

Propriedades Térmicas de Materiais

prof. Rafael Salomão
prof. Vera Lúcia Arantes

2014

- Expansão térmica
- Calor específico e capacidade calorífica
- Condutividade térmica
- Choque térmico

“São as propriedades relacionadas à **resposta dos materiais** à uma **mudança de temperatura**”

- Mudança de temperatura?
Transferência de energia (cinética e potencial) entre dois pontos

1. O que acontece quando um material é aquecido?

- **Primeira pergunta a ser feita: *Que tipo de material é esse?***

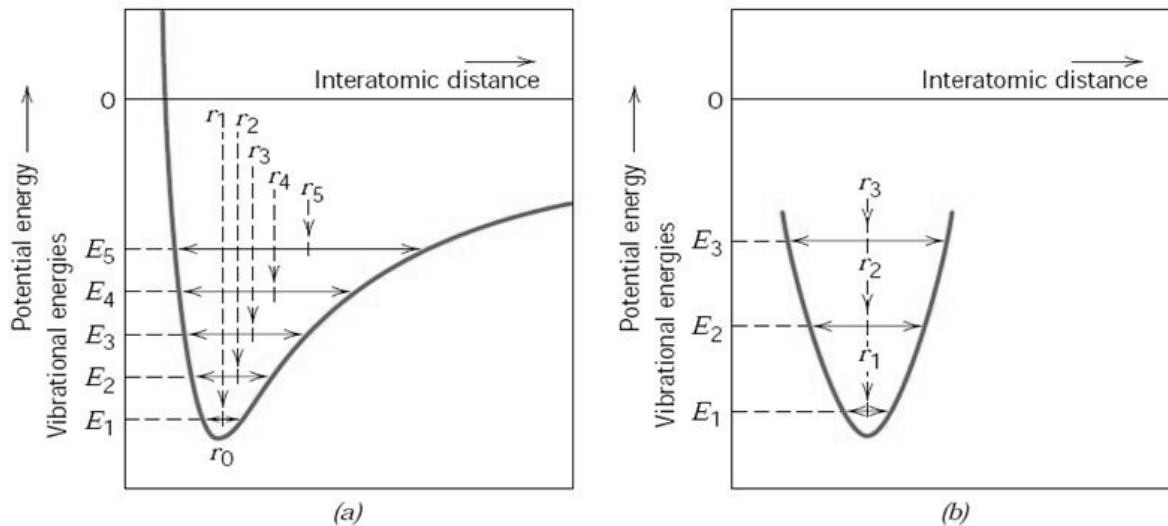
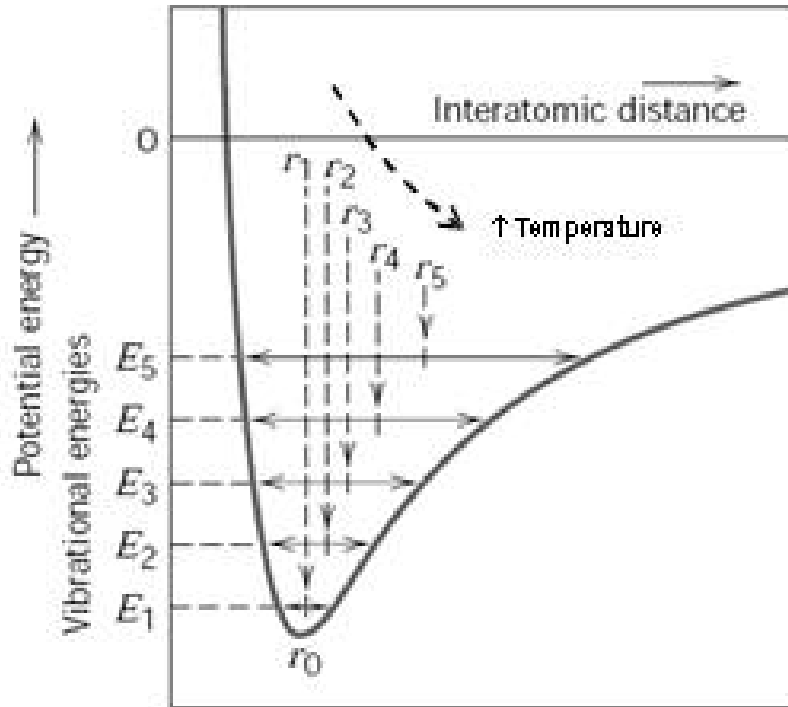


FIGURE 17.3 (a) Plot of potential energy versus interatomic distance, demonstrating the increase in interatomic separation with rising temperature. With heating, the interatomic separation increases from r_0 to r_1 to r_2 , and so on. (b) For a symmetric potential energy-versus-interatomic distance curve, there is no increase in interatomic separation with rising temperature (i.e., $r_1 = r_2 = r_3$). (Adapted from R. M. Rose, L. A. Shepard, and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. 4, *Electronic Properties*. Copyright © 1966 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.)

Mudança na frequência e amplitude das vibrações na posição de equilíbrio



T1 → E1 → r1

T1 < T2 → E2 → r2

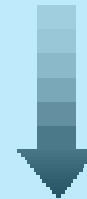
T2 < T3 → E3 → r3

T3 < T4 → E4 → r4

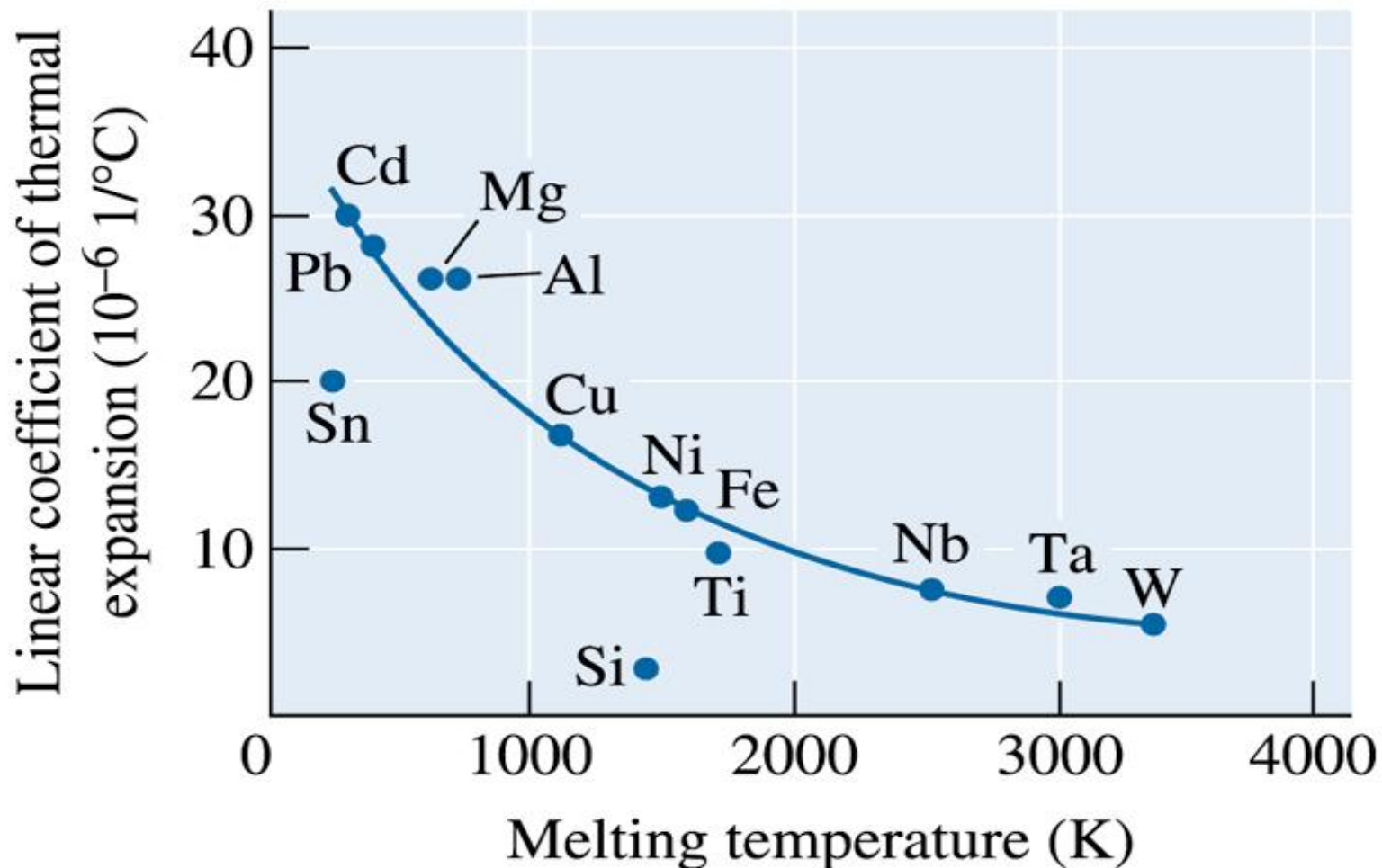
T4 < T5 → E5 → r5

Com ↑ temperatura:

- ↑ **Efeito da assimetria**
- ↑ **≠ em relação ao valor médio da r**



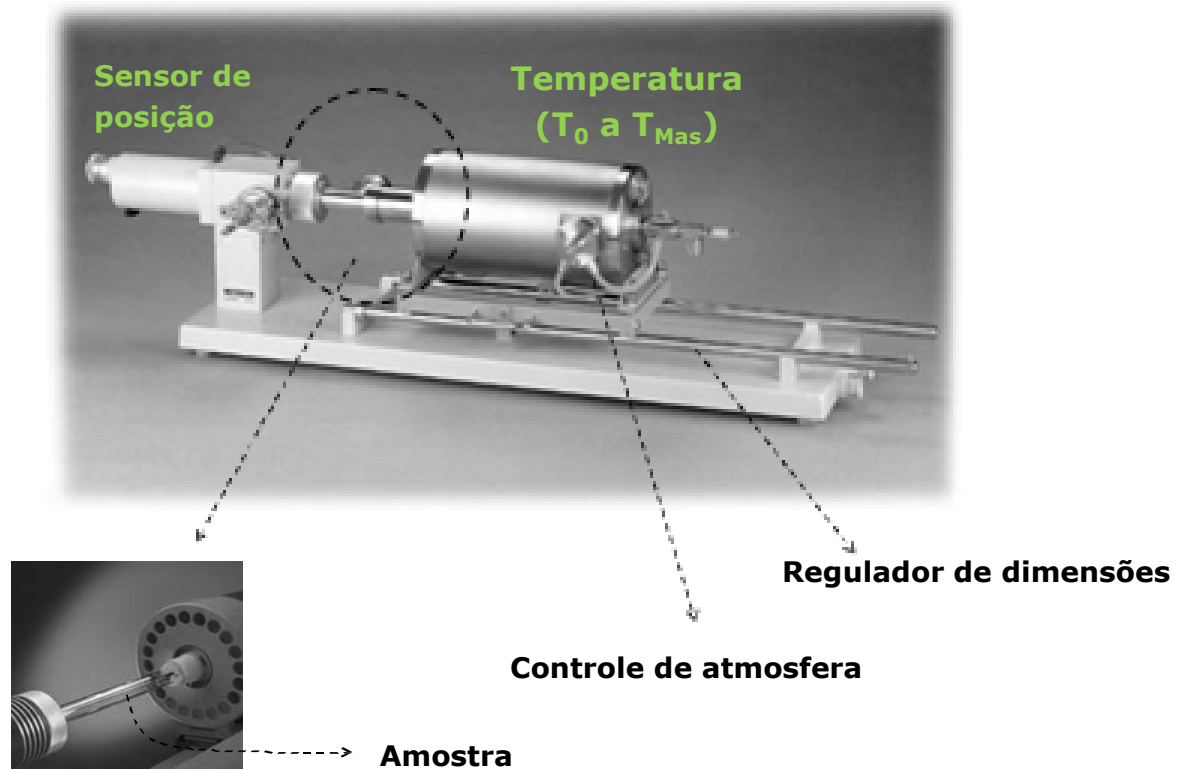
↑ distância inter-atômica



©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning[®] is a trademark used herein under license.

