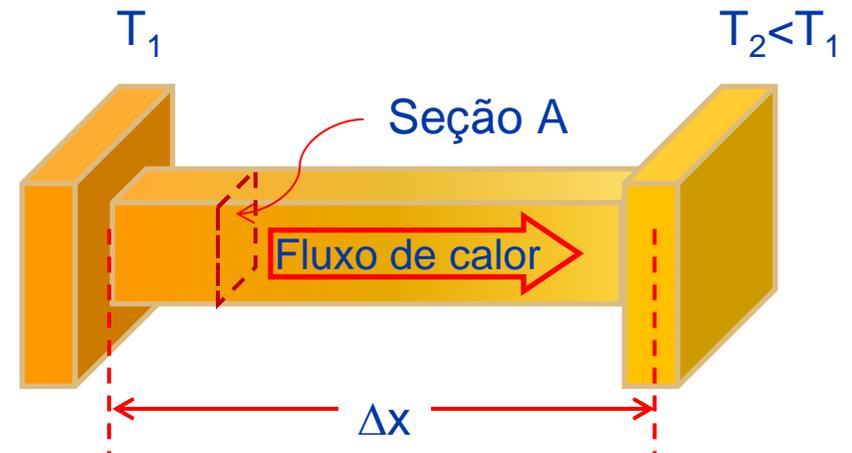
## FLUXO DE CALOR ( $J_q$ ) EM ESTADO ESTACIONÁRIO

É a quantidade de calor ( $\dot{q}$ ) que atravessa o condutor por unidade de área ( $A$ ) e de tempo e é dada por:

$$\frac{\dot{q}}{A} = J_q = -k \frac{dT}{dx} \quad (\text{em J/m}^2 \cdot \text{s})$$

### 1ª lei de Fourier

Onde,  $k$  é uma característica do material chamada **condutividade térmica** (dada em J/m·s·K ou W/m·K); o sinal é negativo porque o calor é contrário ao gradiente de temperatura.



Esquema da condução de calor

**Tabela.** Condutividade térmica ( $k$ ) de alguns materiais.

Material	$k$ (W/m·K)	Material	$k$ (W/m·K)
Prata	429	Ar	0,023
Cobre	398	PEAD	0,46-0,50
Ouro	315	PTFE	0,27
Alumínio	247	Náilon 6,6	0,25
Grafite	150	PP	0,24
Ferro	80	PS	0,16
Alumina	39	Espuma de PS	0,04
Quartzo	10	PU	0,31
Pirex	1,4	Espuma de PU	0,03

# FENÔMENOS NA CONDUÇÃO TÉRMICA DOS MATERIAIS

$$k = k_f + k_e \left\{ \begin{array}{l} k_f: \text{condutividade térmica por fônons;} \\ k_e: \text{condutividade térmica por elétrons livres.} \end{array} \right.$$

<b>MATERIAL</b>	<b>TIPO DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA</b>	
Metal	Vibração dos átomos e movimentação dos elétrons	$k_e \gg k_f$
Cerâmico	Vibração dos átomos	$k_f \gg k_e$
Polímero	Vibração/rotação da cadeias moleculares	

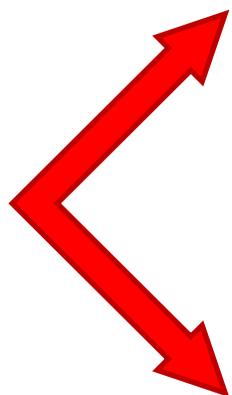
## CONDUTIVIDADE TÉRMICA VERSUS TEMPERATURA

**Maior** energia dos elétrons  $\equiv$  **maior** número de portadores



MAIOR CONDUTIVIDADE

**Mais vibração** da rede



$\equiv$  **maior** contribuição dos fônons



MAIOR CONDUTIVIDADE

$\equiv$  **maior** dispersão dos elétrons



MENOR CONDUTIVIDADE

## TENSÃO TÉRMICA

- Pode ser gerada:
- Pela expansão/contração térmica restrita; ou,
  - Por gradientes de temperatura que levam a mudanças dimensionais diferenciadas em diferentes partes do corpo sólido.

