

# 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?***

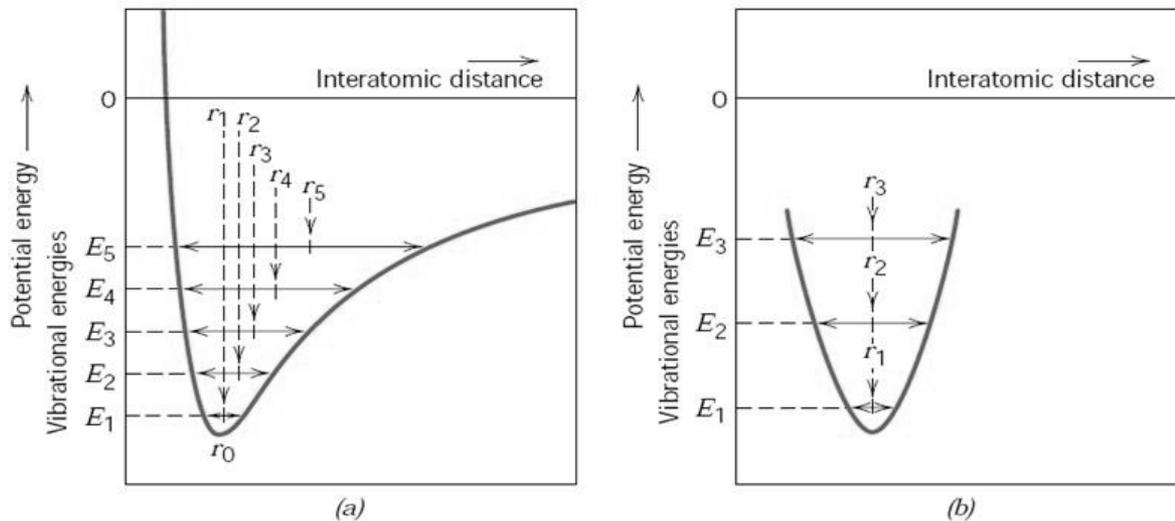
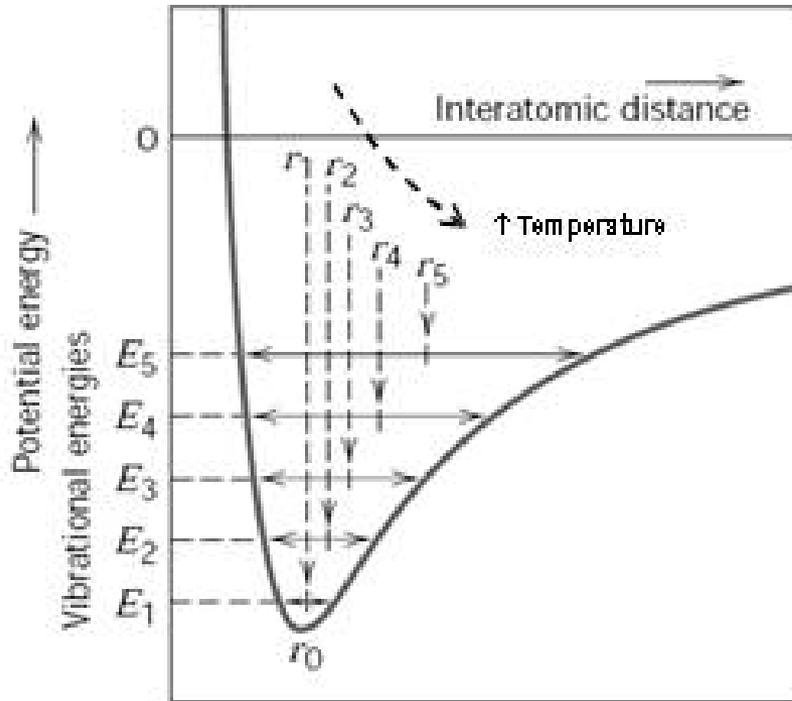


FIGURE 17.3 (a) Plot of potential energy versus interatomic distance, demonstrating the increase in interatomic separation with rising temperature. With heating, the interatomic separation increases from  $r_0$  to  $r_1$  to  $r_2$ , and so on. (b) For a symmetric potential energy-versus-interatomic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

