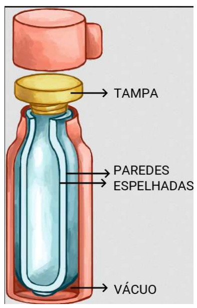
FIS00183 - Física III-C - Aula 7

Jeferson J. Arenzon – 20 de agosto de 2020

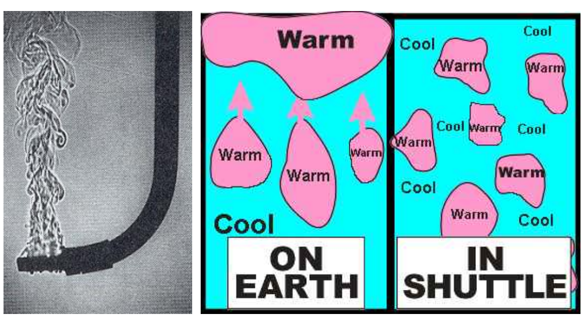
Transferência de Calor

Temos três mecanismos de transferência de calor: condução, convecção e radiação. Eliminando os efeitos dos três mecanismos, como se tenta numa garrafa térmica, podemos controlar a perda (ganho) de energia de um sistema.

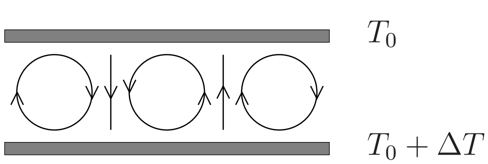


Convecção

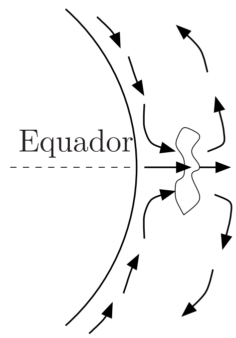
Ocorre tipicamente num fluido[44], na presença de uma diferença (gradiente) de temperatura, e se caracteriza pelo calor sendo transferido pelo movimento do próprio fluido, que constitui uma **corrente de convecção**. A região aquecida (de forma lenta, para evitar turbulência), em geral, diminui de densidade e tende a subir sob o efeito gravitacional (é importante enfatizar a necessidade de gravidade). Na figura vemos uma ponta aquecida sob a água, e a corrente de convecção:



Várias correntes podem coexistir como, por exemplo, no experimento de Rayleigh-Benard:

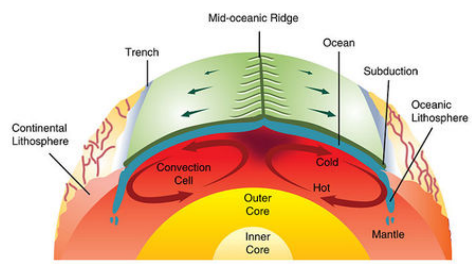


Para um certo intervalo de ΔT, o fluido forma células convectivas estacionárias[45], como mostrado na figura acima. Aumentando-se a diferença, o fluxo torna-se turbulento e caótico.

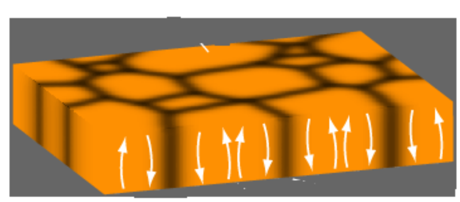


Outro exemplo é a circulação de Hadley: massas úmidas e quentes de ar sobem no equador e descem em regiões subtropicais. A queda de grandes massas de ar seco nestas regiões gera as regiões desérticas do globo. Outras correntes de convecção na atmosfera terrestre são utilizadas por pássaros e asas delta. São principalmente as diferenças de temperatura nas diferentes regiões do planeta que geram correntes que movimentam grandes massas de ar (e umidade). Variações grandes, como as que ocorrem devido às mudanças climáticas causadas pelo homem, podem ter influências catastróficas sobre o clima, provocando enormes desastres.

