



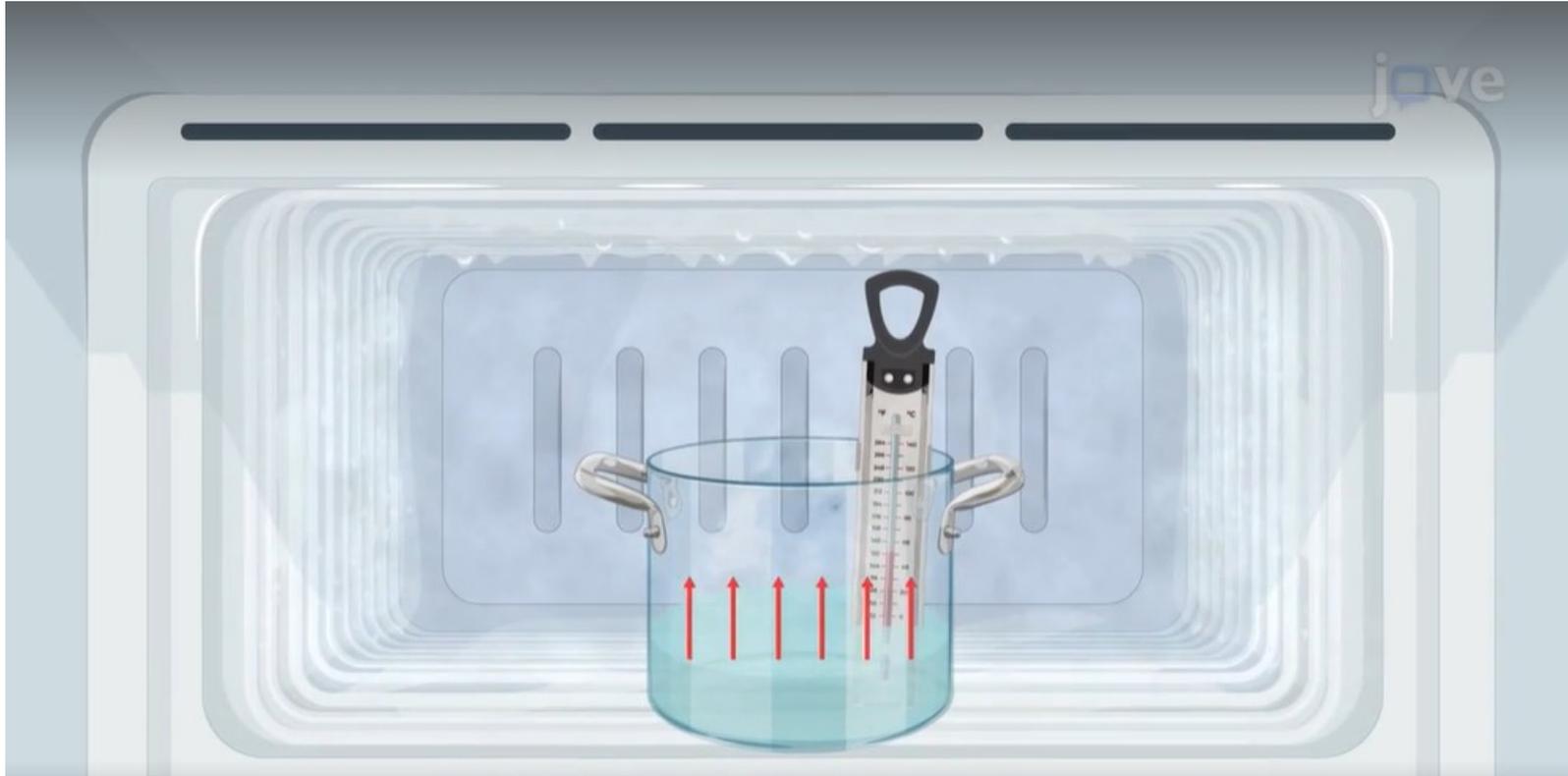
Conceitos fundamentais de transferência de calor

