

Hoje: Transferência de calor

- Processos:
- 1) Condução = existe transf. de calor sem transf. de matéria
 - 2) Convecção = " " " " com " " "
 - 3) Radiação = a transf. de calor via radiação eletromagnética

1) Condução

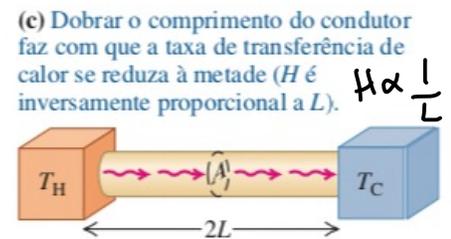
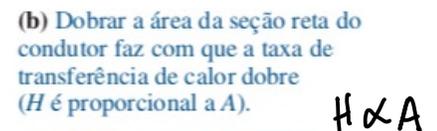
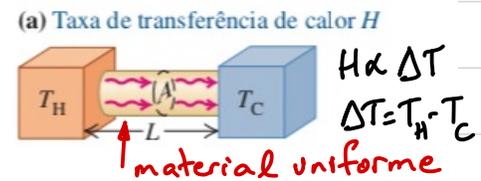
Relação empírica

H = hot
C = cold

Na condução, o sentido de transferência de calor é sempre da temperatura maior para a menor. A **Figura 17.24a** mostra uma barra de um material condutor de comprimento L com uma seção reta de área A . A extremidade esquerda da barra é mantida a uma temperatura T_H , e a extremidade direita é mantida a uma temperatura mais baixa T_C ; isso faz com que o calor flua da esquerda para a direita. Os lados da barra são cobertos por um isolante ideal, de modo que o calor não possa fluir por eles.

Quando uma quantidade de calor dQ é transferida através da barra em um tempo dt , a taxa de transferência de calor é dada por dQ/dt . Chamamos essa grandeza de **taxa de transferência de calor** ou *corrente de calor*, e a designamos por H . Ou seja, $H = dQ/dt$. A experiência mostra que a taxa de transferência de calor é proporcional à área A da seção reta da barra (Figura 17.24b) e a diferença de temperatura ($T_H - T_C$), e inversamente proporcional ao comprimento da barra L (Figura 17.24c):

Figura 17.24 Transferência de calor constante produzida pela condução de calor em uma barra uniforme.



$$H = \frac{dQ}{dt} = kA \frac{T_H - T_C}{L} \quad (17.21)$$

Labels in diagram:
 - Taxa de transferência de calor: $H = \frac{dQ}{dt}$
 - Temperaturas das extremidades quente e fria da barra: $T_H - T_C$
 - Comprimento da barra: L
 - Área da seção reta da barra: A
 - Condutividade térmica do material da barra: k
 - Transferência de calor na condução

$\frac{\Delta T}{L} = \frac{T_H - T_C}{L}$ taxa de variação da temperatura por unidade de comprimento $\Rightarrow \frac{dT}{dx}$ = gradiente de temperatura

Esta equação também pode ser escrita com o:

$$H = \frac{A}{R} (T_H - T_C) \quad \text{onde } R = \frac{L}{k} = \text{resistência térmica}$$

Forma geral que se aplica para qual-
quer material, mesmo os não uniformes

$$H = kA \frac{dT}{dx}$$

material não uniforme

$$H = kA \frac{\Delta T}{L}$$

material uniforme

Unidade: $H \left[\frac{J}{s} = W \right]$
no SI

W = watt

$$k = \frac{HL}{A\Delta T} \Rightarrow k \left[\frac{Wm}{m^2K} \right] \Rightarrow k \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$$

Aplicações na Biologia
Ar seco é um isolante
térmico.

**BIO Aplicação Pele de animal versus
gordura animal** A pele de uma raposa do
ártico é um bom isolante térmico, pois aprisiona
o ar, que tem uma baixa condutividade térmica k .
(O valor $k = 0,04 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ para a pele é
mais alto que para o ar, $k = 0,024 \text{ W/m} \cdot \text{K}$,
pois a pele também inclui pelos sólidos.)
A camada de gordura abaixo da pele da baleia
possui seis vezes a condutividade térmica da pele
($k = 0,24 \text{ W/m} \cdot \text{K}$). Logo, uma camada de 6 cm
de gordura ($L = 6 \text{ cm}$) é necessária para dar o
mesmo isolamento de 1 cm de pele.