Seja uma barra com deformação axial restrita. Então,

$$\sigma = E\alpha_L\Delta T$$

Onde,  $E$  = módulo elástico;  $\alpha_L$  = coeficiente de expansão térmica linear;  
 $\Delta T$  = mudança de temperatura.

Tensão térmica {

- Deformação plástica – material dúctil.
- Fratura – material frágil.

## TENSÕES DEVIDO AO GRADIENTE DE TEMPERATURA

- Aquecimentos/resfriamentos rápidos podem resultar em gradientes de temperatura significativos.
  - ✓ Expansão confinada em partes mais frias do corpo.
  - ✓ Tensões de tração introduzidas na superfície no resfriamento rápido.

# PROPRIEDADES ÓTICAS

## PROPRIEDADES ÓTICAS

- Este é um campo enorme que envolve vários fenômenos.
- As propriedades óticas de um material muda, ou afeta, as características da luz que passa através dele, modificando sua intensidade ou seu vetor de propagação.

Arco Iris

Aurora polar

Miragem

Halo

Fibras óticas

Células fotovoltaicas

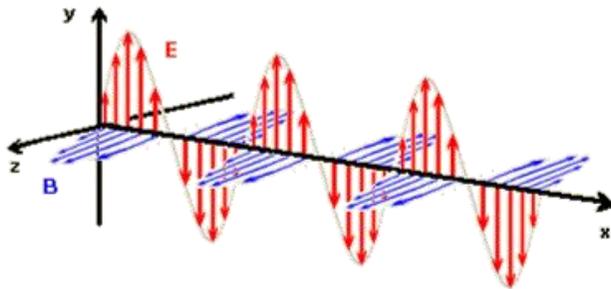
Laser

Holografia

Coloração dos corpos

## NATUREZA DA ENERGIA RADIANTE

- A teoria de Maxwell e aquela quântica fornecem uma explicação teórica consistente dos fenômenos óticos (dualidade):
  - ✓ Ondas (clássica): os campos elétrico ( $E$ ) e magnético ( $B$ ) são perpendiculares entre si e à direção de propagação.