Prof. Alexei Essiptchouk

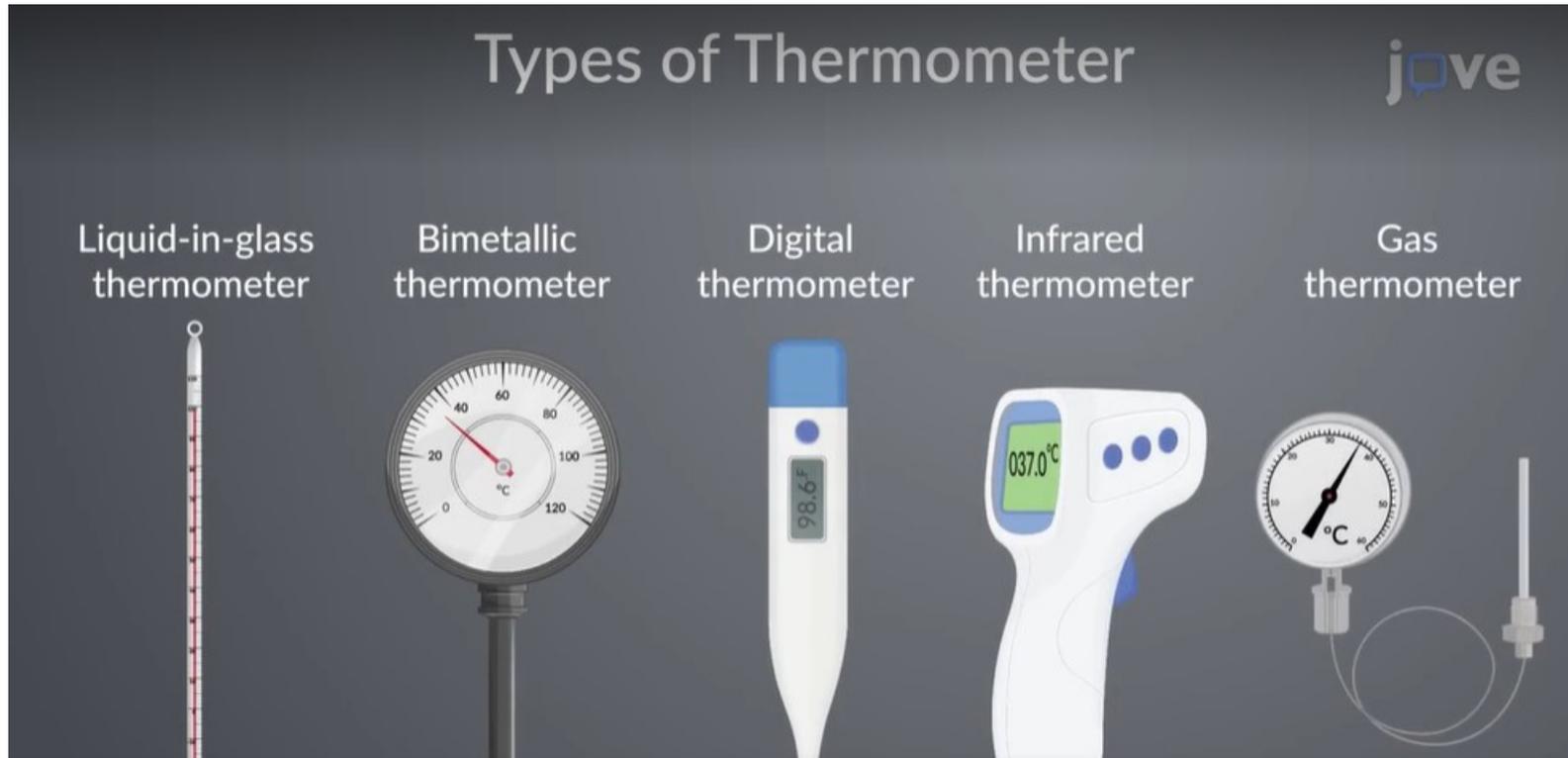
**Dep. Engenharia Ambiental
Instituto de Ciência e Tecnologia
Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"**

