

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?***

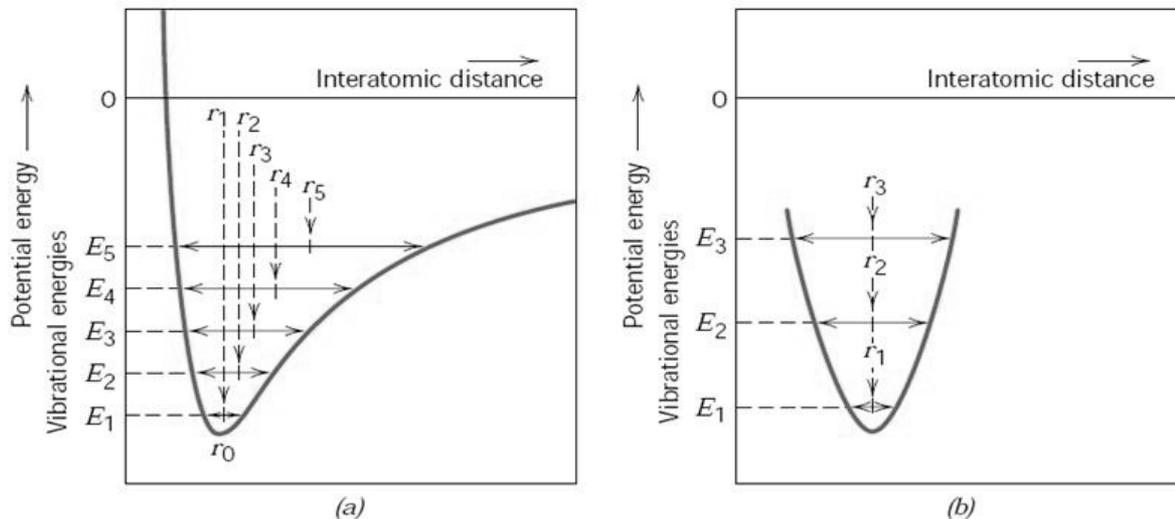
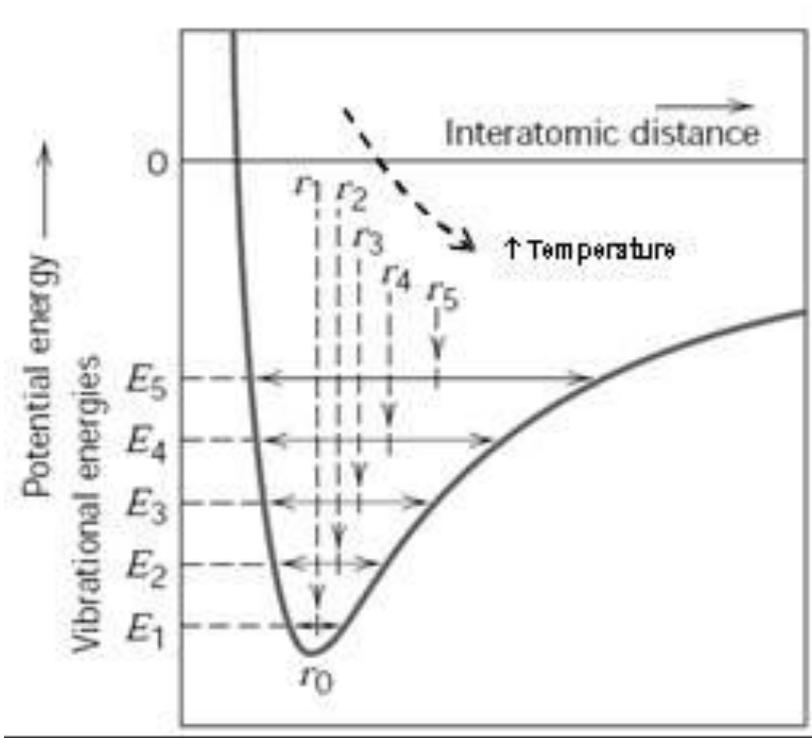


FIGURE 17.3 (a) Plot of potential energy versus interatomic distance, demonstrating the increase in interatomic separation with rising temperature. With heating, the interatomic separation increases from r_0 to r_1 to r_2 , and so on. (b) For a symmetric potential energy-versus-interatomic distance curve, 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



$T_1 \rightarrow E_1 \rightarrow r_1$
 $T_1 < T_2 \rightarrow E_2 \rightarrow r_2$
 $T_2 < T_3 \rightarrow E_3 \rightarrow r_3$
 $T_3 < T_4 \rightarrow E_4 \rightarrow r_4$
 $T_4 < T_5 \rightarrow E_5 \rightarrow r_5$

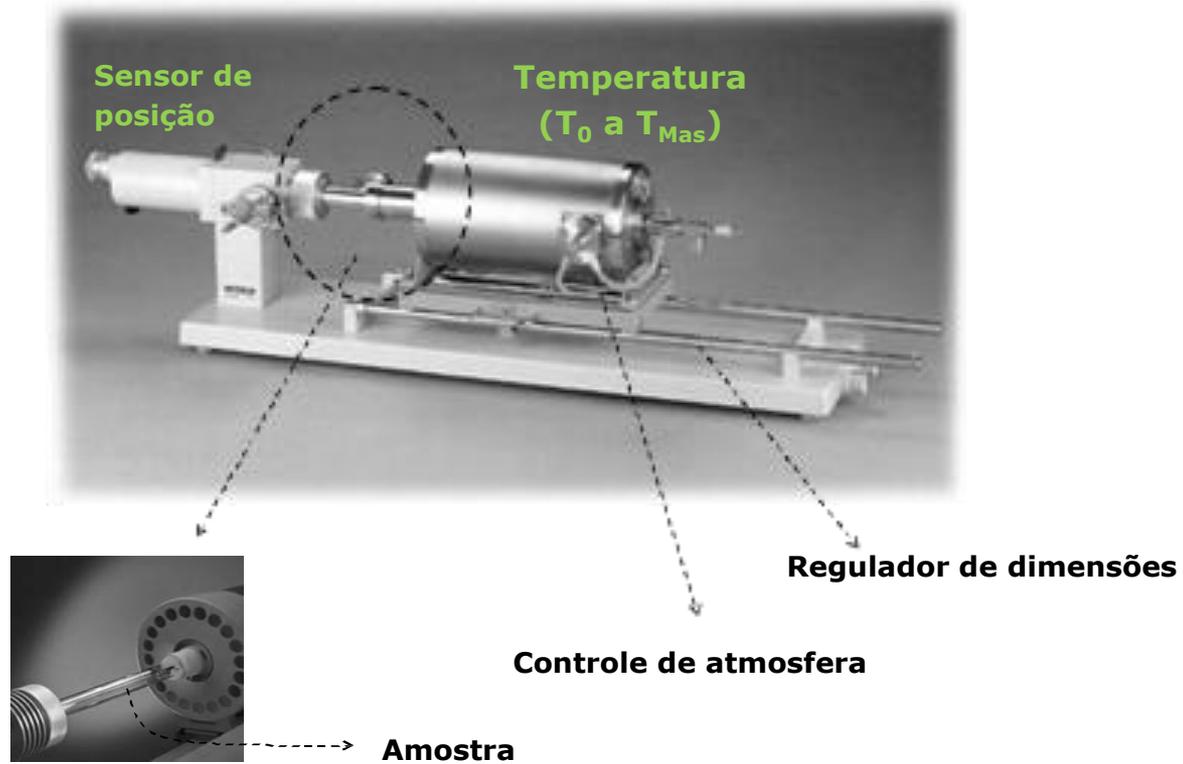
Com \uparrow temperatura:

- \uparrow Efeito da assimetria
- $\uparrow \neq$ em relação ao valor médio da r



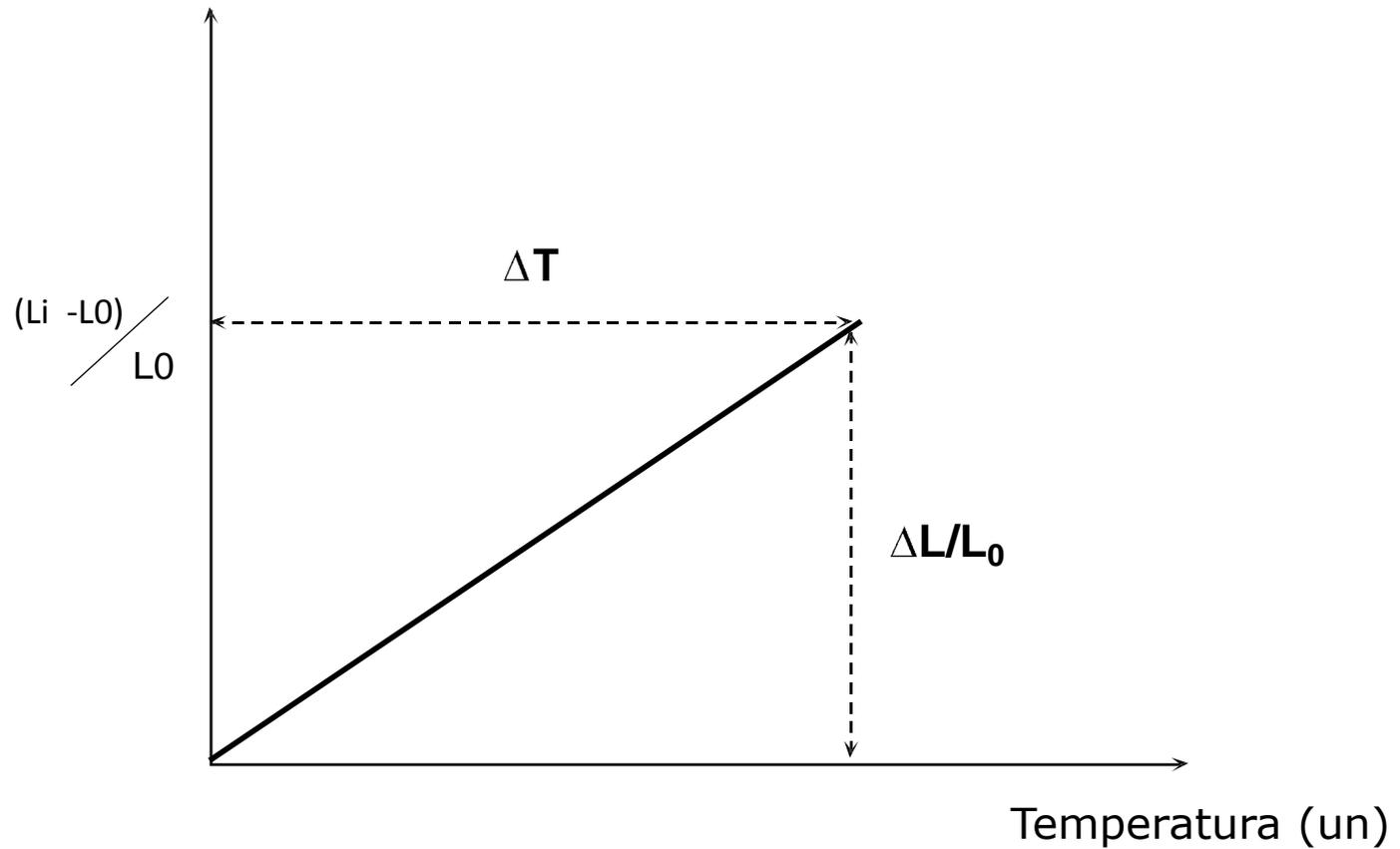
\uparrow distância inter-atômica

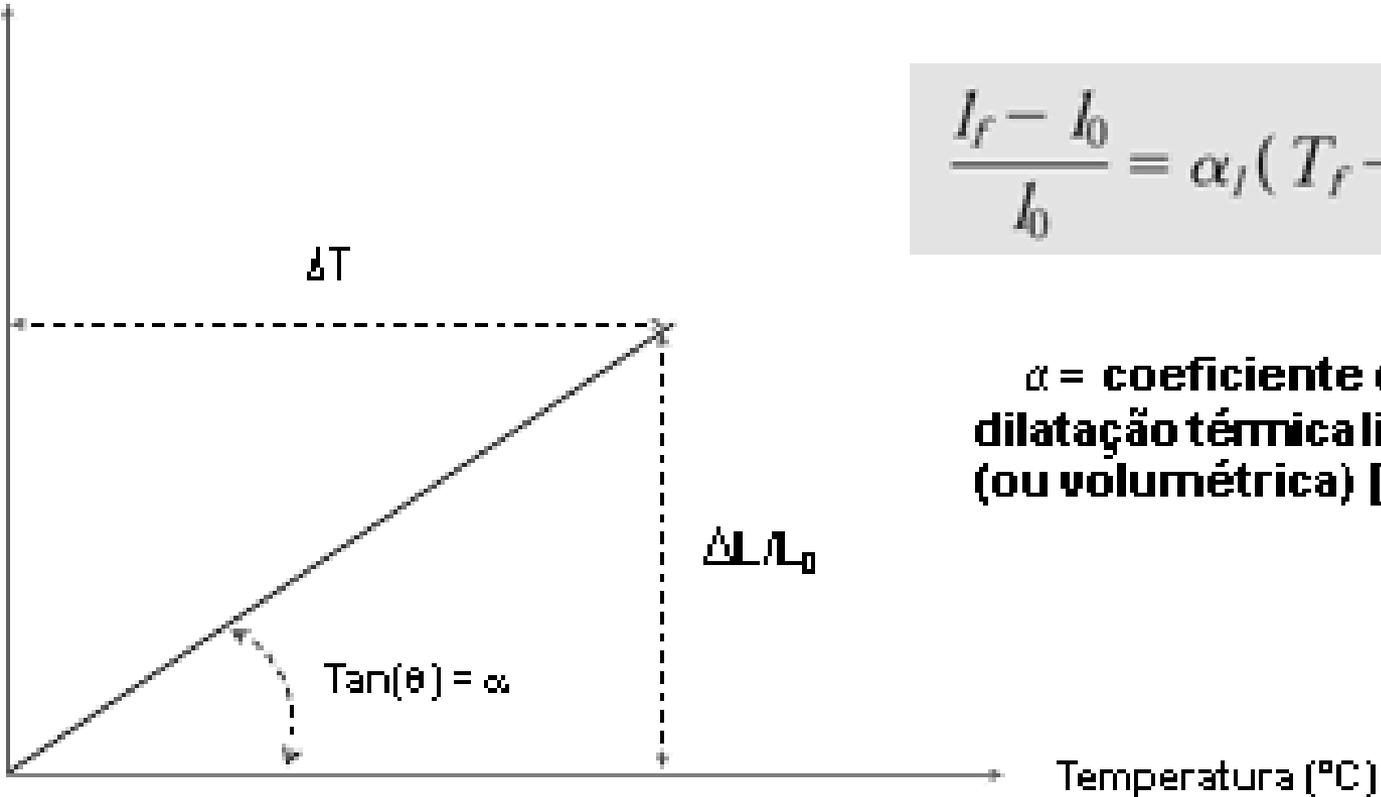
Dilatômetro moderno instrumentado



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) [°C⁻¹]

Utilizando-se a variação volumétrica:

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

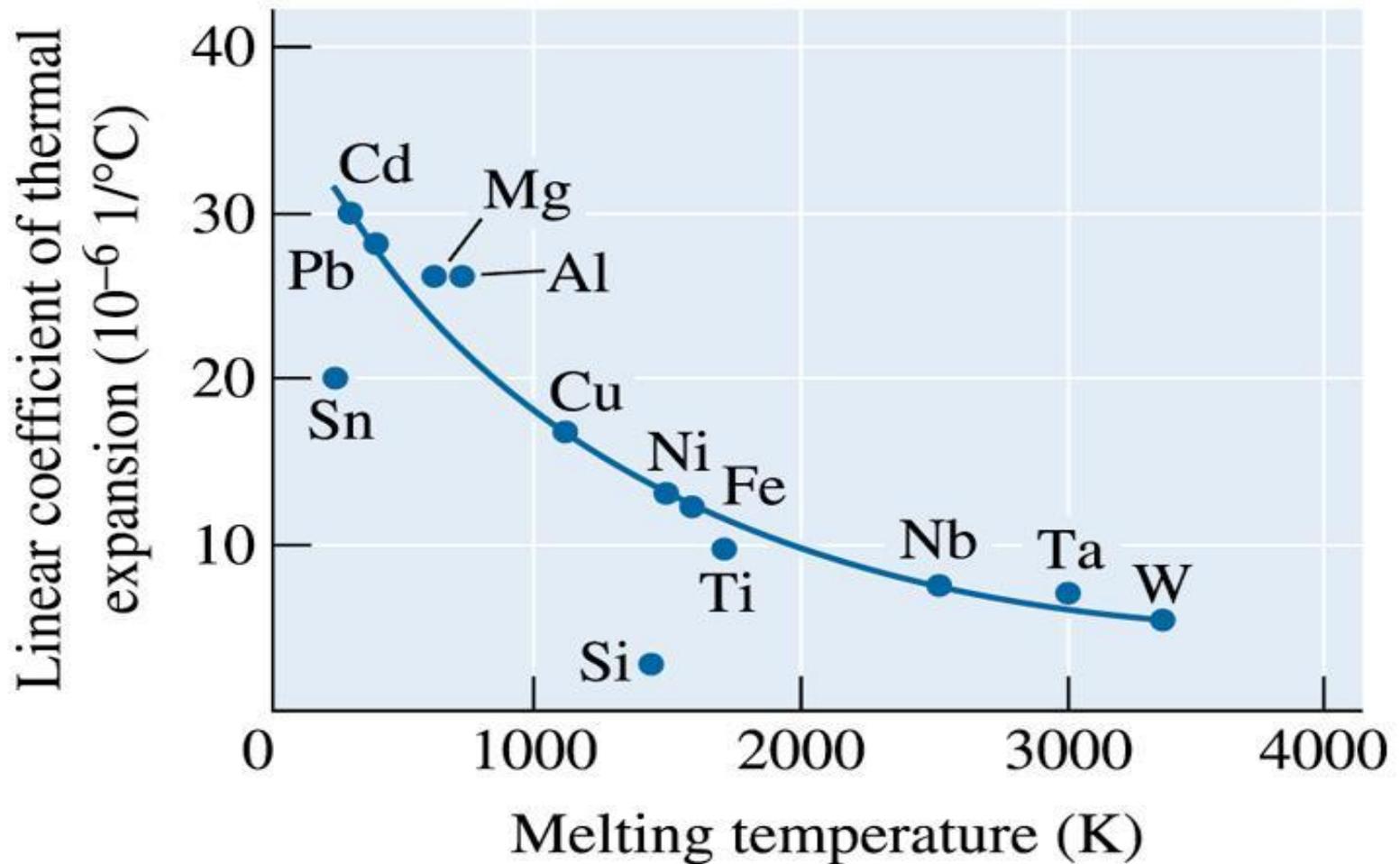
Expansão térmica

- **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 |



©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

| <i>Material</i> | α_f [[°C) ⁻¹ × 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 |

Expansão térmica de trilhos



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_f [$^{\circ}\text{C}^{-1} \times 10^{-6}$] ^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 |
| <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 |
| <i>Polymers</i> | |
| 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_f [(°C) ⁻¹ × 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 |