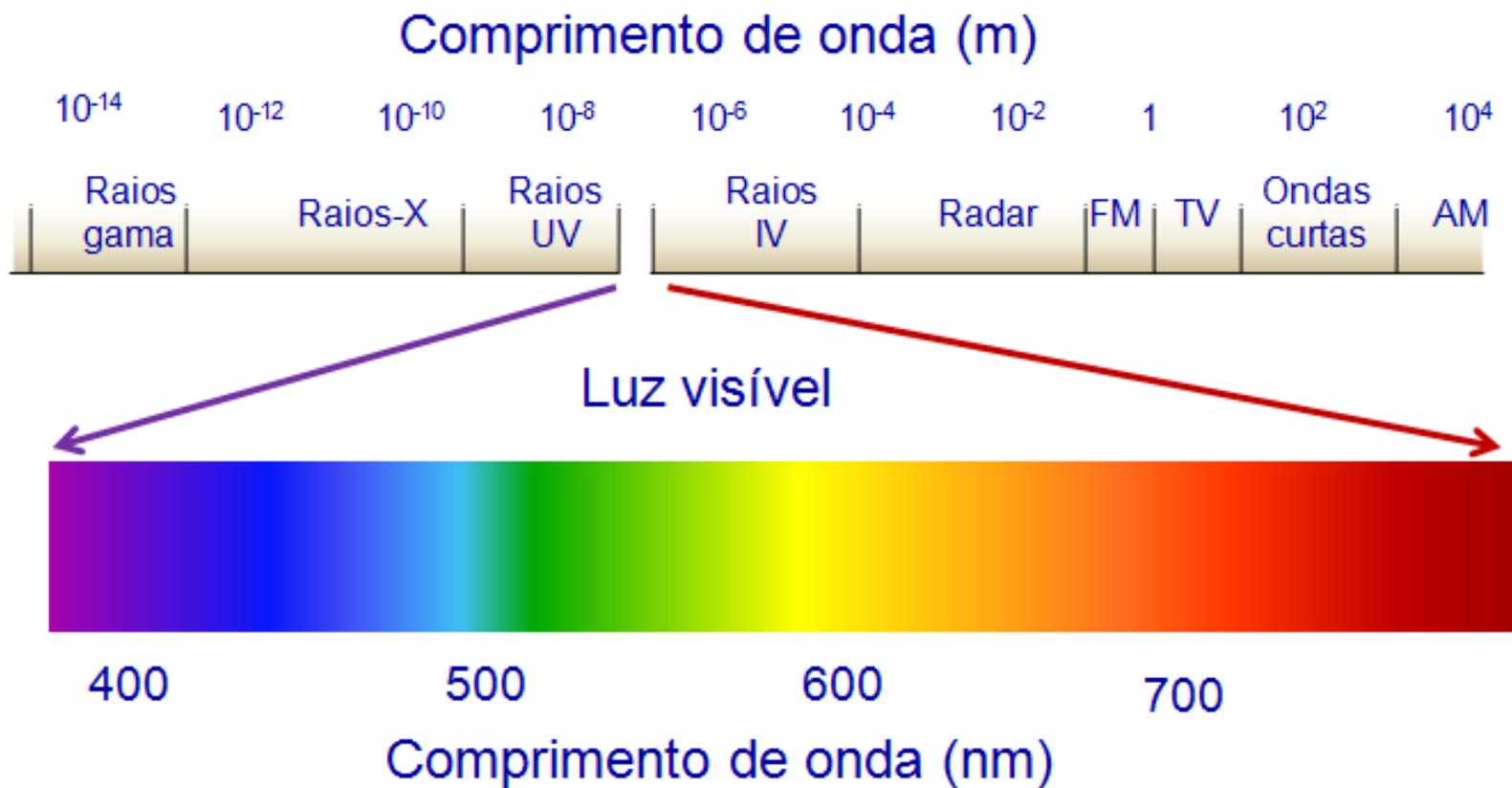


$$c = \frac{1}{(\epsilon_0 \mu_0)^{1/2}}$$

$c$  : velocidade da radiação eletromagnética =  $3 \cdot 10^8$  m/s no vácuo;  
 $\epsilon_0$  : permissividade elétrica no vácuo;  
 $\mu_0$  : permeabilidade magnética no vácuo.

- ✓ Pacotes de energia ou fótons (quântica): geralmente, o conceito de fóton é necessário nos tratamentos da interação da radiação com a matéria.

# Espectro das Radiações Eletromagnéticas

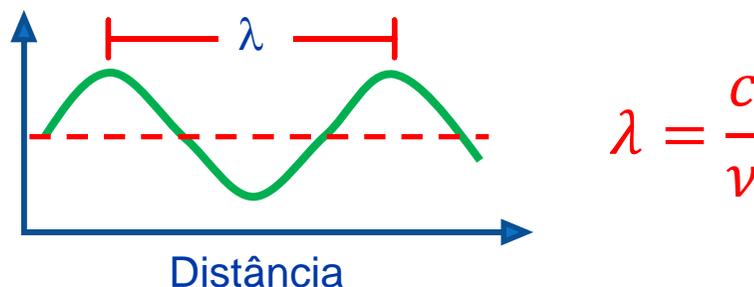


## **Tabela.** Resumo breve da produção e utilização das ondas eletromagnéticas (EM).

<b>Tipo de onda EM</b>	<b>Produção</b>	<b>Aplicações</b>	<b>Relações com a ciência humana</b>	<b>Questões</b>
Radio & TV	Aceleração de cargas	Controles de comunicação remotas	Imagem por ressonância magnética	Requer controles para o uso da banda
Micro-ondas	Aceleração de cargas e agitação térmica	Comunicação, fornos, radar	Aquecimento profundo	Uso no telefones celulares
Infravermelho	Agitação térmica e transições eletrônicas	Imagem térmica, aquecimento	Absorvida pela atmosfera	Efeito estufa
Luz visível	Agitação térmica e transições eletrônicas	Onipresente	Fotossíntese, visão humana	
Ultravioleta	Agitação térmica e transições eletrônicas	Esterilização, Controle do câncer	Produção da vitamina D	Destruição do ozônio, causa câncer
Raios-x	Transições eletrônicas internas	Segurança, médico	Diagnóstico médico, terapia do câncer	Causa câncer
Raios- $\gamma$	Decaimento nuclear	Segurança, medicina nuclear	Diagnóstico médico, terapia do câncer	Causa câncer, danos por radiação

## NOMENCLATURA

**Comprimento de onda** ( $\lambda$ ) – é a distância na direção da propagação de uma onda periódica entre dois pontos sucessivos onde a fase é a mesma em um determinado tempo. A unidade no SI é **m**.