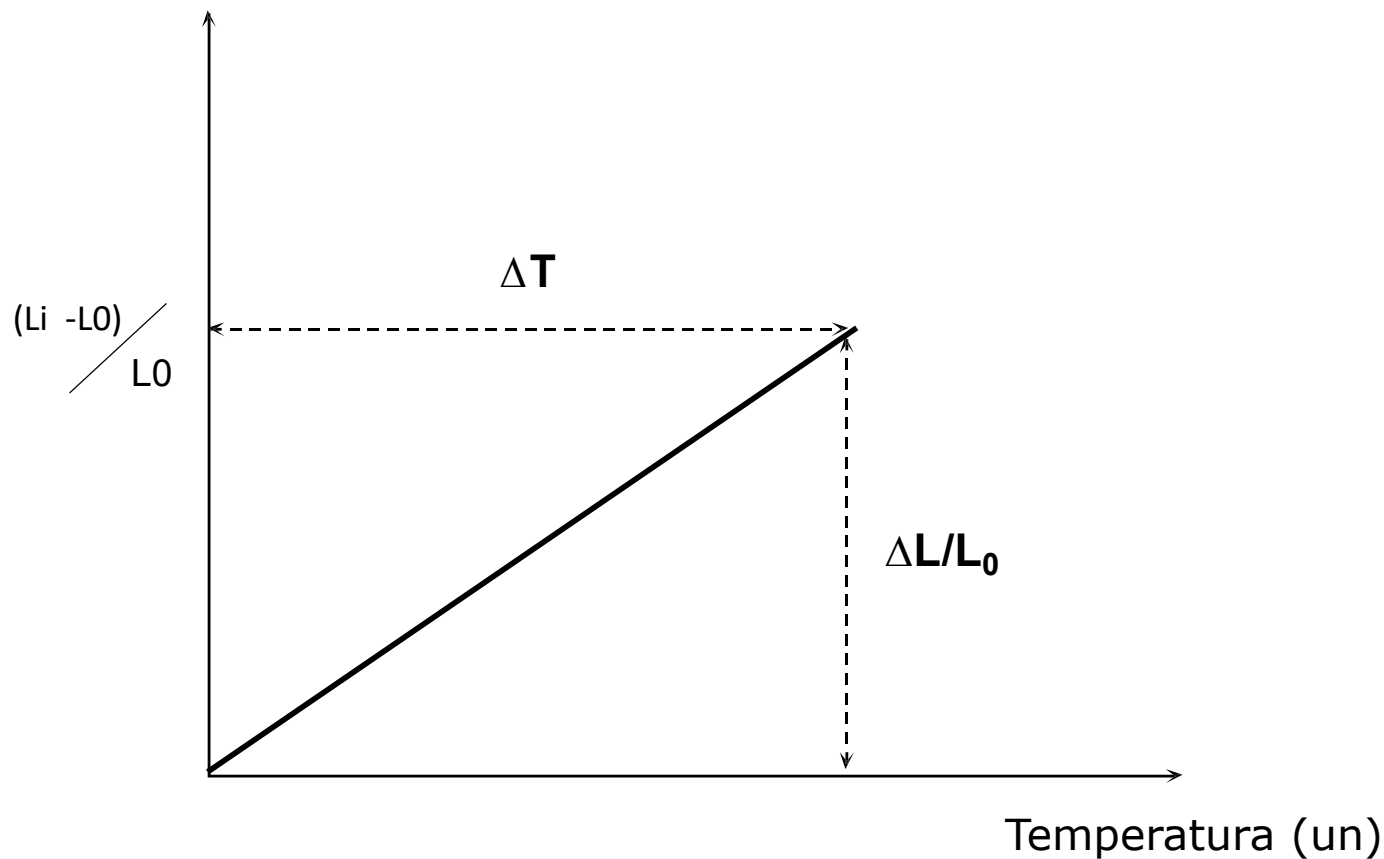
Relação entre o coeficiente de expansão térmica linear e ponto de fusão para metais

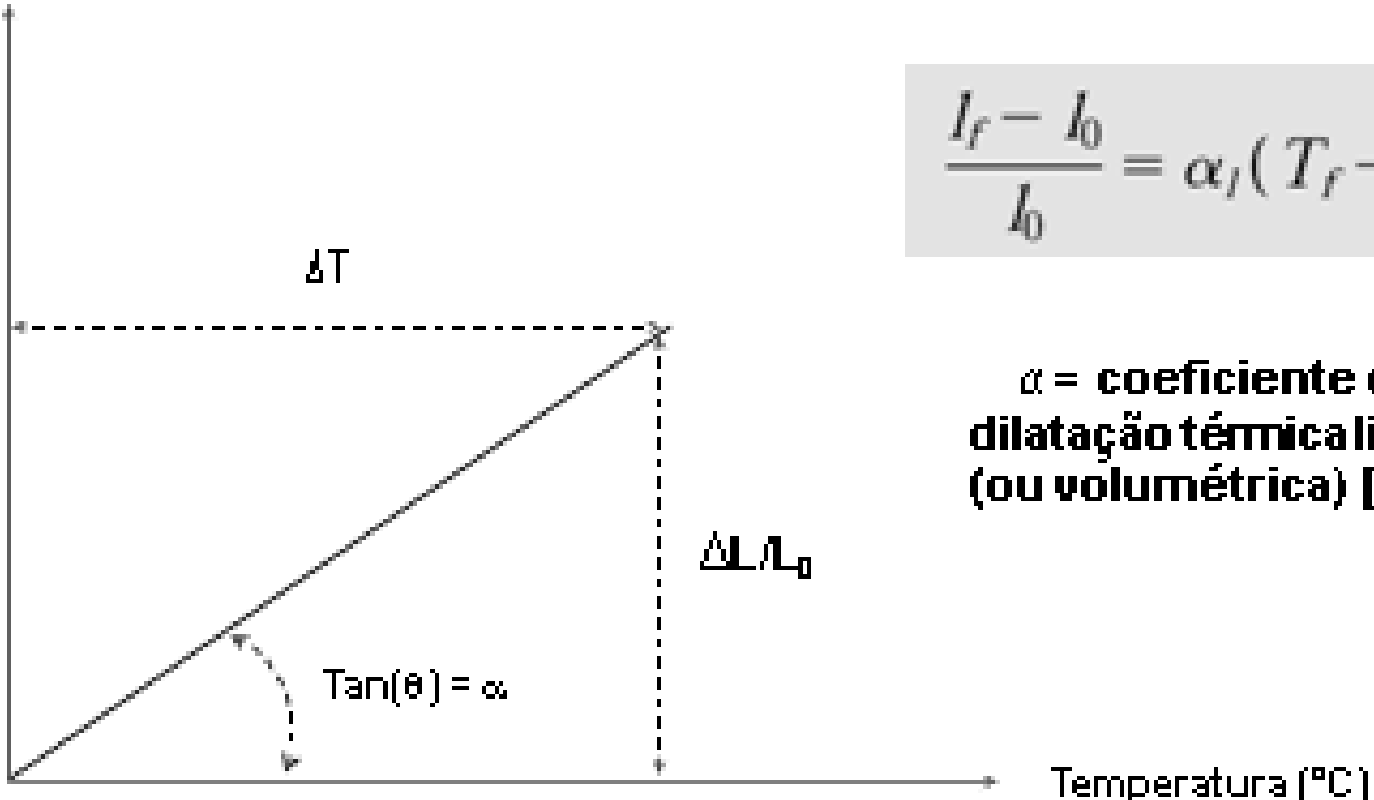
Dilatômetro moderno instrumentado



Dimensão normalizada

([Instantâneo - Inicial]/Inicial, $((L - L_0)/L_0$, adimensional)





$$\frac{l_f - l_0}{l_0} = \alpha_l (T_f - T_0)$$

α = coeficiente de dilatação térmica linear (ou volumétrica) [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]

Utilizando-se a variação volumétrica:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \alpha_v \Delta T$$

Expansão térmica

- **Coeficiente de expansão térmica linear** – é uma medida da variação de comprimento sofrida por um material quando o mesmo é submetido a uma variação unitária de temperatura, ou seja, quando a temperatura do material é elevada em 1 K.

$$\Delta l / l_0 = \alpha_L \Delta T$$

TABLE 21-2 ■ *The linear coefficient of thermal expansion at room temperature for selected materials*

Material	Linear Coefficient of Thermal Expansion ($\times 10^{-6}$ 1/0°C)
Al	25.0
Cu	16.6
Fe	12.0
Ni	13.0
Pb	29.0
Si	3.0
W	4.5
1020 steel	12.0
3003 aluminum alloy	23.2
Gray iron	12.0
Invar (Fe-36% Ni)	1.54
Stainless steel	17.3
Yellow brass	18.9
Epoxy	55.0
6,6-nylon	80.0
6,6-nylon—33% glass fiber	20.0
Polyethylene	100.0
Polyethylene—30% glass fiber	48.0
Polystyrene	70.0
Al ₂ O ₃	6.7
Fused silica	0.55
Partially stabilized ZrO ₂	10.6
SiC	4.3
Si ₃ N ₄	3.3
Soda-lime glass	9.0

Expansão térmica de trilhos

<i>Material</i>	α_l [$^{\circ}\text{C}^{-1} \times 10^{-6}$] ^b
<i>Metals</i>	
Aluminum	23.6
Copper	17.0
Gold	14.2
Iron	11.8

Nickel	13.3
Silver	19.7
Tungsten	4.5
1025 Steel	12.0
316 Stainless steel	16.0
Brass (70Cu-30Zn)	20.0
Kovar (54Fe-29Ni-17Co)	5.1
Invar (64Fe-36Ni)	1.6
Super Invar (63Fe-32Ni-5Co)	0.72



**Trilhos contínuos: não cabem no espaço original
(empenamento)**



Juntas de expansão

<i>Material</i>	α_l [$^{\circ}\text{C}^{-1} \times 10^{-6}$]
<i>Metals</i>	
Aluminum	23.6
Copper	17.0
Gold	14.2
Iron	11.8
Nickel	13.3
Silver	19.7
Tungsten	4.5
1025 Steel	12.0
316 Stainless steel	16.0
Brass (70Cu-30Zn)	20.0
Kovar (54Fe-29Ni-17Co)	5.1
Invar (64Fe-36Ni)	1.6
Super Invar (63Fe-32Ni-5Co)	0.72



Dimensionamento de peças deve levar em conta a expansão:

Concorde era *extremamente* barulhento por dentro até 800 km/h

Acima disso: com aquecimento, as peças se encaixavam com precisão

Como abrir um vidro de *champignons* com elegância?