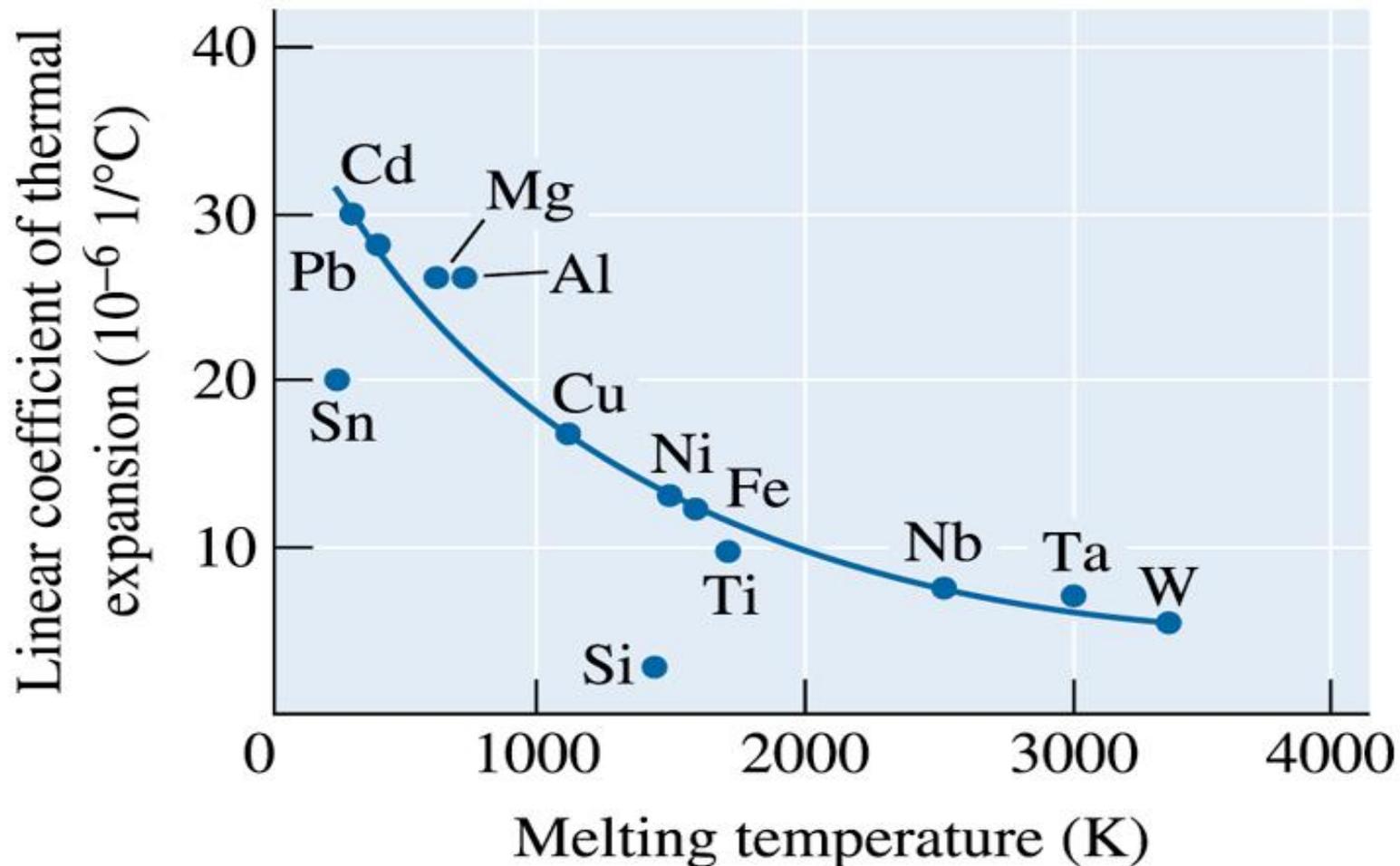
**T4 < T5 → E5 → r5**

**Com ↑ temperatura:**

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



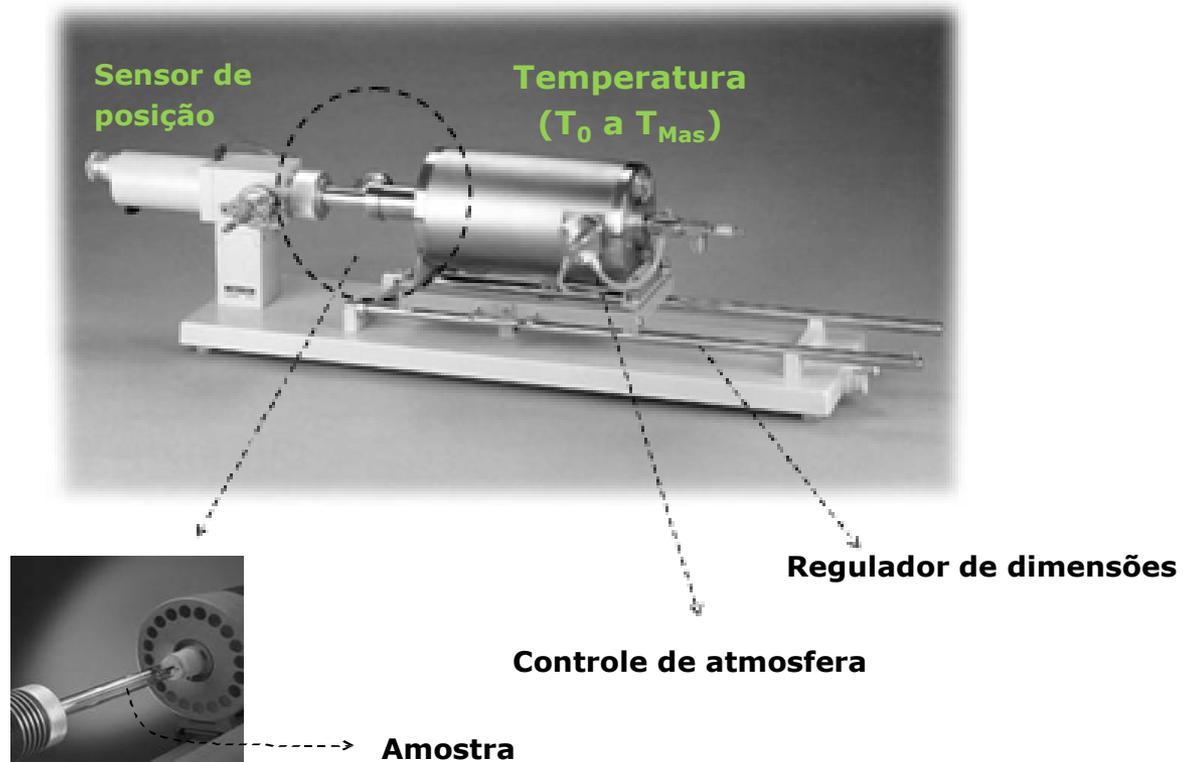
**↑ distância inter-atômica**



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

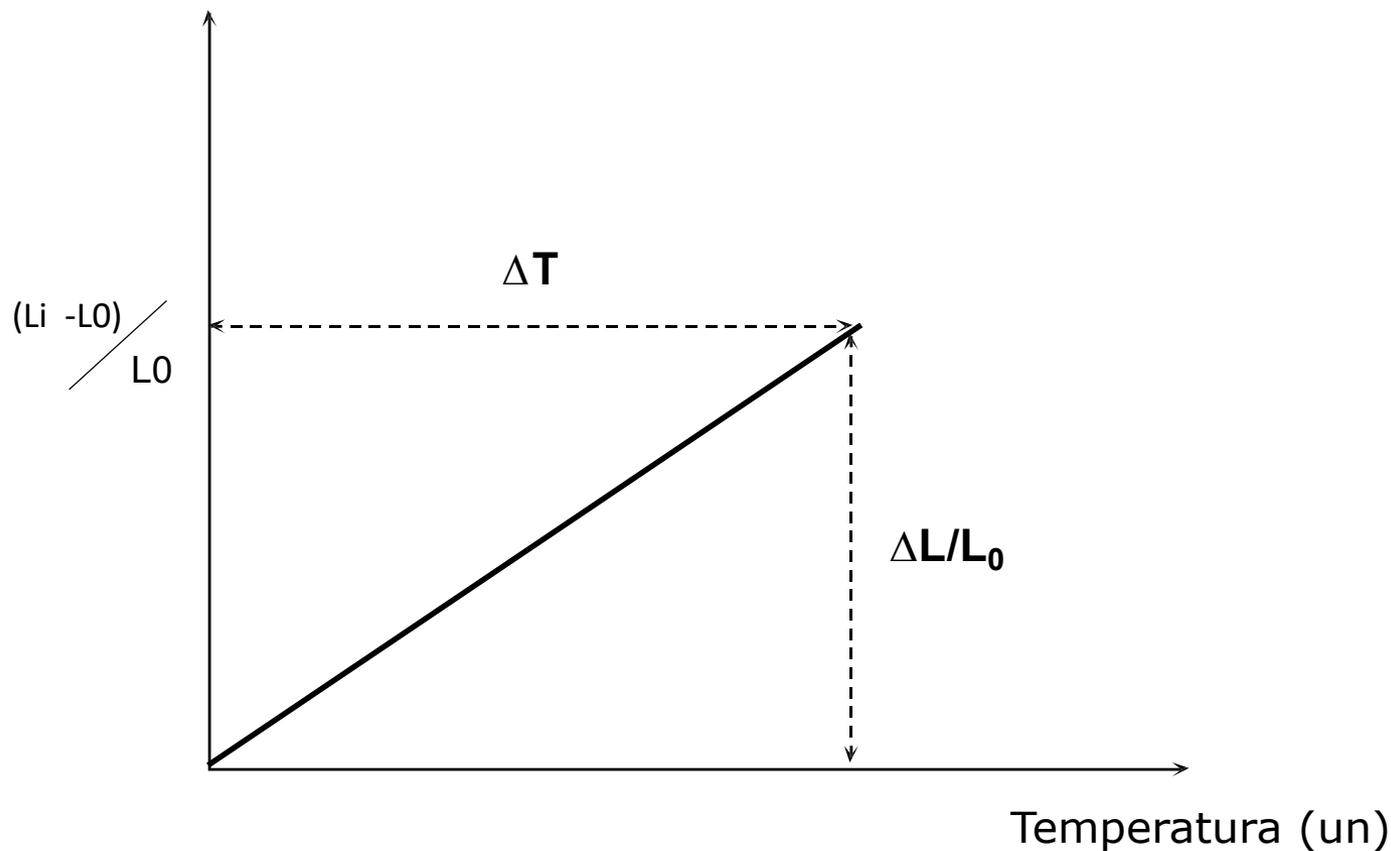
**Relação entre o coeficiente de expansão térmica linear e ponto de fusão para metais**

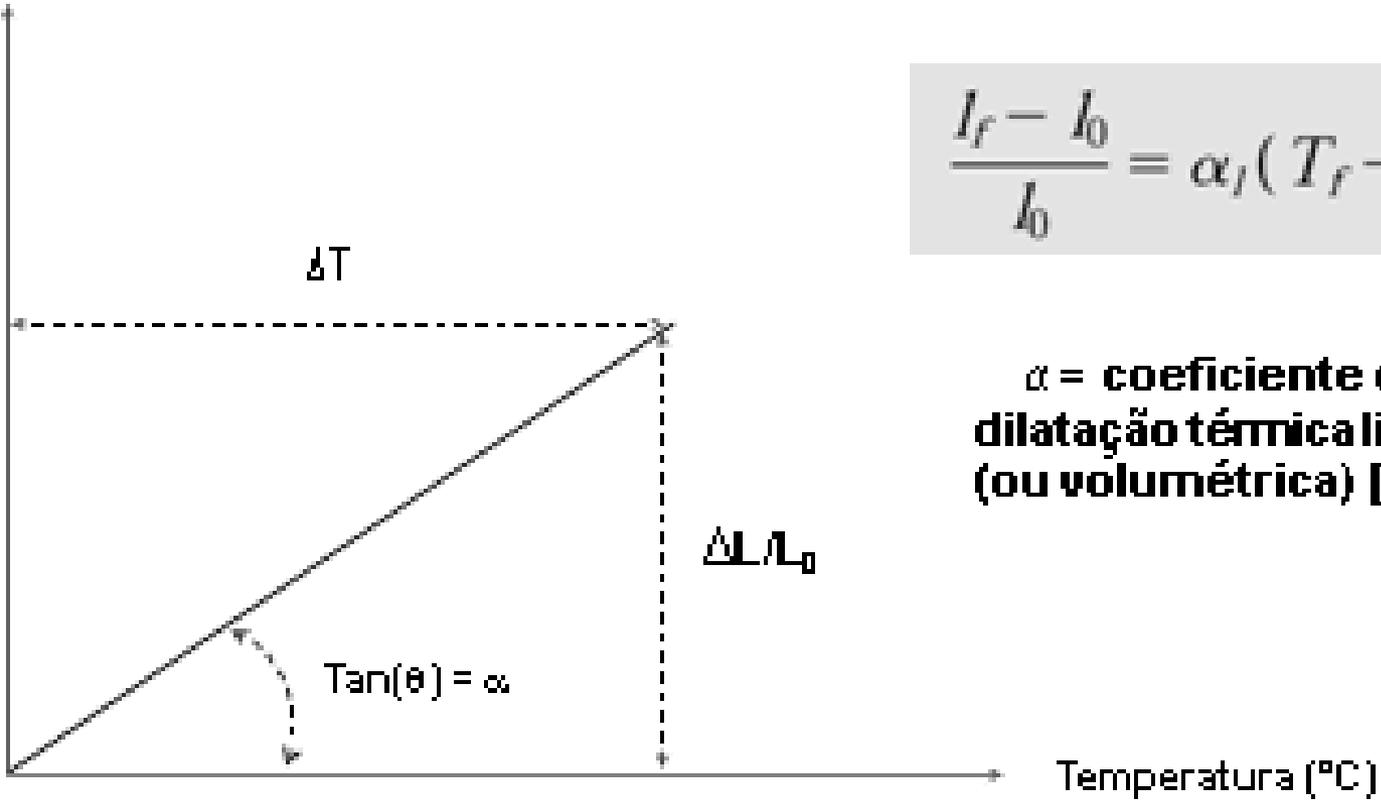
# Dilatômetro moderno instrumentado



## Dimensão normalizada

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





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

$\alpha$  = coeficiente de dilatação térmica linear (ou volumétrica) [°C<sup>-1</sup>]

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*

| <b>Material</b>                       | <b>Linear Coefficient of Thermal Expansion<br/>(<math>\times 10^{-6}</math> 1/0°C)</b> |
|---------------------------------------|--|
| 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 <sub>2</sub> O <sub>3</sub>        | 6.7  |
| Fused silica                          | 0.55   |
| Partially stabilized ZrO <sub>2</sub> | 10.6   |
| SiC                                   | 4.3  |
| Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>        | 3.3  |
| Soda-lime glass                       | 9.0  |

## Expansão térmica de trilhos

| <i>Material</i>                             | $\alpha_l$<br>[ $^{\circ}\text{C}^{-1} \times 10^{-6}$ ] <sup>b</sup> |
|---|---|
| <i>Metals</i>                               |   |
| Aluminum                                    | 23.6  |
| Copper                                      | 17.0  |
| Gold  | 14.2  |
| Iron  | 11.8  |
| <hr style="border-top: 1px dashed black;"/> |   |
| Nickel                                      | 13.3  |
| Silver                                      | 19.7  |
| Tungsten                                    | 4.5   |
| 1025 Steel                                  | 12.0  |
| 316 Stainless steel                         | 16.0  |
| Brass (70Cu-30Zn)                           | 20.0  |
| Kovar                                       | 5.1   |
| (54Fe-29Ni-17Co)                            |   |
| Invar (64Fe-36Ni)                           | 1.6   |
| Super Invar                                 | 0.72  |
| (63Fe-32Ni-5Co)                             |   |



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



**Juntas de expansão**

| <i>Material</i>                | $\alpha_l$<br>[ $^{\circ}\text{C}^{-1} \times 10^{-6}$ ] |
|--------------------------------|--|
| <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<br>(54Fe-29Ni-17Co)      | 5.1  |
| Invar (64Fe-36Ni)              | 1.6  |
| Super Invar<br>(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>                             | $\alpha_l$<br>[(°C) <sup>-1</sup> × 10 <sup>-6</sup> ] <sup>b</sup> |
|---|---|
| <b>Metals</b>                               |   |
| 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<br>(54Fe-29Ni-17Co)                   | 5.1   |
| Invar (64Fe-36Ni)                           | 1.6   |
| Super Invar<br>(63Fe-32Ni-5Co)              | 0.72  |
| <b>Ceramics</b>                             |   |
| Alumina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )   | 7.6   |
| Magnesia (MgO)                              | 13.5 <sup>d</sup>   |
| Spinel (MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )  | 7.6 <sup>d</sup>  |
| Fused silica (SiO <sub>2</sub> )            | 0.4   |
| Soda-lime glass                             | 9.0   |
| Borosilicate (Pyrex) glass                  | 3.3   |
| <b>Polymers</b>                             |   |
| Polyethylene<br>(high density)              | 106–198   |
| Polypropylene                               | 145–180   |
| Polystyrene                                 | 90–150  |
| Polytetrafluoroethylene<br>(Teflon)         | 126–216   |
| Phenol-formaldehyde,<br>phenolic (Bakelite) | 122   |
| Nylon 6,6                                   | 144   |
| Polyisoprene                                | 220   |



| <i>Material</i>     | $\alpha_i$<br>[(°C) <sup>-1</sup> × 10 <sup>-6</sup> ] <sup>b</sup> |
|---------------------|---|
| <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  $\Delta T$