**Frequência** ( $\nu$ ) – é o número de oscilações por segundo descrita pela onda eletromagnética. A unidade no SI é o **hertz** (1 Hz = 1 ciclo/s).

O conteúdo de energia de um fóton ( $E$ ) é diretamente proporcional à frequência ( $\nu$ ) e inversamente proporcional ao comprimento de onda ( $\lambda$ ).

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

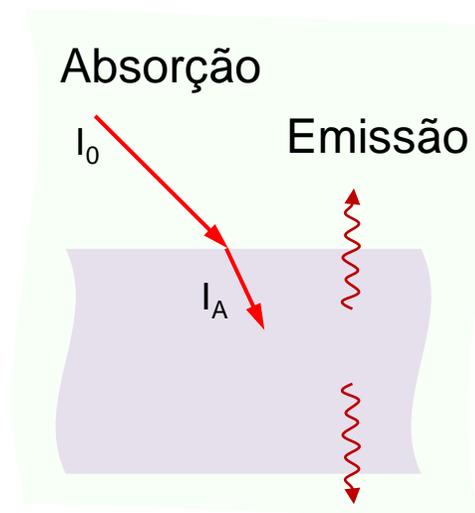
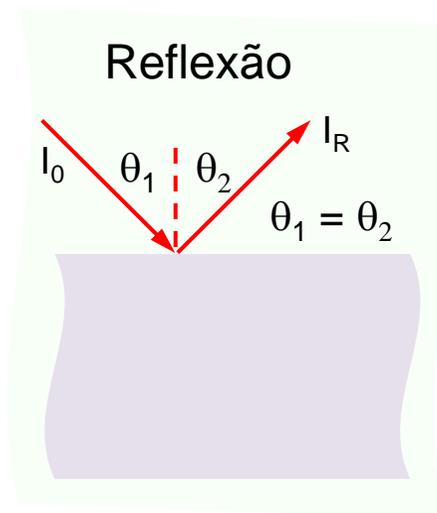
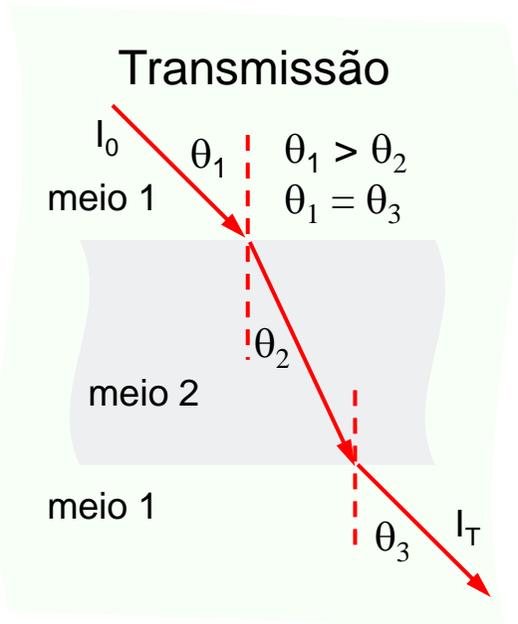
Onde,  $h$  é a constante de Planck que é  $\sim 6,63 \times 10^{-34}$  J.s.

**Tabela.** Transições atômicas e moleculares mais importantes pertinentes as regiões sucessivas desde os raios-x até o micro-ondas.

Região	$\lambda$	Transição
Raios-x	$10^{-2}$ - $10^2$ Å	Elétrons da camada K e L
UV afastado	10-200 nm	e <sup>-</sup> de camada intermediária
UV próximo e visível	200-750 nm	e <sup>-</sup> de valência
IV próximo e médio	0,75-50 $\mu$	Vibrações moleculares
IV afastado	50-1000 $\mu$	Rotações moleculares e vibrações fracas
Micro-ondas	0,1-100 cm	Rotações moleculares

## INTERAÇÕES DA LUZ COM OS SÓLIDOS

- Quando um feixe de luz se propaga de um meio para outro, podem ocorrer os seguintes fenômenos:
  - ✓ Transmissão;
  - ✓ Absorção;
  - ✓ Reflexão na interface entre os dois meios.



