

Mecanismos de Transferência de Calor

Profa. Carolina Brito



Instituto de Física



Importante: este material tem fins didáticos.
Não é permitida sua reprodução, divulgação ou compartilhamento.

Área 1 - Física IIIc

1. Termodinâmica: algumas ideias e conceitos
2. Equilíbrio & Lei Zero da Termodinâmica
3. Dilatação Térmica
4. Calorimetria
- 5. Mecanismos de Transferência de Calor**
6. Primeira Lei da Termodinâmica

Profa. Carolina Brito



Três mecanismos de transferência de calor

- **Convecção**

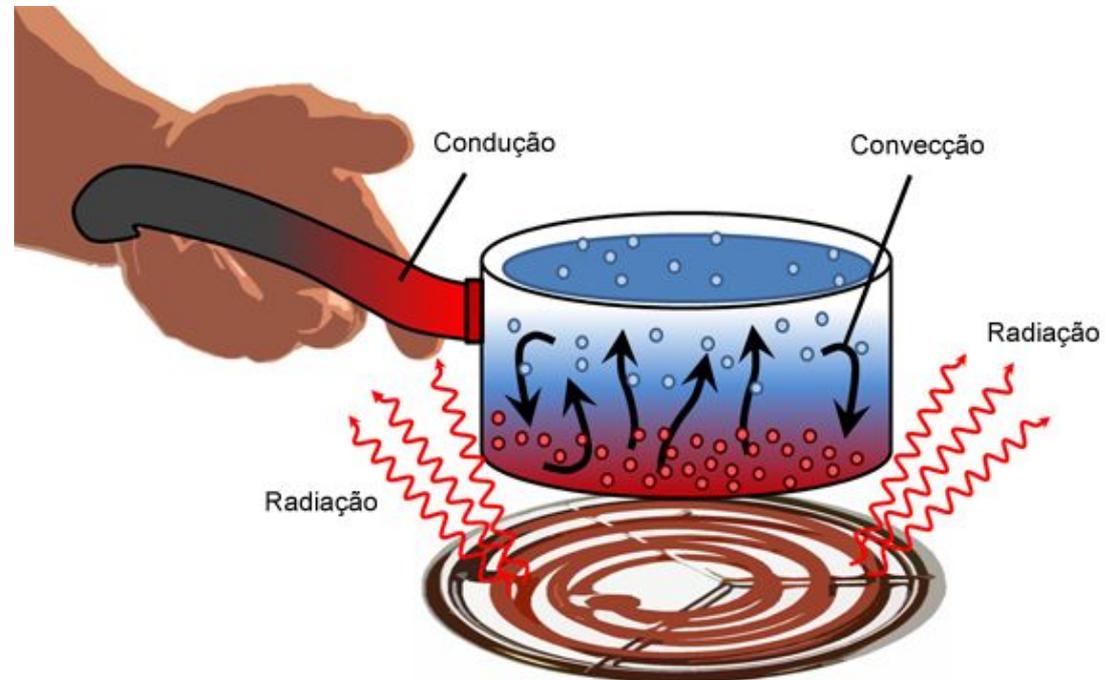
- é preciso haver meio material
- ocorre movimento do próprio meio
- comum em fluidos

- **Radiação Térmica**

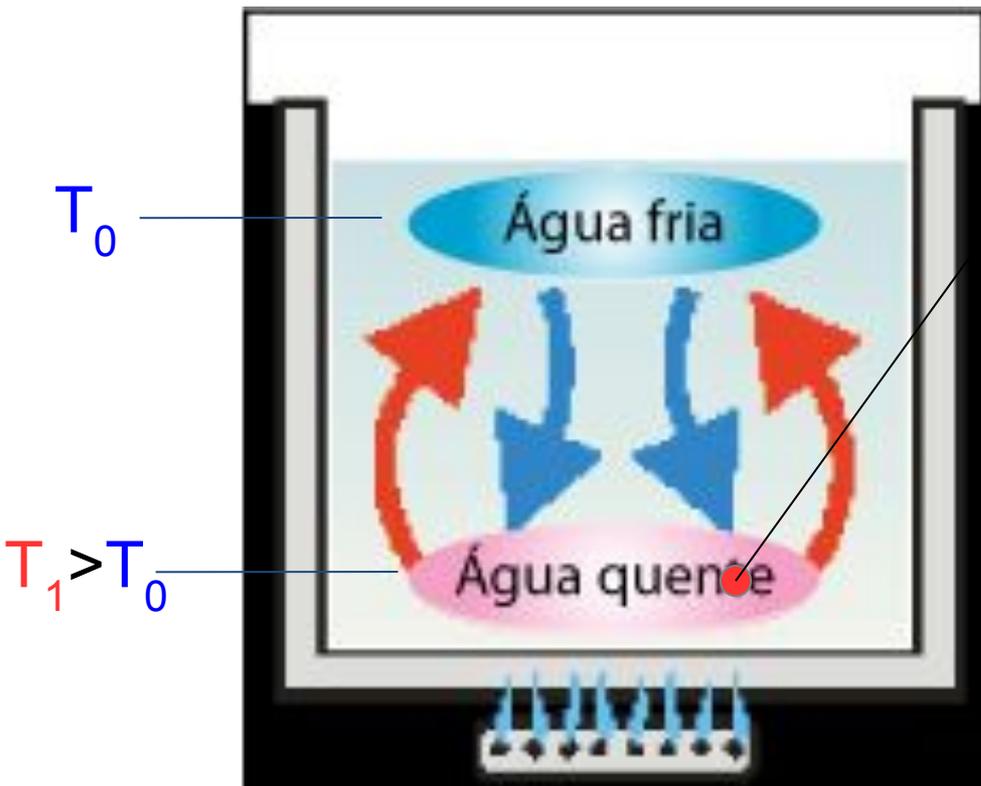
- não há necessidade de meio material
- a troca de calor é feita por meio de ondas eletromagnéticas

- **Condução**

- é preciso haver meio material ;
- *não* ocorre movimento do próprio meio
- comum em sólidos e fluidos



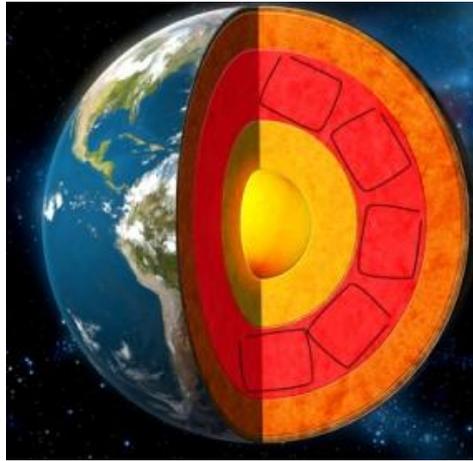
Convecção



- Gotícula de água esquenta em $T_1 \rightarrow$ dilata \rightarrow diminui a densidade \rightarrow sobe \rightarrow ao encontrar T_0 , esfria \rightarrow diminui Volume \rightarrow aumenta densidade \rightarrow desce
- As correntes de convecção ocorrem apenas se a diferença entre T_1 e T_0 forem acima de um certo valor

Convecção: mecanismo relevante em diversas escalas

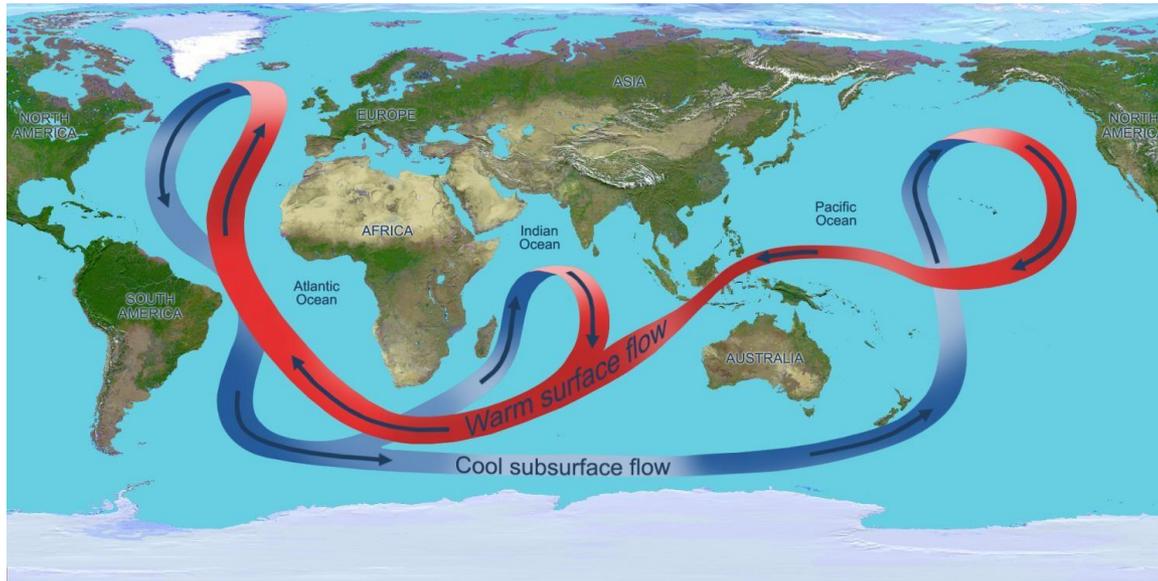
no interior da Terra



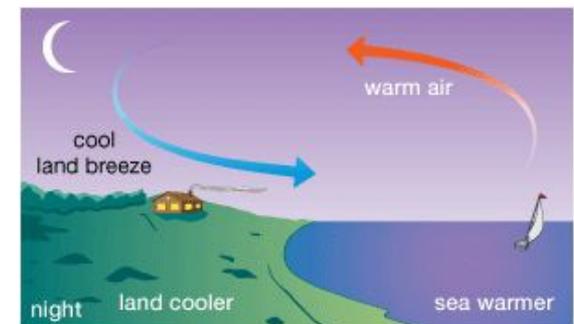
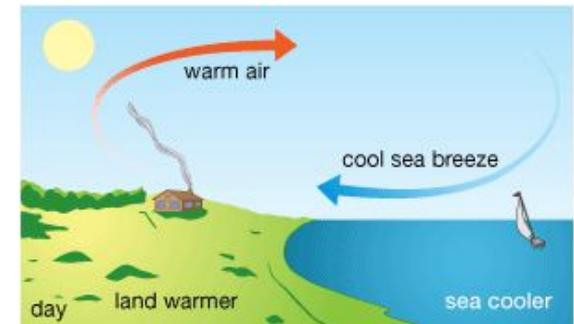
numa panela