Numa escala também planetária, são as correntes de convecção do magma terrestre que movimentam as placas tectônicas e dão origem ao processo de deriva dos continentes.

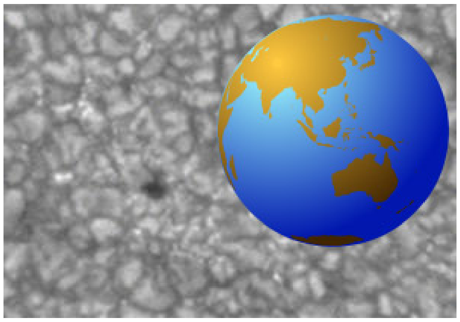


Existem também enormes correntes de convecção no Sol. Elas são responsáveis pela aparência granulada da superfície (as zonas próximas às regiões em que as correntes descem, mais frias portanto, são escuras em comparação às zonas mais quentes):



[44] Sistemas particulados sólidos, como grãos, também podem apresentar correntes de convecção quando vibrados, as quais são responsáveis por separá-los por tamanho, levando os grãos maiores para a superfície e os menores para o fundo. Este é um importante mecanismo na erosão de rios e avalanches, por exemplo.

[45] Este processo não é o mesmo que ocorre durante a ebulição, onde há uma transição de fase que ocorre no interior do líquido à medida em que este recebe calor. Nesta transição, o líquido passa para a fase gasosa e cada uma das bolhas formadas sobe para a superfície



Radiação

A troca de calor com o meio, neste caso, é feita através de ondas eletromagnéticas. Este calor é chamado de **radiação térmica** (para distinguir de sinais eletromagnéticos) e é a radiação emitida por um corpo devido à sua temperatura. Todo corpo emite este tipo de radiação para o meio, e dele a absorve, basta que $T \neq 0$.

A radiação térmica que incide num corpo pode ser **transmitida**, **refletida** ou **absorvida**, e as frações correspondentes obedecem, por conservação de energia:

$$t + r + a = 1,$$

respectivamente. Estes coeficientes são também função do comprimento de onda, da temperatura, do material, etc.

A eficiência com que um corpo emite energia via radiação eletromagnética depende da sua temperatura absoluta e de certas propriedades da sua superfície como: cor, porosidade, rugosidade, etc. A taxa P_e de emissão depende da área de sua superfície e da temperatura absoluta desta área:

$$P_e = \left.\frac{dQ}{dt}\right|_e = \sigma\varepsilon A T^4 \tag{18}$$

onde $\sigma = 5.6704 \times 10^{-8}\, \mathrm{W/m^2K^4}$ é a constante de Stefan-Boltzmann e ε, $0 < \varepsilon < 1$ é a **emissividade** do corpo. Notem que basta que $T \neq 0$ para que haja emissão. A taxa com que energia é absorvida do ambiente é

$$\left.\frac{dQ}{dt}\right|_a = \sigma\varepsilon A T_{amb}^4. \tag{19}$$

Na ausência de outros mecanismos, a taxa líquida de troca de energia é

$$P_{liq} = \left.\frac{dQ}{dt}\right|_a - \left.\frac{dQ}{dt}\right|_e = \sigma\varepsilon A(T_{amb}^4 - T^4). \tag{20}$$

Quando o equilíbrio térmico é atingido, as taxas de emissão e absorção são iguais, isto é, $P_{liq} = 0$.

Pode-se mostrar que $a = \varepsilon$, isto é, um bom emissor é também um bom absorvedor (lei de Kirchoff). Um **corpo negro**, por não refletir nem transmitir quase nada (e, portanto, absorver tudo), tem $\varepsilon = a \simeq 1$. Materiais com brilho metálico tem alta refletividade e baixa transmissibilidade, logo, a é pequeno (maus emissores).