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

OU

$$T + A + R = 1$$

Onde,

$I_0$  é a intensidade do feixe incidente à superfície de um meio sólido e  $I_T$ ,  $I_A$ , e  $I_R$  são as intensidades dos feixes transmitidos, absorvidos e refletidos, respectivamente.

$T$  é a transmitância ( $I_T / I_0$ );

$A$  é a absorbância ( $I_A / I_0$ ); e,

$R$  é a refletância ( $I_R / I_0$ ).

- ✓ Materiais transparentes:  $T \gg A + R$
- ✓ Materiais opacos:  $T \ll A + R$
- ✓ Materiais translúcidos:  $T$  pequeno; a luz é transmitida difusamente.

- Os metais são opacos na região do visível.
- Os vidros são transparentes e quando essa propriedade é muito importante, é essencial que sejam homogêneos e sem poros.
- A transparência em polímeros é principalmente verificada em polímeros **amorfos** e os representantes principais são o poli(metacrilato de metila) (PMMA), poli(carbonato) (PC) e o poli(estireno) (PS); porém, alguns semicristalinos podem apresentar transparência desde que tenham cristalitos muito pequenos (menores que o comprimento de onda da luz que o atravessa).

## PROPRIEDADES ÓTICAS DOS METAIS

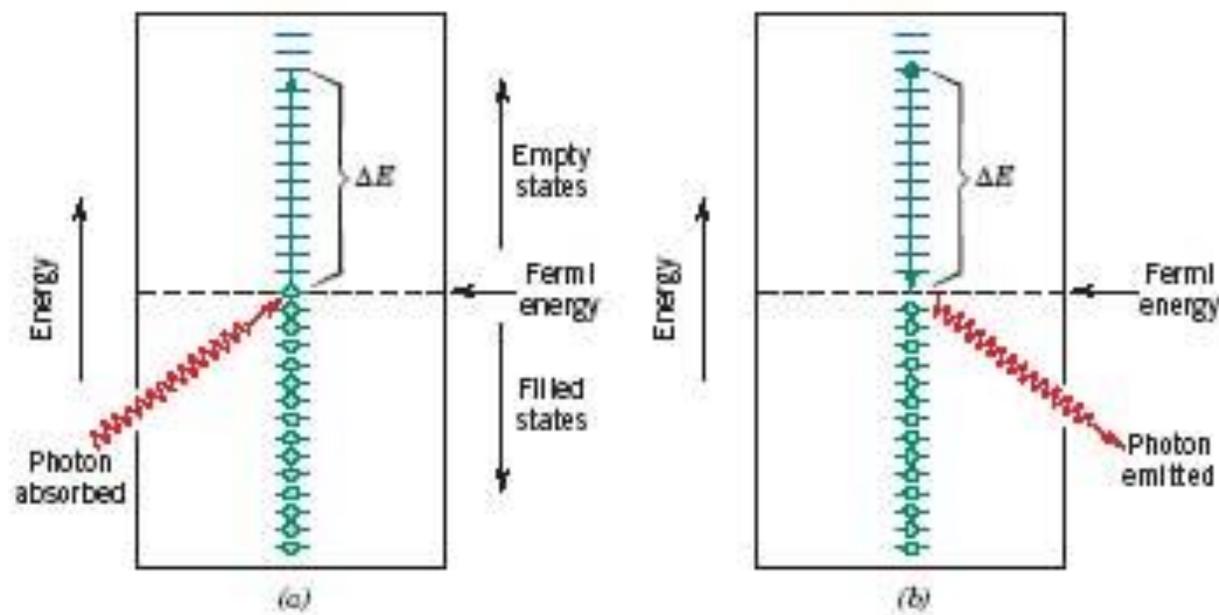
Seja o diagrama de energia para os metais: 



- $E_F$  é a energia de Fermi e é aquela abaixo da qual, a 0K, todos os níveis eletrônicos estão cheios e acima vazios.
- Para  $T > 0K$ ,  $E_F$  é a energia na qual metade dos estados de energia disponíveis estão ocupados.