<i>Material</i>	α_l [(°C) ⁻¹ × 10 ⁻⁶] ^b
Metals	
Aluminum	23.6
Copper	17.0
Gold	14.2
Iron	11.8
Nickel	13.3
Silver	19.7
Tungsten	4.5
1025 Steel	12.0
316 Stainless steel	16.0
Brass (70Cu-30Zn)	20.0
Kovar (54Fe-29Ni-17Co)	5.1
Invar (64Fe-36Ni)	1.6
Super Invar (63Fe-32Ni-5Co)	0.72
Ceramics	
Alumina (Al ₂ O ₃)	7.6
Magnesia (MgO)	13.5 ^d
Spinel (MgAl ₂ O ₄)	7.6 ^d
Fused silica (SiO ₂)	0.4
Soda-lime glass	9.0
Borosilicate (Pyrex) glass	3.3
Polymers	
Polyethylene (high density)	106–198
Polypropylene	145–180
Polystyrene	90–150
Polytetrafluoroethylene (Teflon)	126–216
Phenol-formaldehyde, phenolic (Bakelite)	122
Nylon 6,6	144
Polyisoprene	220



<i>Material</i>	α_i [$(^\circ\text{C})^{-1} \times 10^{-6}$] ^b
<i>Metals</i>	
Aluminum	23.6
Copper	17.0
Gold	14.2
Iron	11.8
Nickel	13.3
Silver	19.7
Tungsten	4.5
1025 Steel	12.0
316 Stainless steel	16.0
Brass (70Cu-30Zn)	20.0



Expansão & contração:

Cabos de cobre não devem tocar o chão no calor, nem se esticar no frio

Solução: balancear comprimento segundo a amplitude térmica ou ΔT

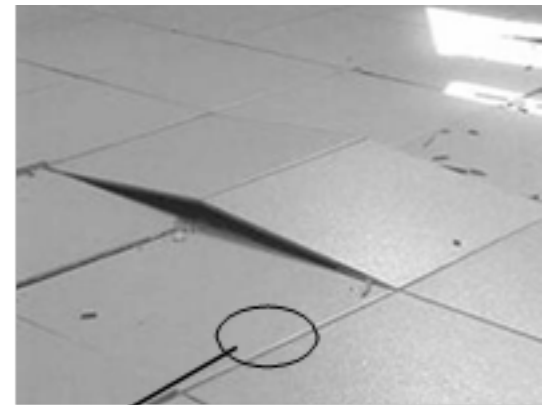
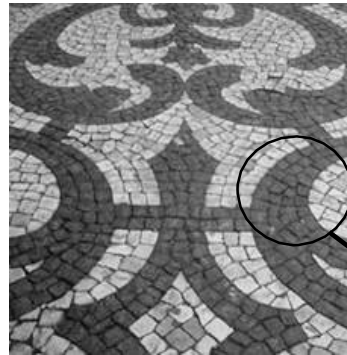
Peças em contato que possuem movimento relativo entre si:

Durante o serviço (em funcionamento!) ocorre aquecimento devido ao atrito, ocasionando variações dimensionais nos componentes; um coeficiente de dilatação térmica distinto nas peças em contato acarreta desajuste dimensional.

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

Materiais cerâmicos também se dilatam/contraem

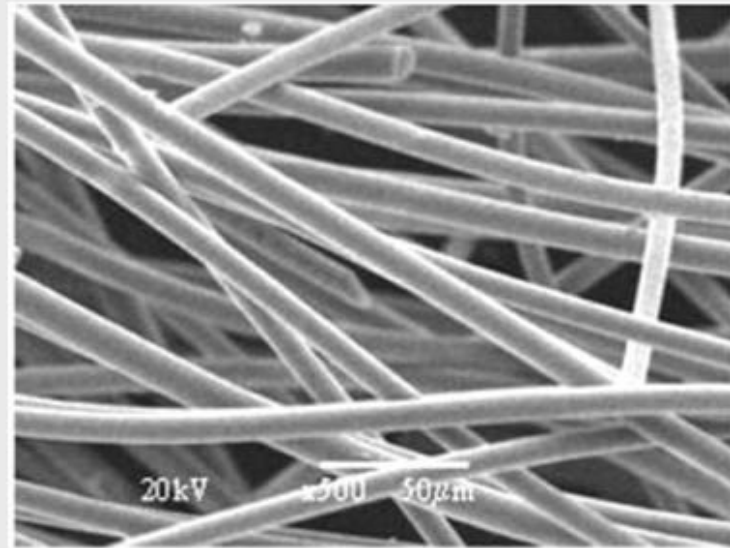
<i>Material</i>	α_1 [(°C) ⁻¹ × 10 ⁻⁶] ^b
<i>Ceramics</i>	
Alumina (Al ₂ O ₃)	7.6
Magnesia (MgO)	13.5 ^d
Spinel (MgAl ₂ O ₄)	7.6 ^d
Fused silica (SiO ₂)	0.4
Soda-lime glass	9.0
Borosilicate (Pyrex) glass	3.3
...	



**Juntas de
expansão**

Cerâmicas refratárias isolantes à base de fibras de Al_2O_3 ou lã de rocha

<i>Material</i>	α_l [($^\circ\text{C}$) $^{-1}$ $\times 10^{-6}$] ^b
	<i>Ceramics</i>
Alumina (Al_2O_3)	7.6
Magnesia (MgO)	13.5 ^d
Spinel (MgAl_2O_4)	7.6 ^d
Fused silica (SiO_2)	0.4
Soda-lime glass	9.0
Borosilicate (Pyrex) glass	3.3

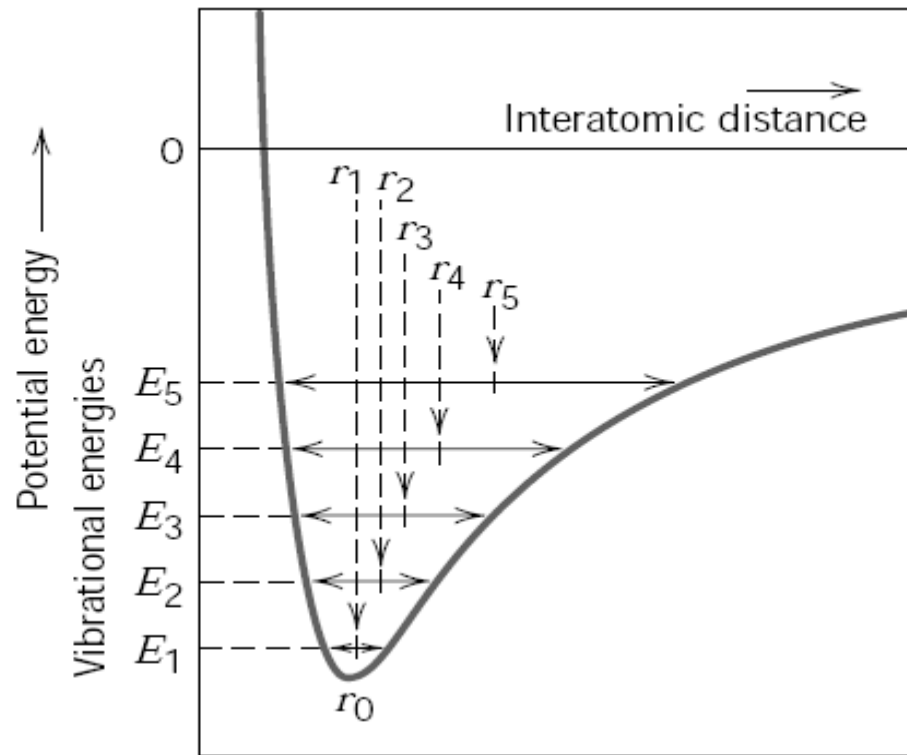


- Al_2O_3 : elevado α na direção da fibra
- Fibras randomicamente dispersas



- α Médio quase nulo (~ 0)
- Baixa condutividade térmica

2. Quanto calor um material é capaz de absorver (e quanto tempo leva para que isso ocorra)?



Sólido sendo aquecido → absorção de energia térmica

Capacidade calorífica

$$C = \delta Q / \delta T \text{ (J/kg.K)}$$

Como os materiais absorvem calor?

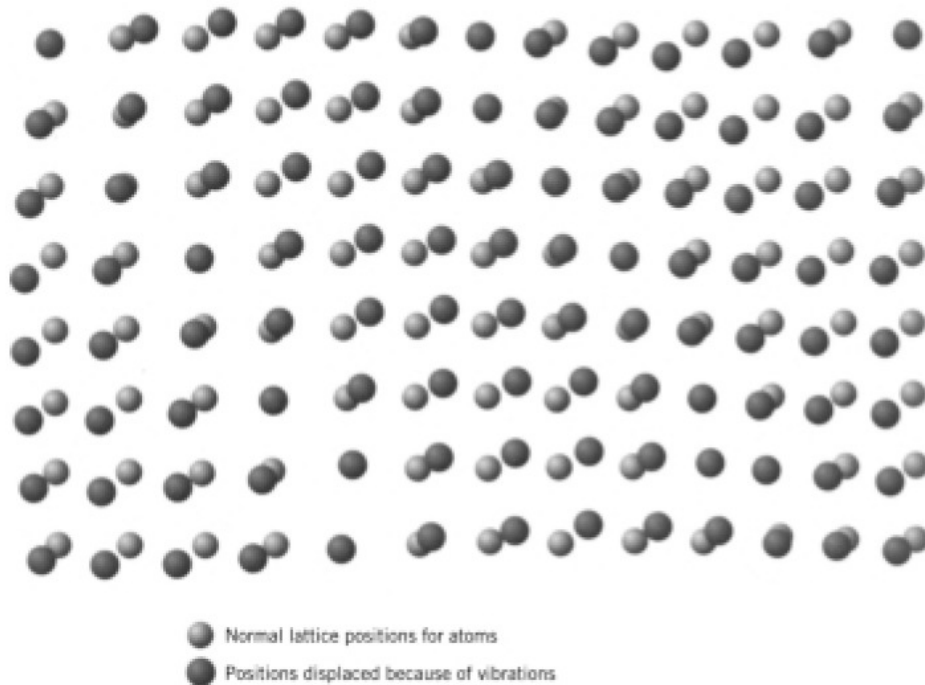


FIGURE 17.1 Schematic representation of the generation of lattice waves in a crystal by means of atomic vibrations. (Adapted from "The Thermal Properties of Materials" by J. Ziman. Copyright © 1967 by Scientific American, Inc. All rights reserved.)

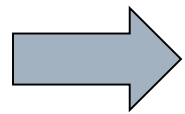
Fónon- "pacote" de ondas elásticas.

Caracteriza-se por sua energia, comprimento de onda ou frequência, capaz de transferir energia pelo material..

- **Fónon**- “pacote” de ondas elásticas.
Caracteriza-se por sua energia, comprimento de onda ou frequência, capaz de transferir energia pelo material..
- **Calor específico** – quantidade de energia necessária para elevar a temperatura de um material de 1K.