Revisão

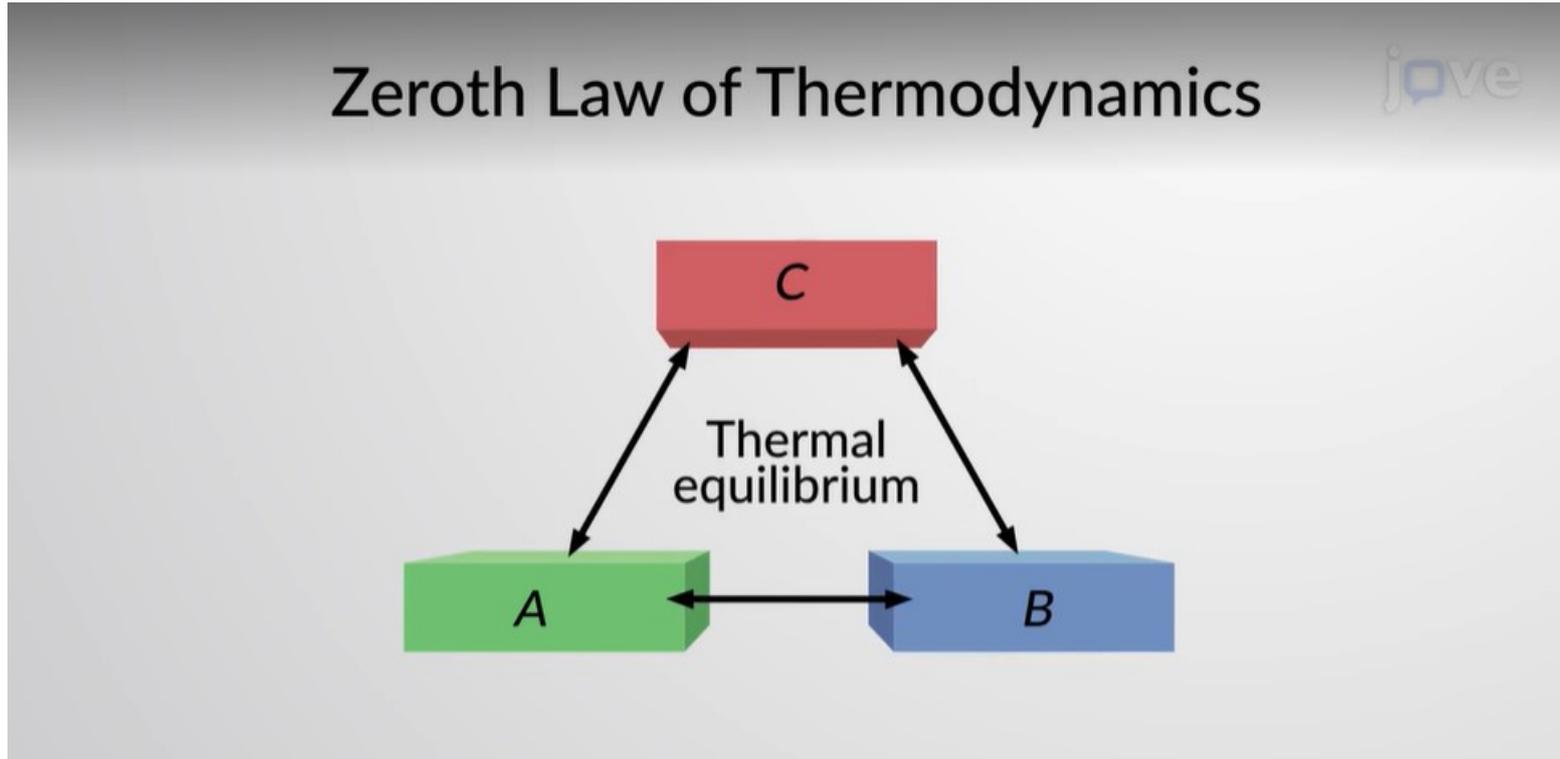
Temperatura e Equilíbrio Térmico



Termômetros e Escalas de Temperatura



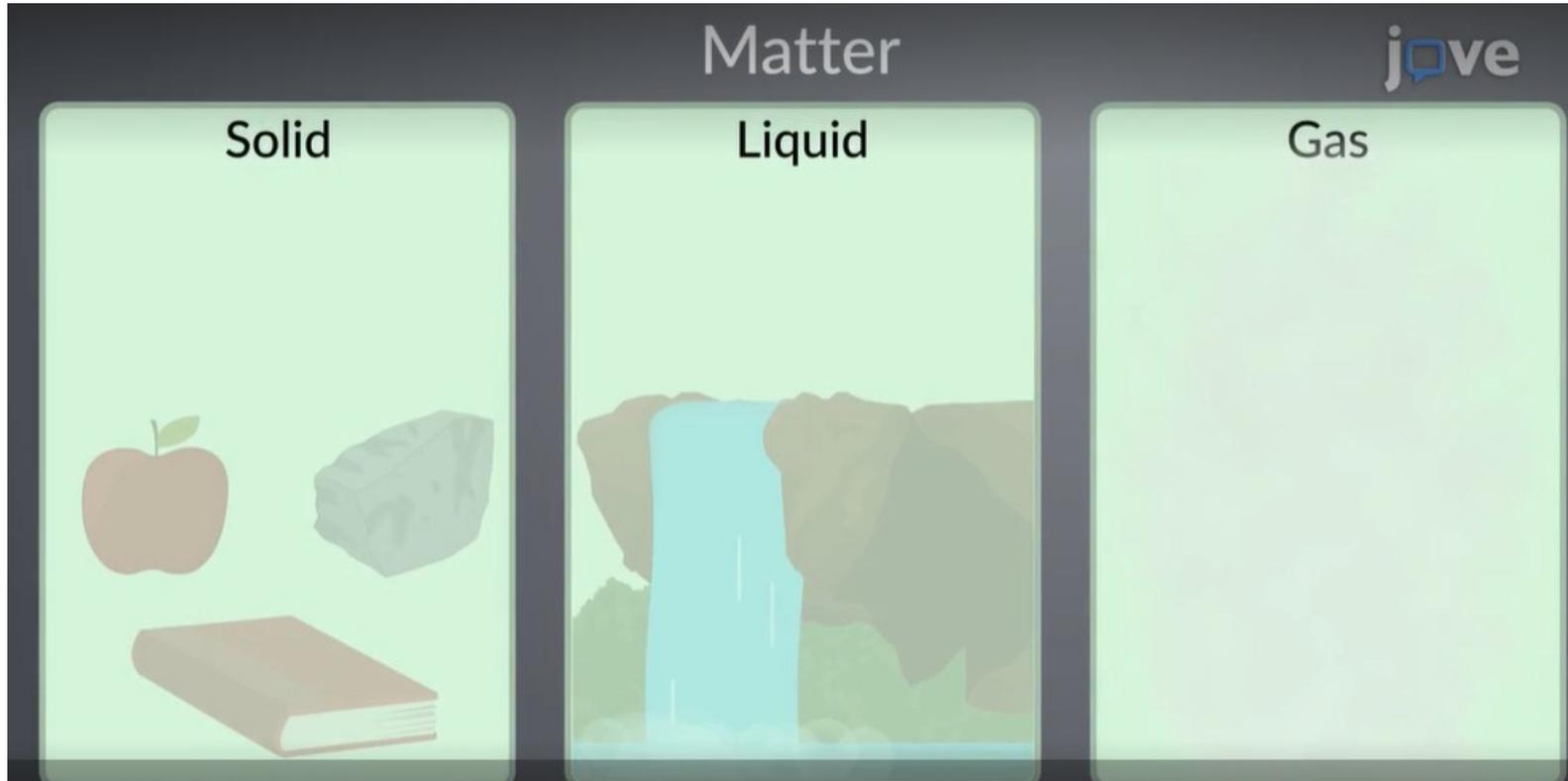
Lei Zero da Termodinâmica



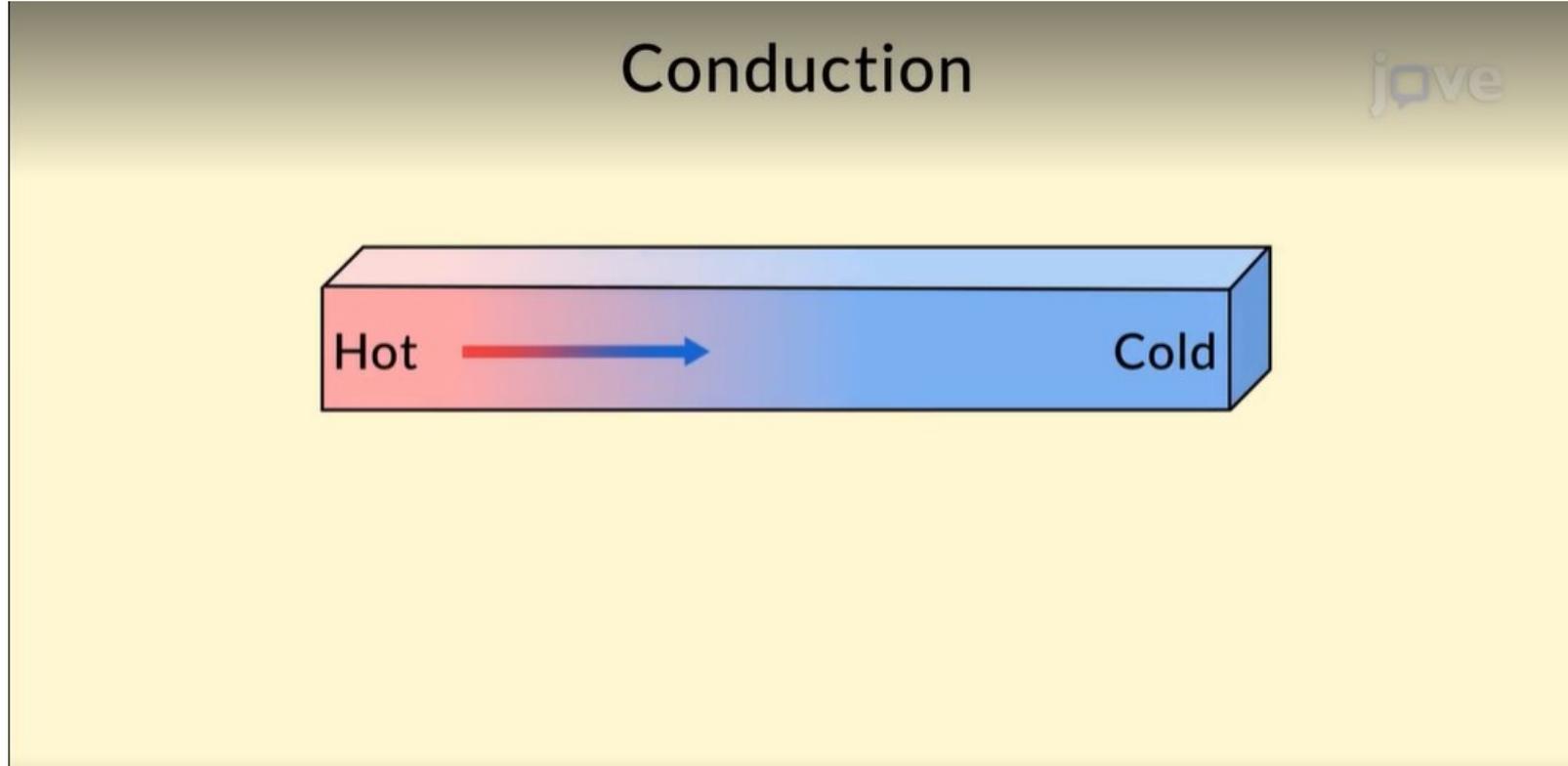
Fluxo de Calor e Calor Específico



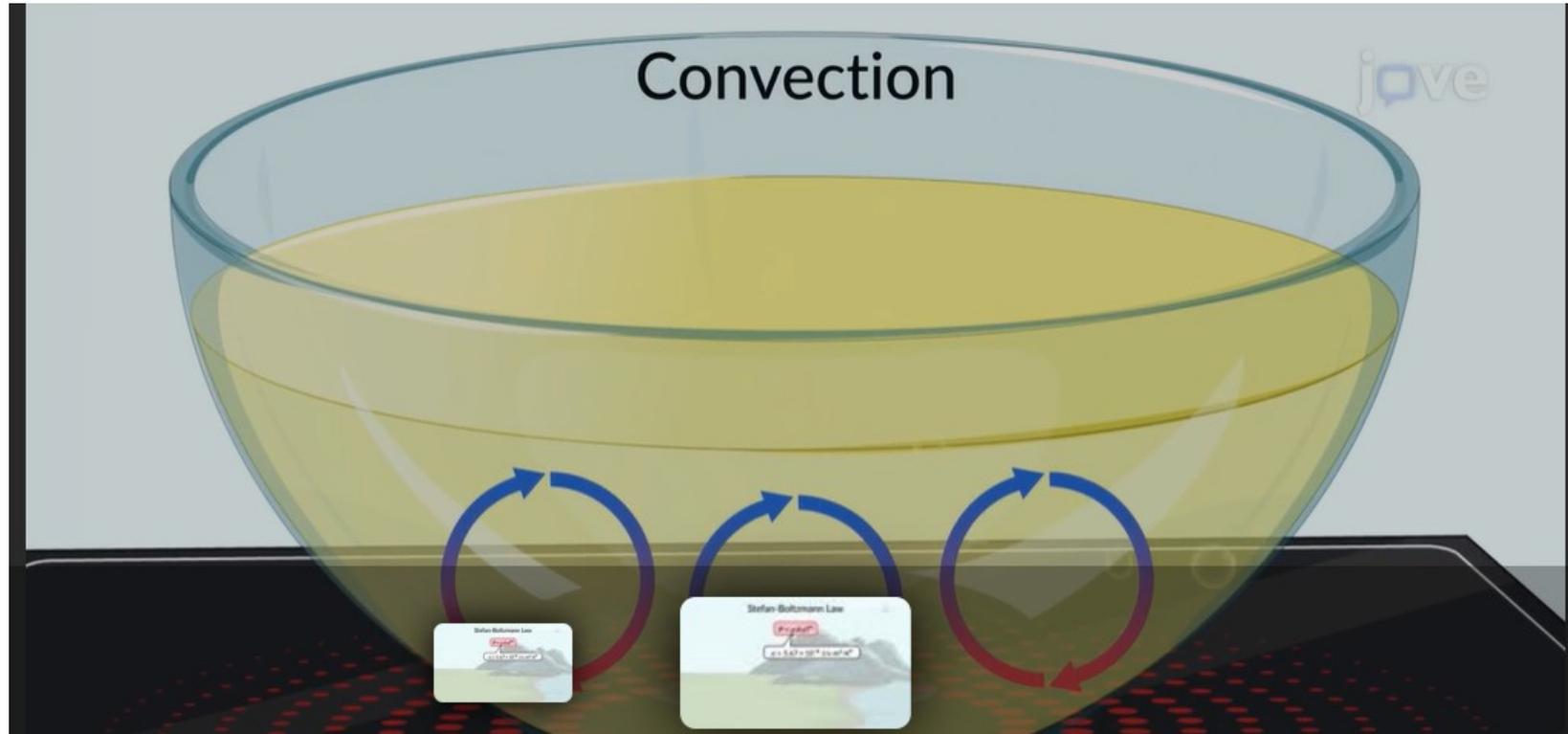
Mudanças de Fases



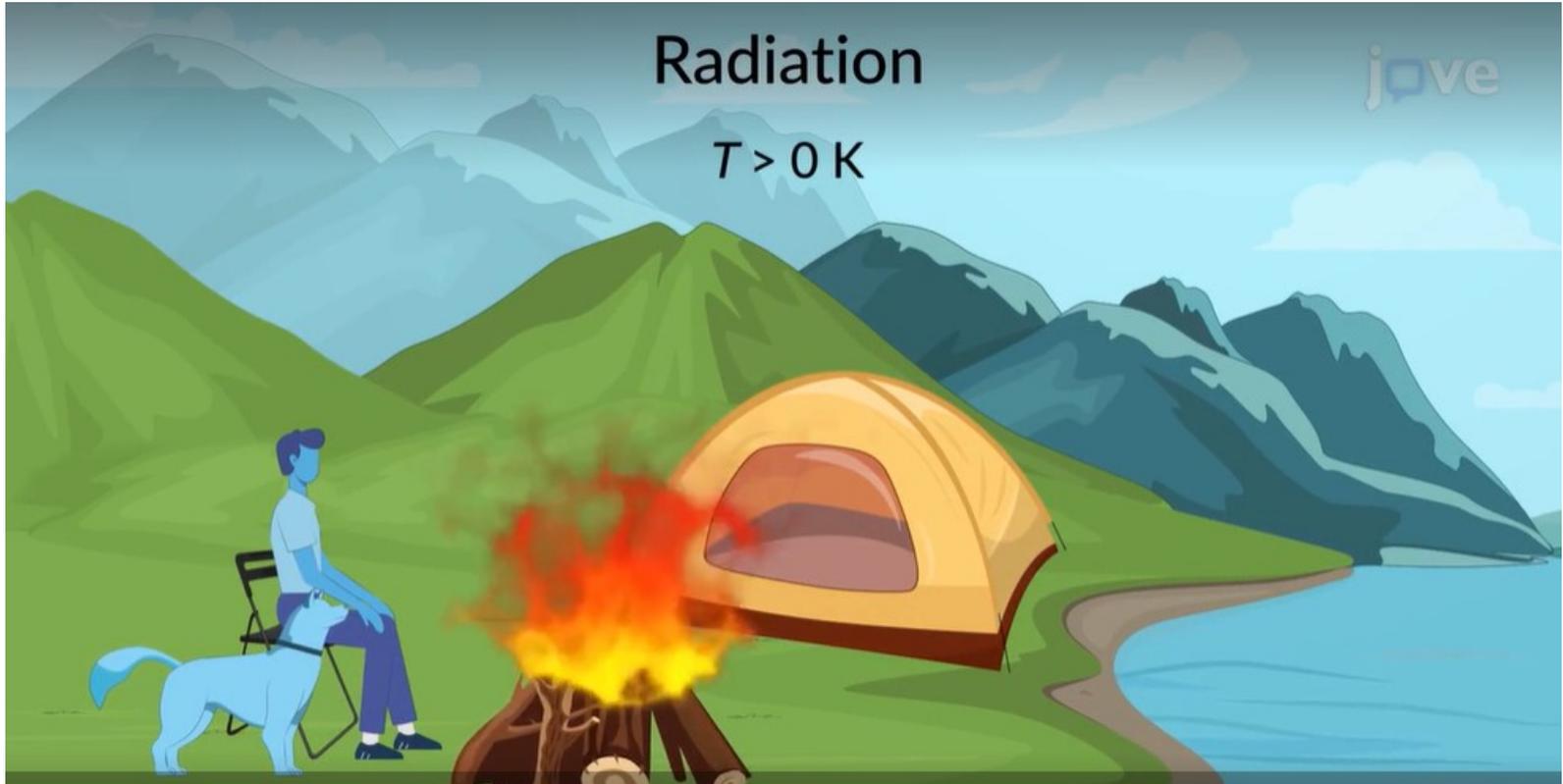
Condução



Convecção e radiação