TABELA 17.5 Condutividades térmicas.

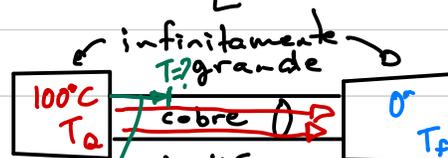
Substância	$k \text{ (W/m} \cdot \text{K)}$
<i>Metais</i>	
Alumínio	205,0
Latão	109,0
Cobre	385,0
Chumbo	34,7
Mercúrio	8,3
Prata	406,0
Aço	50,2
<i>Diversos sólidos (valores típicos)</i>	
Tijolo (isolante)	0,15
Tijolo vermelho	0,6
Concreto	0,8
Cortiça	0,04
Feltro	0,04
Fibra de vidro	0,04
Vidro	0,8
Gelo	1,6
Lã mineral	0,04
Isopor	0,027
Madeira	0,12–0,04
<i>Gases</i>	
Ar (seco)	0,024
Argônio	0,016
Hélio	0,14
Hidrogênio	0,14
Oxigênio	0,023

Exercícios

17.57 • Suponha que a barra da Figura 17.24a seja feita de cobre, tenha 45,0 cm de comprimento e área da seção reta igual a 1,25 cm². Seja T_H = 100,0 °C e T_C = 0,0 °C. (a) Qual é o gradiente de temperatura no estado estacionário final ao longo da barra? (b) Qual é a taxa de transferência de calor na barra no estado estacionário final? (c) Qual é a temperatura final do estado estacionário em um ponto da barra situado a 12,0 cm da extremidade esquerda da barra?

$$k(\text{cobre}) = 385 \text{ W/m.K}$$

$$H = kA \frac{\Delta T}{L} \quad \text{ou} \quad H = kA \frac{dT}{dx}$$



$$L = 45 \text{ cm}$$

$$A = 1,25 \text{ cm}^2 = 1,25 (10^{-2} \text{ m})^2$$

$$A = 1,25 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\left. \begin{array}{l} T_a = 100^\circ\text{C} \\ T_b = 0^\circ\text{C} \end{array} \right\} \Delta T = 100^\circ\text{C} = 100 \text{ K}$$

no SI

a) $\frac{\Delta T}{L}$ = gradiente de temperatura $\frac{\Delta T}{L} = \frac{100}{0,45} = 222,2 \frac{\text{K}}{\text{m}}$

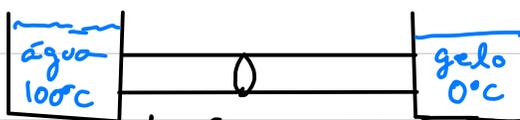
b) $H = kA \frac{\Delta T}{L} = 385 \times 1,25 \times 10^{-4} \times 222,2 = 10,7 \text{ W}$

c) $\frac{\Delta T}{L} \times L = \frac{100^\circ\text{C}}{45 \text{ cm}} \times 12 \text{ cm} = 26,6^\circ\text{C}$

$$100^\circ - 26,6^\circ = 73,3^\circ\text{C}$$

$$T_{12 \text{ cm}} = 73,3^\circ\text{C}$$

17.58 • Uma das extremidades de uma barra metálica isolada é mantida a 100,0 °C, e a outra extremidade é mantida a 0,0 °C por uma mistura de gelo e água. A barra tem 60,0 cm de comprimento e uma seção reta com área igual a 1,25 cm². O calor conduzido pela barra produz a fusão de 8,50 g de gelo em 10,0 min. Ache a condutividade térmica k do metal.