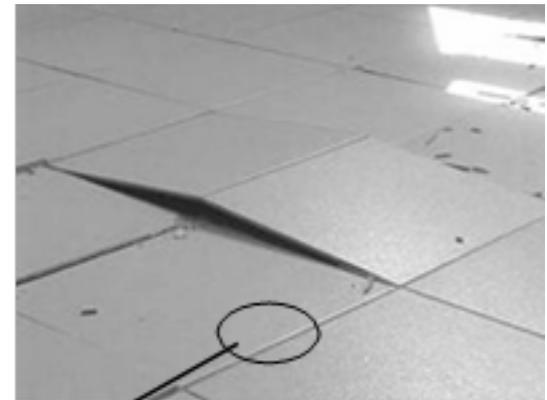
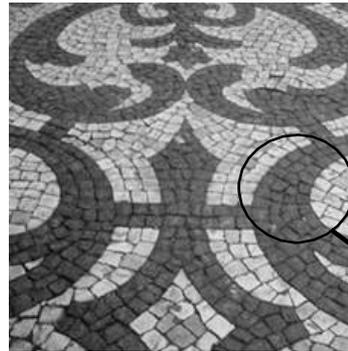
## ***Peças em contato que possuem movimento relativo entre si:***

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

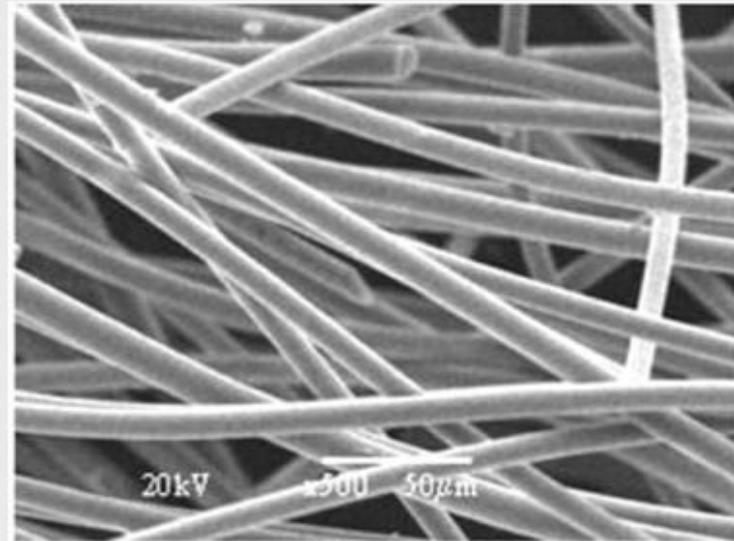
| <i>Material</i>                            | $\alpha_1$<br>[(°C) <sup>-1</sup> × 10 <sup>-6</sup> ] <sup>b</sup> |
|--|---|
| <i>Ceramics</i>                            |   |
| Alumina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )  | 7.6   |
| Magnesia (MgO)                             | 13.5 <sup>d</sup>   |
| Spinel (MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ) | 7.6 <sup>d</sup>  |
| Fused silica (SiO <sub>2</sub> )           | 0.4   |
| Soda-lime glass                            | 9.0   |
| Borosilicate (Pyrex) glass                 | 3.3   |
| ...  |   |



**Juntas de  
expansão**

# Cerâmicas refratárias isolantes à base de fibras de $\text{Al}_2\text{O}_3$ ou lã de rocha

| <i>Material</i>                      | $\alpha_l$<br>[( $^\circ\text{C}$ ) $^{-1}$ $\times 10^{-6}$ ] <sup>b</sup> |
|--------------------------------------|---|
|                                      | <i>Ceramics</i>   |
| Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )  | 7.6   |
| Magnesia ( $\text{MgO}$ )            | 13.5 <sup>d</sup>   |
| Spinel ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ) | 7.6 <sup>d</sup>  |
| Fused silica ( $\text{SiO}_2$ )      | 0.4   |
| Soda-lime glass                      | 9.0   |
| Borosilicate (Pyrex) glass           | 3.3   |

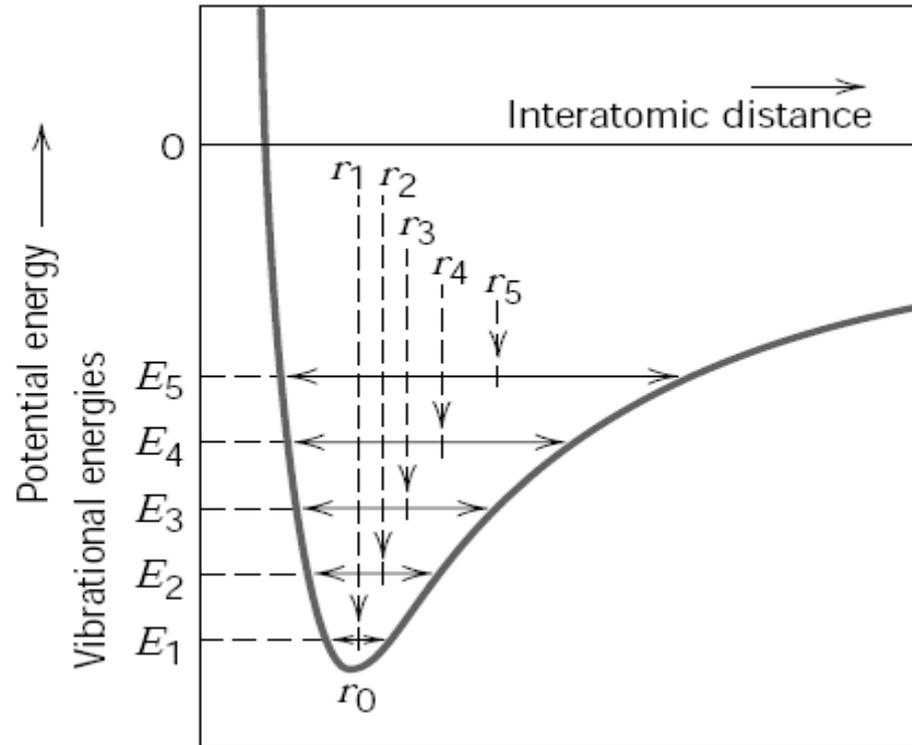


- $\text{Al}_2\text{O}_3$ : elevado  $\alpha$  na direção da fibra
- Fibras randomicamente dispersas



- $\alpha$  Médio quase nulo ( $\sim 0$ )
- 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?

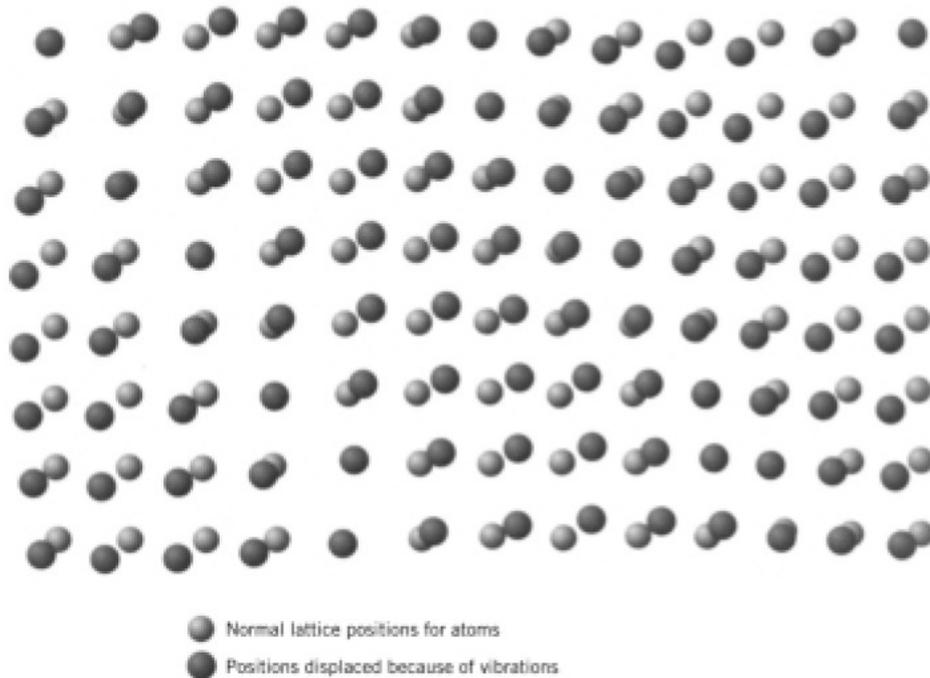


FIGURE 17.1 Schematic representation of the generation of lattice waves in a crystal by means of atomic vibrations. (Adapted from "The Thermal Properties of Materials" by J. Ziman. Copyright © 1967 by Scientific American, Inc. All rights reserved.)

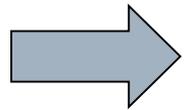
**Fónon**- "pacote" de ondas elásticas.

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.