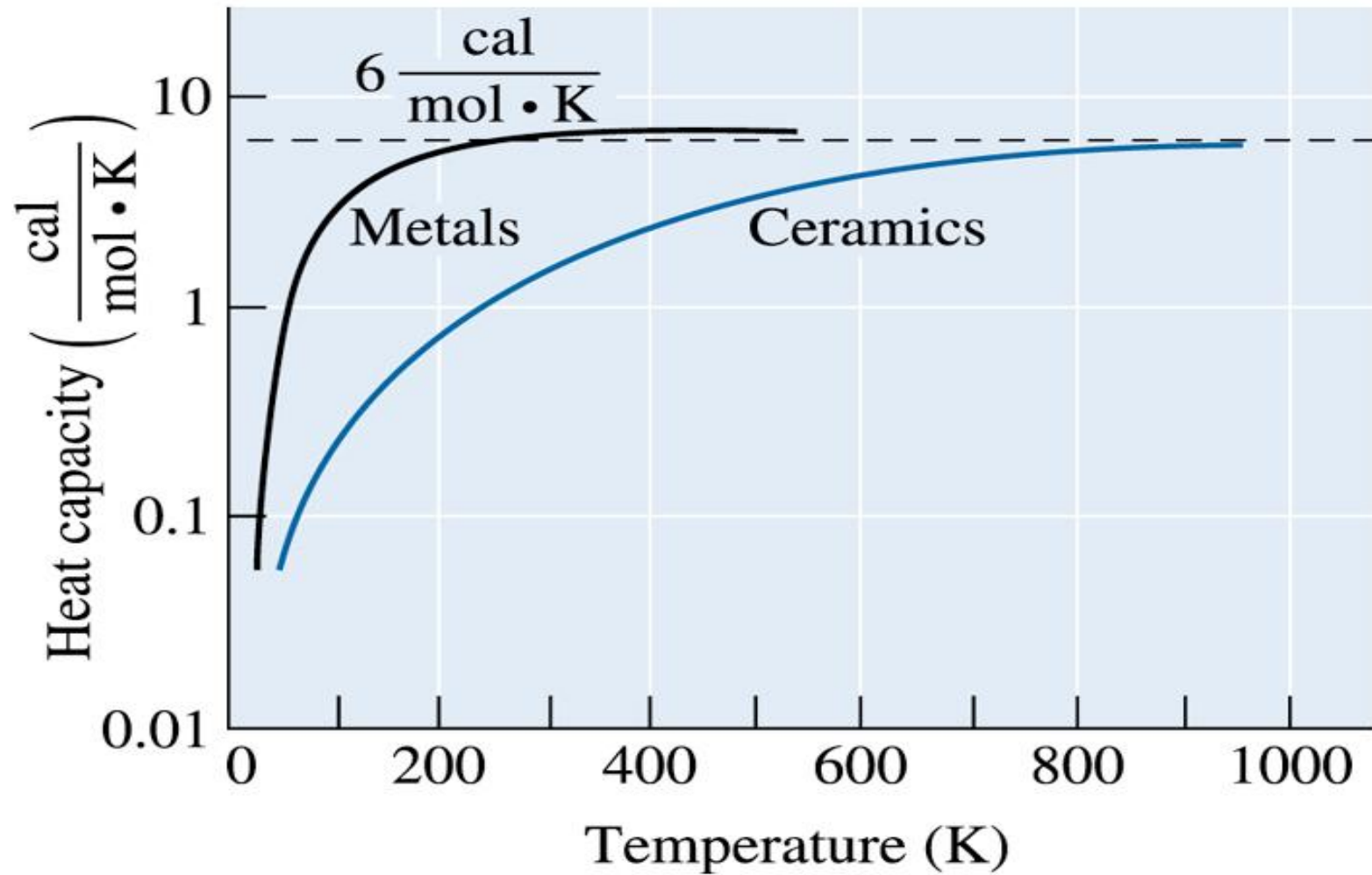
Influência da temperatura

$C_V = AT^3$, onde T é a temperatura absoluta.



Temperatura de Debye

θ_D : temperatura acima da qual o valor de C_V se estabiliza e se iguala a $3 R$.

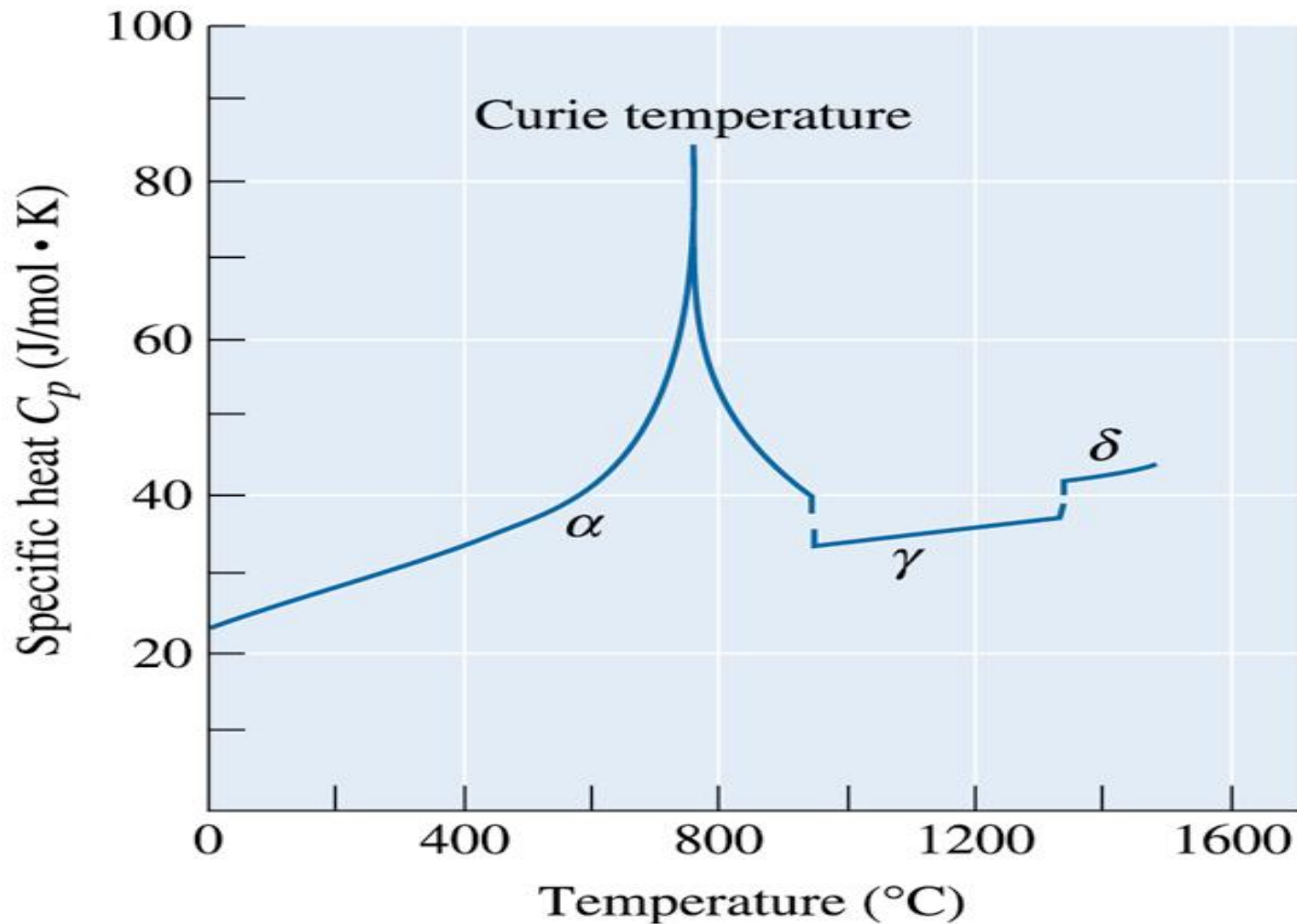


Calor específico de alguns metais e cerâmicas em função da temperatura

TABLE 21-1 ■ The specific heat of selected materials at 27° C

Material	Specific Heat $\left(\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{K}}\right)$	Material	Specific Heat $\left(\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{K}}\right)$
Metals:		Ceramics:	
Al	0.215	Al ₂ O ₃	0.200
Cu	0.092	Diamond	0.124
B	0.245	SiC	0.250
Fe	0.106	Si ₃ N ₄	0.170
Pb	0.038	SiO ₂ (silica)	0.265
Mg	0.243	Polymers:	
Ni	0.106	High-density polyethylene	0.440
Si	0.168	Low-density polyethylene	0.550
Ti	0.125	6,6-nylon	0.400
W	0.032	Polystyrene	0.280
Zn	0.093	Other:	
		Water	1.000
		Nitrogen	0.249

Note: $1 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{K}} = 4184 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$



©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning[™] is a trademark used herein under license.

Efeito da temperatura no calor específico do ferro.

EXEMPLOS

Apagando incêndio

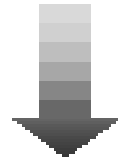
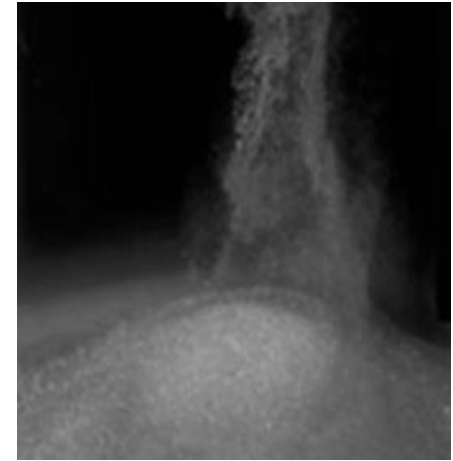
C_p Água ~ 4000 J/Kg.K

C_p Cobre = 386 J/Kg.K



Para apagar um incêndio:

- Tira O_2 (comburente) e/ou
- Tira combustível e/ou
- Tira calor do sistema



Cobre tem baixo C_p e muda de temperatura consumindo pouca energia

Resultado: não tiraria calor do combustível

No litoral, de dia o vento sopra em direção ao mar; à noite, em direção à terra.

✓ Vento = ar quente sobe, ar frio toma seu lugar (convecção)

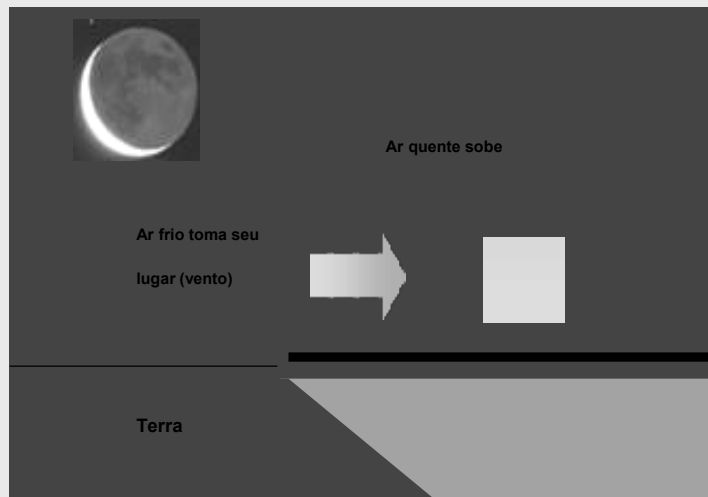
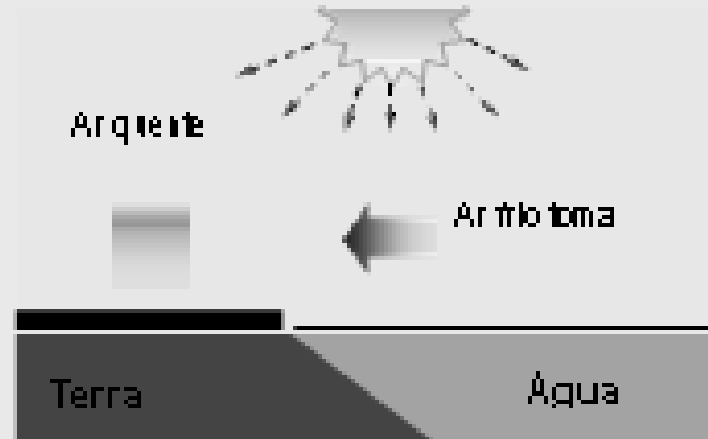
C_p Sílica = 740 J/Kg.K C_p Água ~ 4000 J/Kg.K