## PROPRIEDADES ÓTICAS DOS METAIS

- A radiação incidente ( $I_0$ ), com  $\lambda$  na faixa do visível, é absorvida pelos elétrons promovendo-os para posições desocupadas acima do nível de Fermi.
- Os elétrons que foram promovidos acima do nível de Fermi decaem para níveis menores de energia e emitem luz.
- Assim a luz absorvida pela superfície metálica é re-emitida (refletida) na forma de luz visível.

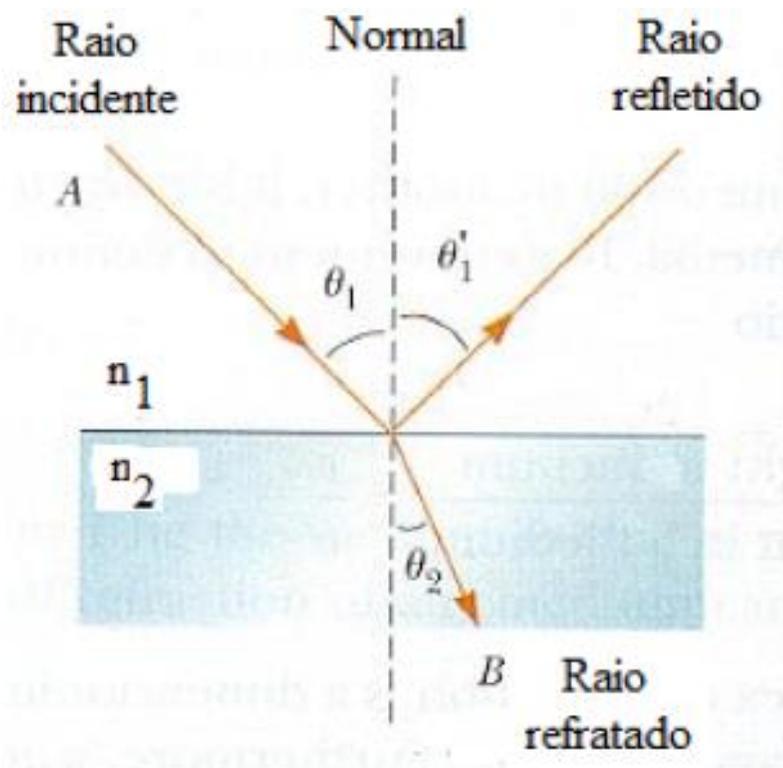


## PROPRIEDADES ÓTICAS DOS METAIS

- ✓ Os metais são opacos e refletivos ( $I_R / I_0 = 0,90-0,95$ ).
- ✓ 90 a 95 % dos fótons incidentes são refletidos e a energia restante é dissipada na forma de calor.
- ✓ A cor dos metais depende dos  $\lambda$  refletidos.
- Os metais são transparentes às radiações de comprimentos de onda menores (raios X e raios  $\gamma$ ).
- 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.

## PROPRIEDADES ÓTICAS DOS MATERIAIS NÃO-METÁLICOS

- Outros fenômenos relevantes são a refração e a transmissão.
- Quando a propagação da luz passa de um meio 1 para um meio 2 podem acontecer:



Onde,  $n$  é o **índice de refração** que corresponde a seguinte relação:

$$n = \frac{c}{v}$$

Sendo  $c$  a velocidade da luz no vácuo e  $v$  a velocidade da luz no material.

- O valor de  $v \leq c$ , assim, o  $n$  é sempre  $>1$ .

## PROPRIEDADES ÓTICAS DOS MATERIAIS NÃO-METÁLICOS

**Tabela.** Índice de refração ( $n$ ) médio de alguns materiais

<b>Material</b>	<b>n</b>	<b>Material</b>	<b>n</b>
Poliestireno	1,60	Diamante	2,42
Polietileno	1,51	Alumina	1,76
Poli(metacrilato de metila)	1,49	Quartzo	1,55
Polipropileno	1,49	Pirex	1,47
Teflon	1,35	Ar	1,00