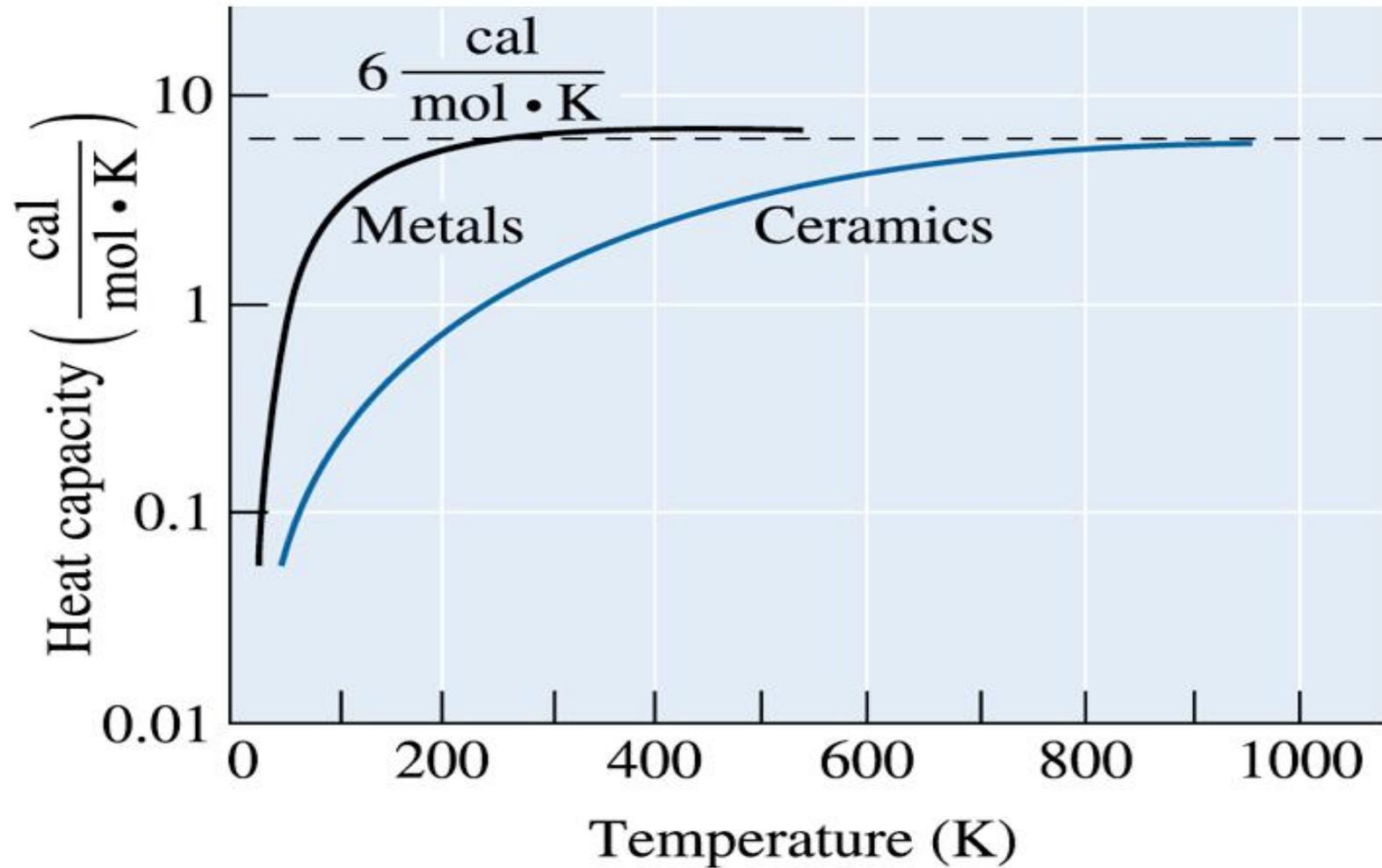
# Influência da temperatura

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



Temperatura de Debye

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

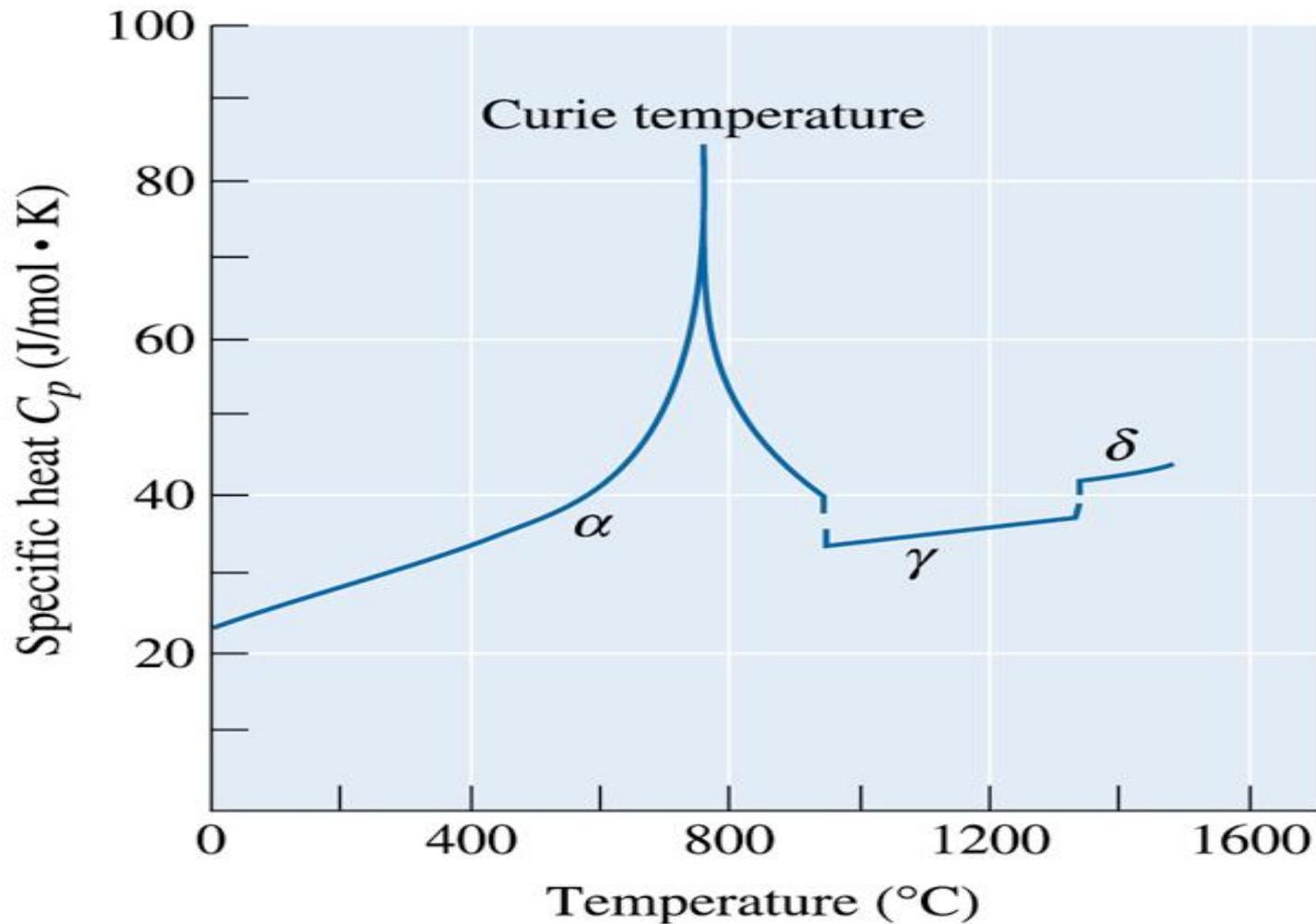


**Calor específico de alguns metais e cerâmicas em função da temperatura**

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

| Material | Specific Heat<br>$\left(\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{K}}\right)$ | Material                       | Specific Heat<br>$\left(\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{K}}\right)$ |
|----------|--|--------------------------------|--|
| Metals:  |  | Ceramics:                      |  |
| Al       | 0.215  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.200  |
| Cu       | 0.092  | Diamond                        | 0.124  |
| B        | 0.245  | SiC                            | 0.250  |
| Fe       | 0.106  | Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> | 0.170  |
| Pb       | 0.038  | SiO <sub>2</sub> (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<sup>™</sup> is a trademark used herein under license.

**Efeito da temperatura no calor específico do ferro.**

# EXEMPLOS

## Apagando incêndio

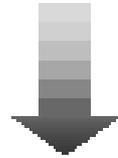
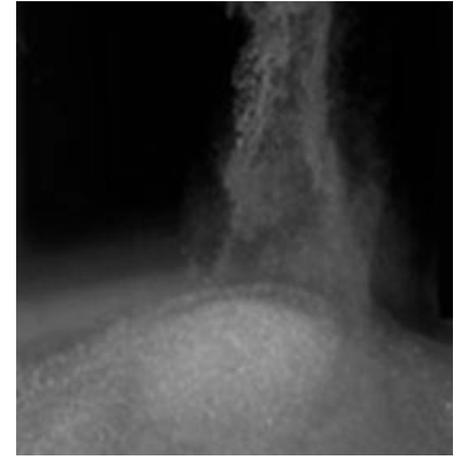
$C_p$  Água ~ 4000 J/Kg.K

$C_p$  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)

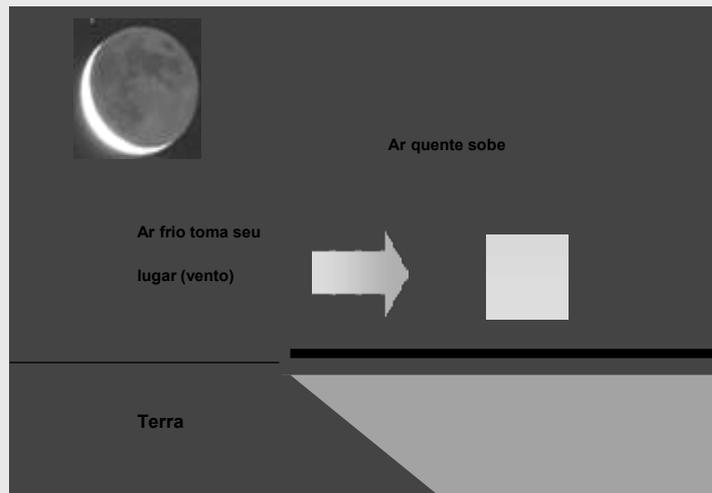
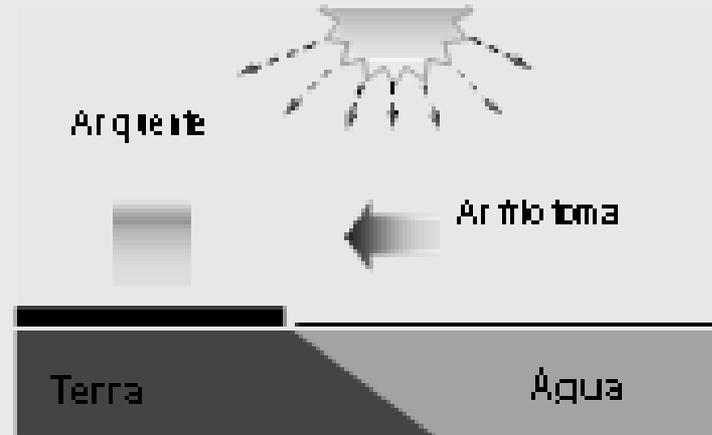
$C_p$  Sílica = 740 J/Kg.K  $C_p$  Água ~ 4000 J/Kg.K