nos oceanos



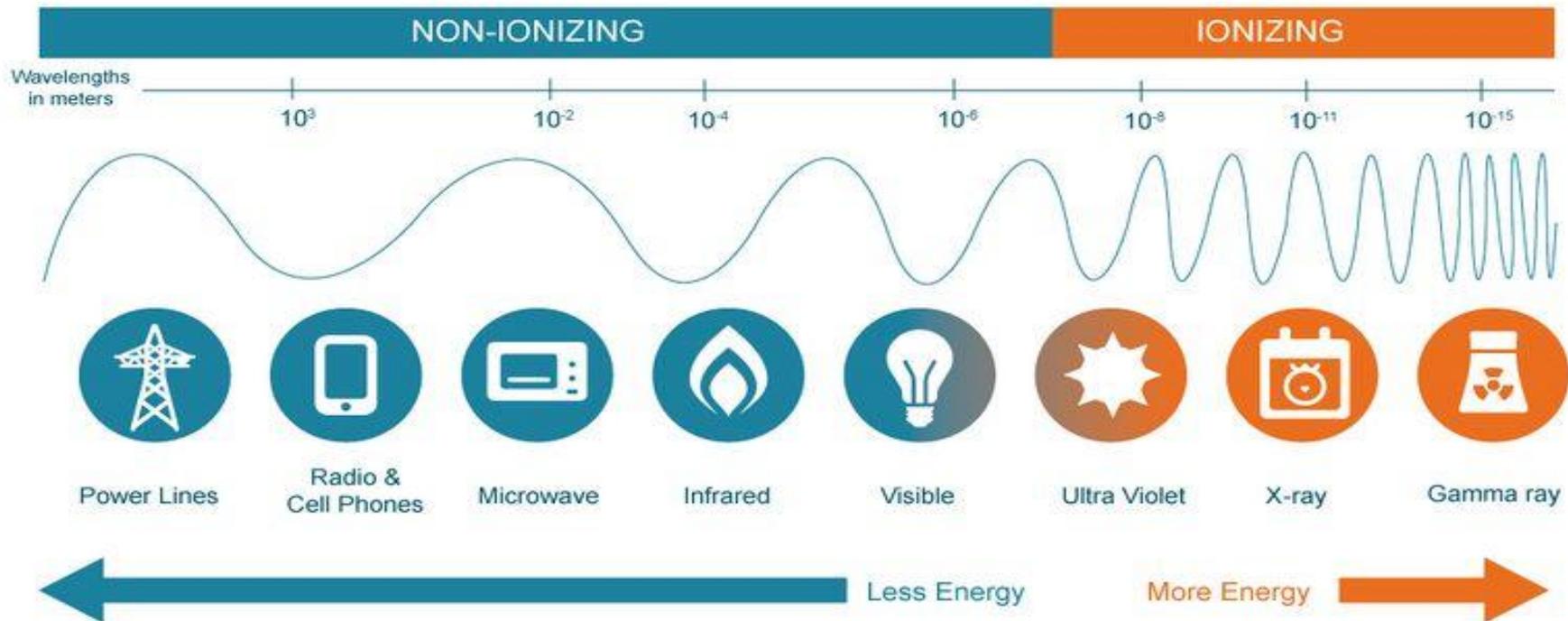
na atmosfera



PS: a densidade da água depende da temperatura e salinidade

Radiação

- Propagação de energia através de ondas eletromagnéticas
- Enorme espectro de ondas eletromagnéticas
- Diferentes mecanismos de interação com a matéria (ionização, vibração e rotação molecular, ...)

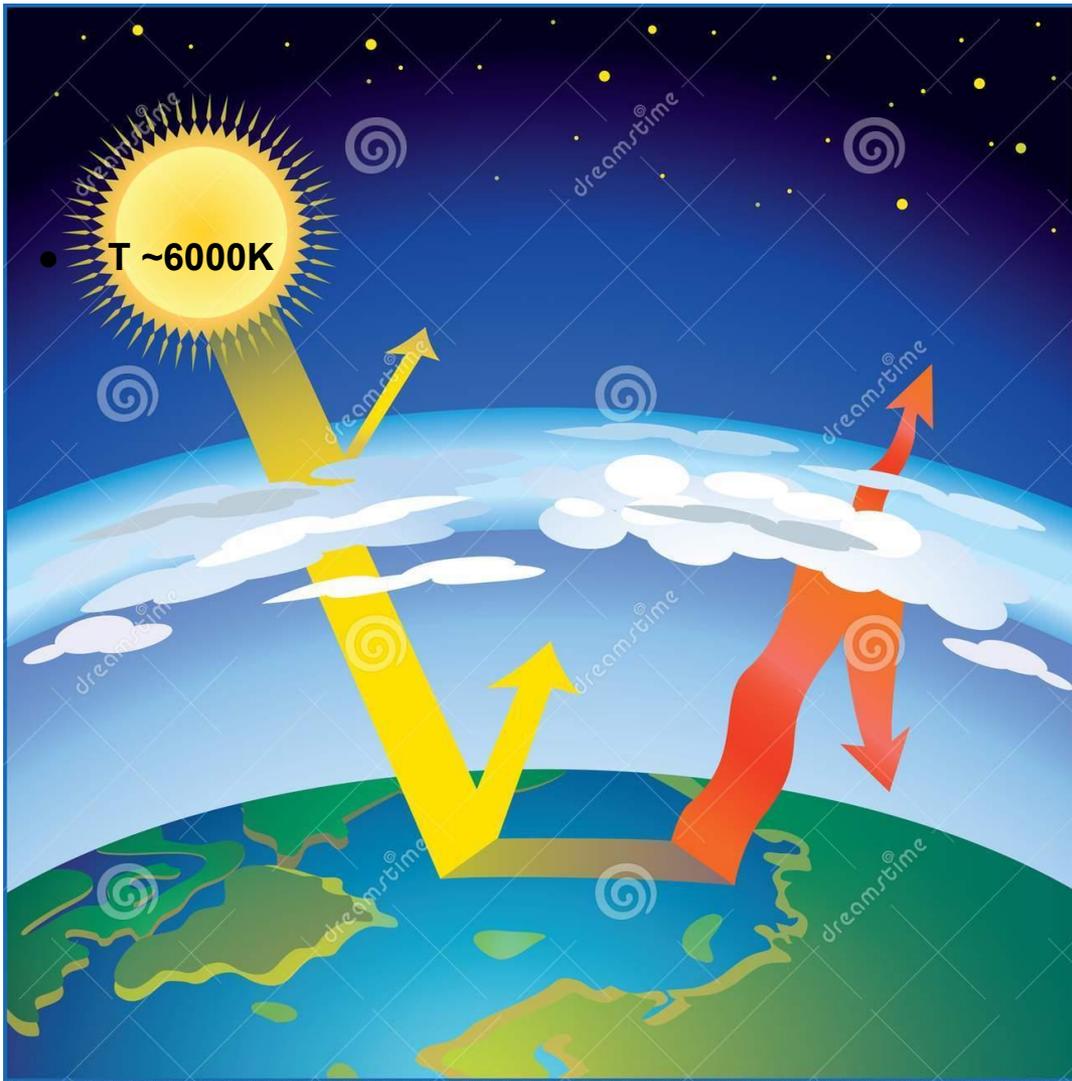


Radiação Térmica

- Qualquer corpo com $T > 0$ *emite* energia via radiação eletromagnética.
- O espectro de emissão depende da sua *temperatura absoluta*
- Corpo humano emite na frequência corresponde ao infra-vermelho
- Câmara térmica: essencialmente captura radiação no infra-vermelho