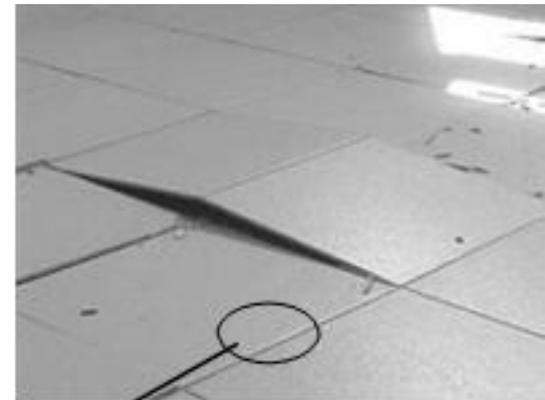
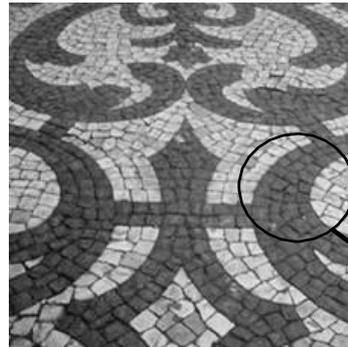
Expansão & contração:

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

Solução: balancear comprimento segundo a amplitude térmica ou ΔT

Materiais cerâmicos também se dilatam/contraem

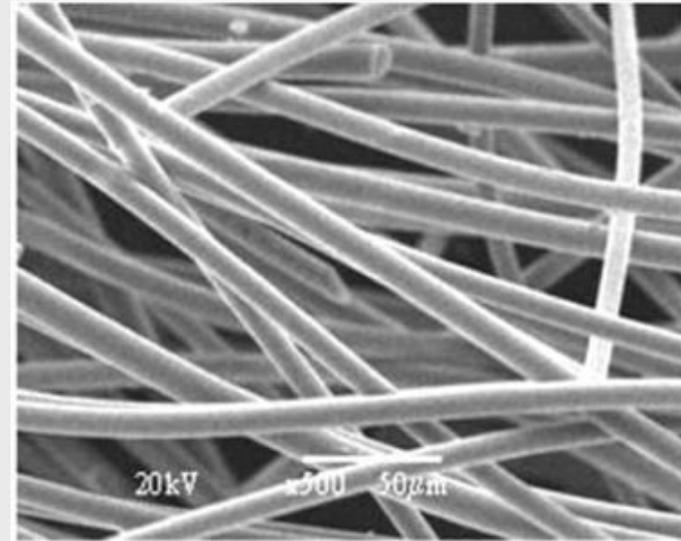
| <i>Material</i> | α_1 [(°C) ⁻¹ × 10 ⁻⁶] ^b |
|--|---|
| <i>Ceramics</i> | |
| Alumina (Al ₂ O ₃) | 7.6 |
| Magnesia (MgO) | 13.5 ^d |
| Spinel (MgAl ₂ O ₄) | 7.6 ^d |
| Fused silica (SiO ₂) | 0.4 |
| Soda-lime glass | 9.0 |
| Borosilicate (Pyrex) glass | 3.3 |
| ... | |



**Juntas de
expansão**

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

| <i>Material</i> | α_l [(°C) ⁻¹ × 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



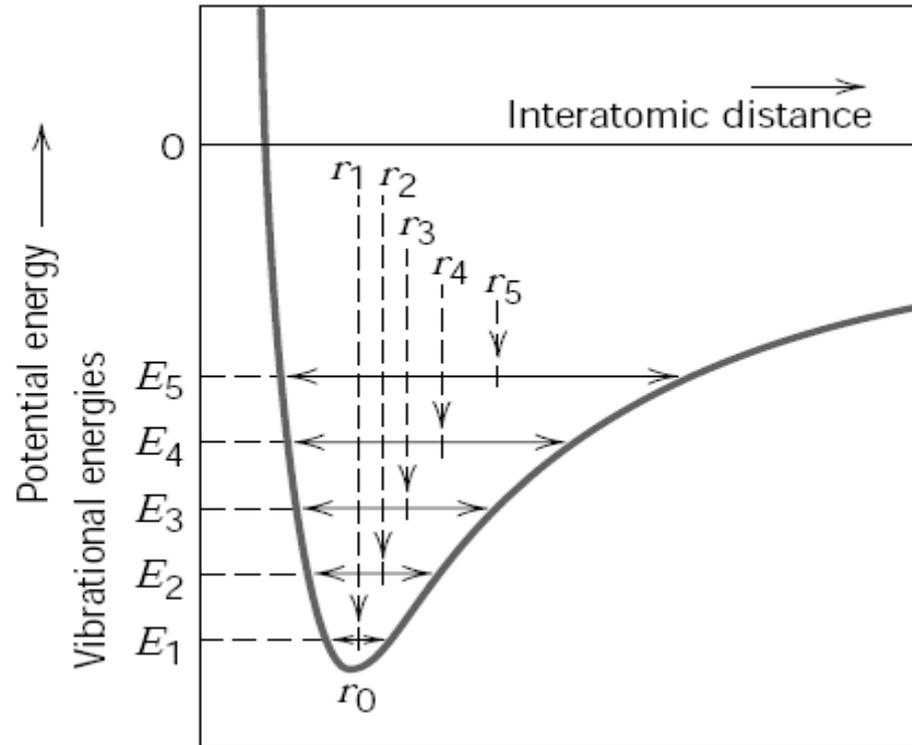
- α Médio quase nulo (~ 0)
- Baixa condutividade térmica

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.

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?

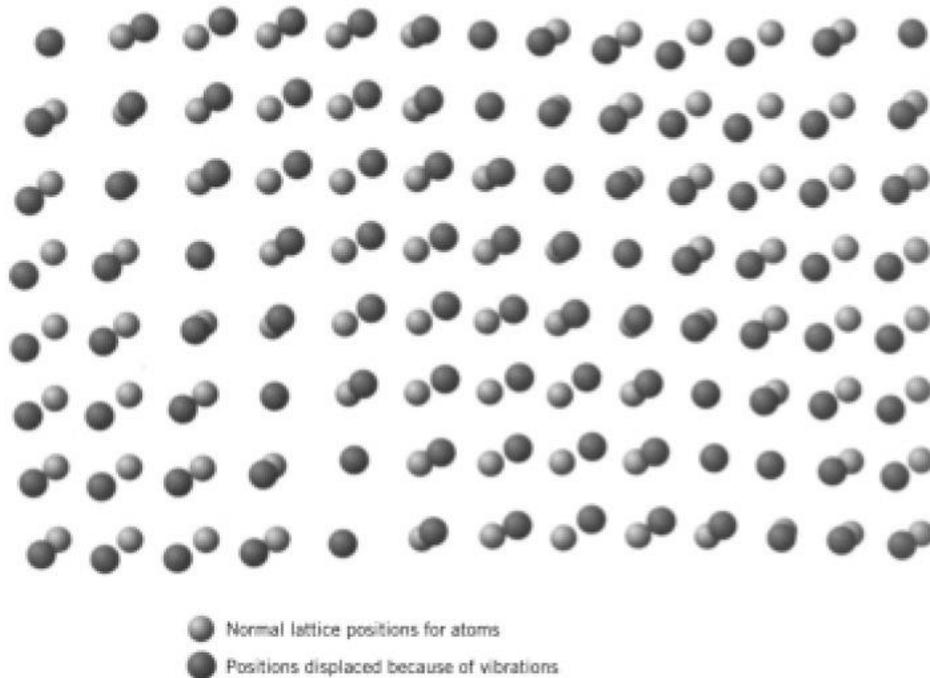


FIGURE 17.1 Schematic representation of the generation of lattice waves in a crystal by means of atomic vibrations. (Adapted from "The Thermal Properties of Materials" by J. Ziman. Copyright © 1967 by Scientific American, Inc. All rights reserved.)

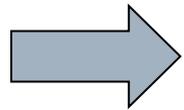
Fónon- "pacote" de ondas elásticas.

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.