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

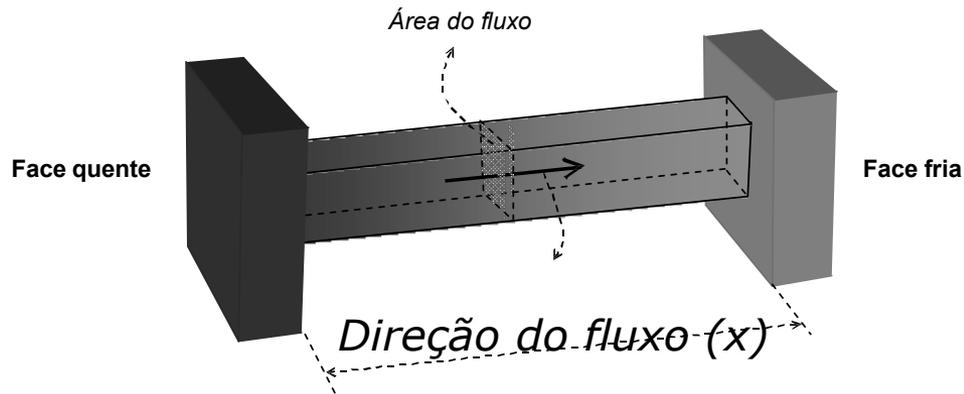
- Terra tem menor CP e se aquece mais rapidamente
- Água tem maior CP e demora a se aquecer
- Terra aquece o ar sobre ela, gerando vento vindo do mar (+ frio)

**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  $\Delta T$ )

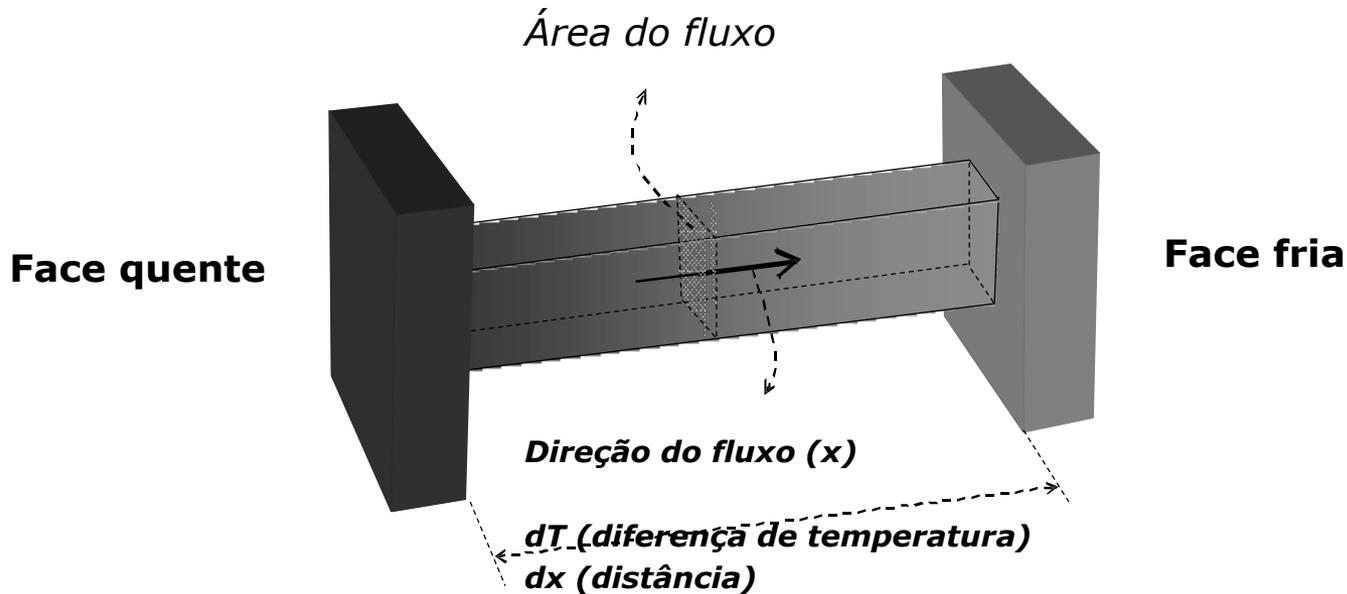
➔ **Convecção**: movimento de um fluido (ar, água)

**Ex.: Vento**

➔ **Condução** através do sólido

**Ex.: trocadores de calor**

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



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

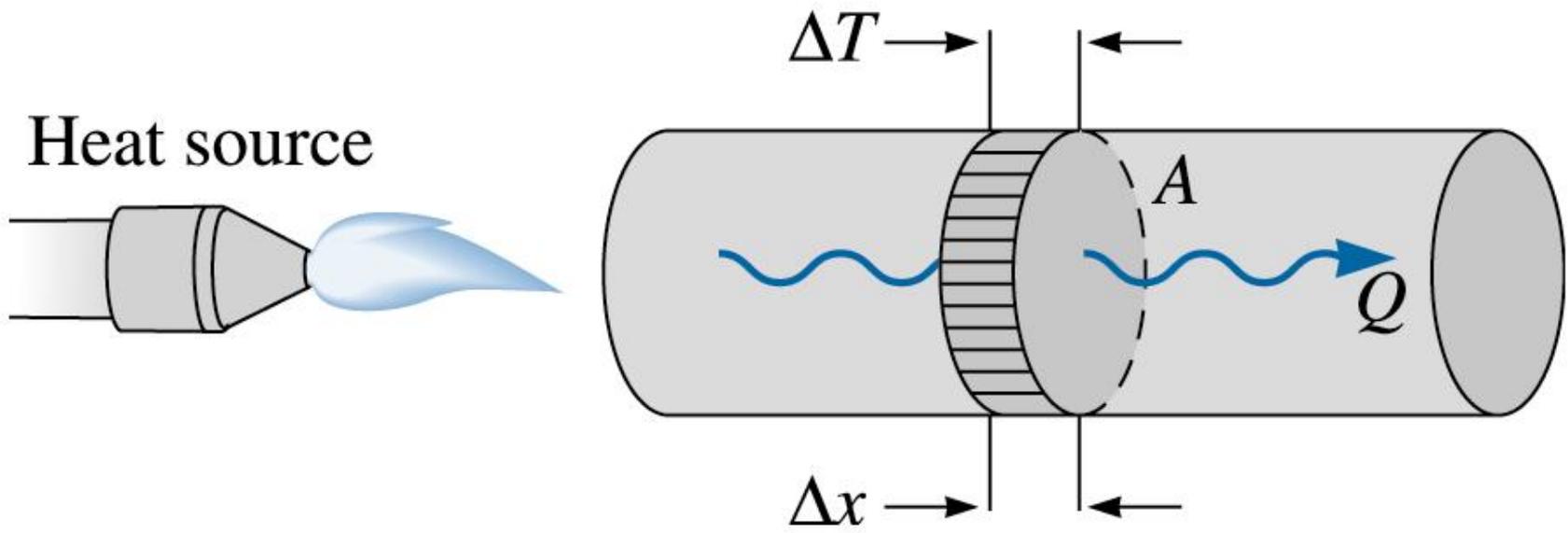
$q$  = fluxo de calor por área =  $Q/A$

$k$  = 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<sup>®</sup> 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 )*