Condução

Ao contrário da convecção, não há movimento do meio. Ocorre tanto em fluidos como em sólidos, sob o efeito de diferenças de temperatura.

As leis básicas da condução (Fourier) são:

- o calor flui das regiões de temperatura mais elevada para as de menor temperatura;
- o calor Q transferido em Δt é

  a) proporcional ao gradiente de temperatura (diretamente em relação à diferença de temperatura e inversamente com a espessura Δx da chapa):

  $$|Q| \sim \left|\frac{\Delta T}{\Delta x}\right|$$

  b) proporcional à área A através da qual flui o calor;

  c) proporcional a Δt.

Portanto:

$$|Q| \sim \left|\frac{\Delta T}{\Delta x}\right| A\Delta t \to Q = -\kappa\frac{\Delta T}{\Delta x}A\Delta t, \tag{21}$$

enquanto no limite $\Delta t \to 0$,

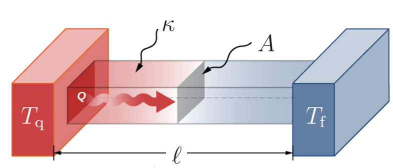
$$\boxed{\frac{dQ}{dt} = -\kappa A\frac{dT}{dx}}. \tag{22}$$

O sinal negativo vem do fato de que se $dT/dx < 0$, $dQ/dt > 0$, ou seja, o calor flui no sentido de maior para menor T. Em outras palavras: a corrente de calor segue no sentido contrário do gradiente de temperatura. A constante de proporcionalidade, $\kappa > 0$, é a **condutividade térmica** (quanto maior for κ, melhor condutora de calor é a substância) e que depende do material. Quanto maior for κ, menor será a diferença de temperatura entre dois pontos do objeto, já que ele é um mau 'acumulador' de calor (veja o exemplo no final da seção).

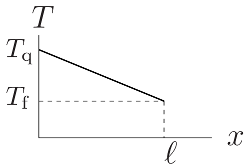
Alguns valores da condutividade térmica (em $\mathrm{J/s.m.°C}$):

Prata	420	concreto	0.85
Cobre	380	água	0.56
Alumínio	200	pele humana	0.2
Aço	40	madeira	0.07-0.2
Vidro	0.9	ar seco	0.02

Em geral, metais são bons condutores térmicos (notem que o valor do aço, apesar de bem menor do que o dos outros metais, ainda é alto comparado com os não metais da tabela).



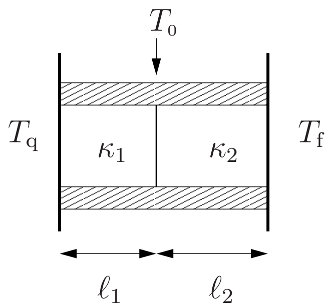
Queremos agora encontrar o perfil de temperatura $T = T(x)$ no caso simples de uma barra homogênea de seção reta A e comprimento ℓ, cujas extremidades são mantidas em contato com reservatórios térmicos de temperaturas T_q e $T_\text{f} < T_\text{q}$. No regime estacionário (fluxo constante), a temperatura ao longo da barra não depende do tempo, somente da posição (x). Além disso, a corrente térmica dQ/dt não pode depender de x: o fluxo de calor por unidade de tempo tem que ser o mesmo através de qualquer seção da barra, senão haveriam pontos de acúmulo (perda) de calor na barra e a T deveria aumentar (diminuir). Logo, dT/dx deve ser uma constante (senão seria uma função de x). Assim, se a derivada é constante, significa que a função é uma reta:



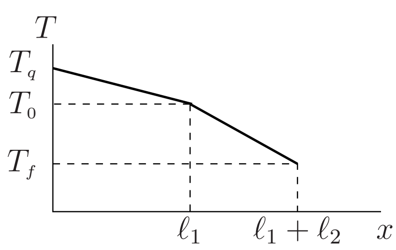
$$\frac{dT}{dx} = \text{CTE} \rightarrow \frac{dT}{dx} = -\frac{T_\text{q} - T_\text{f}}{\ell} \rightarrow \boxed{\frac{dQ}{dt} = \frac{\kappa A}{\ell}(T_\text{q} - T_\text{f})},$$

onde substituímos dT/dx na Eq. (22). A quantidade $R \equiv \ell/\kappa$ é a **resistência térmica**.