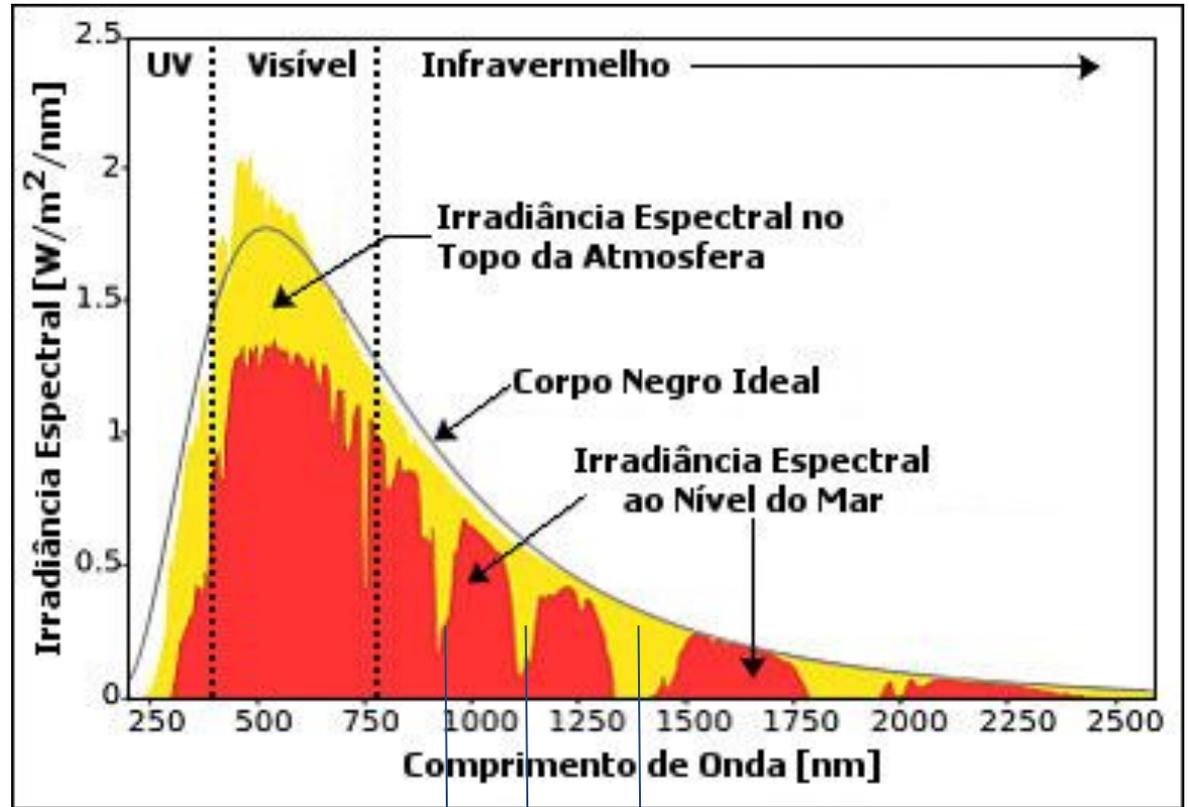
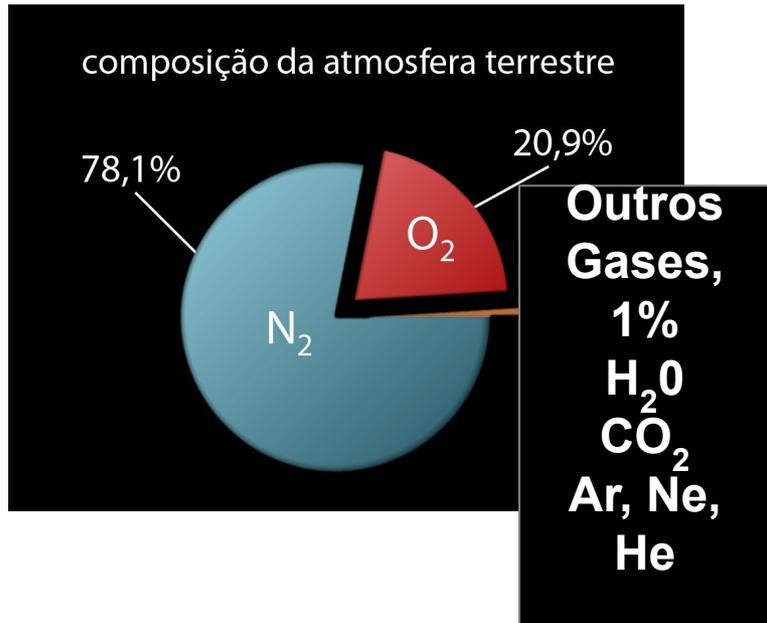
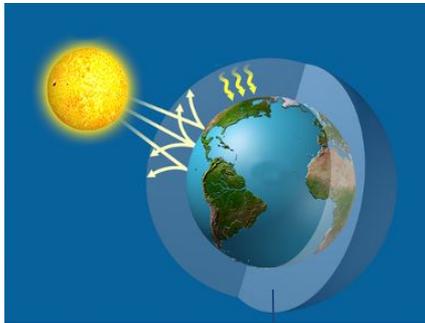
Radiação Térmica e o Efeito Estufa



- Temperatura na superfície do Sol $T \sim 6000\text{K}$ → ele emite radiação ppte na frequência do visível → esquentam a Terra.
- Temperatura média da Terra $\sim 300\text{K}$ → ela emite radiação ppte na frequência do infra-vermelho
- Parte do que a Terra reemite volta para o espaço; parte fica retido na sua atmosfera
- A Terra retém calor por um processo chamado *Efeito Estufa* → O que é ??

O Efeito Estufa é um fenômeno natural

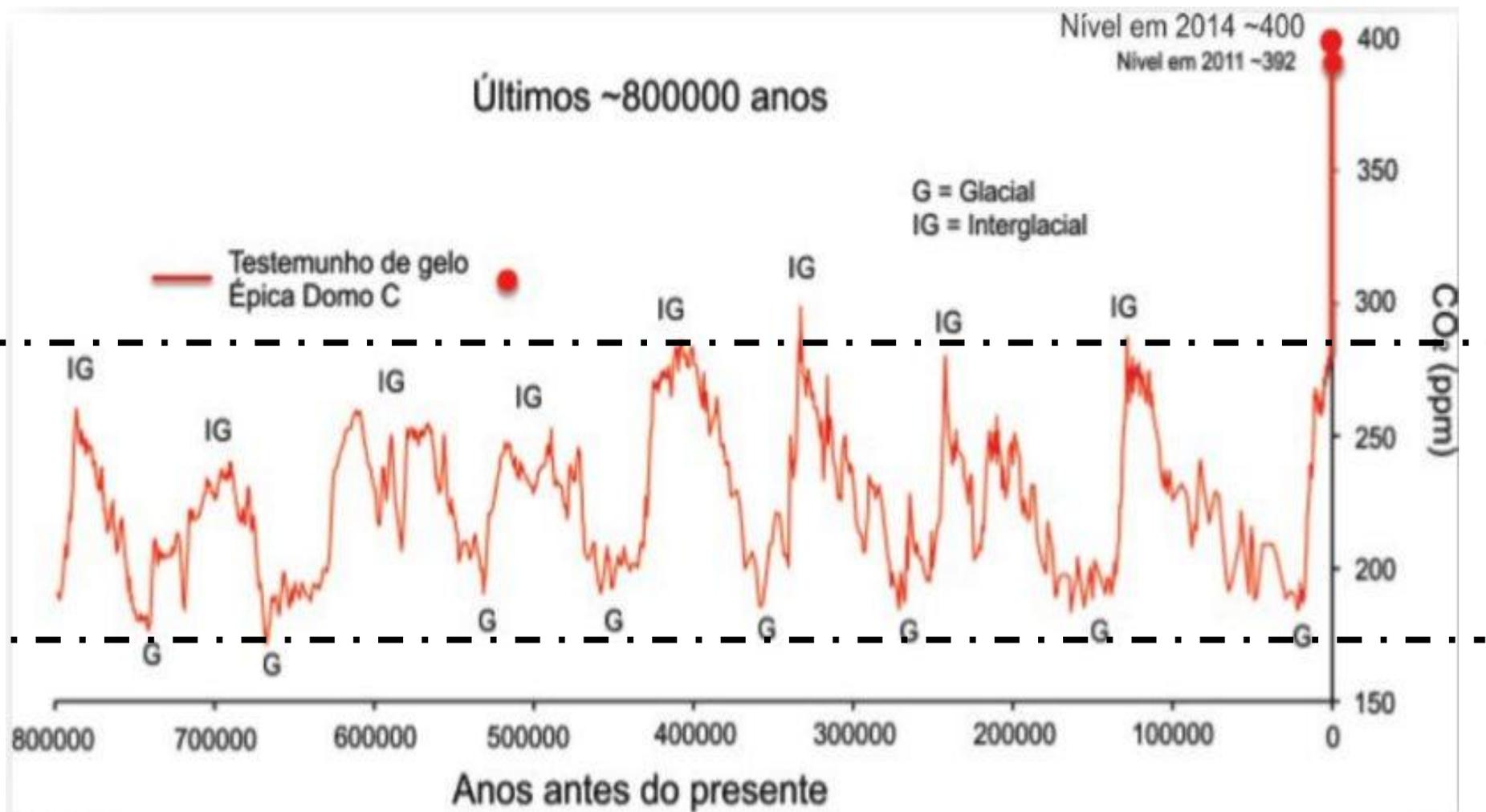
- Descoberto por Joseph Fourier, em 1824
- Gases ditos “de efeito estufa” absorvem algumas frequências e reemitem
- Sem o Efeito Estufa, a temperatura média da Terra seria $\sim 15^{\circ}\text{C}$ menor do que é



Bandas de absorção dos gases

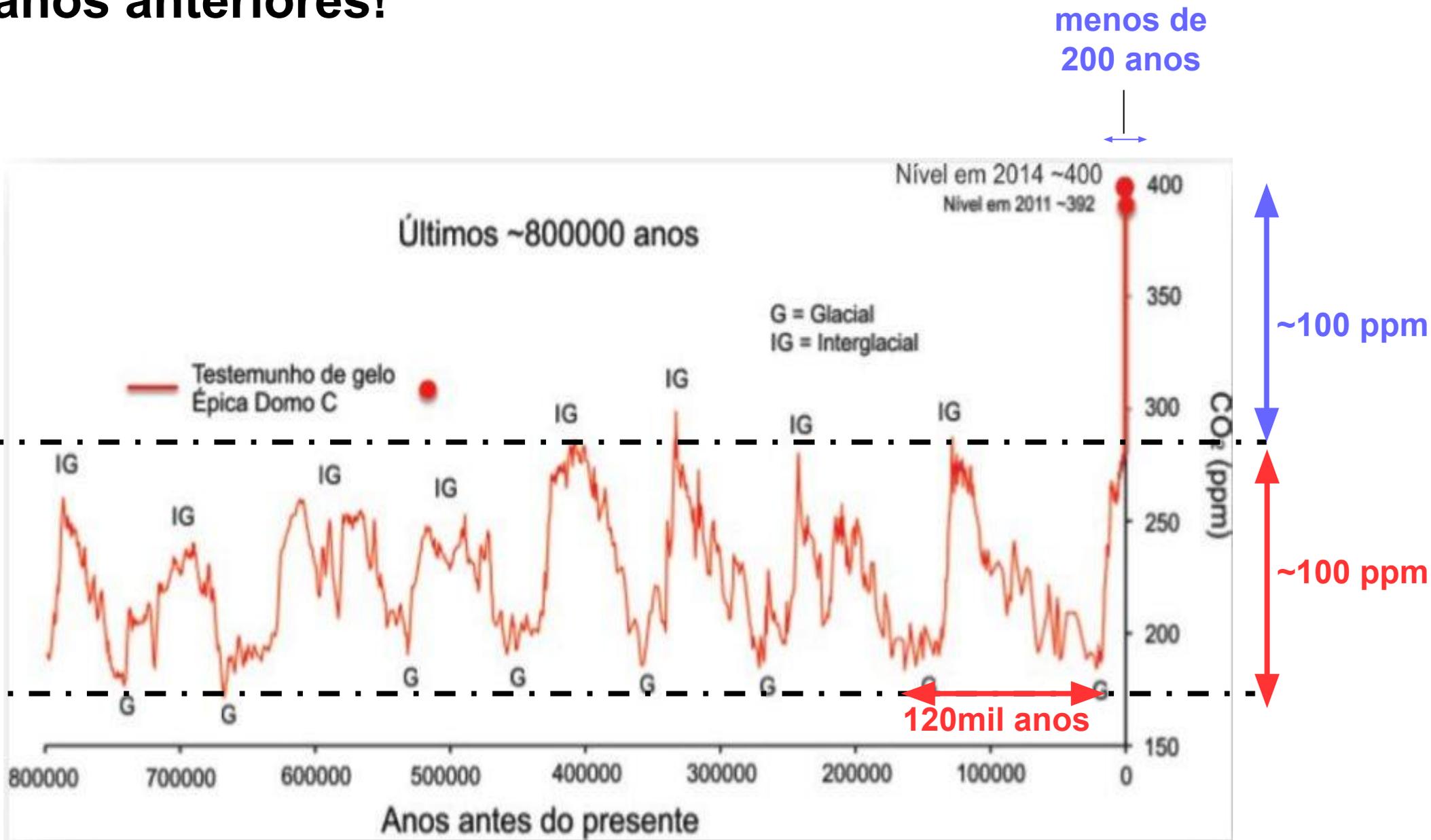
H₂O, O₂, CO₂

O que não é natural é o excesso de gases de efeito estufa



INCT da Criosfera (2014),
Compreendendo as Mudanças Climáticas, Flávia Moraes et al.