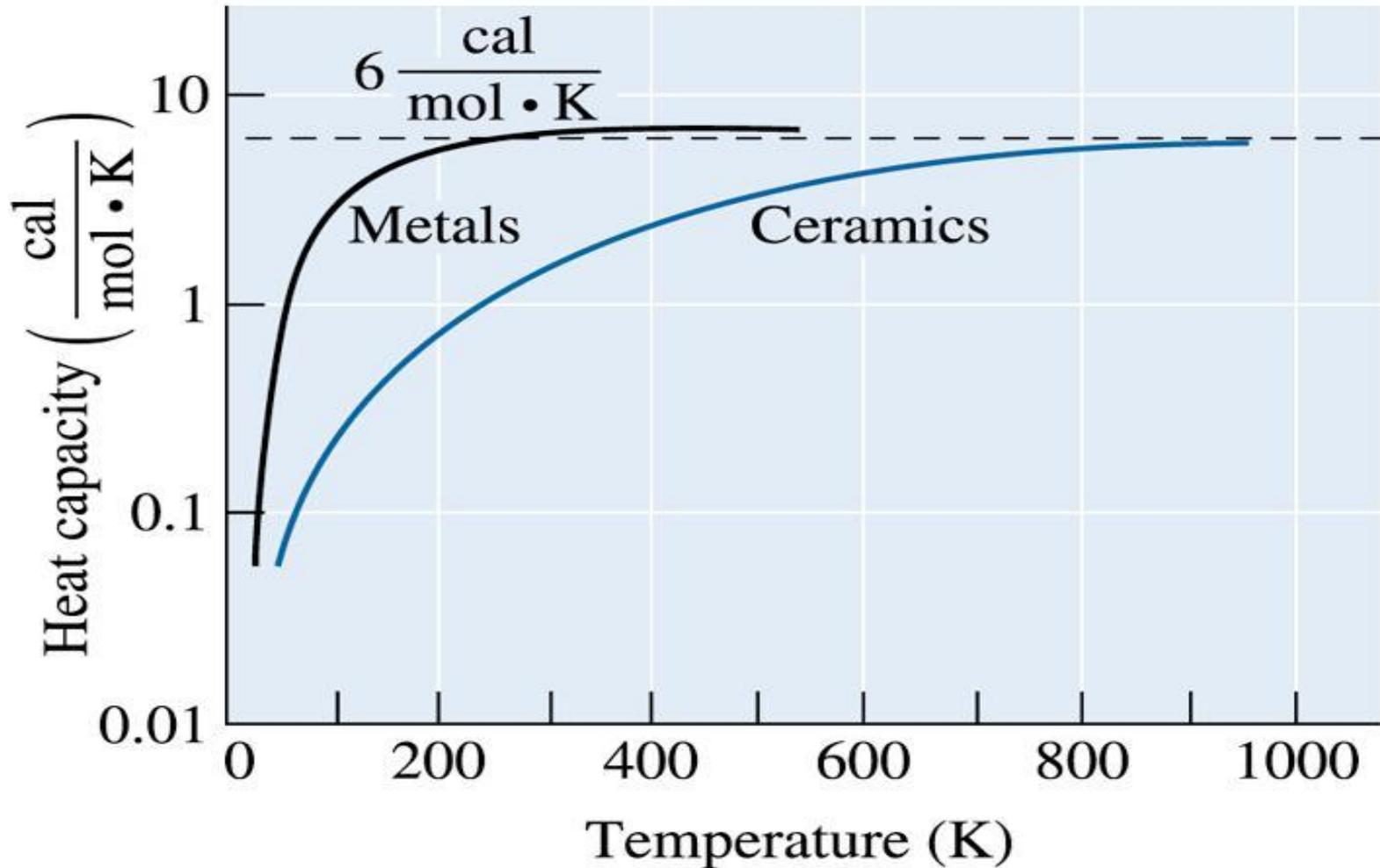
Influência da temperatura

$C_V = AT^3$, 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 $3 R$.



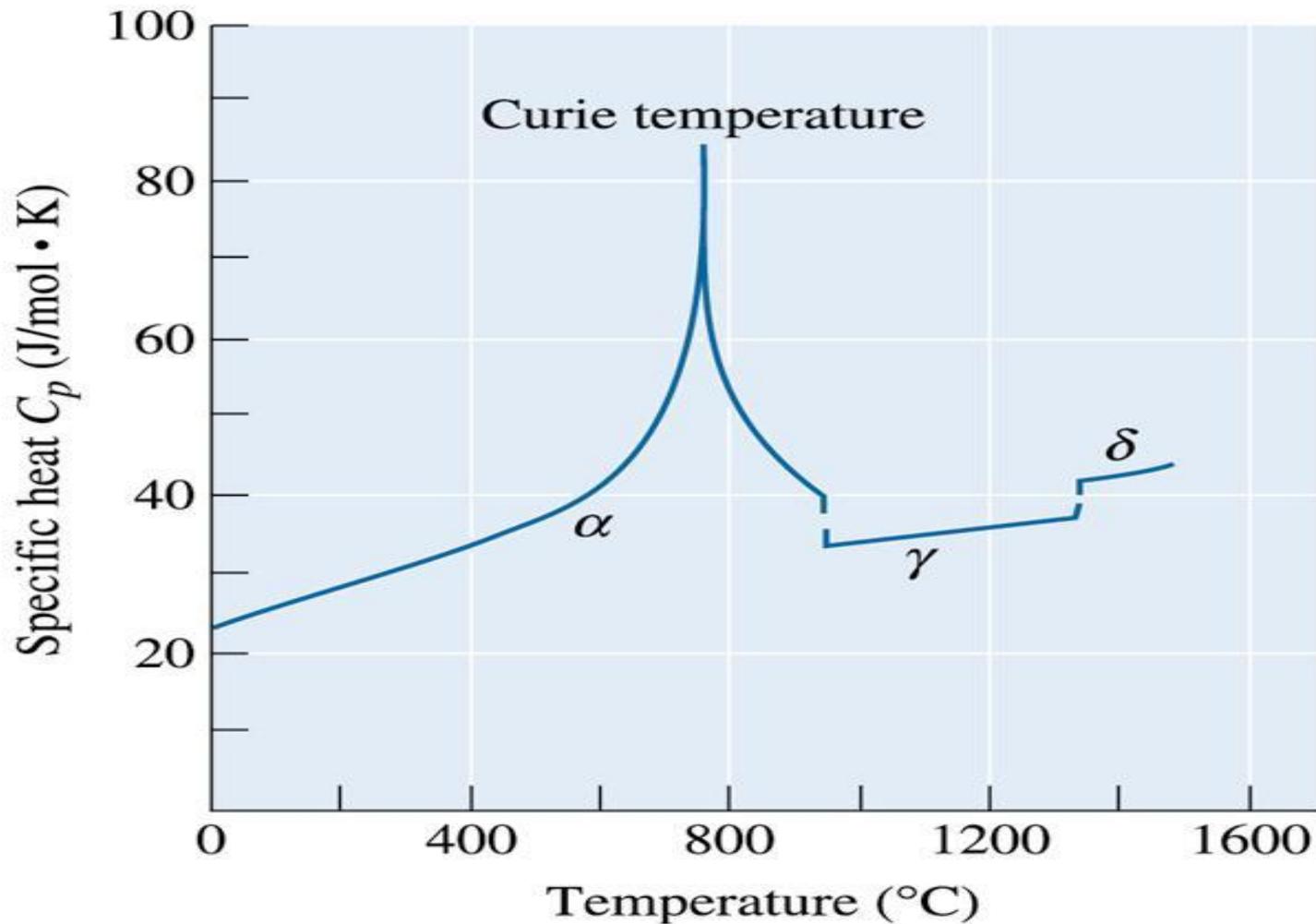
©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning[®] is a trademark used herein under license.

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

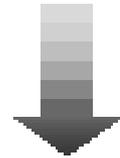
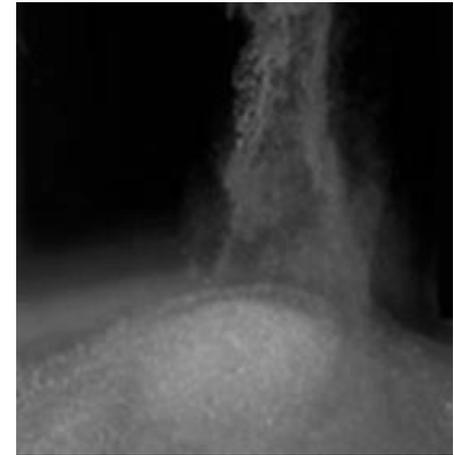
C_p Água ~ 4000 J/Kg.K



Para apagar um incêndio:

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

C_p Cobre = 386 J/Kg.K



Cobre tem C_p e muda de temperatura usando muito 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

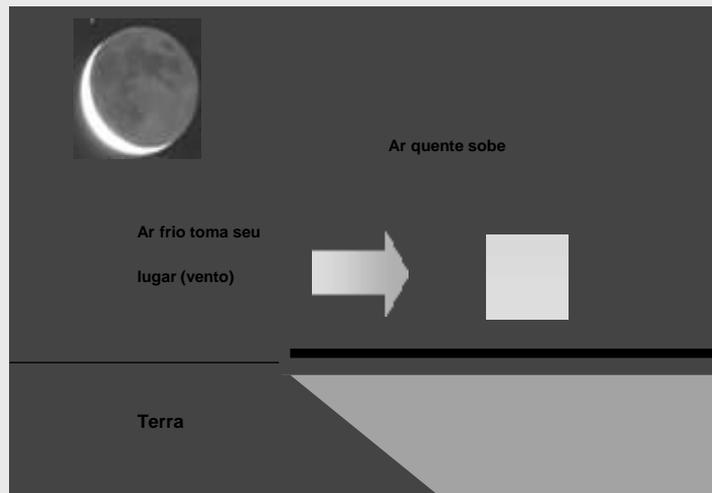
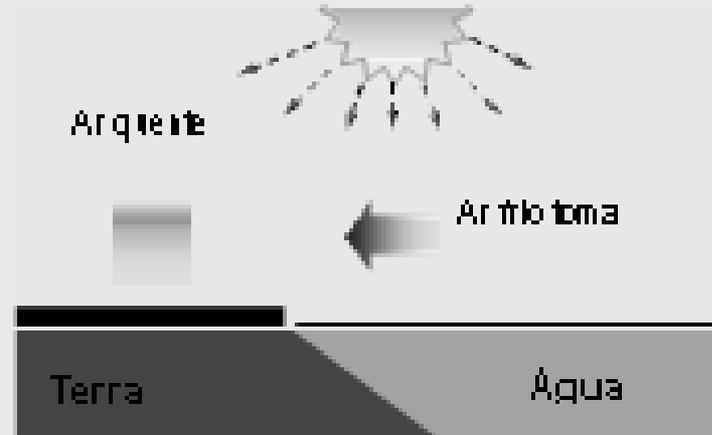
Água ~ 4000 J/Kg.K