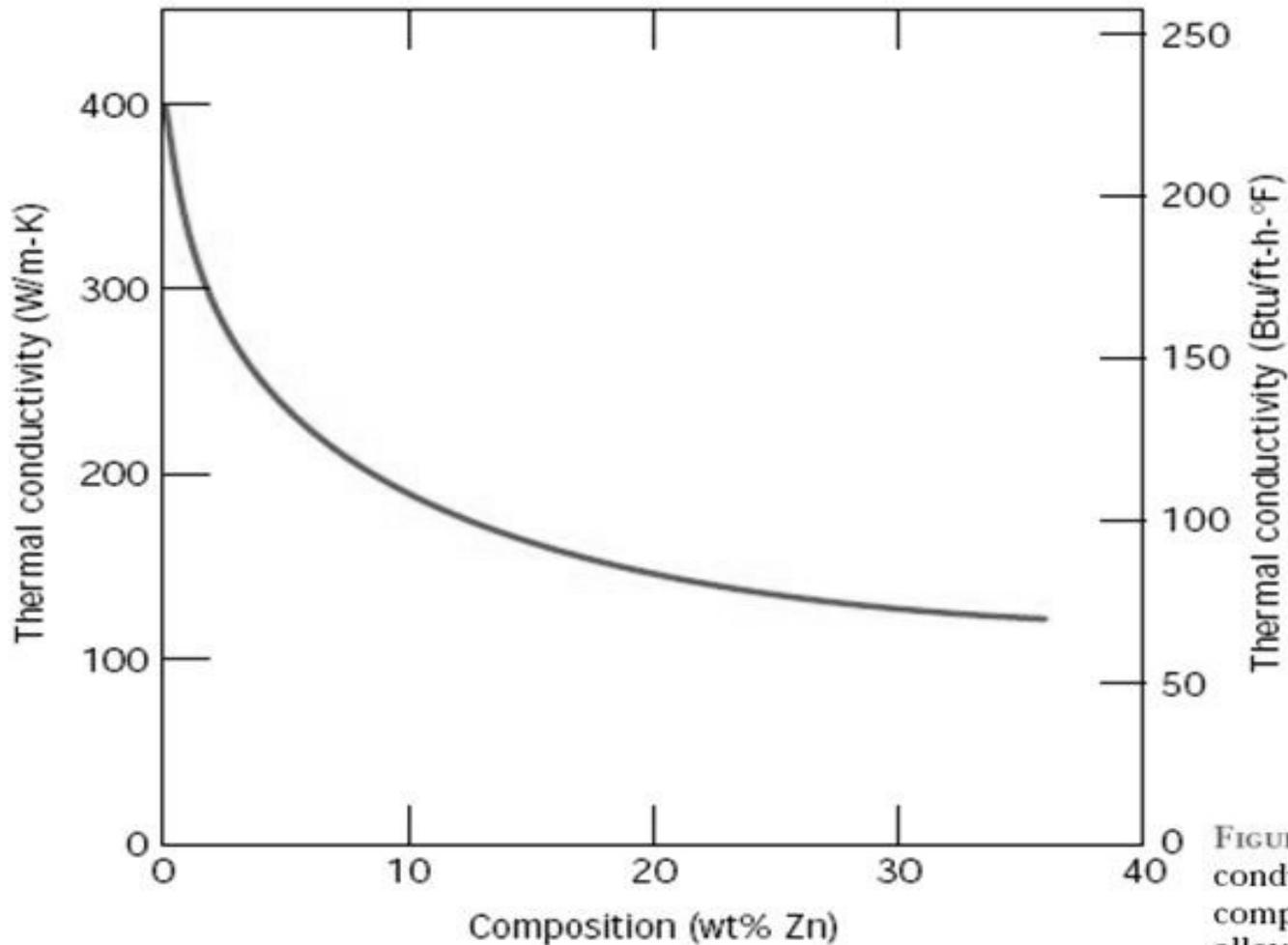
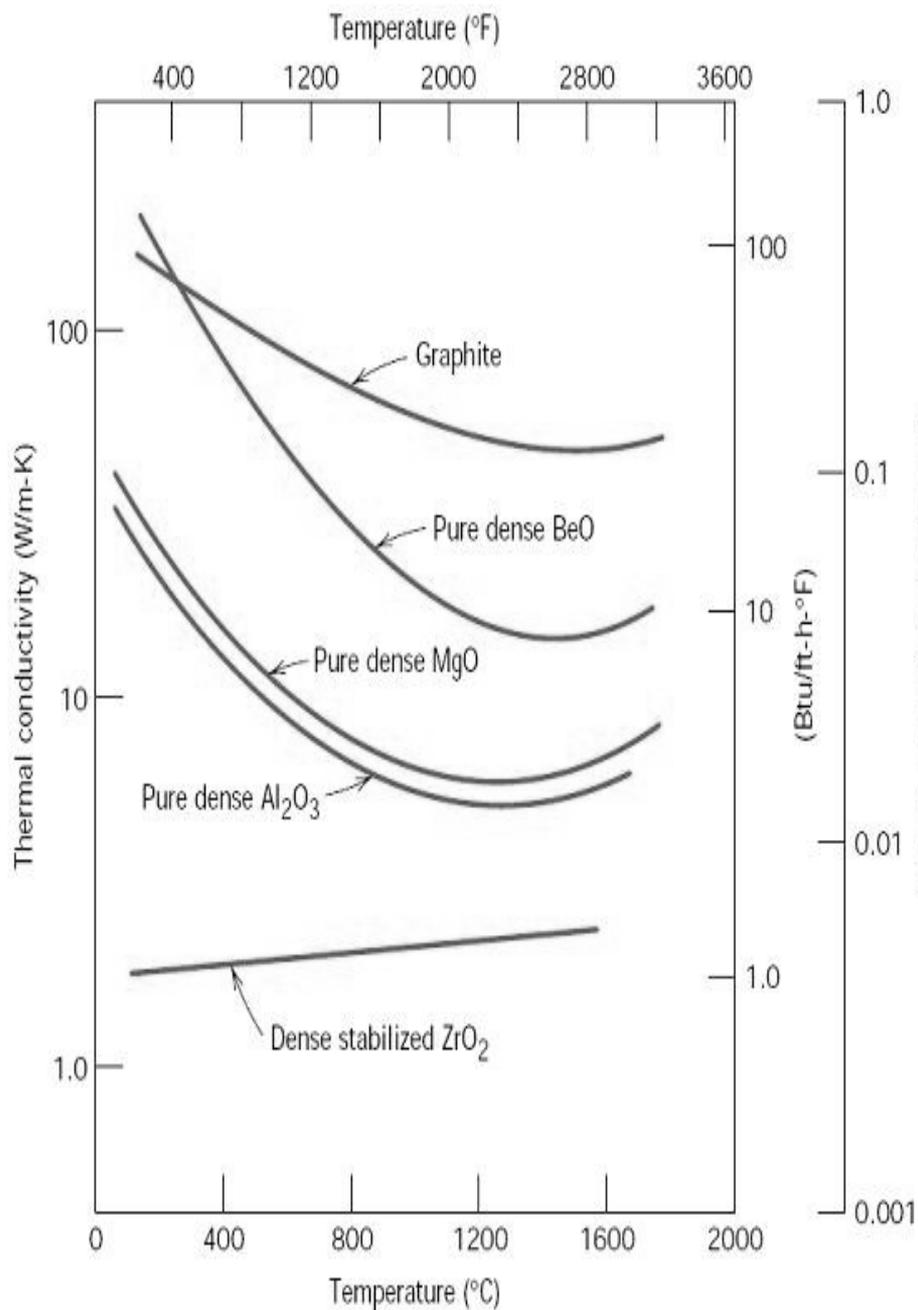


FIGURE 17.4 Thermal conductivity versus composition for copper-zinc alloys. (Adapted from *Metals Handbook: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Pure Metals*, Vol. 2, 9th edition, H. Baker, Managing Editor, American Society for Metals, 1979, p. 315.)

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



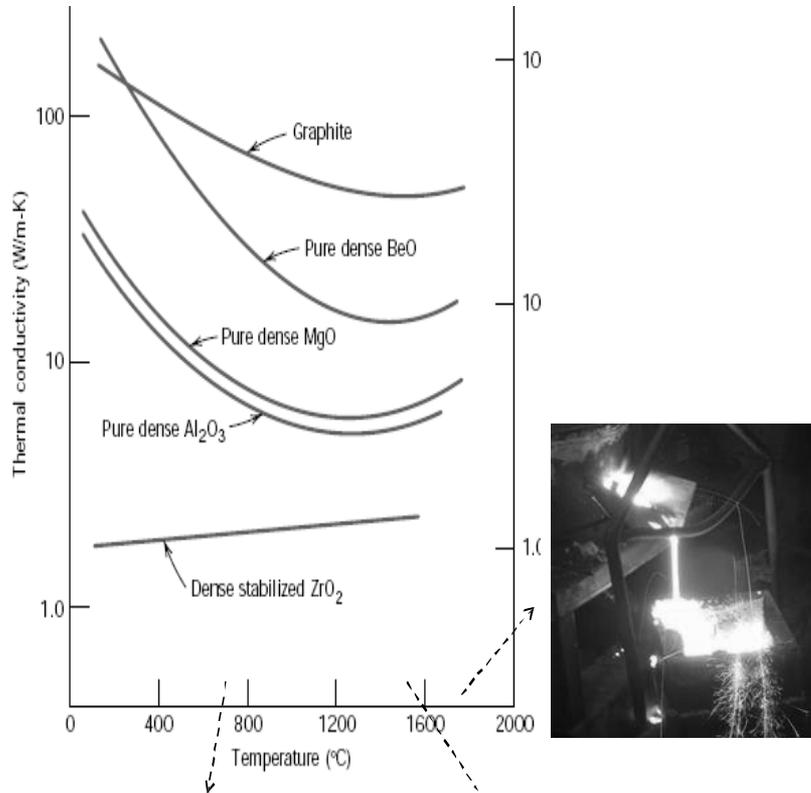
**O aumento na quantidade de fônons com temperatura dificulta a condução**



**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.)

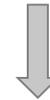
# Condutividade térmica: fônons em cerâmicas



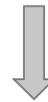
**Cerâmicas cristalinas (óxidos, principalmente)**

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

**R: Diferentes mecanismos de condução de calor**

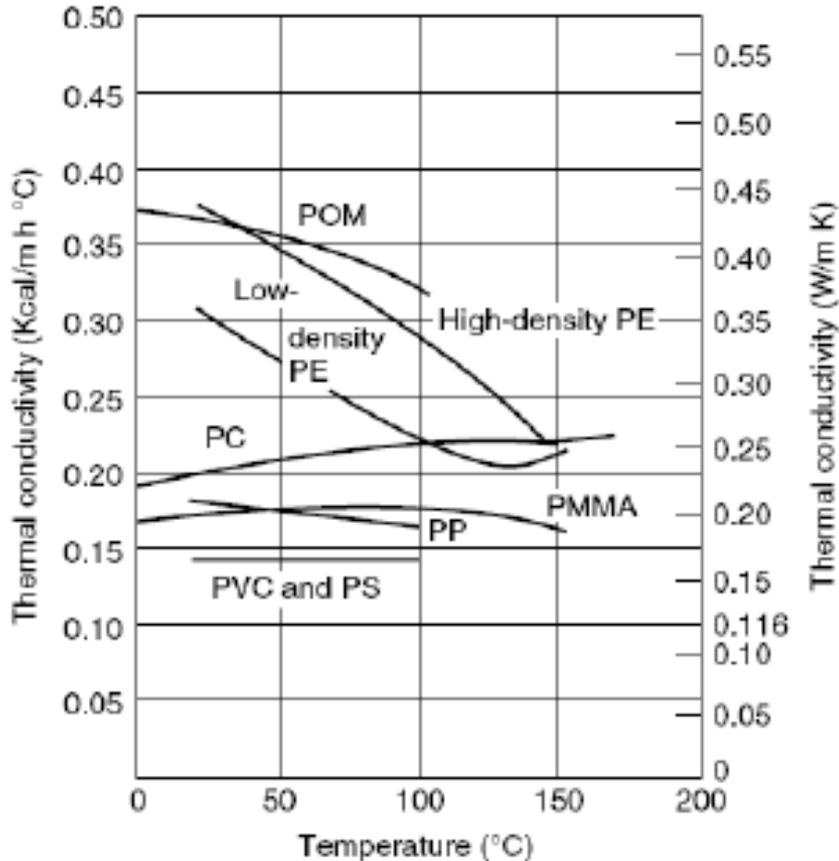


**Acima de 1000°C: emissão de grande quantidade de radiação infravermelha = condução por irradiação**



**Condução por fônons deixa de ser a mais importante**

# Fônons em polímeros

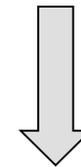


Por serem semi-cristalinos ou amorfos:

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

a) **Cadeias flexíveis**

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



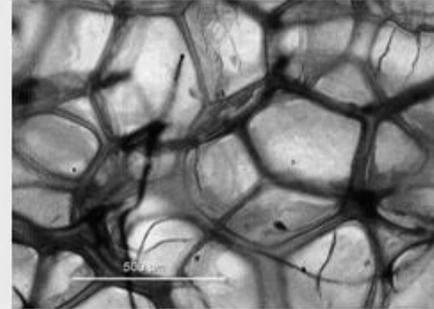
**Materiais intrinsecamente isolantes térmicos**