Dia: sol fornece energia para a terra e a água do mar

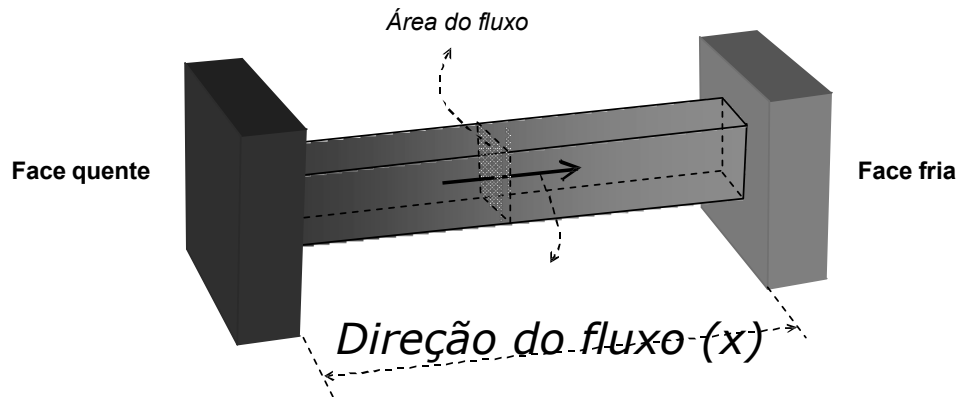
- Terra tem menor CP e se aquece mais rapidamente
- Água tem maior CP e demora a se aquecer
- Terra aquece o ar sobre ela, gerando vento vindo do mar (+ frio)

Noite: a terra e a água do mar dissipam calor para o ar

- Terra tem menor CP e se resfria mais rapidamente
- Água tem maior CP e demora a se resfriar
- O mar mantém o ar aquecido gerando vento vindo da terra (+ fria)



3. Como os materiais conduzem calor?



Como calor pode ser propagar de um ponto quente a um outro ponto frio? (= reduzir ΔT)

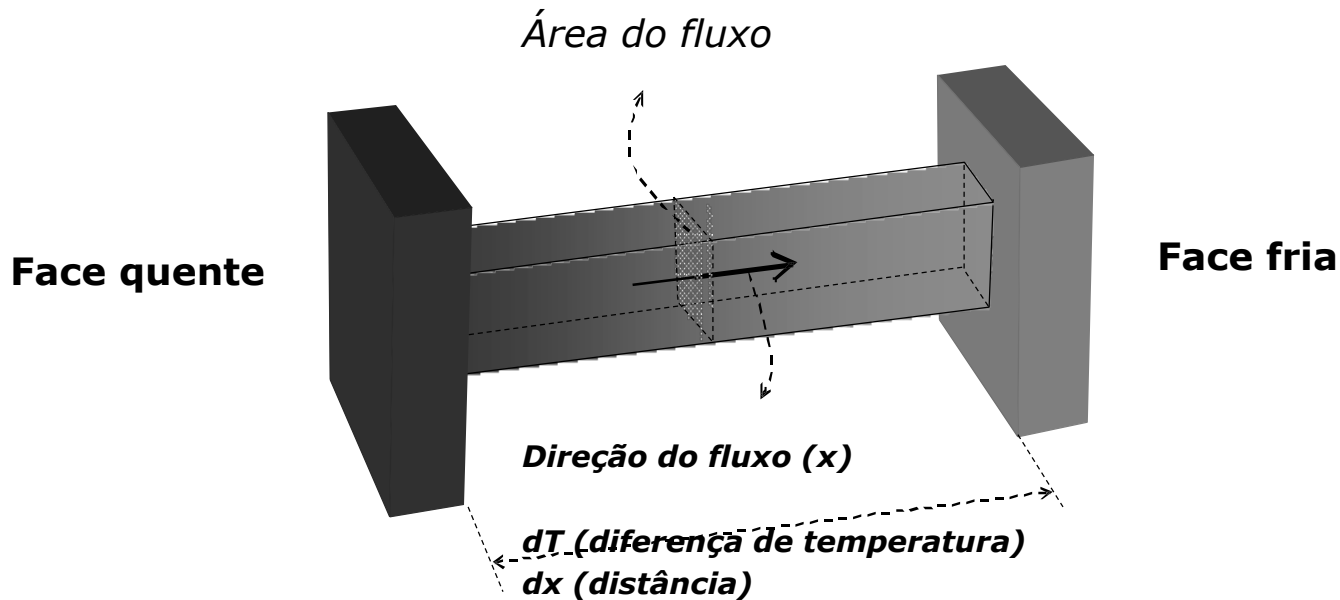
➔ **Convecção**: movimento de um fluido (ar, água)

Ex.: Vento

➔ **Condução** através do sólido

Ex.: trocadores de calor

➔ **Irradiação**: emissão de radiação infravermelha **Ex.: calor do sol**



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

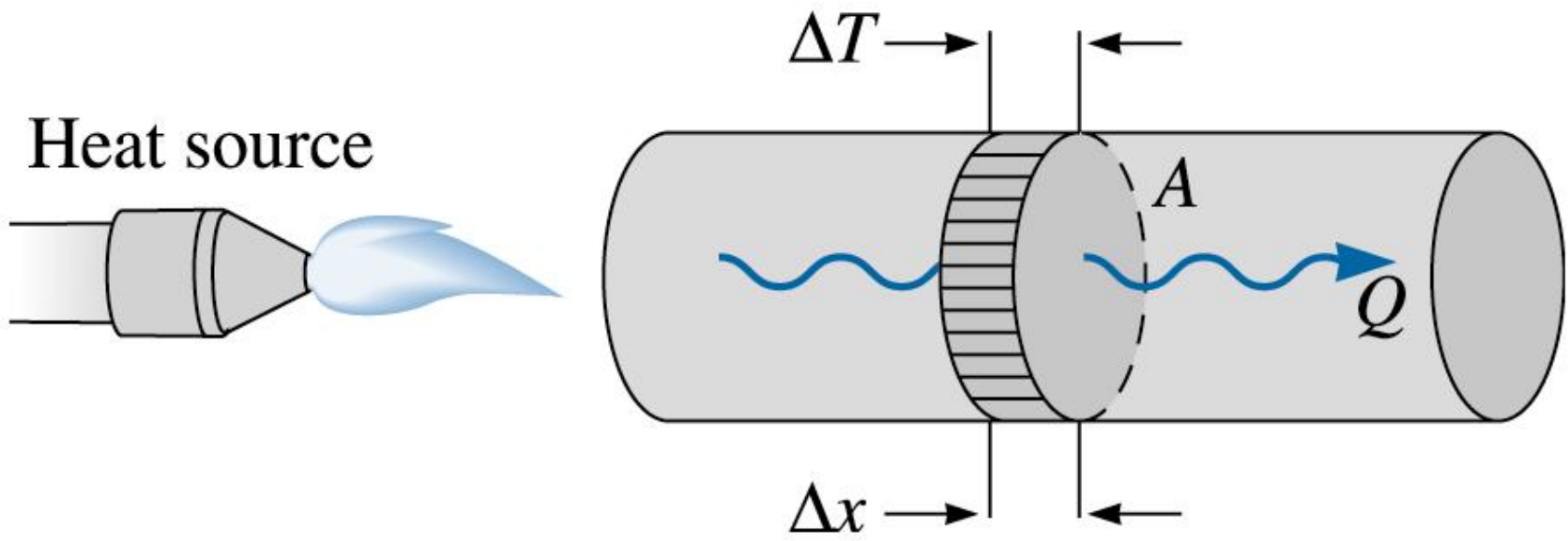
q = fluxo de calor por área = Q/A

k = condutividade térmica

dT/dx = gradiente de temperatura

(em estado estacionário = não depende do tempo)

Condutividade térmica é a medida da dificuldade que um material impõe à passagem de um fluxo de calor por sua estrutura



©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning[®] is a trademark used herein under license.

$$\frac{Q}{A} = K \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Componentes da condução térmica:

$$k_{\text{Fônons}} + k_{\text{elétrons}}$$

Vibrações elásticas da rede cristalina

- Pouco eficientes, mas abundantes
 - Espalhamento dificulta condução:
- *Defeitos cristalinos (contornos de grão, trincas, discordâncias...)*
 - *Outras ondas (T)*

Elétrons móveis

Altamente eficaz, mas presente apenas nos metais)

Também podem ser espalhados:

- *Defeitos, átomos estranhos...*
- *Outros elétrons (T)*

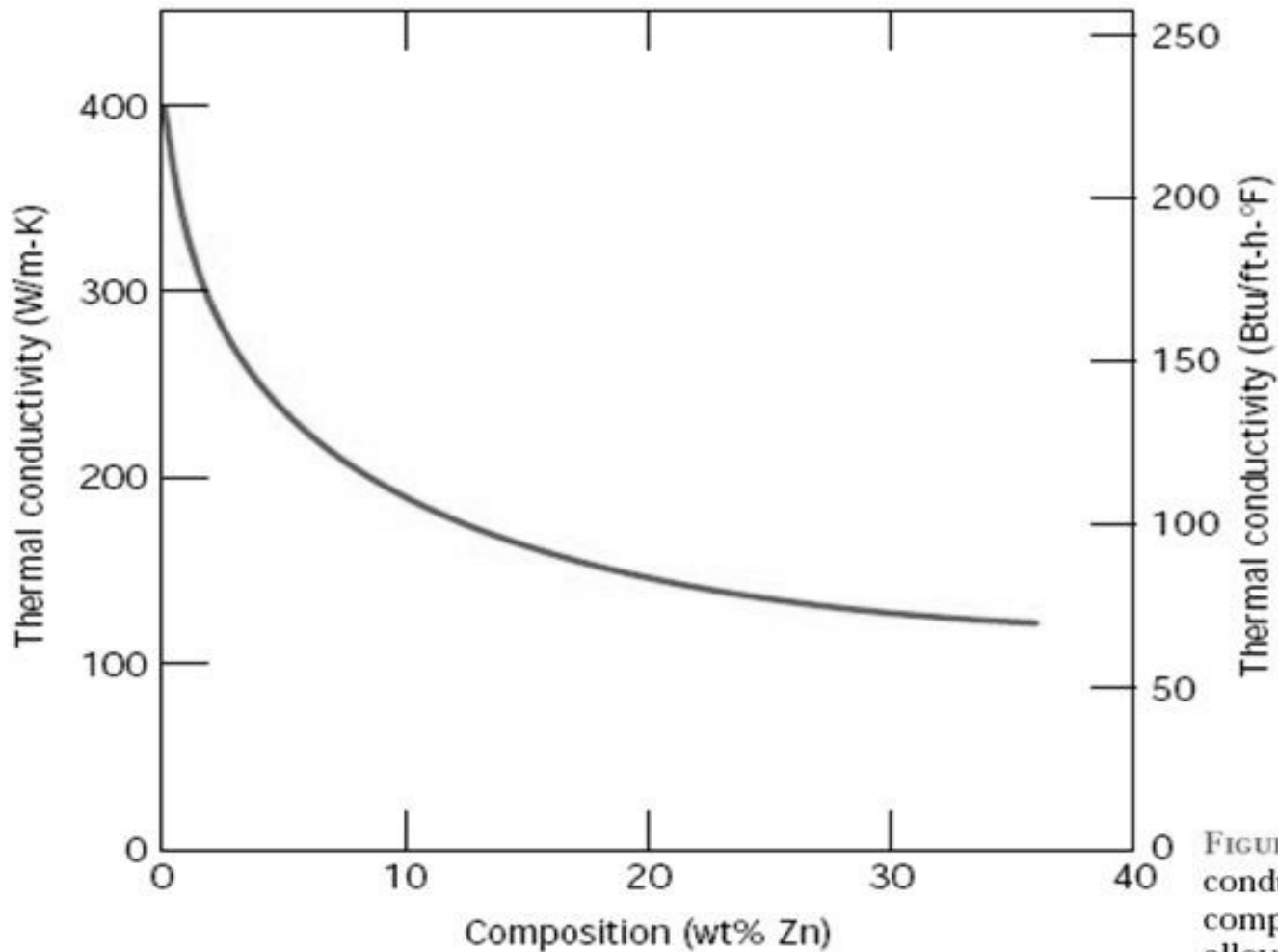
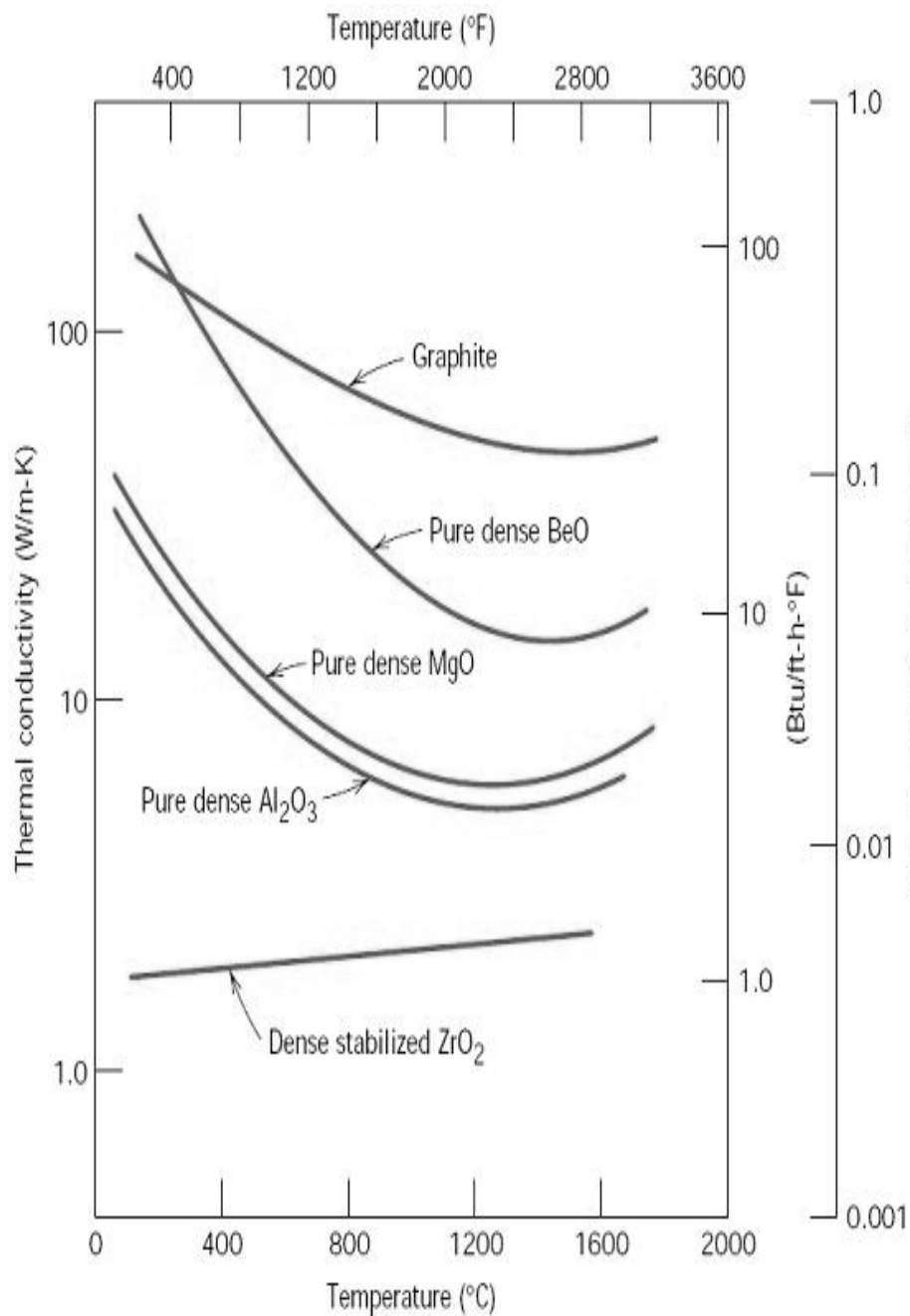


FIGURE 17.4 Thermal conductivity versus composition for copper-zinc alloys. (Adapted from *Metals Handbook: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Pure Metals*, Vol. 2, 9th edition, H. Baker, Managing Editor, American Society for Metals, 1979, p. 315.)

•Aumento da [elementos de liga em metais]:
 maior espalhamento dos elétrons, menor condutividade térmica



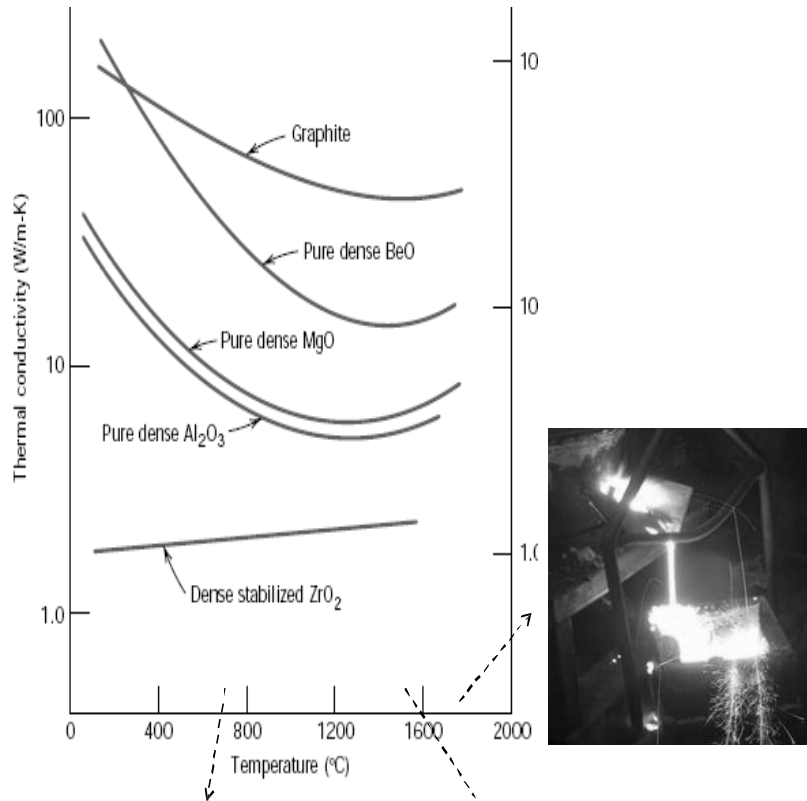
O aumento na quantidade de fônons com temperatura dificulta a condução



Então k não deveria sempre cair com temperatura?

FIGURE 17.5
Dependence of thermal conductivity on temperature for several ceramic materials. (Adapted from W. D. Kingery, H. K. Bowen, and D. R. Uhlmann, *Introduction to Ceramics*, 2nd edition. Copyright © 1976 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.)

Condutividade térmica: fônons em cerâmicas



Cerâmicas cristalinas (óxidos, principalmente)

Por que k diminui e depois cresce com o aumento da temperatura?

R: Diferentes mecanismos de condução de calor

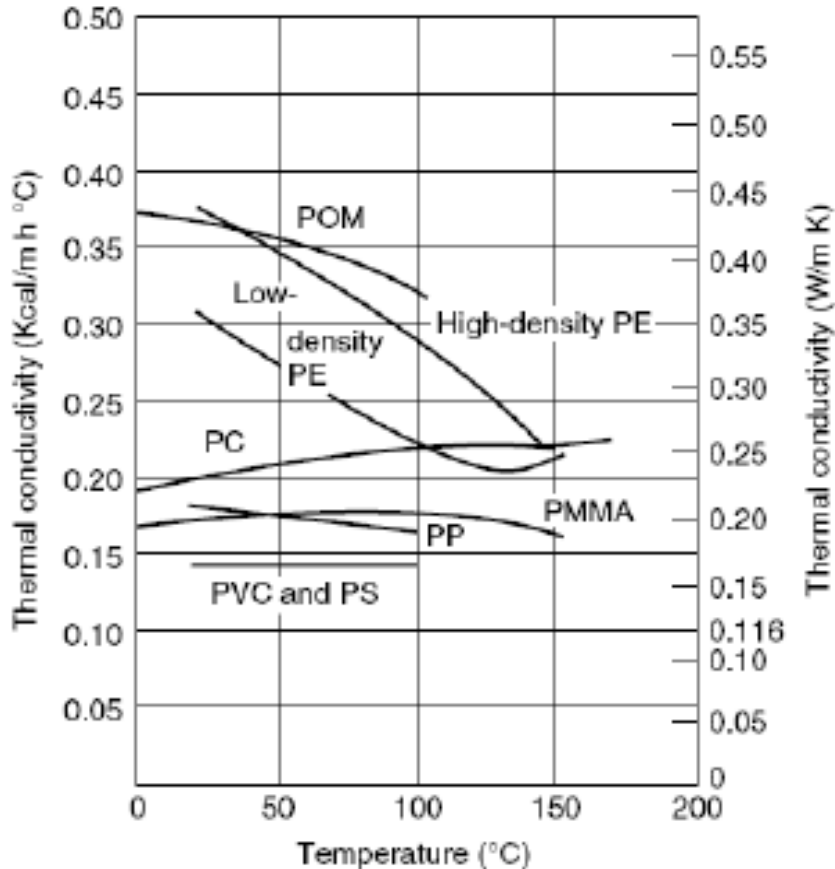


Acima de 1000°C: emissão de grande quantidade de radiação infravermelha = condução por irradiação



Condução por fônons deixa de ser a mais importante

Fônons em polímeros

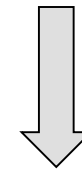


Por serem semi-cristalinos ou amorfos:

❑ **Grande dificuldade para propagar os fônons:**

a) **Cadeias flexíveis**

b) **Capazes de rotação para acomodar o estado mais energético**



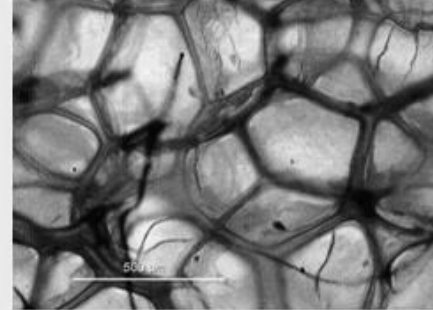
Materiais intrinsecamente isolantes térmicos

Materiais porosos (*isolante térmicos*)

Presença de vazios *fechados*
(não conectados):

- a) Ajudam a espalhar fônons
- b) Porção de material com k baixíssimo
- c) Não contribuem com condução por convecção