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

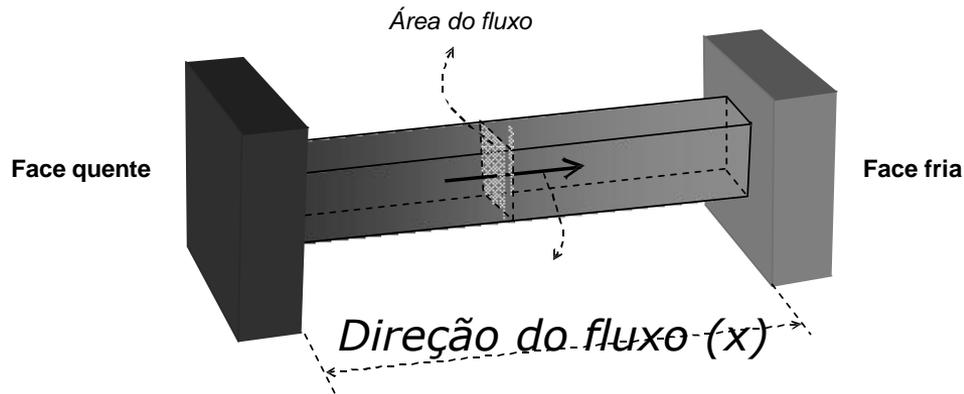
- Terra tem menor CP e se aquece mais rapidamente
- Água tem maior CP e demora a se aquecer
- Terra aquece o ar sobre ela, gerando vento vindo do mar (+ frio)

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)

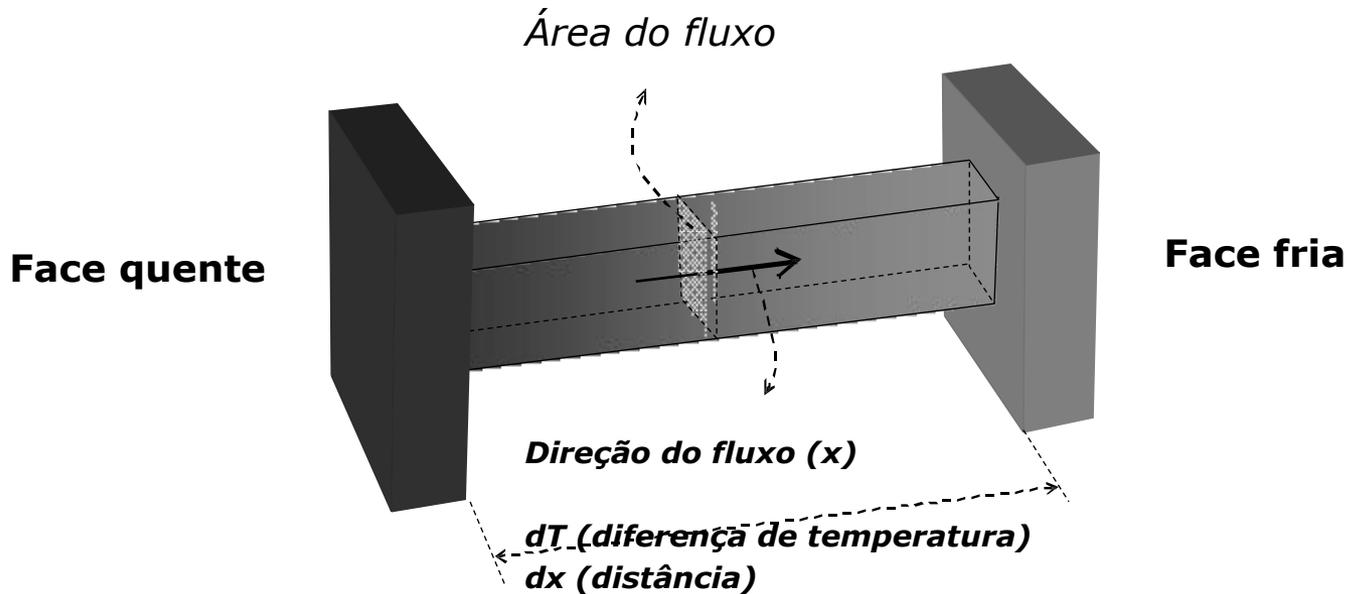
➔ **Convecção**: movimento de um fluido (ar, água)

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

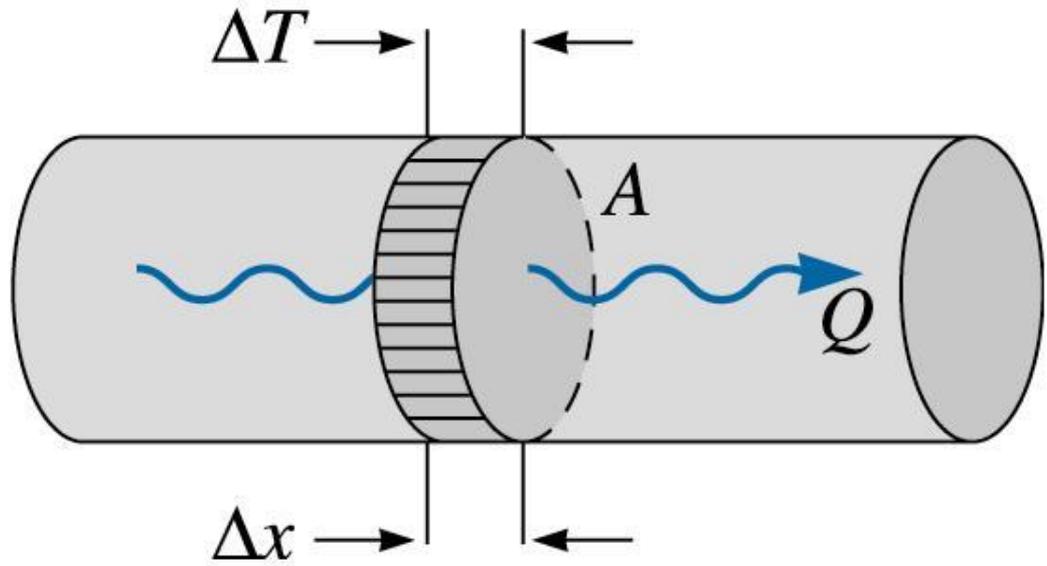
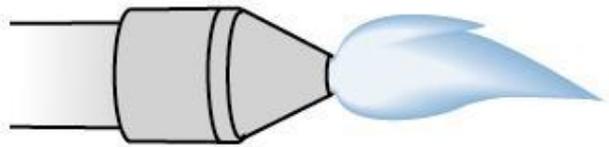
k = condutividade térmica

dT/dx = gradiente de temperatura

(em estado estacionário = não depende do tempo)