## 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

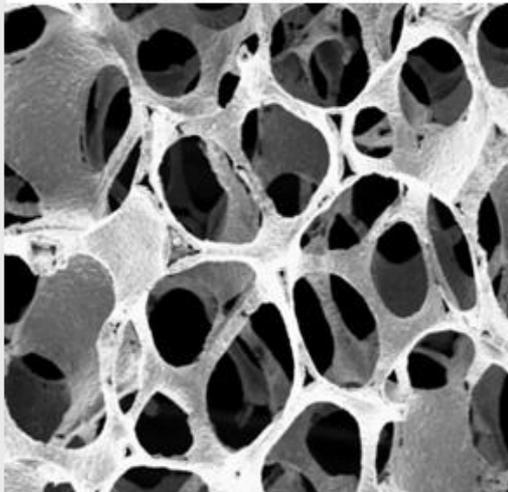
**Valores de  $k$  muito,  
muito baixos**



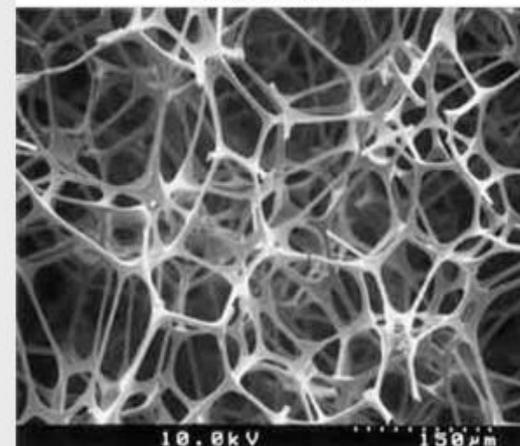
**Espuma cerâmica com célula aberta:  
filtração de metal líquido**



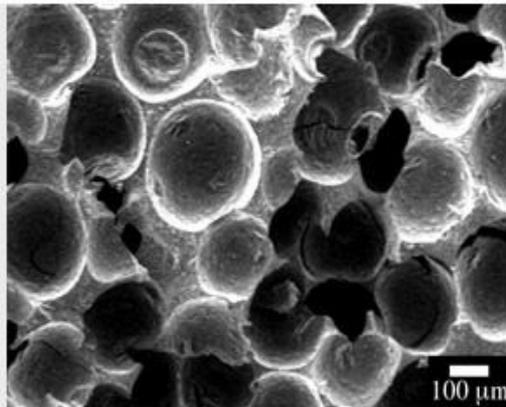
**Espuma metálica (isolamento acústico)**



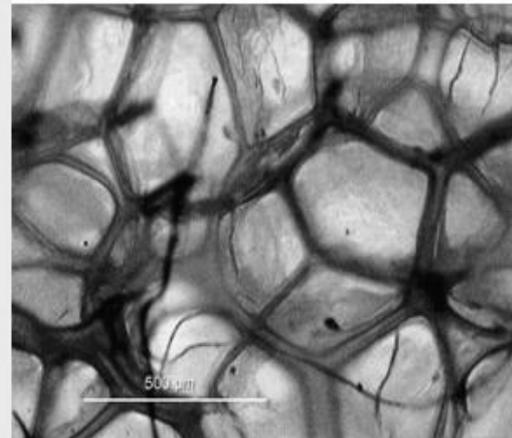
**Espuma polimérica com célula aberta:  
filtração, esponjas**



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



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

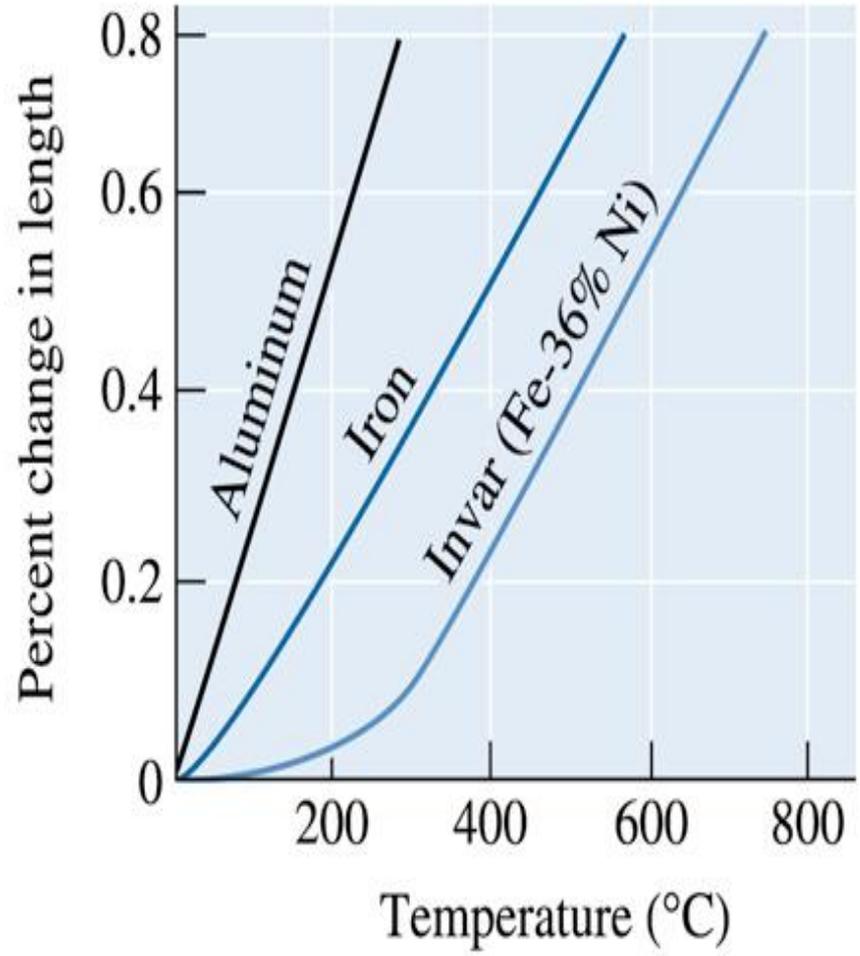
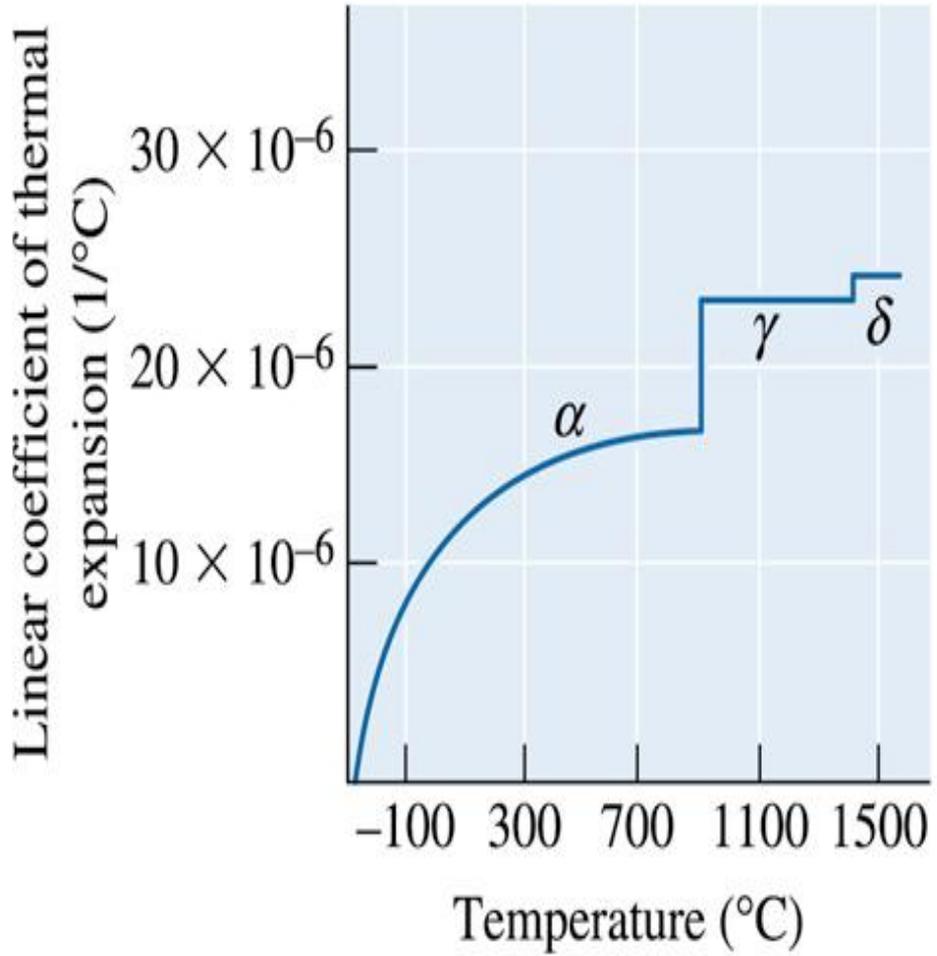


- **Condutividade térmica é uma propriedade altamente anisotrópica (depende da direção analisada)**

**Table 4.9 Thermal Conductivity of Quartz**

| Temperature<br>(°C) | Thermal Conductivity (W/m·K) |                               |       |
|---------------------|------------------------------|-------------------------------|-------|
|                     | Normal to<br><i>c</i> -Axis  | Parallel<br>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)**