Varição do CO₂ em 200 anos é maior do que nos 800 mil anos anteriores!



INCT da Criosfera (2014),
Compreendendo as Mudanças Climáticas, Flávia Moraes et al.

E daí, quais são as consequências ?

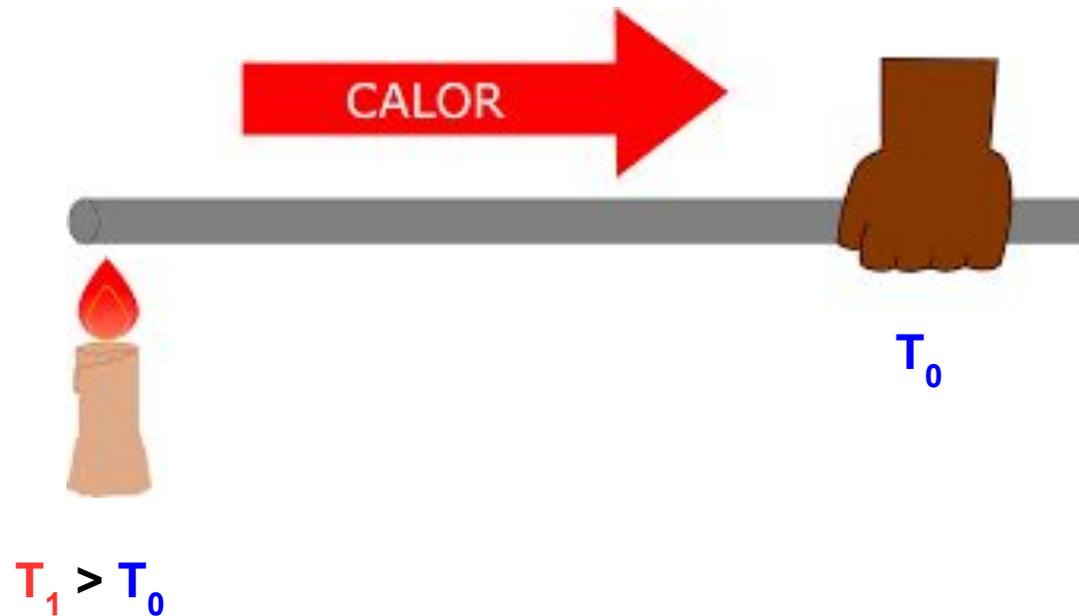
- Aquecimento global (<https://youtu.be/3sqdyEpkIFU>)
- Aumento de eventos extremos
- Derretimento acelerado do gelo
- Aumento do nível do mar
- Extinção acelerada de espécies
- ...

→ ótima fonte de informação: <https://climate.nasa.gov>

→ Palestra de divulgação sobre mudanças climáticas (Simplifísica): <https://youtu.be/E93cdMNsy30>

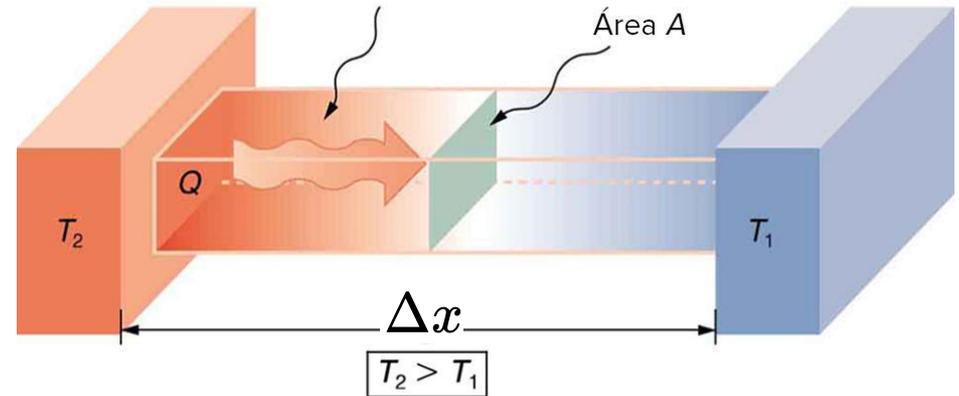
Condução de Calor

- Os materiais devem estar em contato físico e estar a temperaturas diferentes



Condução de Calor

Como quantificar o calor conduzido ?



Resultados experimentais:

I) O calor flui das regiões de temperatura mais elevada para as de menor temperatura

II) Durante um intervalo de tempo Δt o calor ΔQ transferido é:

IIa) proporcional à $\Delta T = T_2 - T_1$

IIb) inversamente proporcional à espessura Δx da placa

$$\Delta Q \sim \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

III) é proporcional à área de contato A através da qual flui o calor $\rightarrow \Delta Q \sim A$

IV) é proporcional ao intervalo de tempo Δt durante o qual flui calor $\rightarrow \Delta Q \sim \Delta t$

Condução de Calor

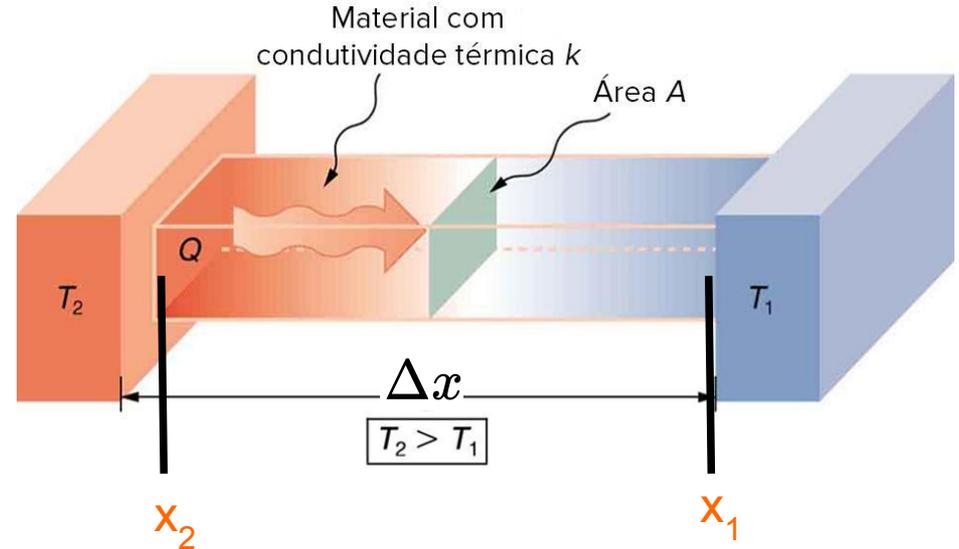
I + II + III + IV:

$$\Delta Q \sim \frac{\Delta T}{\Delta x} A \Delta t$$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} \sim \frac{\Delta T}{\Delta x} A$$

Constante de proporcionalidade
→ Condutividade térmica κ

$$H = \left| \frac{\Delta Q}{\Delta t} \right| = \kappa A \frac{\Delta T}{\Delta x}$$



fluxo de calor: $\frac{\Delta Q}{\Delta T}$

gradiente de temperatura: $\frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1}$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -\kappa A \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

O sinal - é porque o fluxo de calor é no sentido *contrário* ao do gradiente de temperatura.

Condução de Calor

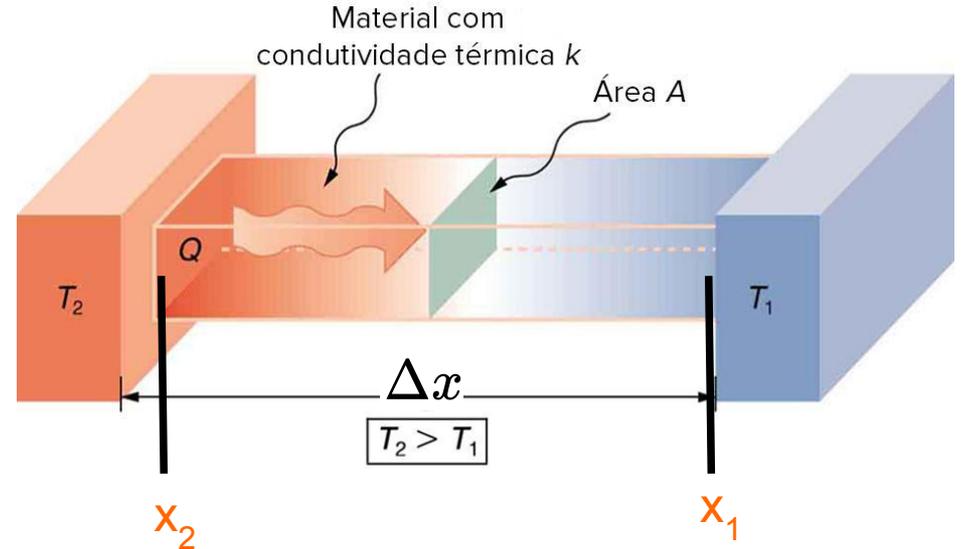
I + II + III + IV:

$$\Delta Q \sim \frac{\Delta T}{\Delta x} A \Delta t$$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} \sim \frac{\Delta T}{\Delta x} A$$

Constante de proporcionalidade
→ Condutividade térmica κ

$$H = \left| \frac{\Delta Q}{\Delta t} \right| = \kappa A \frac{\Delta T}{\Delta x}$$