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

Heat source



©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)*

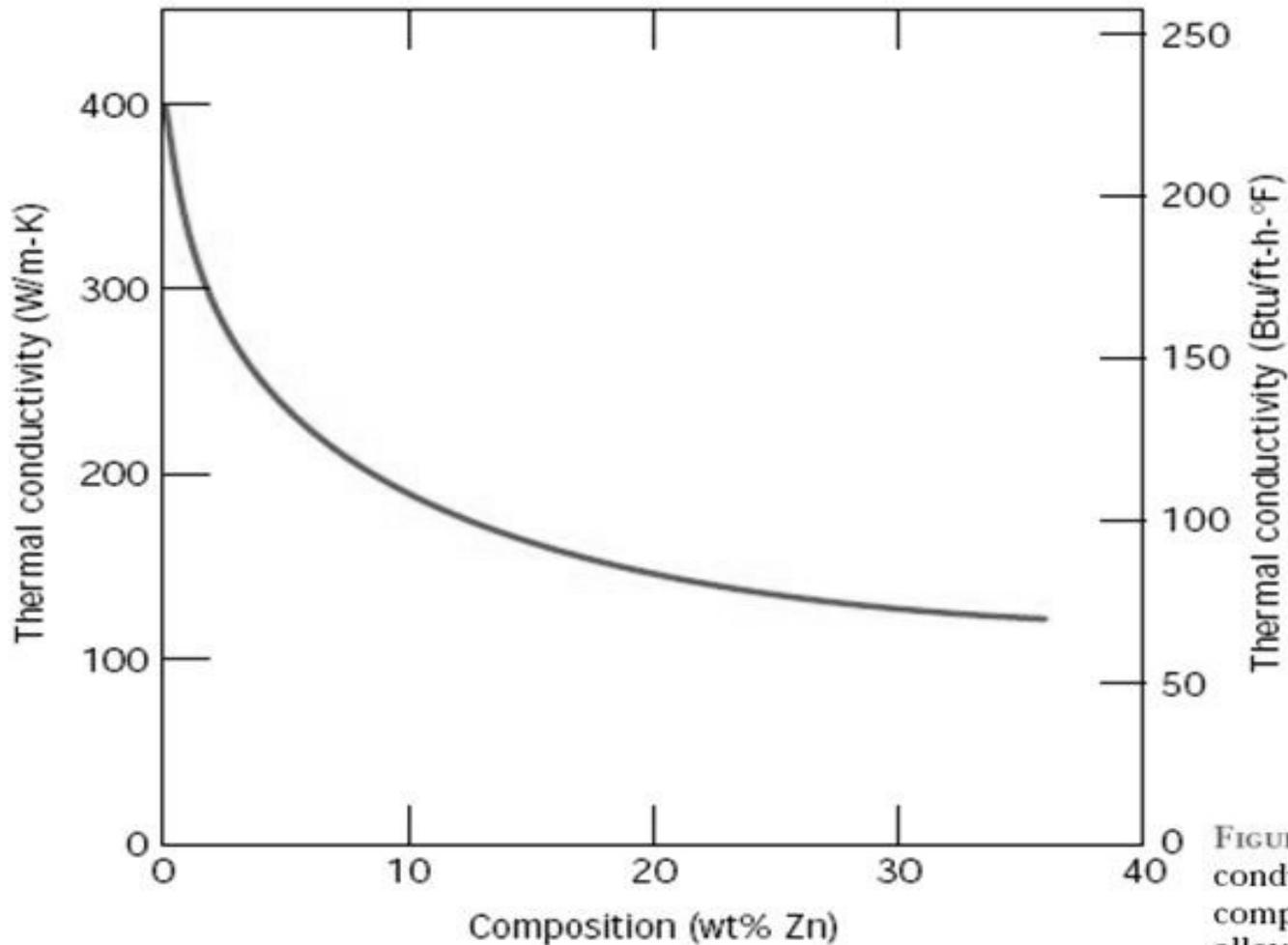
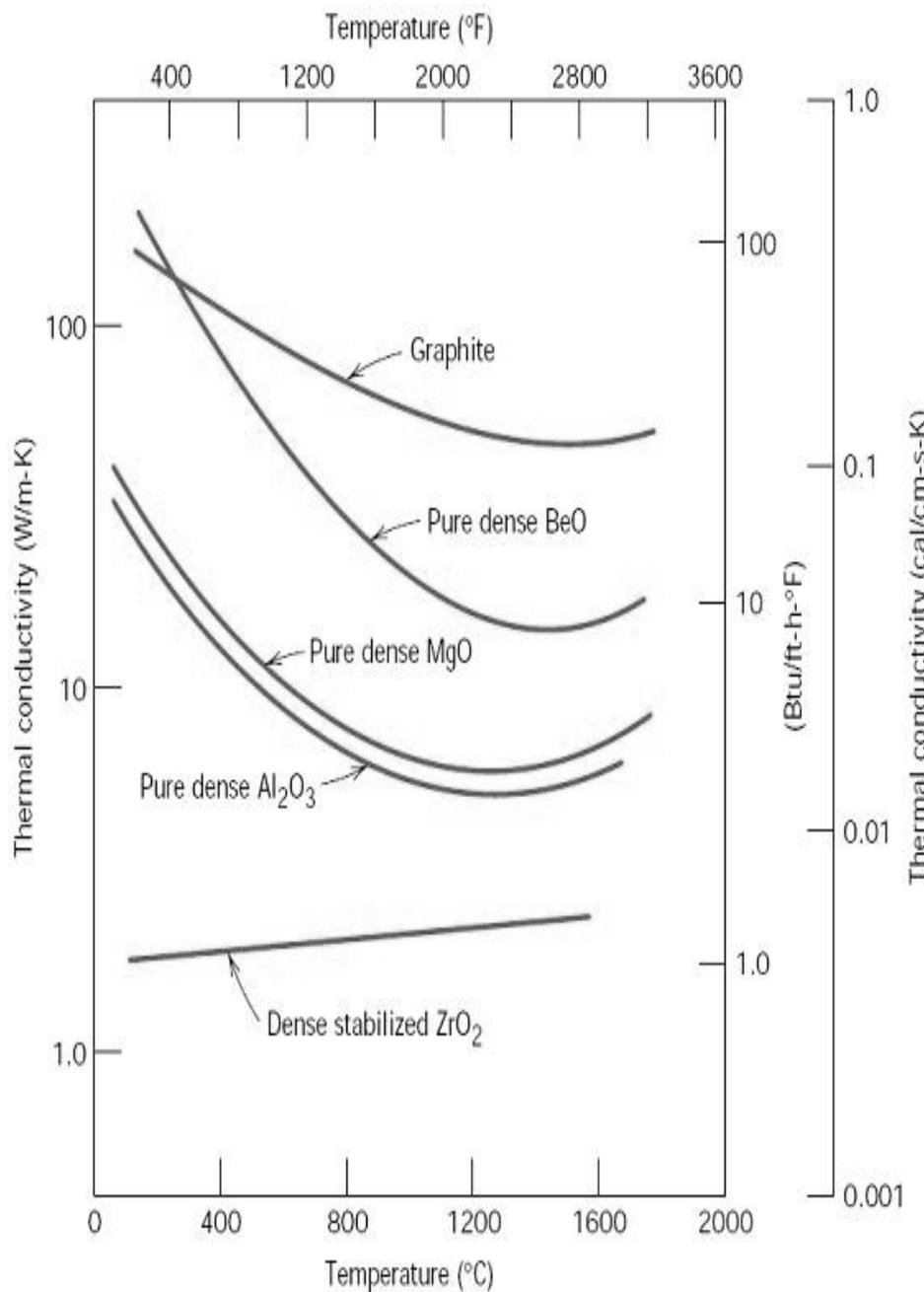


FIGURE 17.4 Thermal conductivity versus composition for copper-zinc alloys. (Adapted from *Metals Handbook: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Pure Metals*, Vol. 2, 9th edition, H. Baker, Managing Editor, American Society for Metals, 1979, p. 315.)

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



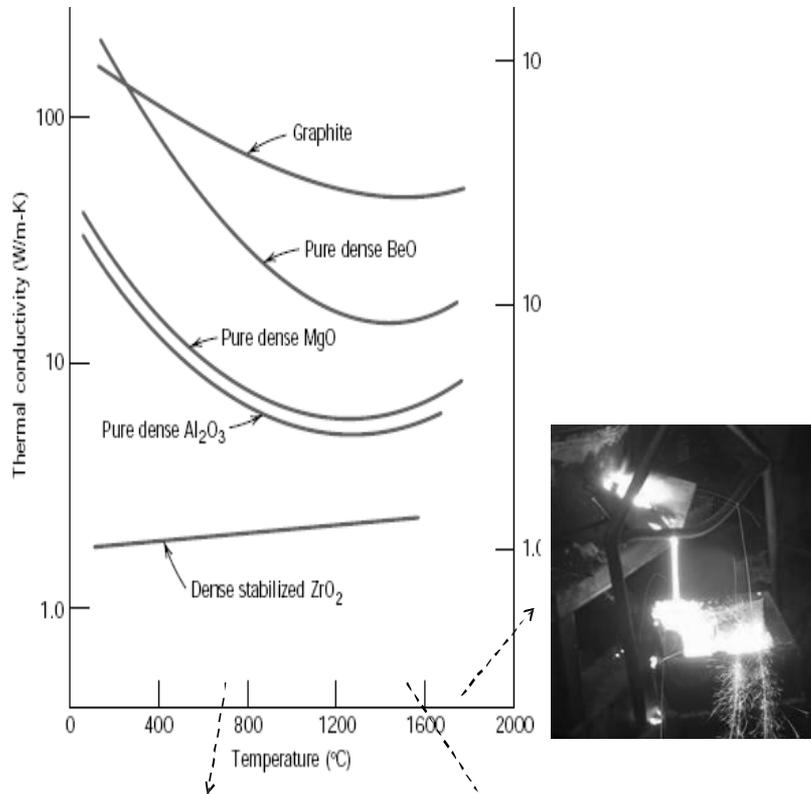
O aumento na quantidade de fônons com temperatura dificulta a condução



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.)

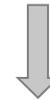
Condutividade térmica: fônons em cerâmicas



Cerâmicas cristalinas (óxidos, principalmente)

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

R: Diferentes mecanismos de condução de calor

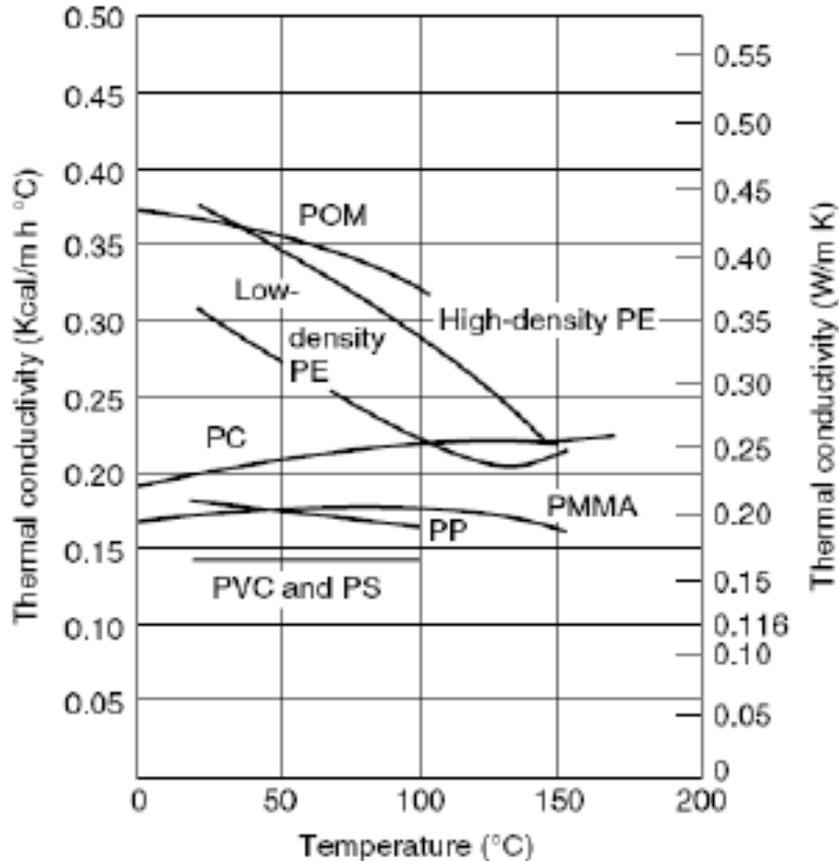


Acima de 1000°C: emissão de grande quantidade de radiação infravermelha = condução por irradiação



Condução por fônons deixa de ser a mais importante

Fônons em polímeros

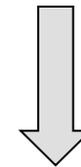


Por serem semi-cristalinos ou amorfos:

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

a) **Cadeias flexíveis**

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



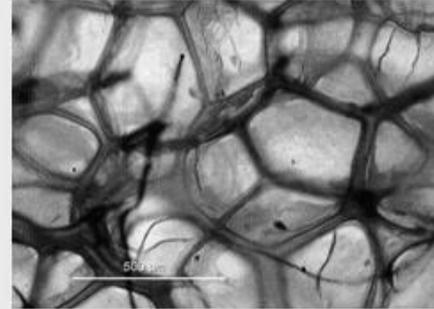
Materiais intrinsecamente isolantes térmicos