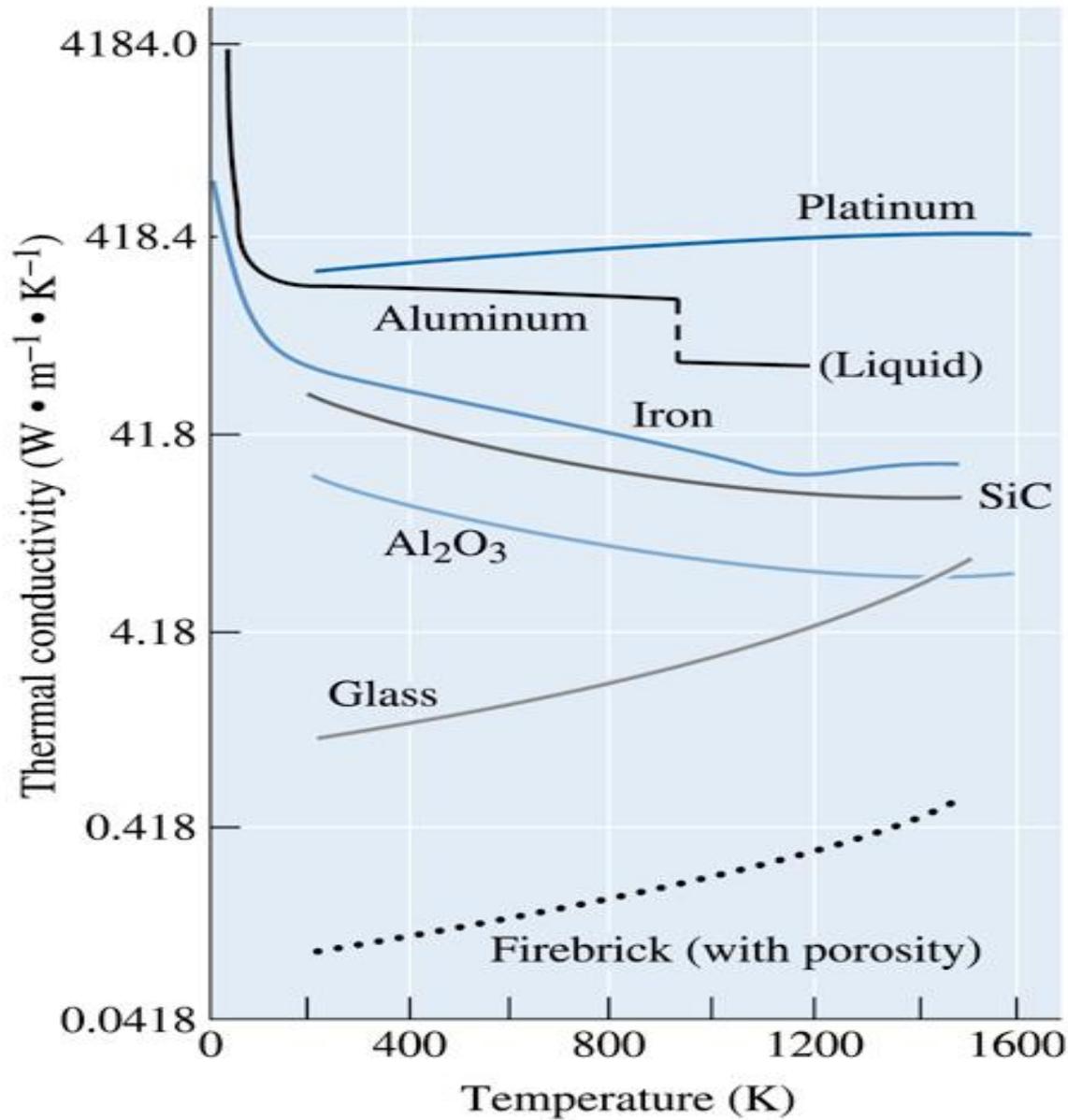


©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning<sup>®</sup> is a trademark used herein under license.

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

| Material            | Thermal Conductivity<br>( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ) | Material          | Thermal Conductivity<br>( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ) |
|---------------------|---|-------------------|---|
| Pure Metals:        |   | Ceramics:         |   |
| Ag                  | 430   | $Al_2O_3$         | 16–40   |
| Al                  | 238   | Carbon (diamond)  | 2000  |
| Cu                  | 400   | Carbon (graphite) | 335   |
| Fe                  | 79  | Fireclay          | 0.26  |
| Mg                  | 100   | Silicon carbide   | up to 270   |
| Ni                  | 90  | AlN               | up to 270   |
| Pb                  | 35  | $Si_3N_4$         | up to 150   |
| Si                  | 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  | Polymers:         |   |
| Alloys:             |   | 6,6-nylon         | 0.25  |
| 1020 steel          | 100   | Polyethylene      | 0.33  |
| 3003 aluminum alloy | 280   | Polyimide         | 0.21  |
| 304 stainless steel | 30  | Polystyrene       | 0.13  |
| Cementite           | 50  | Polystyrene foam  | 0.029   |
| Cu-30% Ni           | 50  | Teflon            | 0.25  |
| Ferrite             | 75  |                   |   |
| Gray iron           | 79.5  |                   |   |
| Yellow brass        | 221   |                   |   |

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



| <i>Material</i>                | $k$<br>(W/m-K) <sup>c</sup> |
|--------------------------------|-----------------------------|
| 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<br>(54Fe-29Ni-17Co)      | 17                          |
| Invar (64Fe-36Ni)              | 10                          |
| Super Invar<br>(63Fe-32Ni-5Co) | 10                          |



**Trocadores  
de calor**



# Condutividade térmica em metais

| <i>Material</i>                | $k$<br>$(W/m-K)^c$ |
|--------------------------------|--------------------|
| 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<br>(54Fe-29Ni-17Co)      | 17                 |
| Invar (64Fe-36Ni)              | 10                 |
| Super Invar<br>(63Fe-32Ni-5Co) | 10                 |



**Podem causar aquecimento do interior / exterior de máquina térmicas**

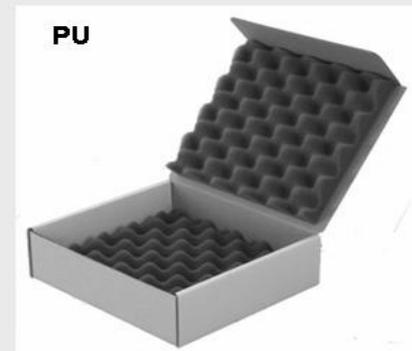
# Condutividade térmica: polímeros

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

## Espumas poliméricas:

Isolantes térmicos por excelência:

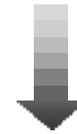
↓  $k_{\text{Polímeros}}$  + ↓  $k_{\text{ar}}$  + espalhamento de fônons



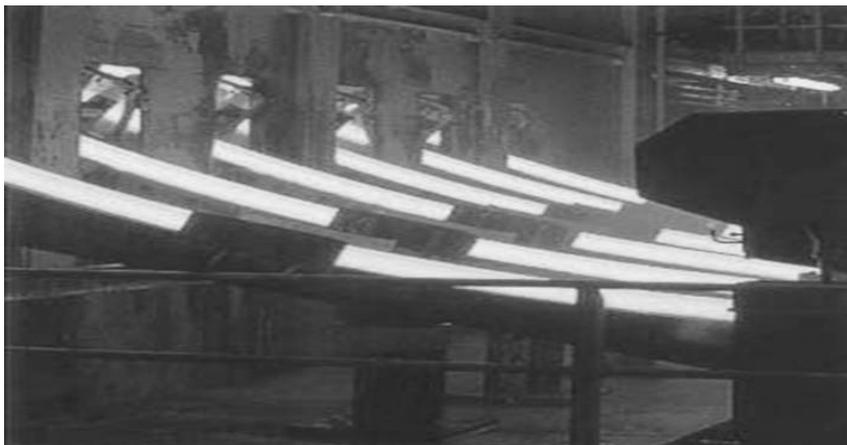
# Condutividade térmica de cerâmicas

| <i>Material</i>            | $k$<br>$(W/m-K)^e$ |
|----------------------------|--------------------|
| Alumina ( $Al_2O_3$ )      | 39                 |
| Magnesia (MgO)             | 37.7               |
| Spinel ( $MgAl_2O_4$ )     | 15.0 <sup>e</sup>  |
| 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.

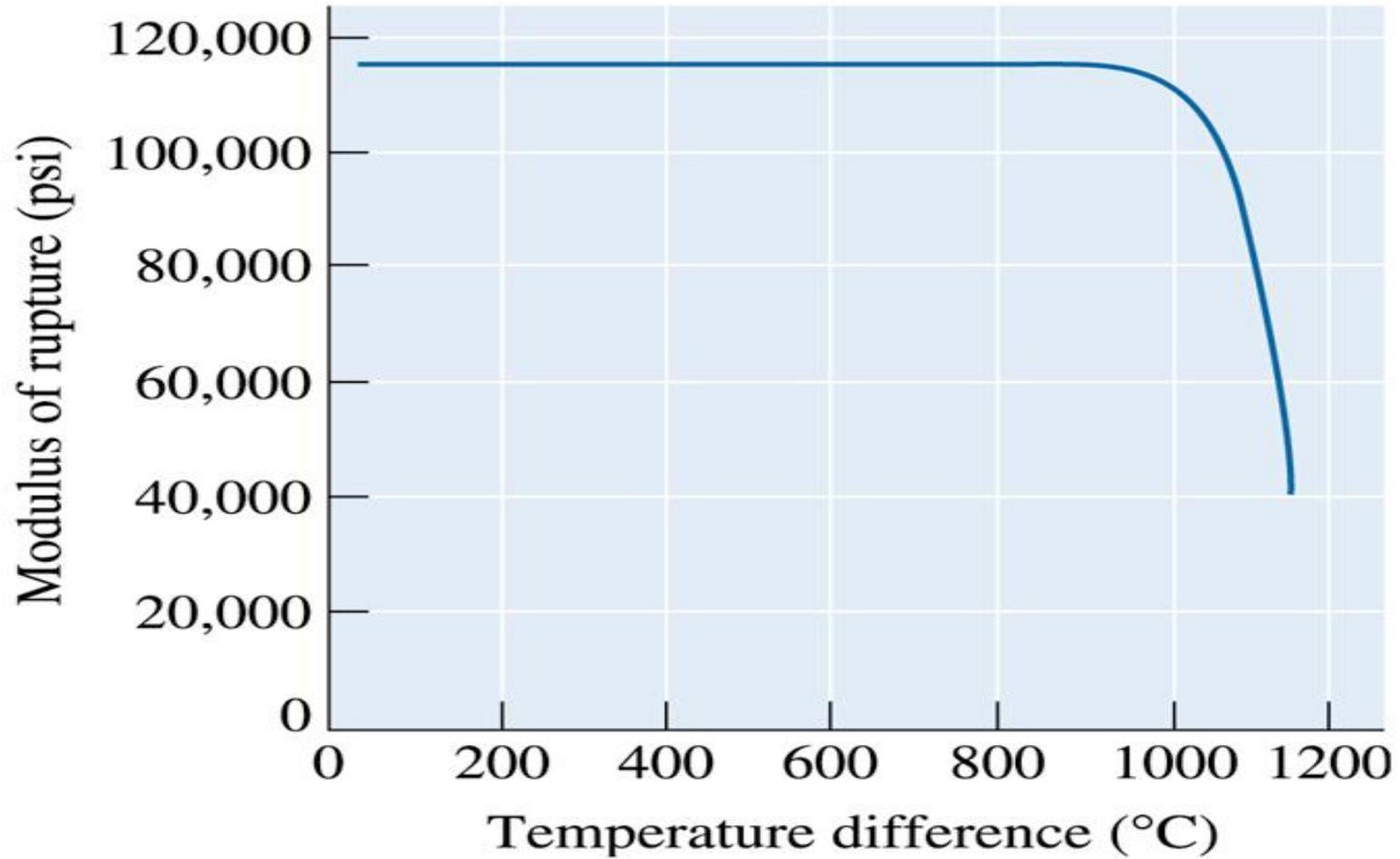
$$\sigma = E \cdot \alpha_L \cdot \Delta T$$

# 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**