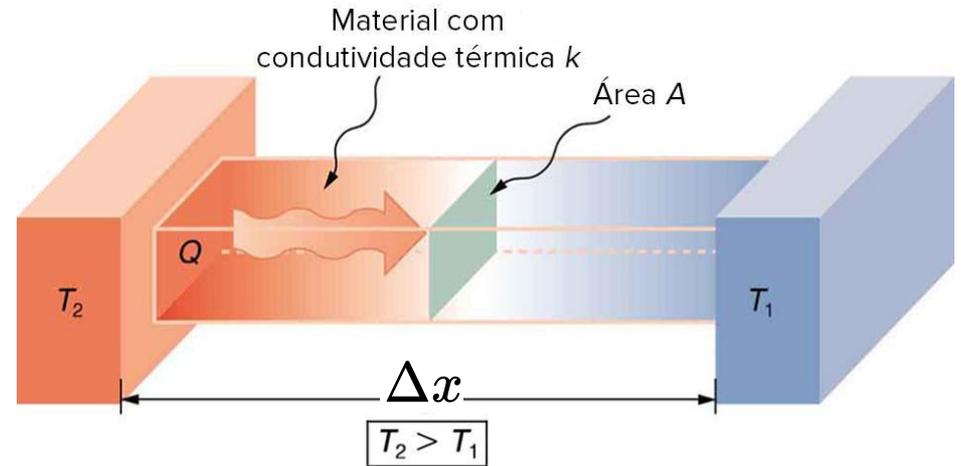
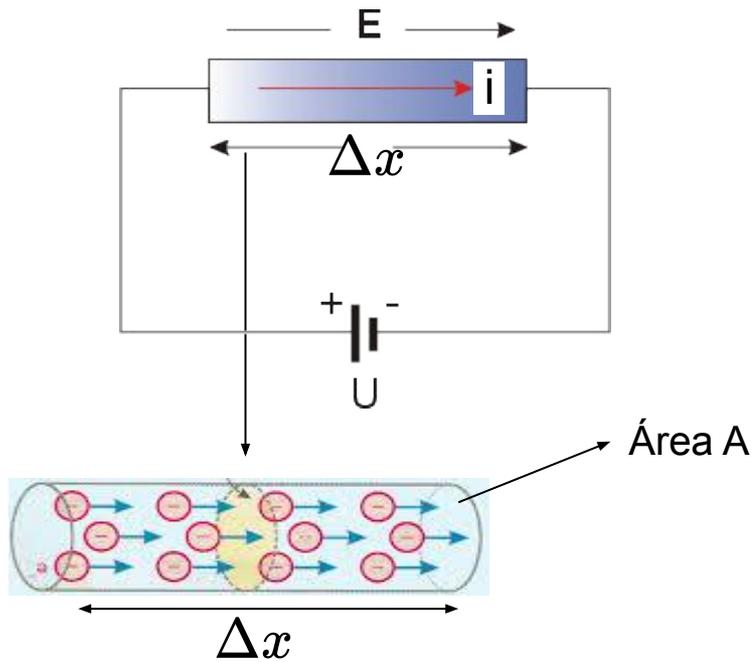
fluxo de calor: $\frac{\Delta Q}{\Delta T}$

gradiente de temperatura: $\frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1}$

$$\frac{dQ}{dt} = -\kappa A \frac{dT}{dx}$$

No caso infinitesimal

Analogia: fluxo de calor vs corrente elétrica



Fluxo de carga elétrica

Gradiente do potencial elétrico

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \sigma A \left(\frac{\Delta V}{\Delta x} \right) = \frac{V}{R}$$

condutividade elétrica

Fluxo de calor

Gradiente de temperatura

$$H = \left| \frac{\Delta Q}{\Delta t} \right| = \kappa A \left(\frac{\Delta T}{\Delta x} \right)$$

condutividade térmica

Valores típicos de conductividades térmicas

Substance	k (W/m · K)
<i>Metals</i>	
Stainless steel	14
Lead	35
Iron	67
Brass	109
Aluminum	235
Copper	401
Silver	428
<i>Gases</i>	
Air (dry)	0.026
Helium	0.15
Hydrogen	0.18
<i>Building Materials</i>	
Polyurethane foam	0.024
Rock wool	0.043
Fiberglass	0.048
White pine	0.11
Window glass	1.0

Exemplo 1

Façamos uma experiência imaginária. Imagine que você está sentado na cadeira abaixo. A estrutura da cadeira é feita de alumínio ($k_{Al}=235\text{W/mK}$) e o local onde a pessoa senta é feita de madeira ($k_{mad}=0,15\text{ W/mK}$). Suponha que temperatura ambiente seja de 20°C .

(a) Pelo que vimos nas primeiras aulas de termodinâmica, a que temperatura estarão a estrutura e o local onde a pessoa senta?

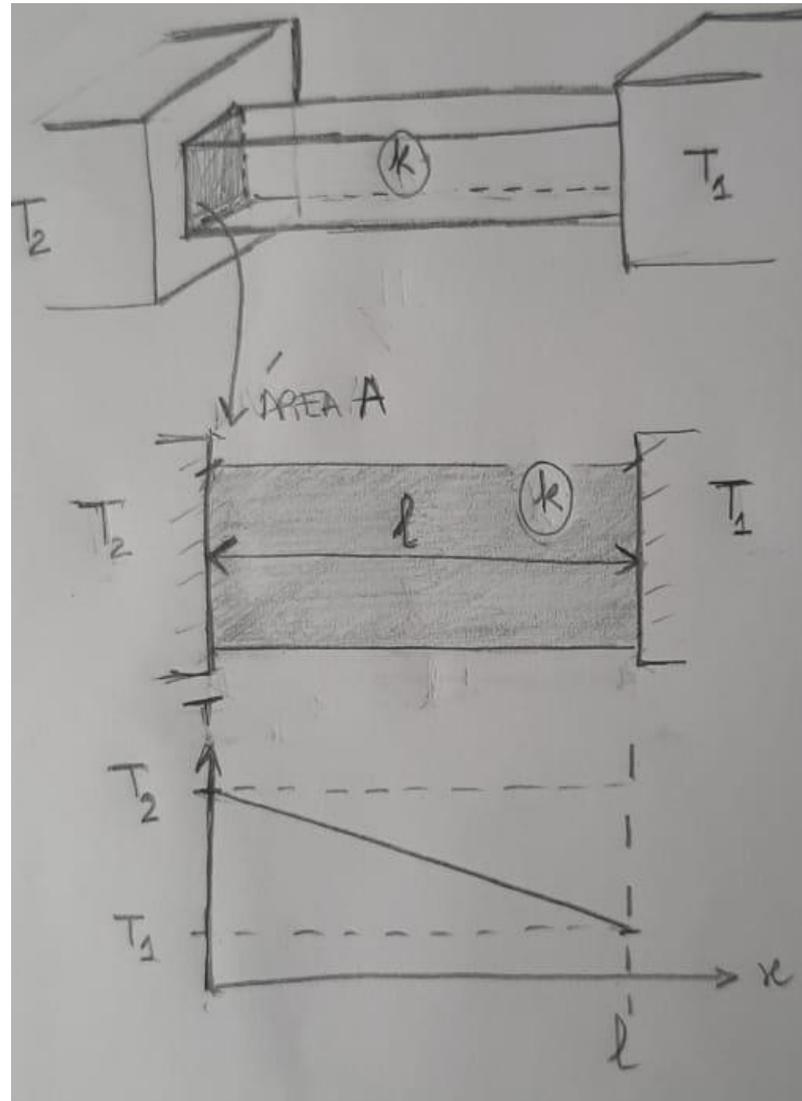
b) Qual das duas partes (de alumínio ou madeira) parece estar a uma temperatura mais elevada? Por quê?



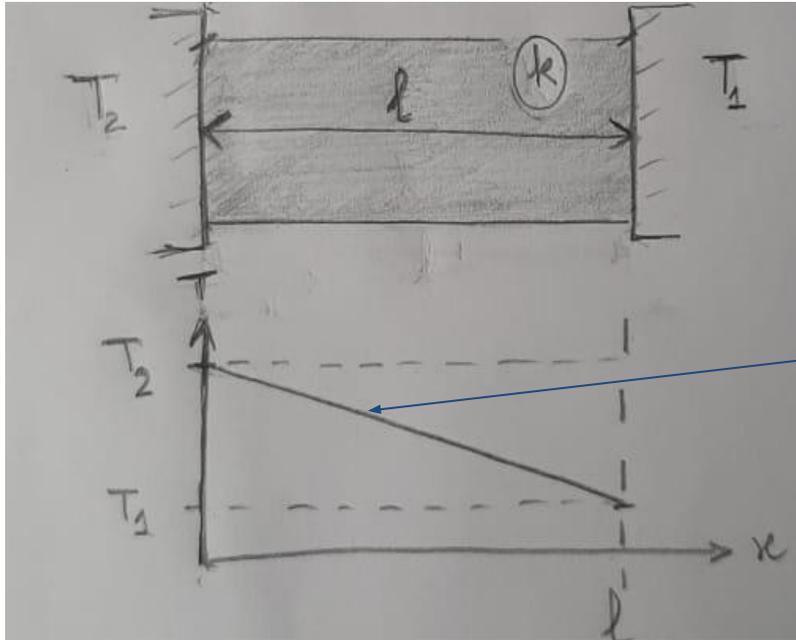
Condução de calor numa barra homogênea

Como é o perfil de temperatura na barra ?

- Barra homogênea = feita de um só material
- Não há troca de calor nas laterais da barra; somente nas extremidades
- Seção reta A , comprimento l , e tem extremidades mantidas em contato com reservatórios térmicos de temperaturas T_2 e $T_1 < T_2$
- *No regime estacionário*, T não depende do tempo \rightarrow Depende apenas de x , $T=T(x)$
- O fluxo de calor $\Delta Q/\Delta t$ não pode depender de x ; Ele é o mesmo em qualquer seção reta onde “cortarmos” a barra. Ou seja, $\Delta Q/\Delta t = \text{constante}$
- Analogia com o fluxo de carga: se não houver perda de carga através das laterais do fio, a corrente $i = \Delta q/\Delta t = \text{constante}$.