$$L = 60 \text{ cm} = 0,6 \text{ m}$$

$$A = 1,25 \text{ cm}^2 = 1,25 (10^{-2} \text{ m})^2 = 1,25 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$L_{\text{fusão}}(\text{gelo}) = 334 \times 10^3 \text{ J/kg}$$

$$\Delta T = 100^\circ\text{C} = 100 \text{ K}$$

O gelo recebe $\frac{Q}{\Delta t} \Rightarrow$ derreter

$$m = 8,5 \text{ g} = 8,5 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

$$\Delta t = 10 \text{ min} = 10 \times 60 \text{ s} = 600 \text{ s}$$

$$Q = mL = 8,5 \times 10^{-3} \times 334 \times 10^3 = 2839 \text{ J}$$

$$H = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{2839}{600} = 4,73 \text{ J/s}$$

$$H = kA \frac{\Delta T}{L} \therefore k = \frac{HL}{A\Delta T}$$

$$k = \frac{4,73 \times 0,6}{1,25 \times 10^{-4} \times 100} = \frac{2,839}{0,0125} = 227 \frac{\text{J m}}{\text{s m}^2 \text{K}} = 227 \text{ W/m.K}$$

2) Convecção

A transferência de calor por convecção é um processo muito complexo, e não existe nenhuma equação simples para descrevê-lo. A seguir, assinalamos alguns fatos experimentais.

1. A taxa de transferência de calor por convecção é diretamente proporcional à área da superfície. É por essa razão que se usa uma área superficial grande em radiadores e aletas de refrigeração.
2. A viscosidade do fluido retarda o movimento da convecção natural nas vizinhanças de superfícies estacionárias, dando origem a uma película ao longo da superfície que, quando vertical, costuma ter aproximadamente o mesmo valor isolante que 1,3 cm de madeira compensada ($R = 0,7$). A convecção forçada provoca uma diminuição da espessura dessa película, fazendo aumentar a taxa de transferência de calor. Isso explica por que você sente mais frio quando há um vento frio do que quando o ar está em repouso com a mesma temperatura.
3. Verifica-se que a taxa de transferência de calor na convecção é aproximadamente proporcional à potência de $\frac{5}{4}$ da diferença de temperatura entre a superfície e um ponto no corpo principal do fluido.

$$H \propto (\Delta T)^{5/4}$$

Figura 17.28 Um dispositivo de aquecimento na ponta deste tubo submerso aquece a água circundante, produzindo um padrão complexo de convecção livre.



3) Radiação

$$\rightsquigarrow E = h\nu$$

$h =$ constante de Planck
 $\nu =$ frequência de oscilações

Qualquer corpo, mesmo a uma temperatura normal, emite energia sob a forma de radiação eletromagnética. A uma temperatura normal, digamos a 20°C , quase toda a energia é transportada por ondas infravermelhas com comprimentos de onda muito maiores que os da luz visível (ver figuras 17.4 e 17.29). À medida que a temperatura aumenta, os comprimentos de onda passam a ter valores menores. A 800°C , um corpo emite radiação visível em quantidade suficiente para adquirir luminosidade própria e parecer “vermelho quente”, embora, mesmo nessa temperatura, a maior parte da energia seja transportada por ondas infravermelhas. A 3.000°C , a temperatura característica do filamento de uma lâmpada incandescente, a radiação contém luz visível suficiente para que o corpo pareça “branco quente”.

A taxa de radiação de energia de uma superfície é proporcional à área A da superfície e à quarta potência da temperatura absoluta (Kelvin) T . Essa taxa também depende da natureza da superfície; essa dependência é descrita por uma grandeza e , denominada **emissividade**. Sendo um número sem dimensões compreendido entre 0 e 1, e representa a razão entre a taxa de radiação de uma superfície particular e a taxa de radiação de uma superfície de um corpo ideal com as mesmas área e temperatura. A emissividade também depende ligeiramente da temperatura. Logo, podemos expressar a taxa de transferência de calor $H = dQ/dt$ devida à radiação de uma superfície pela relação

Figura 17.29 Esta imagem em infravermelho com falsa cor revela a radiação emitida por várias partes do corpo humano. A emissão mais forte (partes avermelhadas do rosto) vem das áreas mais quentes, ao passo que, por outro lado, há muito poucas emissões vindas da garrafa de bebida gelada.