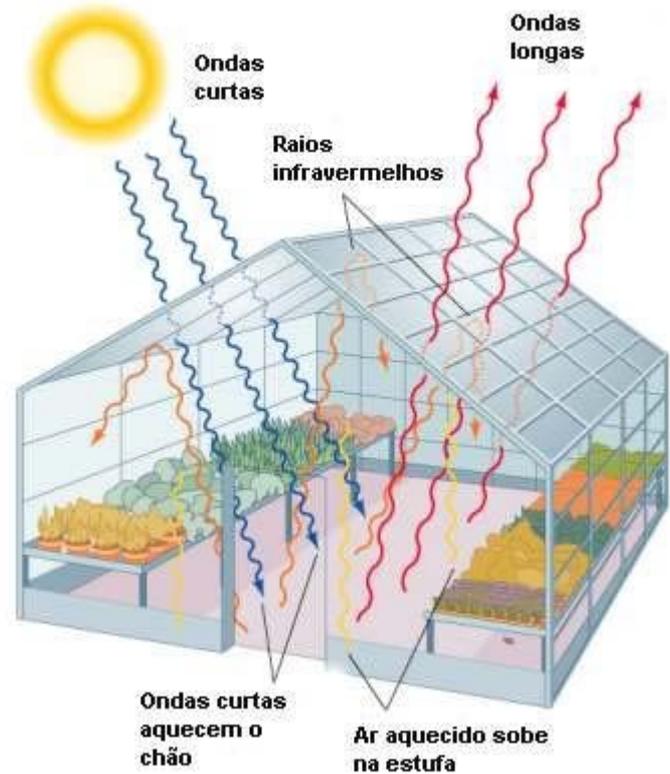


Radiação: aplicação



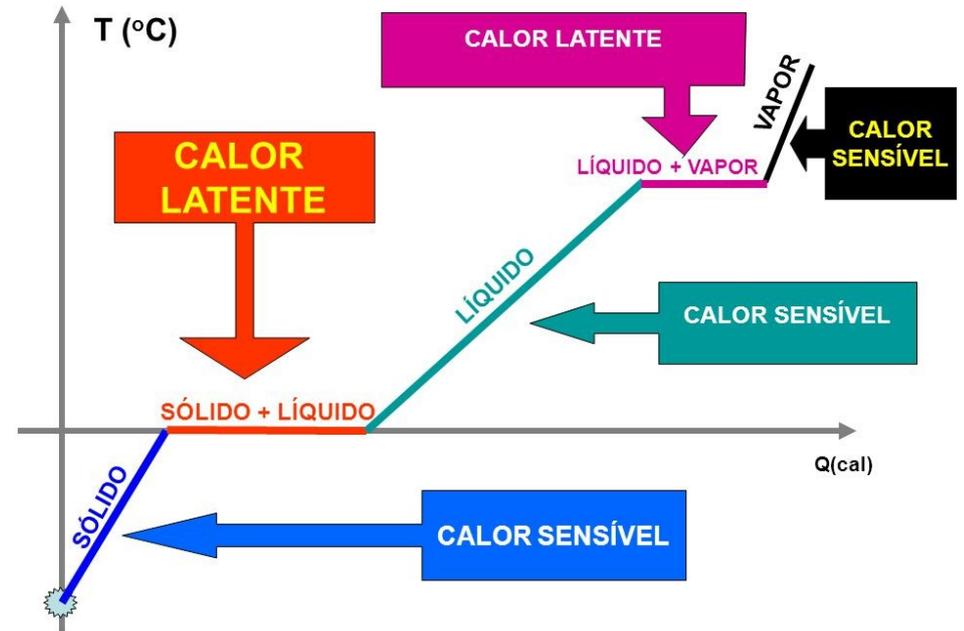
Definições

- **Energia total** constituída de energia térmica, mecânica (cinética e potencial), elétrica, magnética, química, nuclear;
- **Energia interna** (energia microscópica) relacionada com a estrutura molecular de um sistema e com o grau de atividade molecular;
- Unidade de energia:
 - **Joule** (SI);
 - **BTU** (*British thermal unit*): $1 \text{ BTU} = 1055 \text{ J} = 252 \text{ calorias}$;
 - **Caloria**: $1 \text{ cal} = 4.1868 \text{ J}$ – energia necessária para aumentar a temperatura em 1°C de 1 grama de água



Definições

- **Energia sensível** (calor sensível): a parte da energia interna associada com a energia cinética das moléculas (velocidade média das moléculas é proporcional à temperatura).
- **Energia latente** (calor latente): a energia interna associada com a fase de um sistema



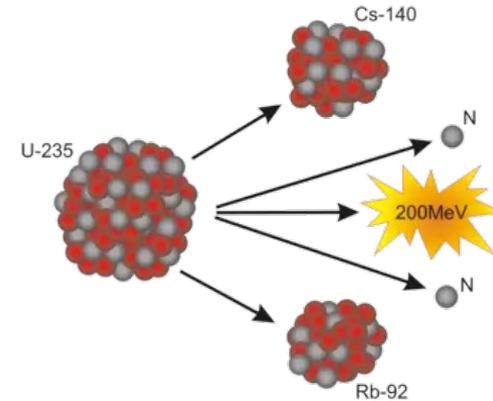
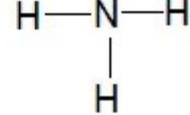
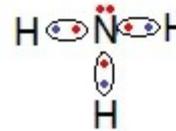
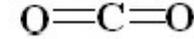
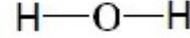
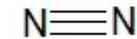
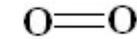
Definições