Condução de calor numa barra homogênea



$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -\kappa A \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta x} = const$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{T_2 - T_1}{0 - l} = -\frac{T_2 - T_1}{l}$$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \kappa A \frac{T_2 - T_1}{l} = \left(\frac{\kappa A}{l} \right) (T_2 - T_1) = \frac{A}{R} (T_2 - T_1)$$

$$R \equiv \frac{l}{\kappa}$$

Resistência Térmica

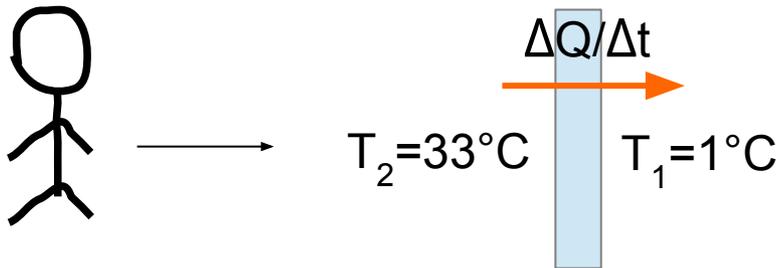
Exemplo 2

(a) Calcule a taxa com que o calor flui para fora do corpo de um esquiador através de suas roupas. Utilize os seguintes dados:

- área da superfície do corpo = $1,8 \text{ m}^2$;
- espessura da roupa = 1 cm ;
- temperatura da superfície da pele = $33 \text{ }^\circ\text{C}$;
- temperatura da superfície exterior da roupa = 1°C ;
- condutividade térmica da roupa = $0,04 \text{ W / m.K}$.

b) Como a resposta anterior mudaria se, depois de uma queda, as roupas do esquiador ficassem ensopadas de água? Condutividade térmica da água igual a $0,6 \text{ W / m.K}$.

c) No inverno, porque ficamos com sensação de frio quando a roupa está molhada?



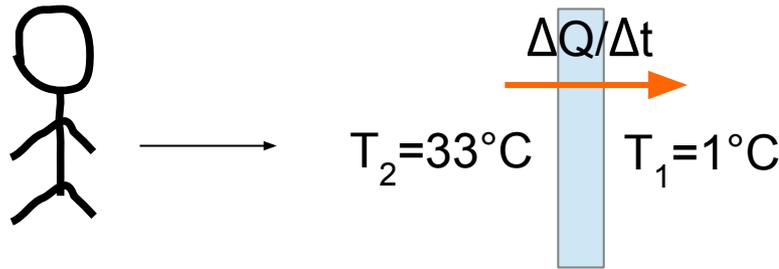
• Taxa com a qual perde calor: $H = \left| \frac{\Delta Q}{\Delta t} \right| = \kappa A \frac{\Delta T}{\Delta x}$

• Dados: $A = 1,8 \text{ m}^2$; $\Delta x = 0,01 \text{ m}$; $k_{\text{roupa}} = 0,04 \text{ W/m.k}$

Exemplo 2

(a) Calcule a taxa com que o calor flui para fora do corpo de um esquiador através de suas roupas.

(b) Como a resposta anterior mudaria se, depois de uma queda, as roupas do esquiador ficassem ensopadas de água? Condutividade térmica da água igual a $0,6 \text{ W / m.K}$.



- Taxa com a qual perde calor: $H = \left| \frac{\Delta Q}{\Delta t} \right| = \kappa A \frac{\Delta T}{\Delta x}$

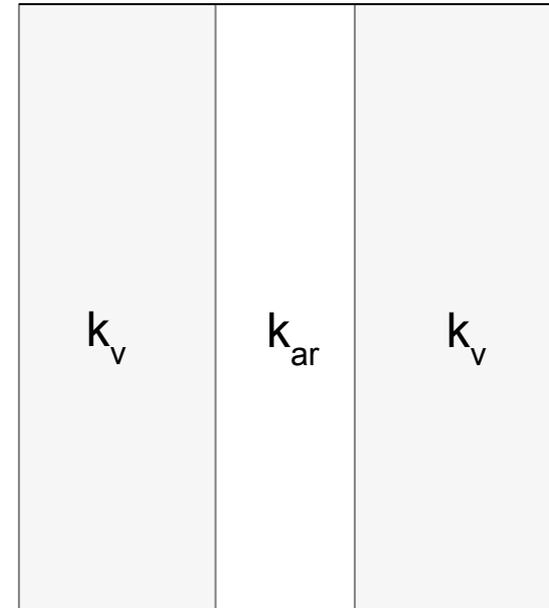
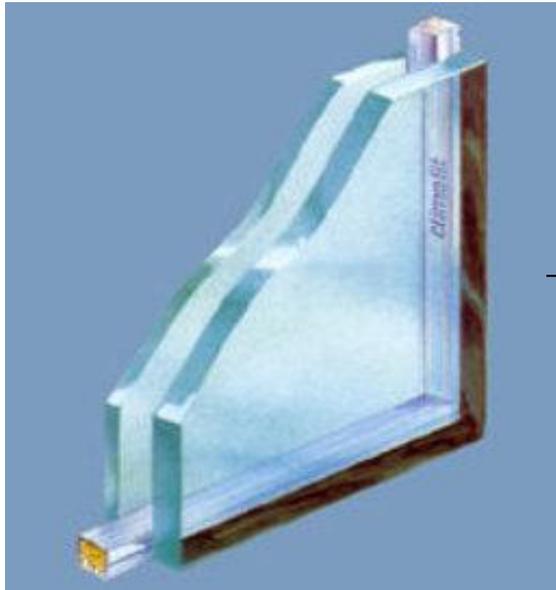
- Dados: $A=1,8\text{m}^2$; $\Delta x=0,01\text{m}$; $k_{\text{roupa}}=0,04 \text{ W/m.k}$

a) roupa seca: $k=0,04 \text{ W/m.K} \rightarrow \Delta Q/\Delta t = (0,04 \text{ W/m.K}) (1,8\text{m}^2) ((33-1) \text{ K})/0,01\text{m} = 223 \text{ W}$ (ou J/s)

b) roupa molhada: $k=0,6 \text{ W/m.K} \rightarrow \Delta Q/\Delta t = (0,6 \text{ W/m.K}) (1,8\text{m}^2) ((33-1) \text{ K})/0,01\text{m} = 3348 \text{ W}$ (ou J/s)

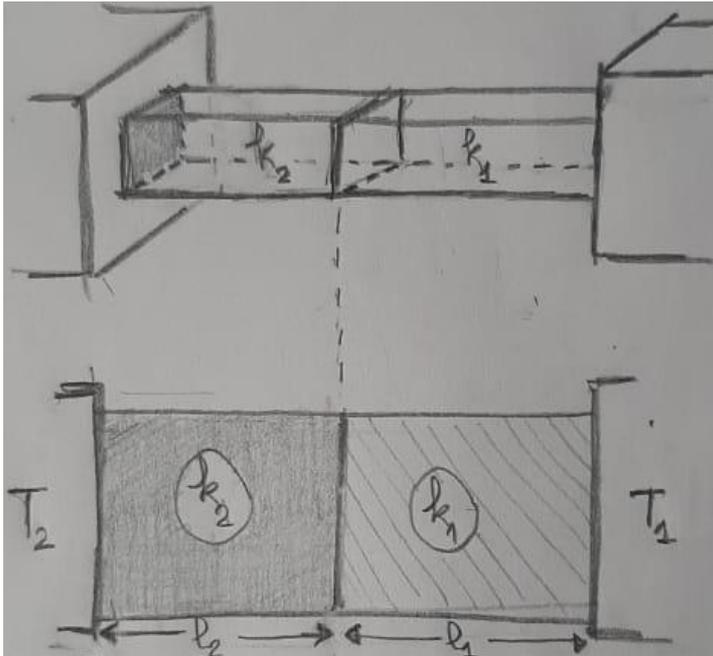
c) No inverno, porque ficamos com sensação de frio quando a roupa está molhada?

E se a barra não for homogênea ?



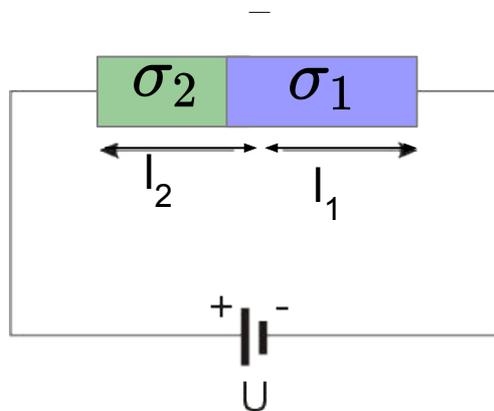
Como calcular a *condutividade térmica efetiva* k_{ef} do material ?

Condução de calor numa barra não homogênea



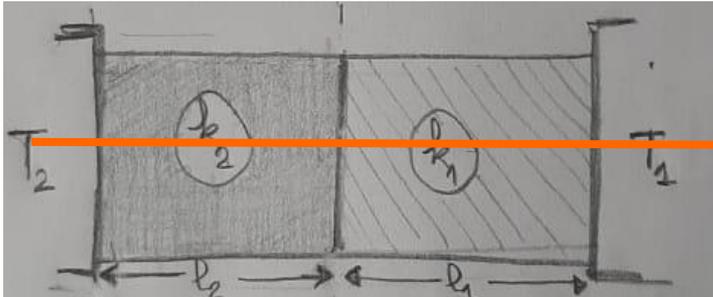
- Barra com dois tipos de materiais, os quais têm *condutividade térmica* diferentes κ_1, κ_2
- Não há troca (entrada/saída) de *calor* nas laterais da barra; somente nas extremidades
- Seção reta A , comprimento l , e tem extremidades mantidas em contato com reservatórios térmicos de temperaturas T_2 e $T_1 < T_2 \rightarrow \Delta T = T_2 - T_1$

Analogia



- Fio com dois tipos de materiais, os quais têm *condutividade elétrica* diferentes σ_1, σ_2
- Não há troca (entrada/saída) de *cargas* nas laterais da barra; somente nas extremidades
- Seção reta A , comprimento l , e tem extremidades mantidas em contato com uma bateria, criando uma diferença de potencial $\Delta U = U_2 - U_1$