Vamos agora considerar duas barras, cujos comprimentos e condutividades são, respectivamente, ℓ_i e κ_i, $i = 1, 2$, e que estão entre os mesmos reservatórios anteriores:



Note que T_0 não é, a princípio, conhecida.



No regime estacionário, a corrente de calor deve ser fixa:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\kappa_1 A}{\ell_1}(T_\text{q} - T_0) = \frac{\kappa_2 A}{\ell_2}(T_0 - T_\text{f})$$

Eliminando T_0:

$$T_0 = T_\text{f} + \frac{\ell_2}{\kappa_2 A}\frac{dQ}{dt}$$

Substituindo:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\kappa_1 A}{\ell_1}\left(T_\text{q} - T_\text{f} - \frac{\ell_2}{\kappa_2 A}\frac{dQ}{dt}\right)$$

Isolando dQ/dt:

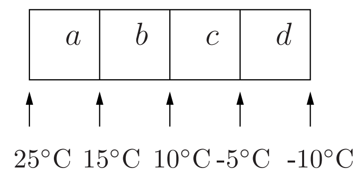
$$\frac{dQ}{dt} = \frac{A(T_\text{q} - T_\text{f})}{\dfrac{\ell_1}{\kappa_1} + \dfrac{\ell_2}{\kappa_2}} \tag{23}$$

Podemos ainda generalizar para um número n de materiais:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{A(T_\text{q} - T_\text{f})}{\displaystyle\sum_{i=1}^{n} \frac{\ell_i}{\kappa_i}} = \frac{A(T_\text{q} - T_\text{f})}{\displaystyle\sum_{i=1}^{n} R_i} \tag{24}$$

Note que não depende de T_0.

Exemplo 21:



As larguras e áreas são idênticas. O que se pode dizer sobre as condutividades térmicas?

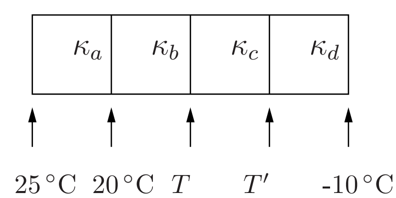
O fluxo é o mesmo em todos os blocos. Como também a largura e área são iguais:

$$\kappa_a(25 - 15) = \kappa_b(15 - 10) = \kappa_c(10 - (-5)) = \kappa_d(-5 - (-10))$$

ou

$$\kappa_b = \kappa_d = 2\kappa_a = 3\kappa_c \rightarrow \kappa_c < \kappa_a < \kappa_b = \kappa_d$$

Exemplo 22:



As larguras estão relacionadas por $\ell_d = 2\ell_a$, $\ell_b = \ell_c$ e, além disso, $\kappa_d = 5\kappa_a$ e $\kappa_c = 3\kappa_b$. As áreas são iguais. Quanto valem T e T'?

Para a: $\dfrac{dQ}{dt} = \dfrac{\kappa_a A}{\ell_a}(25 - 20)$

Para d: $\dfrac{dQ}{dt} = \dfrac{\kappa_d A}{\ell_d}[T' - (-10)]$

Então:

$$\frac{\kappa_a}{\ell_a}5 = \frac{\kappa_d}{\ell_d}(T' + 10) \Longrightarrow T' = -8\,°\text{C}$$

Analogamente para b e c:

$$\frac{\kappa_b}{\ell_b}(20 - T) = \frac{\kappa_c}{\ell_c}(T - T') \Longrightarrow T = -1\,°\text{C}$$