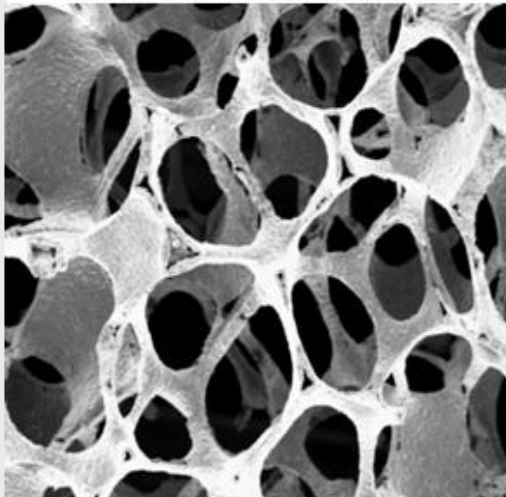
**Valores de k muito,
muito baixos**



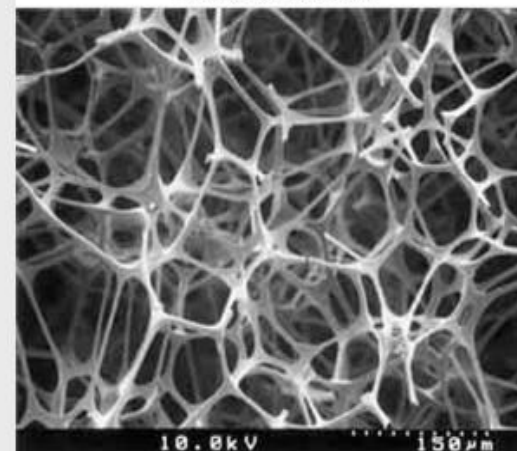
**Espuma cerâmica com célula aberta:
filtração de metal líquido**



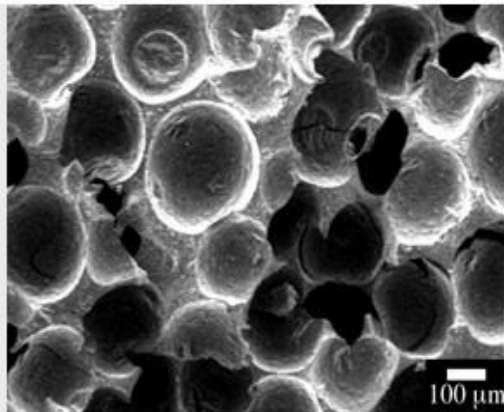
Espuma metálica (isolamento acústico)



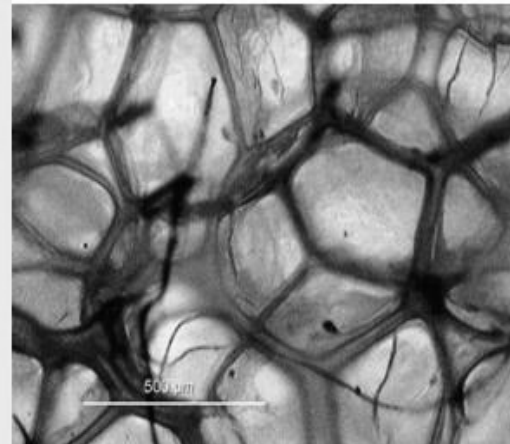
**Espuma polimérica com célula aberta:
filtração, esponjas**



**Espuma cerâmica com célula fechada:
isolamento térmico (~ 1800°C)**



**Espuma polimérica com célula fechada:
isolamento térmico e acústico (isopor)**

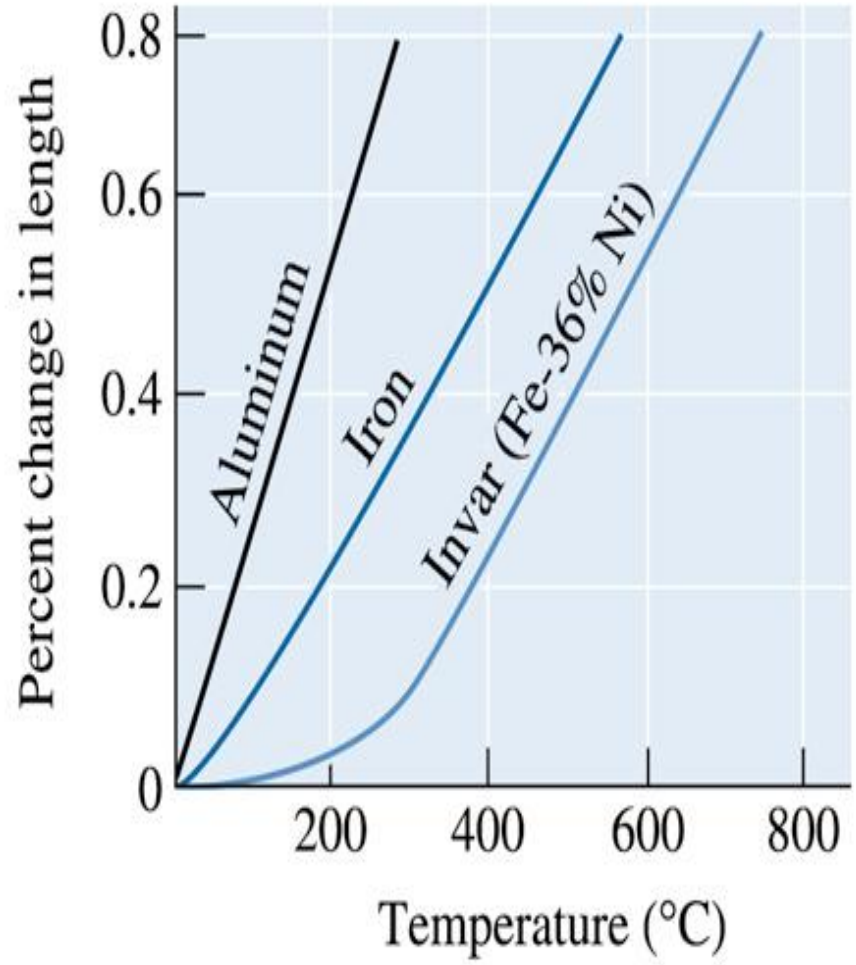
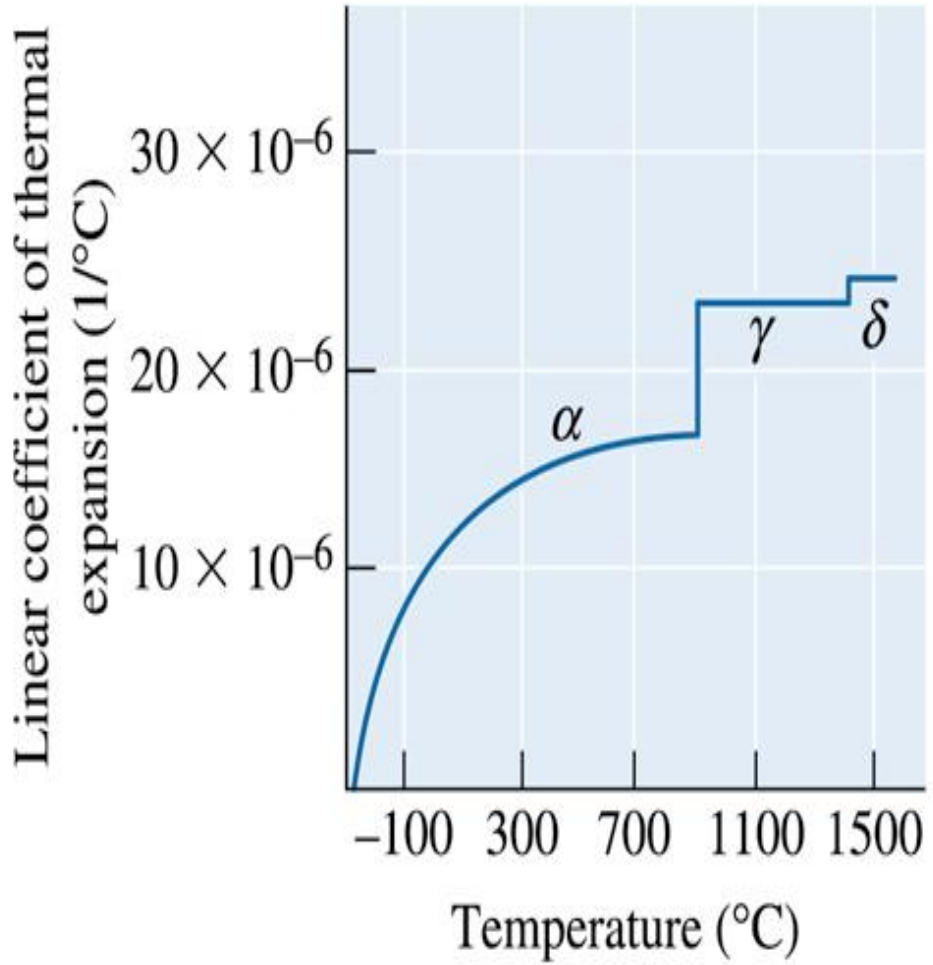


- **Condutividade térmica é uma propriedade altamente anisotrópica (depende da direção analisada)**

Table 4.9 Thermal Conductivity of Quartz

Temperature (°C)	Thermal Conductivity (W/m·K)		
	Normal to <i>c</i> -Axis	Parallel to <i>c</i> -Axis	Ratio
0	0.67	1.13	1.69
100	0.50	0.79	1.58
200	0.42	0.63	1.50
300	0.35	0.50	1.43
400	0.31	0.42	1.35

Fônons se propagam mais rapidamente nas direções mais densas do material (densidade linear e densidade planar)