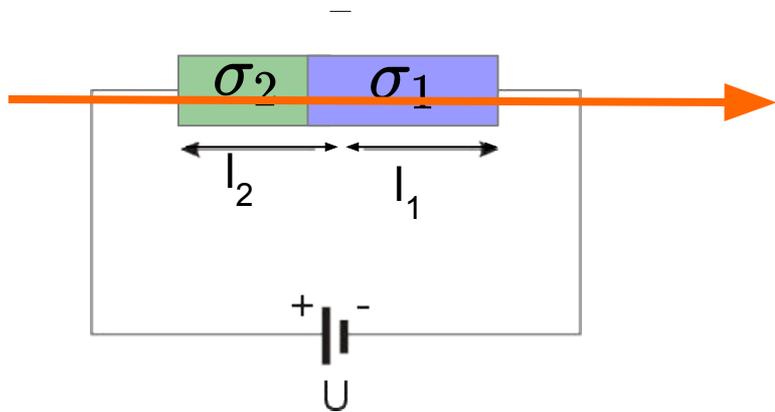
Condução de calor numa barra não homogênea



fluxo de calor Q

$$H = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \text{const}$$

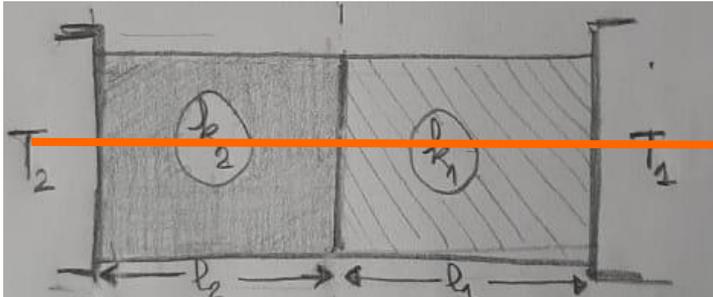
Se não há perda de calor (carga) nas laterais, **o fluxo é constante** ao longo de toda a barra (fio elétrico)



fluxo de carga q

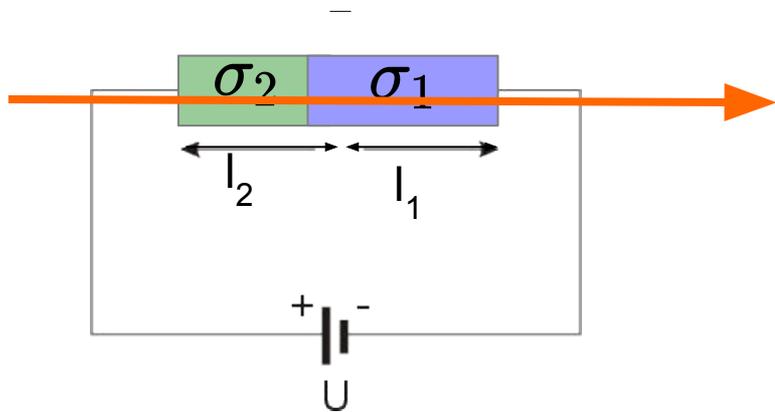
$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \text{const}$$

Condução de calor numa barra não homogênea



fluxo de calor Q

$$H = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \text{const}$$



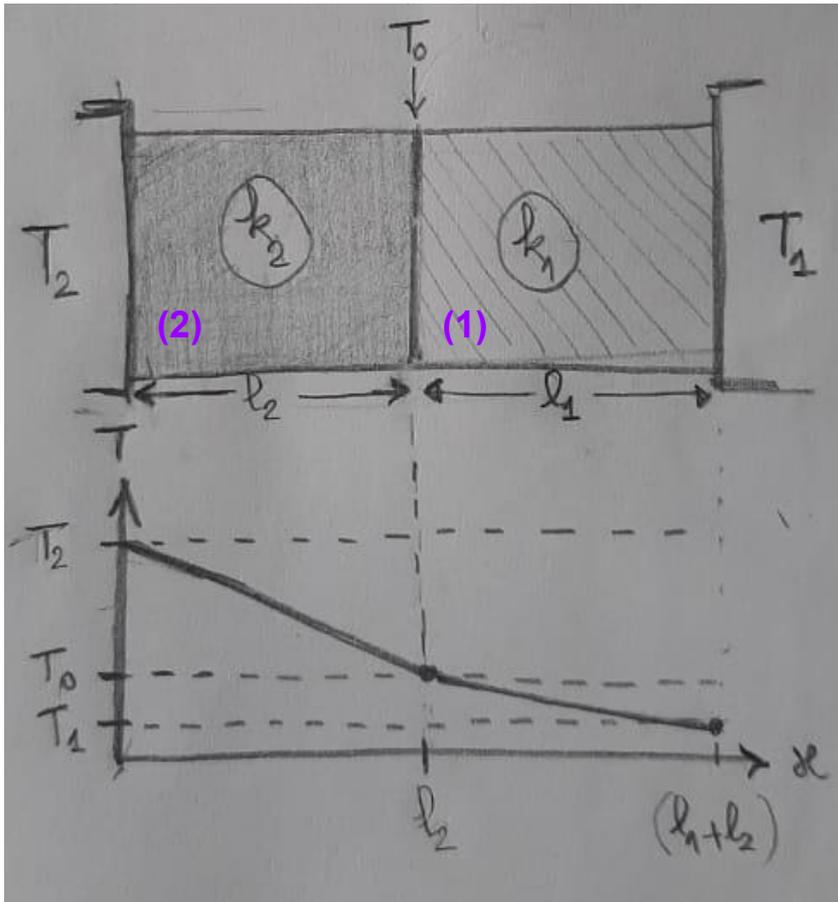
fluxo de carga q

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \text{const}$$

O que ocorre com a **Temperatura** (Potencial elétrico) ao longo da barra (fio elétrico)?

É constante ou varia?

Condução de calor numa barra não homogênea



$$H = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = -\kappa A \frac{\Delta T}{\Delta x} = \text{const}$$

(2)

(1)

$$\frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{T_0 - T_2}{l_2 - 0}$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{T_1 - T_0}{(l_1 + l_2) - l_2}$$

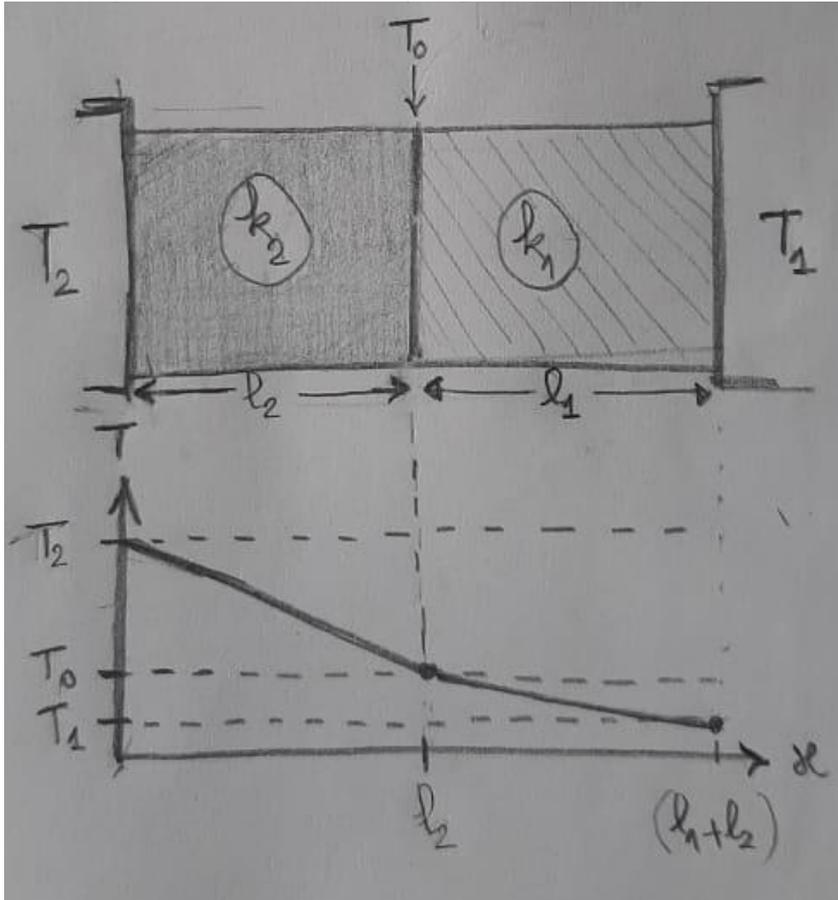
$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -\kappa A \frac{\Delta T}{\Delta x} = -\kappa_2 A \frac{(T_0 - T_2)}{l_2 - 0} = -\kappa_1 A \frac{(T_1 - T_0)}{(l_2 + l_1) - l_2}$$

Isola o T_0 ...

$$T_0 = \frac{\kappa_2 \frac{T_2}{l_2} + \kappa_1 \frac{T_1}{l_1}}{\frac{\kappa_2}{l_2} + \frac{\kappa_1}{l_1}}$$

Condução de calor numa barra não homogênea

E substitui o T_0 em uma das equações. P.ex:

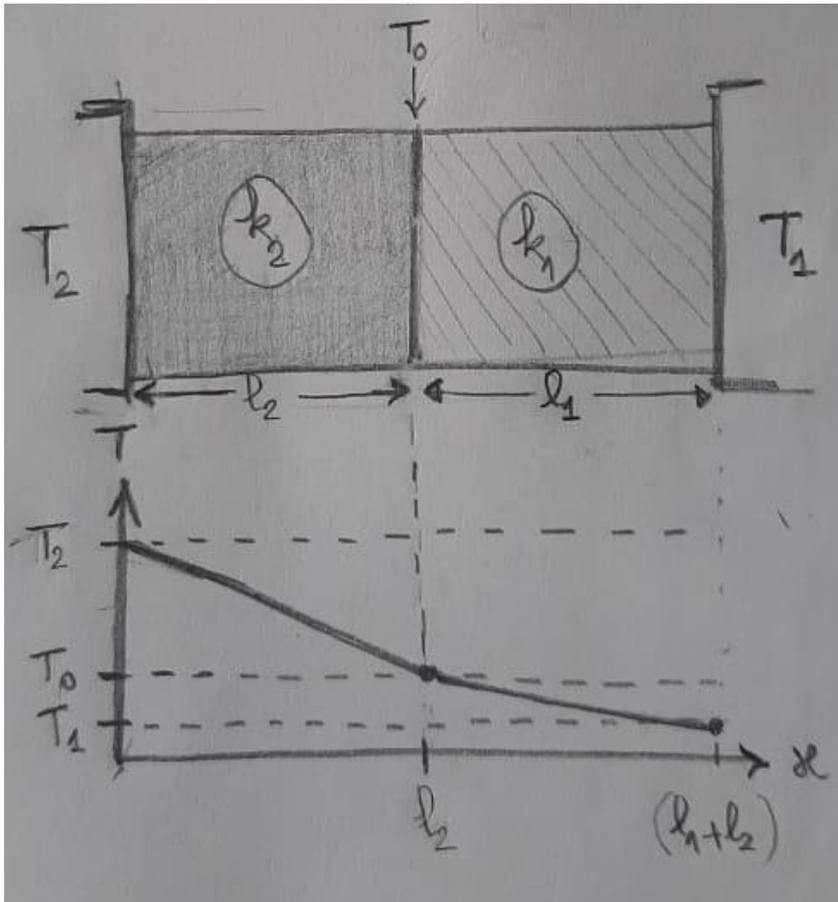


$$T_0 = \frac{\kappa_2 \frac{T_2}{l_2} + \kappa_1 \frac{T_1}{l_1}}{\frac{\kappa_2}{l_2} + \frac{\kappa_1}{l_1}}$$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -\kappa_2 A \frac{(T_2 - T_0)}{l_2}$$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -\frac{\kappa_2 \kappa_1 A}{\kappa_2 l_1 + \kappa_1 l_2} (T_2 - T_1)$$