# PROPRIEDADES ÓTICAS DOS MATERIAIS NÃO-METÁLICOS

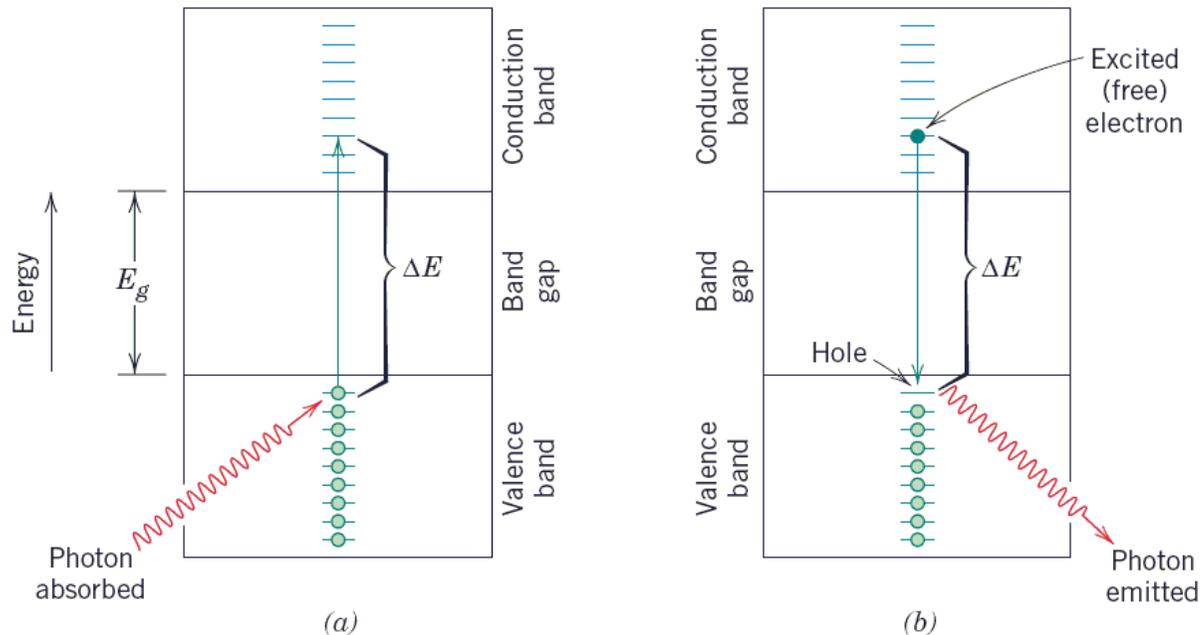
Ao incidirem na superfície de um material não-metálico, somente alguns fótons são absorvidos, pois há um poço de energia que separa as bandas preenchidas das bandas não preenchidas.

(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.



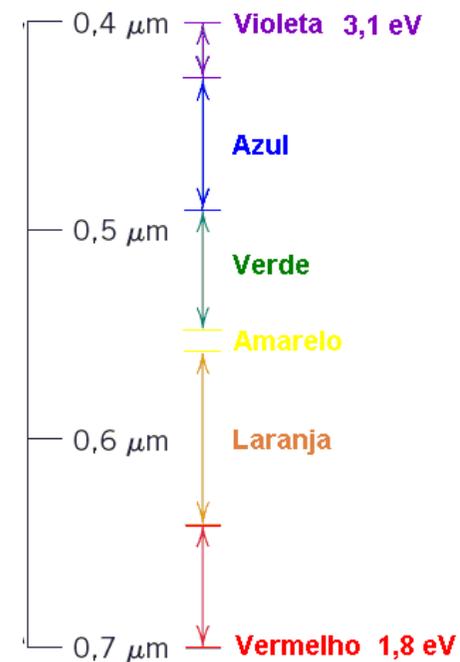
# PROPRIEDADES ÓTICAS DOS MATERIAIS NÃO-METÁLICOS

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

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

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

- Os fótons da radiação visível possuem energias entre 1,8 eV (vermelho) e 3,1 eV (violeta).
- Os materiais **semicondutores** que têm poço de energia **menor que 1,8 eV** são sempre opacos à luz e possuem um “**aspecto metálico**”.
- 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.
- 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 NÃO METÁLICOS**

- Um mesmo material pode ser transparente, translúcido ou opaco, dependendo da **reflexão** interna e da **refração** do feixe transmitido.