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

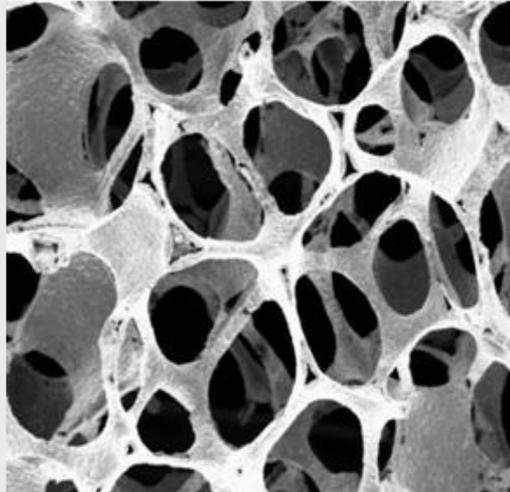
**Valores de k muito,
muito baixos**



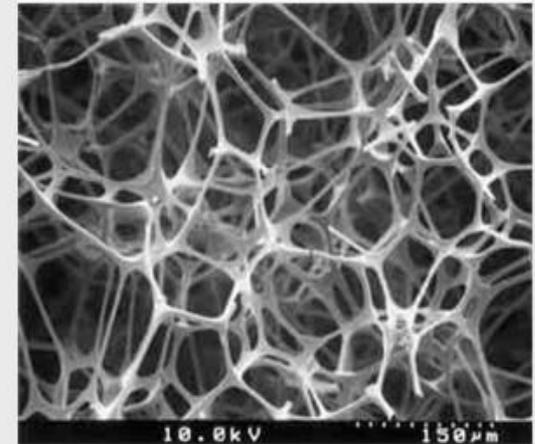
**Espuma cerâmica com célula aberta:
filtração de metal líquido**



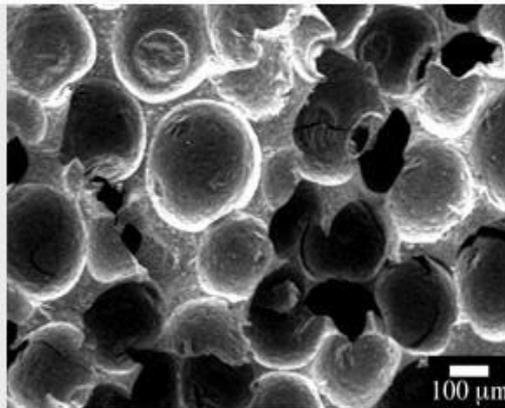
Espuma metálica (isolamento acústico)



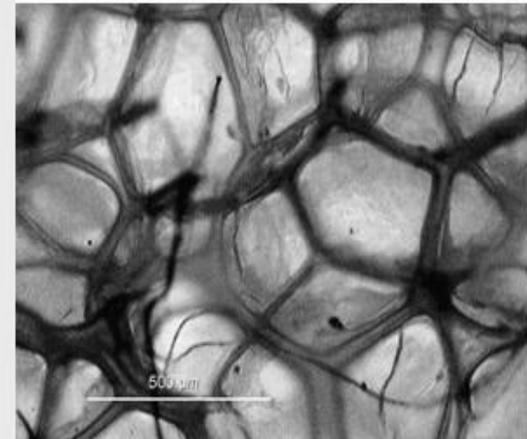
**Espuma polimérica com célula aberta:
filtração, esponjas**



**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)

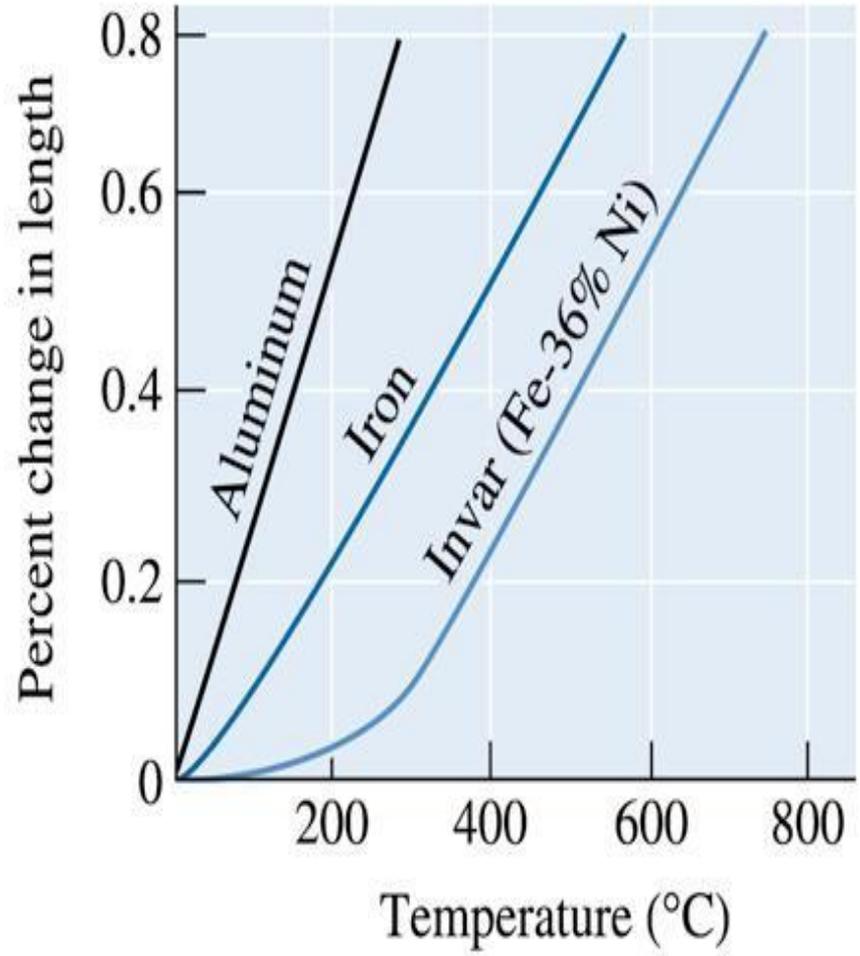
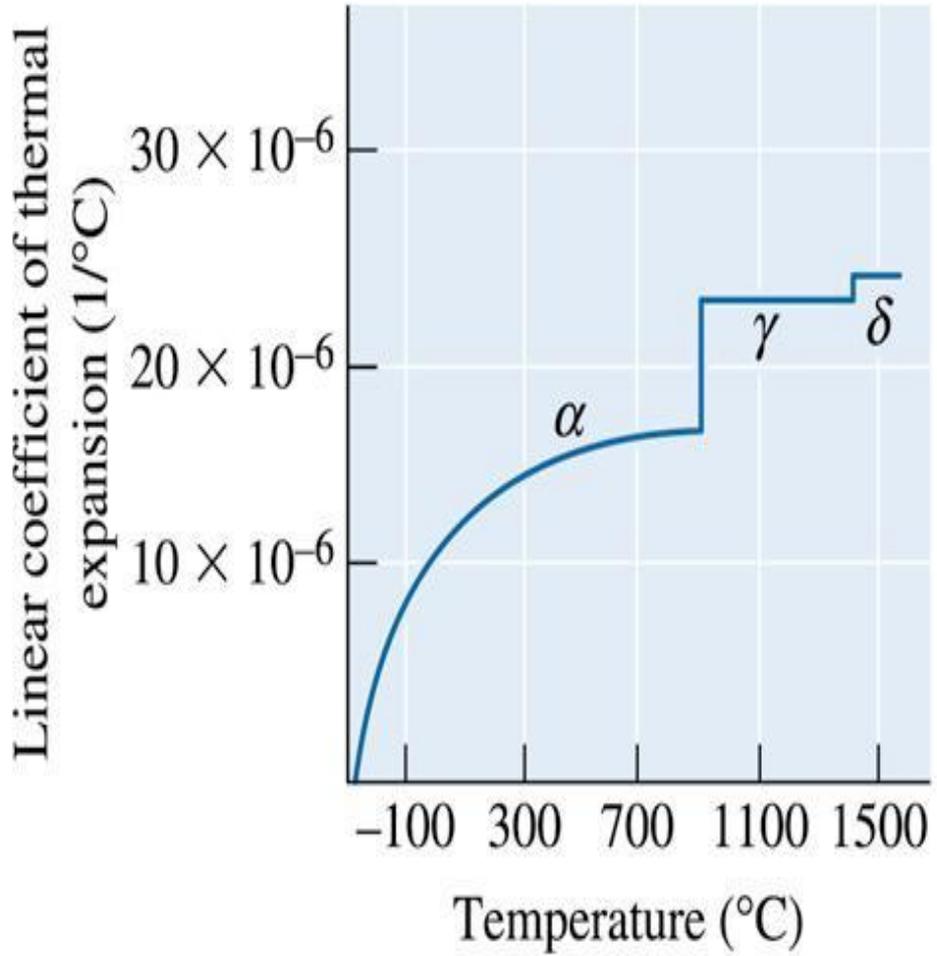
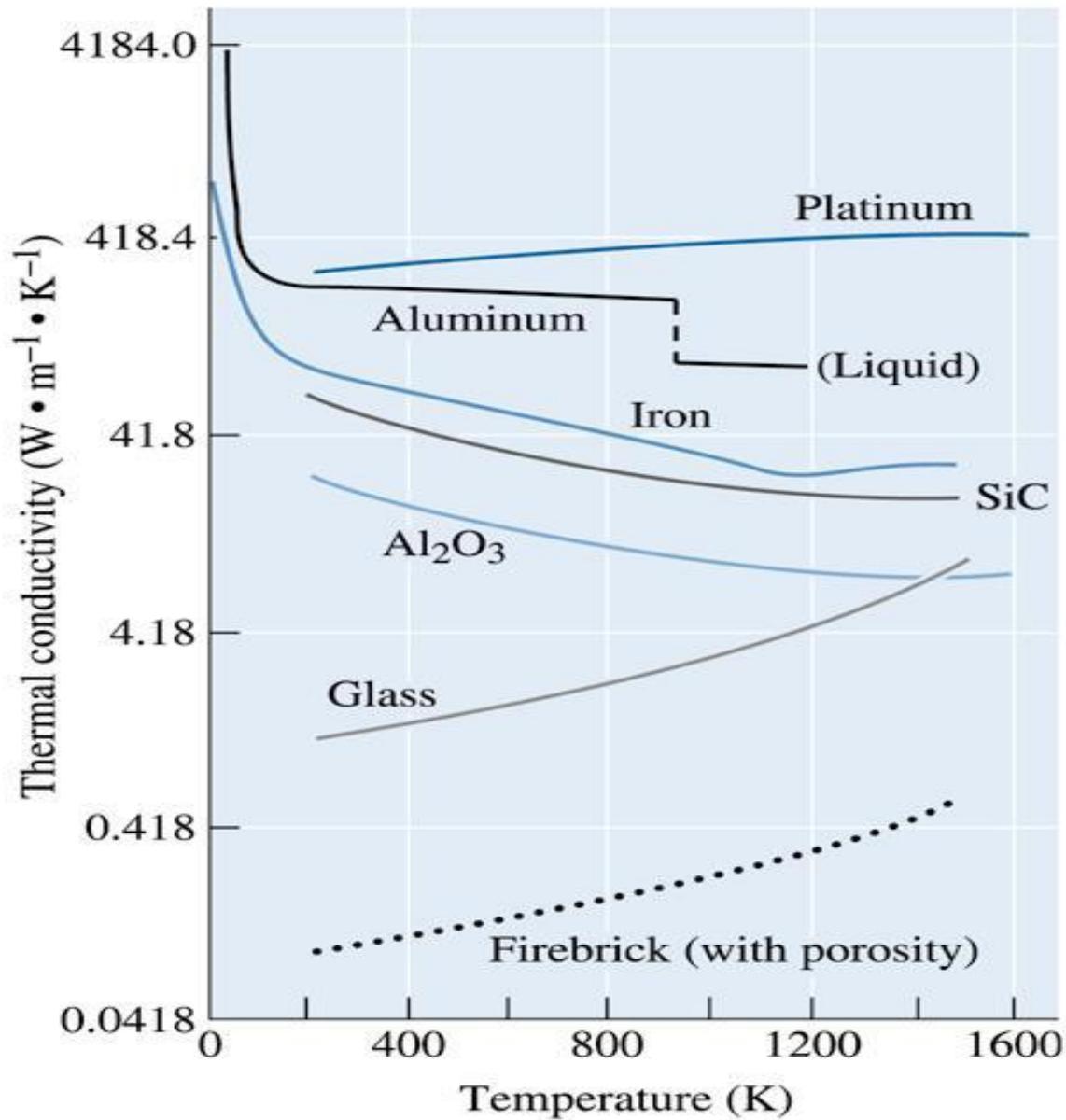