- **Energia química** (energia de ligação) associada às ligações dos átomos em uma molécula
- **Energia nuclear** - associada às ligações dentro do núcleo de um átomo
- **Entalpia** – representa a soma da energia interna u e a energia do fluido pV .
- **Calor específico** - energia necessária para aumentar a temperatura em 1 grau de uma unidade de massa de uma substancia

Fórmulas eletrônicas:



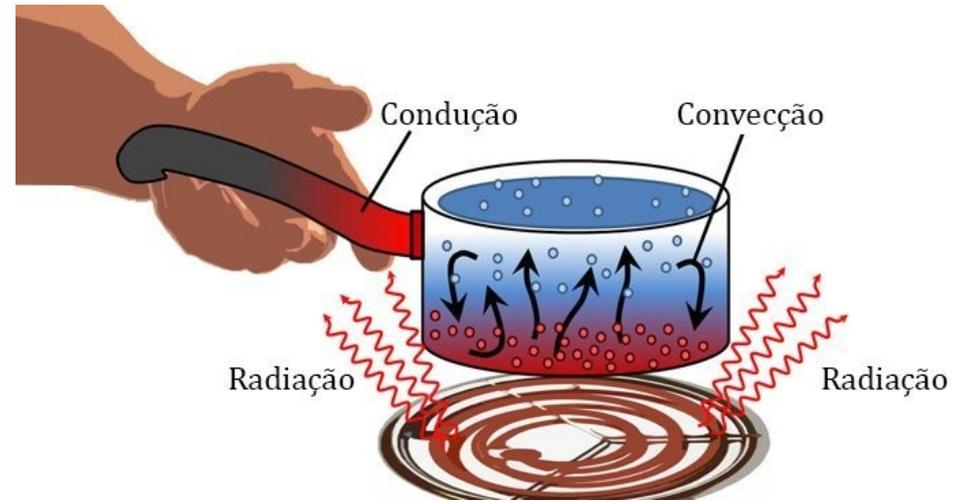
Fórmulas estruturais planas:



Definições

Transferência de calor é energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperatura no espaço

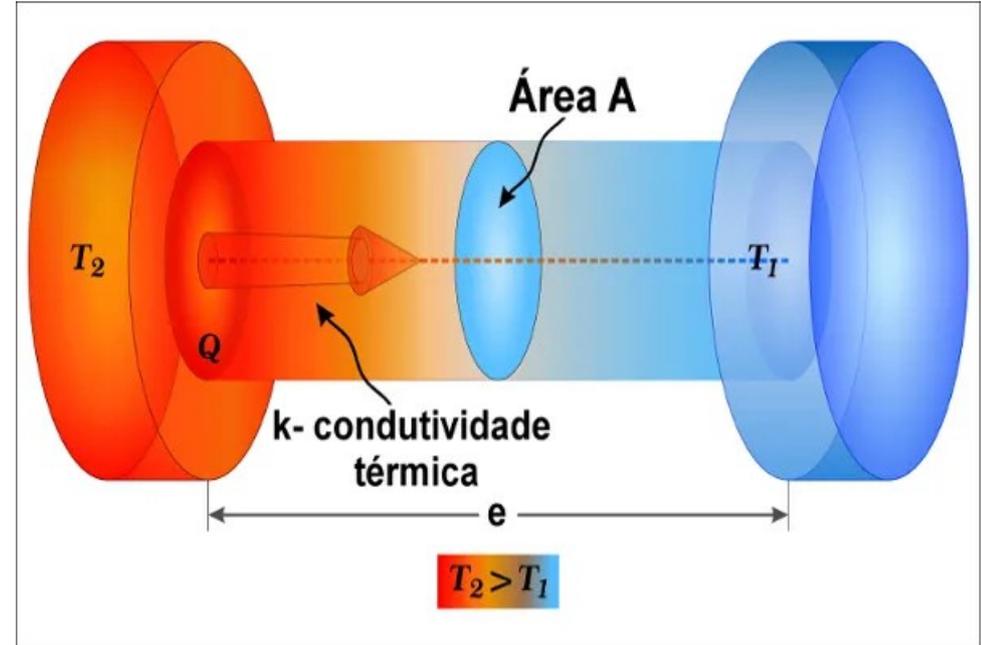
Transferência de calor é a área de ciência que estuda os **mecanismos de transporte de calor** e a determinação das **distribuições de temperatura e dos fluxos** (taxas de transferência) **de calor**