*Monocristal  
transparente* →



*Policristal denso  
(não poroso)  
translúcido*

*Policristal poroso  
(≈ 5%) opaco*

Óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

## FATORES QUE INFLUENCIAM A TRANSPARÊNCIA DOS MATERIAIS

- Contornos de grão;
- Partículas finas dispersas na matriz;
- Porosidade;
- Índice de refração anisotrópico.
- Nos polímeros o grau de cristalinidade determina a sua transparência, pois ocorrem espalhamentos de luz nas interfaces das fases amorfas e cristalinas.
  - ✓ O tamanho dos cristais e a sua distribuição de tamanho também interferem na sua transparência.
- Os polímeros amorfos são transparentes.

## REFERÊNCIAS

Callister, 7ª ed. (2008) e 8ª ed. (2012), capítulos 19 (Propriedades Térmicas) e 21 (Propriedades Ópticas) [seções 1 a 10].

### Outras referências importantes

- Callister, 5ª ed. (2000), capítulos 20 (Propriedades Térmicas) e 22 (Propriedades Ópticas) [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. (1998), Seções 5-14 e 5-15 (comportamento óptico) e Seção 1-3 (comportamento térmico).

[http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/thermal\\_electrical/nonmetal\\_thermal.php](http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/thermal_electrical/nonmetal_thermal.php)

Portal que ilustra os fônons óticos e acústicos em uma rede 2D

# ANEXO

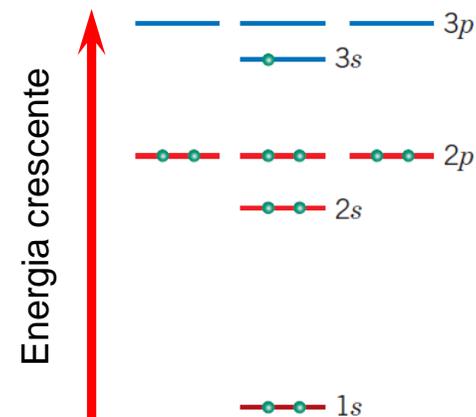
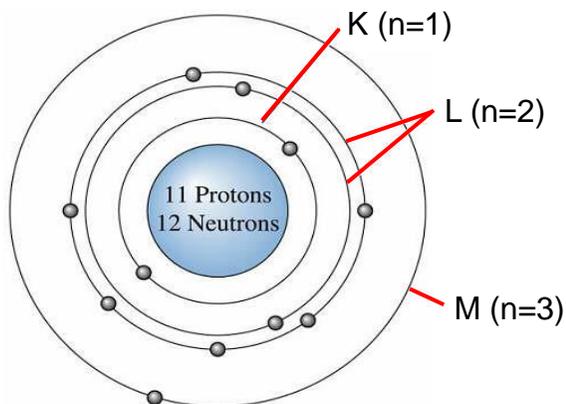
$C_p$  é sempre maior do que  $C_v$ . Por que?

Informação: A diferença entre  $C_p$  e  $C_v$  é muito pequena para sólidos e líquidos, mas muito grande para os gases.

Porque os valores a pressão constante incluem também a energia térmica que é usada no trabalho para expandir a substância contra essa pressão constante, quando a sua temperatura aumenta.

- **Permissividade elétrica no vácuo** ( $\epsilon_0$ ) (Farad/metro [F/m] no SI) – é a medida da resistência que é encontrada quando se forma um campo elétrico no meio, ou seja, é a medida de como um campo elétrico afeta e é afetado por um meio dielétrico.
- **Permeabilidade magnética no vácuo** ( $\mu_0$ ) ou constante magnética (Henry/metro [H/m]) – é a medida da habilidade de um material suportar a formação de um campo magnético dentro dele; ou seja, é o grau de magnetização que o material obtém em resposta a um campo elétrico aplicado.

Representação dos estados de energia ocupados e não ocupados para um átomo de sódio ( $^{23}_{11}\text{Na}_{12}$ ).



	elétron	$n$	$l$	$m$	$m_s$
3s <sup>1</sup>	11	3	0	0	+1/2 ou -1/2
2p <sup>6</sup>	10	2	1	+1	-1/2
	9	2	1	+1	+1/2
	8	2	1	0	-1/2
	7	2	1	0	+1/2
	6	2	1	-1	-1/2
2s <sup>2</sup>	5	2	1	-1	+1/2
	4	2	0	0	-1/2
	3	2	0	0	+1/2
1s <sup>2</sup>	2	1	0	0	-1/2
	1	1	0	0	+1/2