TABLE 21-3 ■ *Typical values of room temperature thermal conductivity of selected materials*

| 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> | 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 |



**Trocadores
de calor**



Condutividade térmica em metais

| <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 | 17 |
| (54Fe-29Ni-17Co) | |
| Invar (64Fe-36Ni) | 10 |
| Super Invar | 10 |
| (63Fe-32Ni-5Co) | |



Podem causar aquecimento do interior / exterior de máquina térmicas

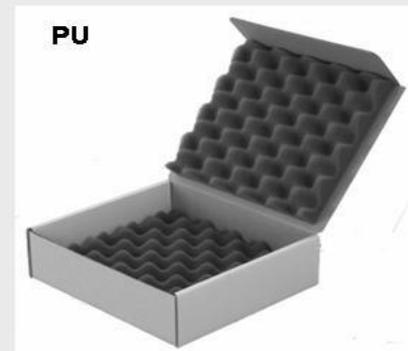
Condutividade térmica: polímeros

| <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:

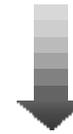
↓ $k_{\text{Polímeros}}$ + ↓ k_{ar} + espalhamento de fônons



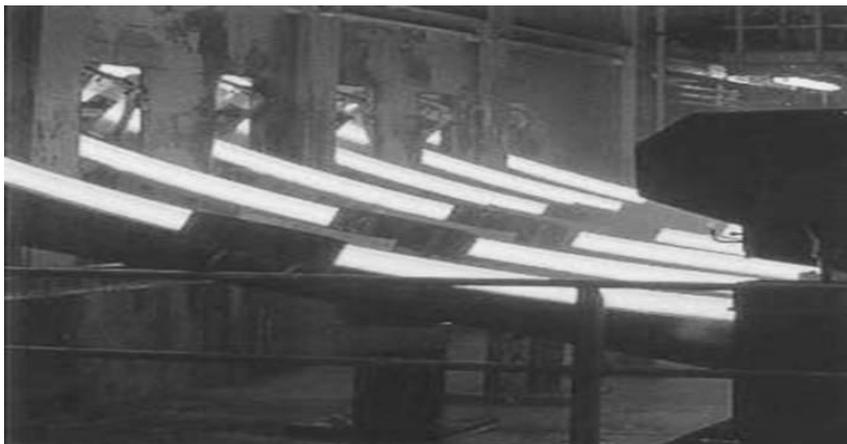
Condutividade térmica de cerâmicas

| <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



Tensões térmicas

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

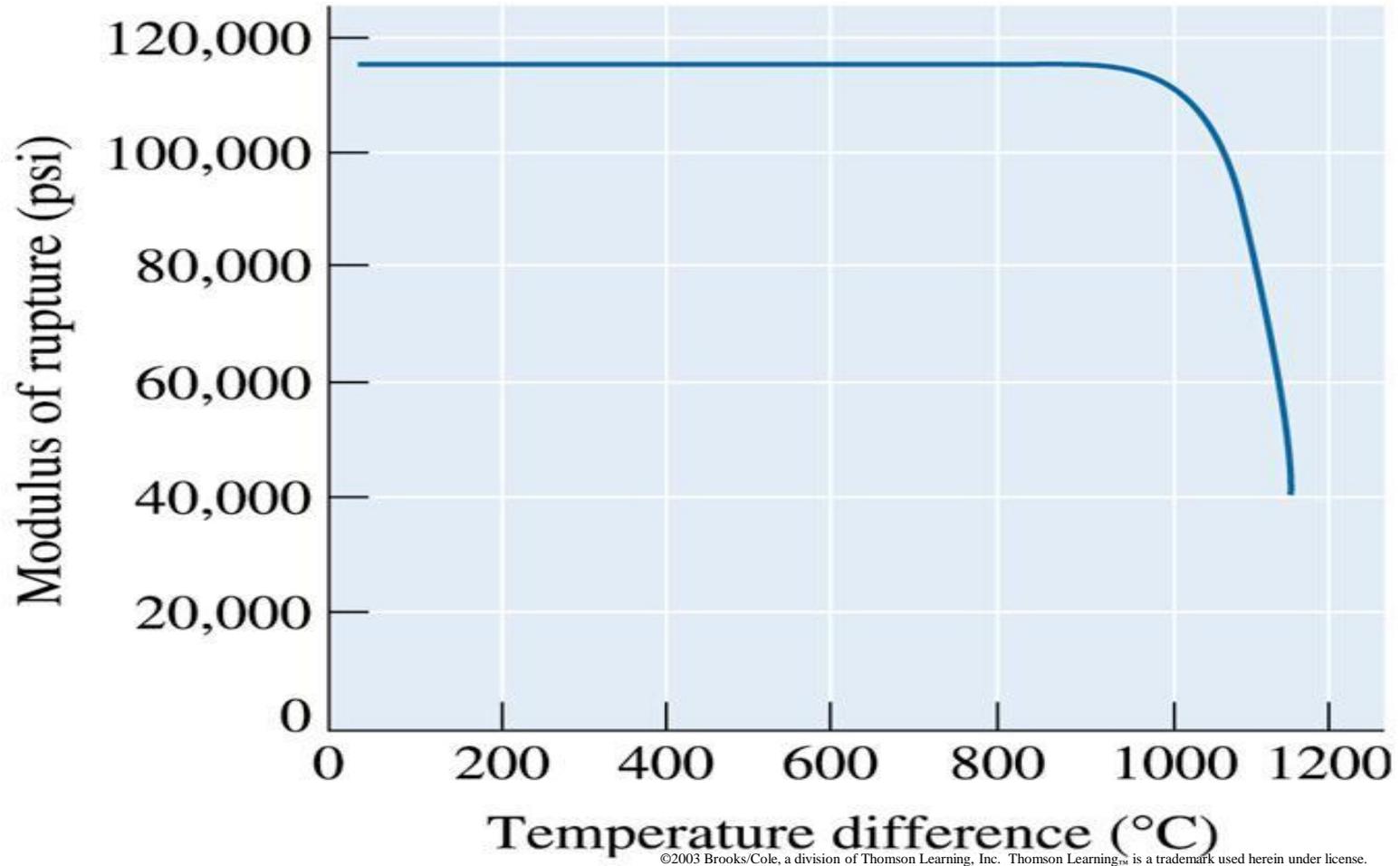
$$\sigma = E \cdot \alpha_L \Delta T$$

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