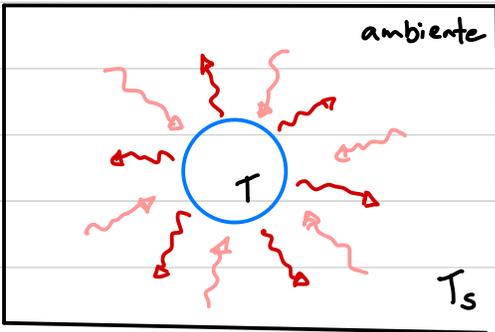
$e = 1$ (corpo ideal conhecido com corpo negro)
 Lei de Stefan-Boltzmann

$$H = Ae\sigma T^4 \quad (17.25)$$

Taxa de transferência de calor na radiação \rightarrow H
 Área da superfície emissora \rightarrow A
 Emissividade da superfície \rightarrow e
 Temperatura absoluta da superfície \rightarrow T
 Constante de Stefan-Boltzmann \rightarrow σ

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4} = \text{constante de Stefan-Boltzmann}$$

$e = 1$ (chamado de corpo negro)



Um corpo embebido pelo ambiente com temperatura diferente

$H > 0 \Rightarrow T > T_s$ calor sai do corpo
 $H < 0 \Rightarrow T < T_s$ calor entra no corpo

Área da superfície emissora \rightarrow Emissividade da superfície
 Taxa de transferência de calor total na radiação $\rightarrow H_{\text{total}} = Ae\sigma(T^4 - T_s^4)$ (17.26)
 Constante de Stefan-Boltzmann \rightarrow Temperaturas absolutas da superfície (T) e dos arredores (T_s)

Exercícios

17.66 • Qual é a taxa de irradiação da energia por unidade de área de um corpo negro que está a uma temperatura de (a) 273 K; (b) 2.730 K? $e=1$

$$H = Ae\sigma T^4$$

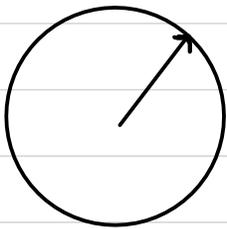
$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$$

$$\frac{H}{A} = ? \quad a) \frac{H}{A} = e\sigma T^4 = 1 \times 5,67 \times 10^{-8} \times 273^4 = 314,9 \text{ W/m}^2$$

$$b) \frac{H}{A} = 1 \times 5,67 \times 10^{-8} \times \underbrace{2730^4}_{273^4 \times 10^4} = 314,9 \times 10^4 \text{ W/m}^2$$

17.67 • Uma panela esférica contém 0,75 L de café quente (basicamente água) a uma temperatura inicial de 95 °C. A panela tem uma emissividade de 0,60, e o ambiente está a 20,0 °C. Calcule a taxa de perda de calor por radiação do café.

$$1L = 10^{-3} m^3$$



$$V = 0,75L = 0,75 \times 10^{-3} m^3$$

$$T = 95^\circ C = 368 K$$

$$e = 0,6$$

$$T_s = 20^\circ C = 293 K$$

$$\Delta T = -75K$$

$$H = A e \sigma (T^4 - T_s^4)$$

$$H = ?$$

Quanto tempo o café vai ficar na temperatura do ambiente?

$$c_{cafe} = c_{agua} = 4190 J/kg \cdot K$$

Estera
$$V = \frac{4}{3} \pi r^3 \Rightarrow r = \sqrt[3]{\frac{3V}{4\pi}} = 0,0563 m$$

$$A = 4\pi r^2 = 0,040 m^2$$

$$H = A e \sigma (T^4 - T_s^4)$$

$$H = 0,04 \times 0,6 \times 5,67 \times 10^{-8} (368^4 - 293^4) = \underline{14,9 W}$$

Sabendo que a água tem aproximadamente 1000 kg em 1 m³, então em 0,75 × 10⁻³ m³ tem 0,75 kg de água.
 $m = 0,75 kg = 750g$ de água ou café na panela.

$$Q = m c \Delta T = 0,75 \times 4190 \times (-75) = -235687,5 J$$

o sinal significa que o calor será perdido pelo café.

Assumindo que H não varia durante o processo de resfriamento

$$H = \frac{Q}{\Delta t} \therefore \Delta t = \frac{Q}{H} = \frac{235687,5}{14,9} = 15817s = 263,6 min = 4h 23 min$$

Mas esta conta é aproximada, pois a medida que a temperatura do café reduz a taxa de transferência do calor reduz e assumimos que ela perman