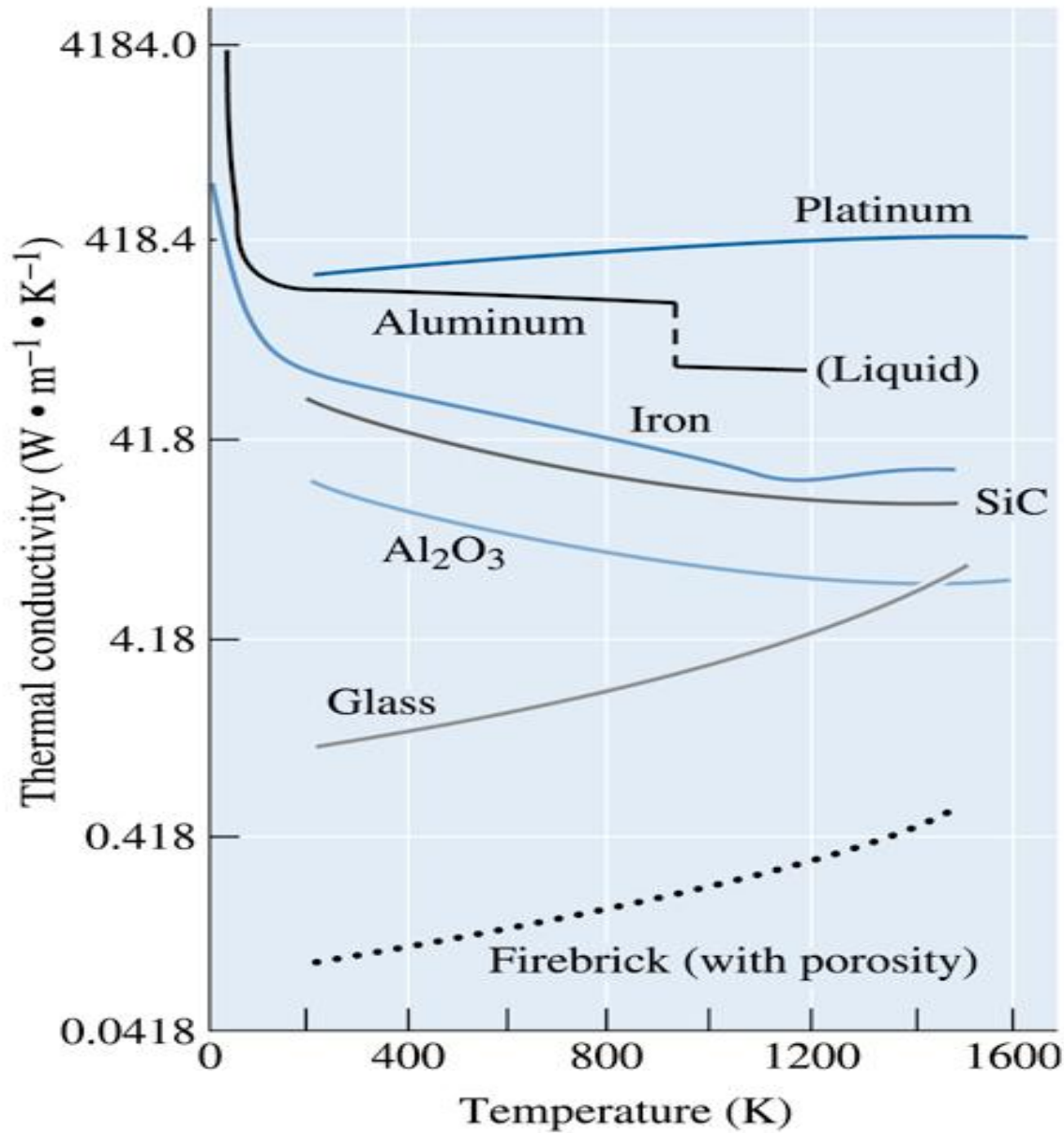


©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning[®] is a trademark used herein under license.

TABLE 21-3 ■ Typical values of room temperature thermal conductivity of selected materials

Material	Thermal Conductivity ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	Material	Thermal Conductivity ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
Pure Metals:		Ceramics:	
Ag	430	Al ₂ O ₃	16–40
Al	238	Carbon (diamond)	2000
Cu	400	Carbon (graphite)	335
Fe	79	Fireclay	0.26
Mg	100		
Ni	90	Silicon carbide	up to 270
Pb	35	AlN	up to 270
Si	150	Si ₃ N ₄	up to 150
		Soda-lime glass	0.96–1.7
Ti	22	Vitreous silica	1.4
W	171	Vycor™ glass	12.5
Zn	117	ZrO ₂	4.2
Zr	23		
Alloys:		Polymers:	
1020 steel	100	6,6-nylon	0.25
3003 aluminum alloy	280	Polyethylene	0.33
304 stainless steel	30	Polyimide	0.21
Cementite	50	Polystyrene	0.13
		Polystyrene foam	0.029
Cu-30% Ni	50	Teflon	0.25
Ferrite	75		
Gray iron	79.5		
Yellow brass	221		

Note: $1 \text{ cal/cm} \cdot \text{s} \cdot \text{K} = 418.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$



<i>Material</i>	<i>k</i> <i>(W/m-K)^c</i>
Aluminum	247
Copper	398
Gold	315
Iron	80
Nickel	90
Silver	428
Tungsten	178
1025 Steel	51.9
316 Stainless steel	15.9
Brass (70Cu-30Zn)	120
Kovar (54Fe-29Ni-17Co)	17
Invar (64Fe-36Ni)	10
Super Invar (63Fe-32Ni-5Co)	10



**Trocadores
de calor**



Condutividade térmica em metais

<i>Material</i>	k $(W/m-K)^c$
Aluminum	247
Copper	398
Gold	315
Iron	80
Nickel	90
Silver	428
Tungsten	178
1025 Steel	51.9
316 Stainless steel	15.9
Brass (70Cu-30Zn)	120
Kovar (54Fe-29Ni-17Co)	17
Invar (64Fe-36Ni)	10
Super Invar (63Fe-32Ni-5Co)	10



Podem causar aquecimento do interior / exterior de máquina térmicas

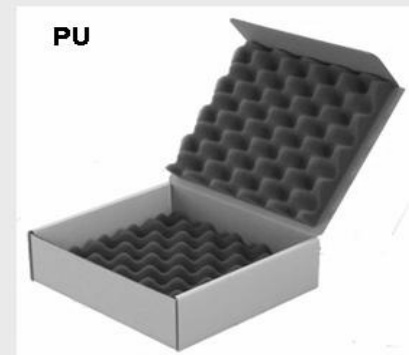
Condutividade térmica: polímeros

<i>Material</i>	k (W/m-K) ^c
Polyethylene (high density)	0.46–0.50
Polypropylene	0.12
Polystyrene	0.13
Polytetrafluoroethylene (Teflon)	0.25
Phenol-formaldehyde, phenolic (Bakelite)	0.15
Nylon 6,6	0.24
Polyisoprene	0.14

Espumas poliméricas:

Isolantes térmicos por excelência:

↓ $k_{\text{Polímeros}}$ + ↓ k_{ar} + espalhamento de fônons



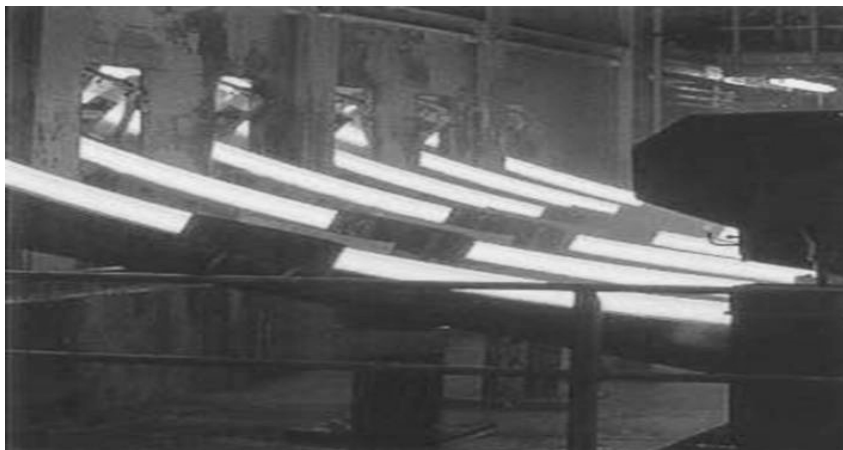
Condutividade térmica de cerâmicas

<i>Material</i>	k $(W/m-K)^e$
Alumina (Al_2O_3)	39
Magnesia (MgO)	37.7
Spinel ($MgAl_2O_4$)	15.0 ^e
Fused silica (SiO_2)	1.4
Soda-lime glass	1.7
Borosilicate (Pyrex) glass	1.4

Refratários Isolantes



Reduzem consumo de energia



4. Como os materiais se comportam frente a variações de temperatura?

Tensões térmicas

Tensões térmicas – tensões introduzidas devido a diferenças de expansão e contração que ocorrem em um material devido à variações de temperatura.

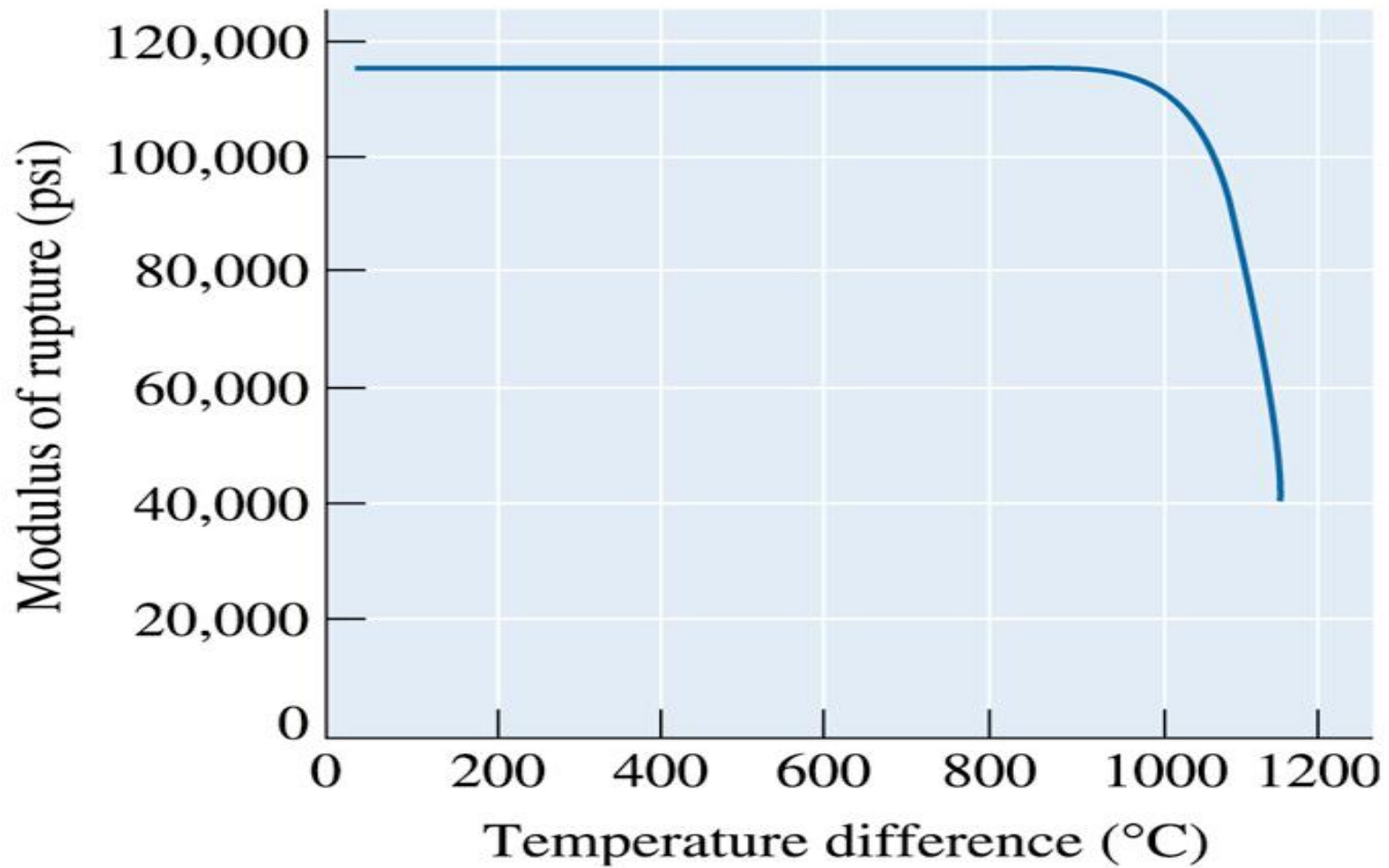
$$\sigma = E \cdot \alpha_L \cdot \Delta T$$

Choque térmico

- **Resistência ao choque térmico** – medida da resistência do material à fratura causada pela exposição a uma variação de temperatura

Para cerâmicas:

$$RCT = \sigma_f \cdot k / E \cdot \alpha_L$$



Efeito do choque térmico no módulo de ruptura do sialon