Condução de calor numa barra não homogênea



$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -\frac{\kappa_2 \kappa_1 A}{\kappa_2 l_1 + \kappa_1 l_2} (T_2 - T_1)$$

$$\div \kappa_2 \kappa_1$$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -\frac{A}{\frac{l_1}{\kappa_1} + \frac{l_2}{\kappa_2}} (T_2 - T_1)$$

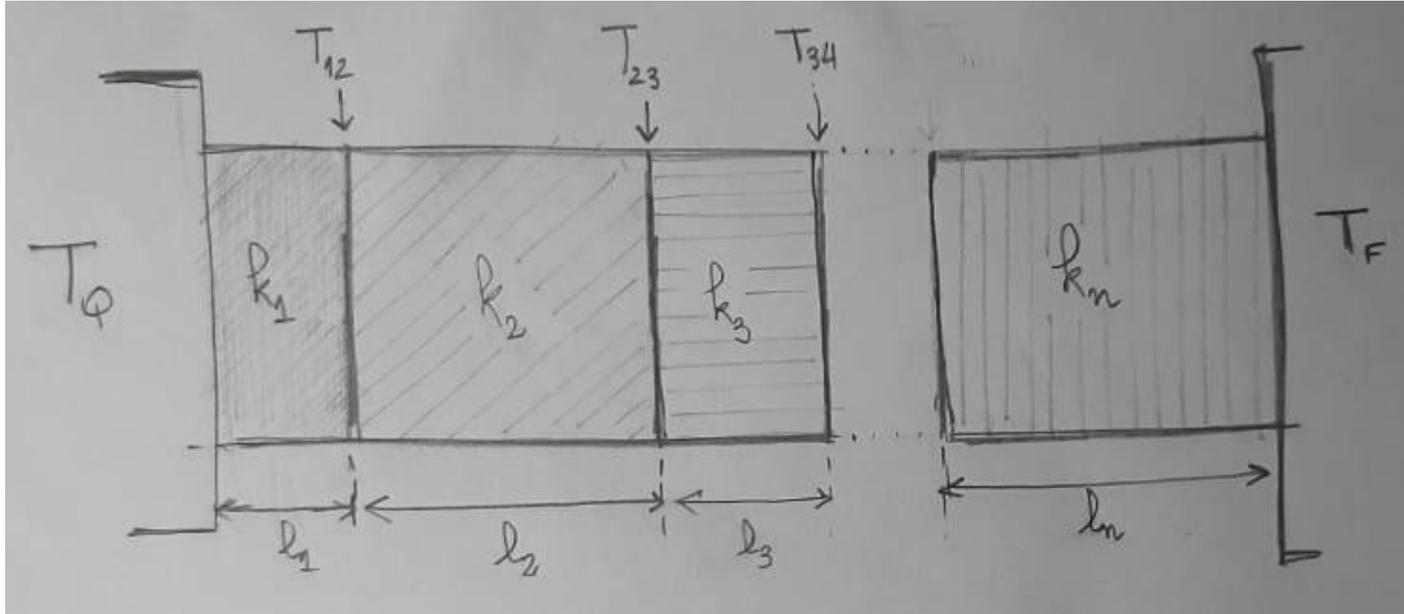
$$R_1 \equiv \frac{l_1}{\kappa_1} \quad R_2 \equiv \frac{l_2}{\kappa_2}$$

Resistência Térmica

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{A}{R_1 + R_2} (T_2 - T_1)$$

Dispositivo composto por “n” materiais

Reservatório térmico à temperatura mais elevada, T_Q



Reservatório térmico à temperatura menos elevada, T_F

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{l_i}{\kappa_i}} A(T_Q - T_F) = \frac{1}{\sum_{i=1}^n R_i} A(T_Q - T_F)$$

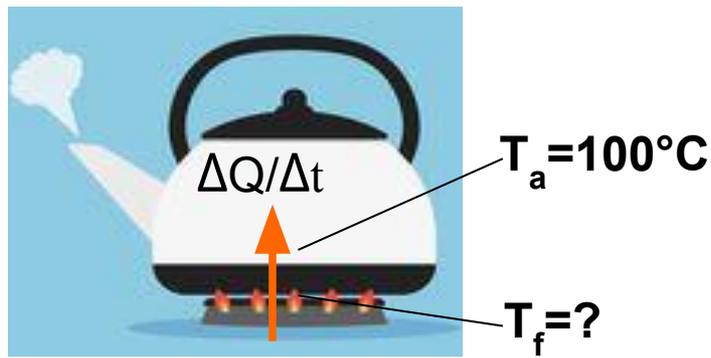
$\equiv \kappa_{ef}$

Exemplo 3

Uma chaleira de alumínio contendo água em ebulição a 100°C está sobre uma chama. O raio do fundo da chaleira é de $7,5\text{cm}$ e sua espessura é de 2mm . A condutividade térmica do alumínio é $\kappa_{Al}=0,49\text{ cal/s.cm.}^{\circ}\text{C}$. A chaleira vaporiza 1 litro (equivalente a 1kg) de água em 5 min . O calor de vaporização da água a 100°C é de $L_v=540\text{ cal/g}$. Despreze as perdas pelas superfícies laterais e responda:

a) A que temperatura está o fundo da chaleira?

b) Se tiver uma superfície de vidro com espessura de 2mm entre a chama e a chaleira, quanto tempo levaria para vaporizar a mesma quantidade de água? $\kappa_v=0,0024\text{ cal/s.cm.}^{\circ}\text{C}$



$$(a) \quad \left| \frac{\Delta Q}{\Delta t} \right| = \kappa_{Al} A \frac{\Delta T}{\Delta x}$$
$$\left| \frac{\Delta Q}{\Delta t} \right| = \kappa_{Al} A \frac{(T_f - T_a)}{\Delta x}$$

$$A = \pi 7,5^2 \text{ cm}^2 \quad \Delta x = 2 \text{ mm} = 0,2 \text{ cm}$$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{L_v m}{\Delta t} = \frac{(540 \text{ cal/g})(1000 \text{ g})}{300}$$

$$\frac{5,4 \times 10^5}{300} = (0,49 \text{ cal/s.cm.}^{\circ}\text{C}) (\pi 7,5^2 \text{ cm}^2) \frac{(T_f - 100)}{0,2}$$

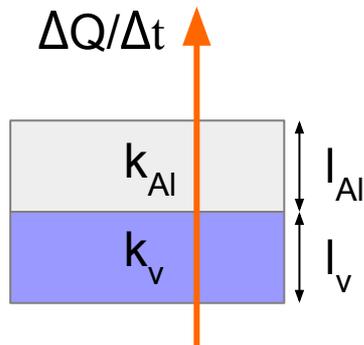
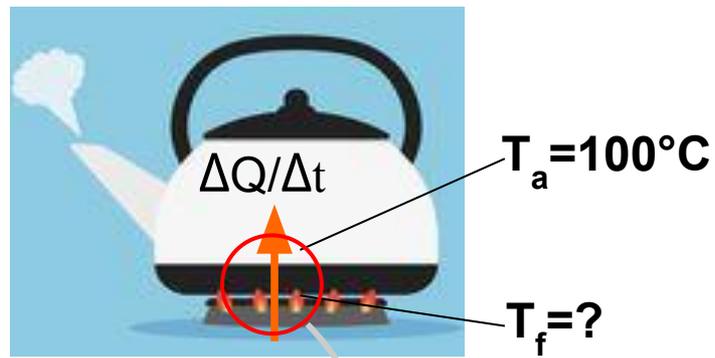
$$T_f \approx 104,2^{\circ}\text{C}$$

Exemplo 3

Uma chaleira de alumínio contendo água em ebulição a 100°C está sobre uma chama. O raio do fundo da chaleira é de $7,5\text{cm}$ e sua espessura é de 2mm . A condutividade térmica do alumínio é $k_{Al}=0,49\text{ cal/s.cm.}^{\circ}\text{C}$. A chaleira vaporiza 1 litro (equivalente a 1kg) de água em 5 min . O calor de vaporização da água a 100°C é de $L_v=540\text{ cal/g}$. Despreze as perdas pelas superfícies laterais e responda:

a) A que temperatura está o fundo da chaleira?

b) Se tiver superfície de vidro com espessura de 2mm entre a chama e a chaleira, quanto tempo levaria para vaporizar a mesma quantidade de água? $k_v=0,0024\text{ cal/s.cm.}^{\circ}\text{C}$



(b)

$$\left| \frac{\Delta Q}{\Delta t} \right| = \frac{A}{\frac{l_v}{\kappa_v} + \frac{l_{Al}}{\kappa_{Al}}} (T_2 - T_1)$$
$$\frac{L_v m}{\Delta t} = \frac{(\pi 7,5^2 \text{ cm}^2)}{\frac{0,02 \text{ cm}}{0,00239 \text{ cal/s.cm.}^{\circ}\text{C}} + \frac{0,02 \text{ cm}}{0,49 \text{ cal/s.cm.}^{\circ}\text{C}}} (4,2\text{C})$$

$$\Delta t \approx 257090\text{s} \approx 71\text{h} !!$$