Definições

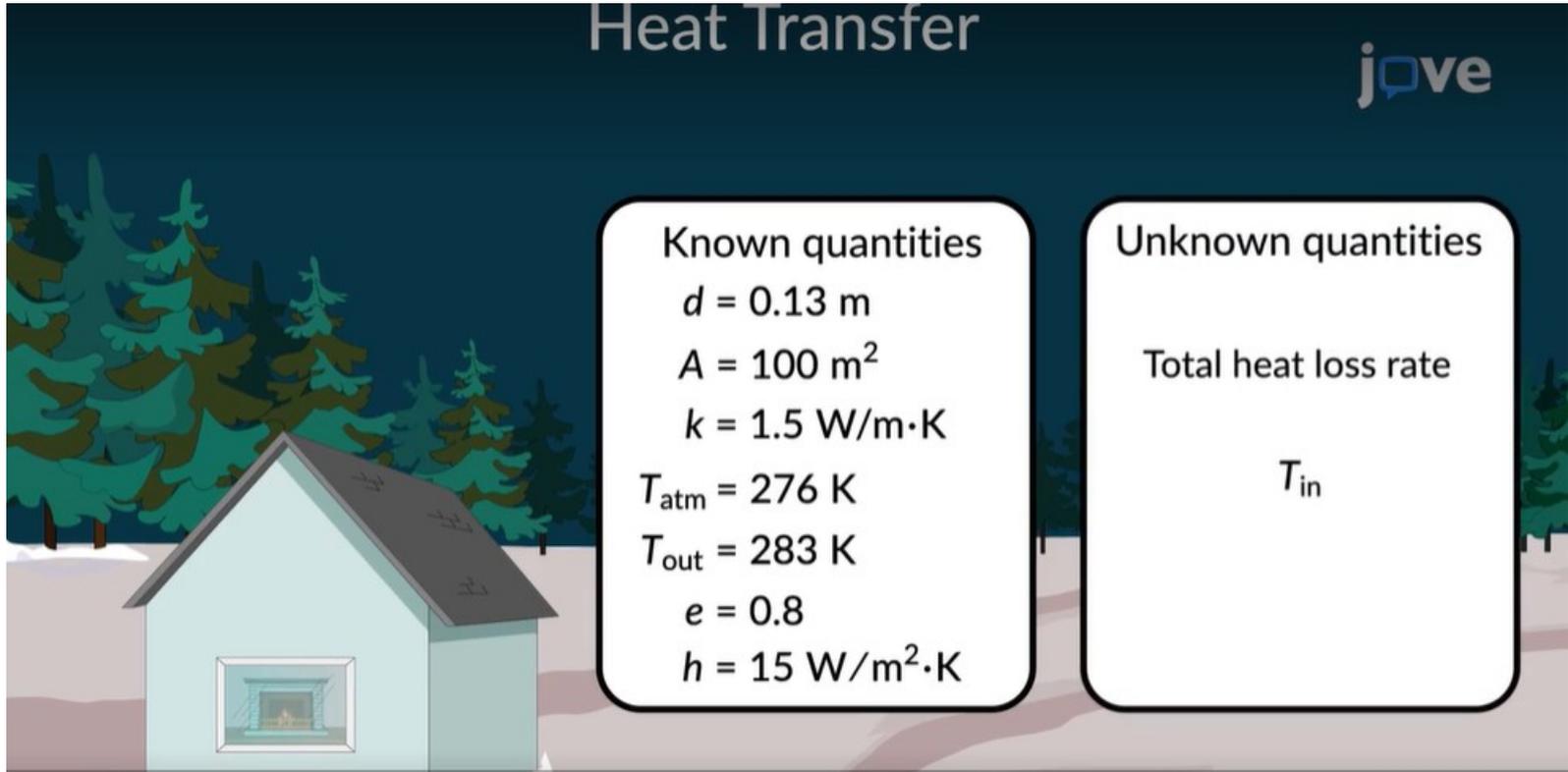
Fluxo de calor (taxa de transferência de calor) é uma quantidade de calor que é transferida através de uma superfície por unidade de tempo $[J/s] = [W]$

Densidade de fluxo de calor é a quantidade de calor que é transferida por unidade de tempo e por unidade de área $[J/s/m^2] = [W/m^2]$



Resolução de problemas

Heat Transfer jove



Known quantities

- $d = 0.13 \text{ m}$
- $A = 100 \text{ m}^2$
- $k = 1.5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
- $T_{\text{atm}} = 276 \text{ K}$
- $T_{\text{out}} = 283 \text{ K}$
- $e = 0.8$
- $h = 15 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

Unknown quantities

- Total heat loss rate
- T_{in}

Exemplo

Considere uma casa que tem um piso com uma área de 600 m^2 e uma altura média de 2.75 m , situada a 1500 m de altitude, onde a pressão atmosférica é 82.7 kPa . Inicialmente a casa está a uma temperatura uniforme de $10 \text{ }^\circ\text{C}$. Então, liga-se o aquecedor elétrico até o ar no interior da casa atingir a temperatura de $20 \text{ }^\circ\text{C}$.



Determine a quantidade de energia transferida para o ar admitindo que

- (a) a casa é bem vedada e o ar do interior não escapa para o exterior durante o processo de aquecimento e
- (b) alguma quantidade de ar escapa através de fendas quando o ar aquecido no interior da casa expande à pressão constante.

Determine também o custo do aquecimento para cada caso, sabendo-se que o custo da eletricidade na região é de $0,75 \text{ R\$/kWh}$.

Solução

Propriedades do ar a **1 atm** de pressão

Temp. $T, ^\circ\text{C}$	Densidade $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico $c_p, \text{J/kg} \cdot \text{K}$	Condutividade térmica $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividade térmica $\alpha, \text{m}^2/\text{s}^2$	Viscosidade dinâmica $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidade cinemática $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandtl Pr
-150	2,866	983	0,01171	$4,158 \times 10^{-6}$	$8,636 \times 10^{-6}$	$3,013 \times 10^{-6}$	0,7246
-100	2,038	966	0,01582	$8,036 \times 10^{-6}$	$1,189 \times 10^{-6}$	$5,837 \times 10^{-6}$	0,7263
-50	1,582	999	0,01979	$1,252 \times 10^{-5}$	$1,474 \times 10^{-5}$	$9,319 \times 10^{-6}$	0,7440
-40	1,514	1002	0,02057	$1,356 \times 10^{-5}$	$1,527 \times 10^{-5}$	$1,008 \times 10^{-5}$	0,7436
-30	1,451	1004	0,02134	$1,465 \times 10^{-5}$	$1,579 \times 10^{-5}$	$1,087 \times 10^{-5}$	0,7425
-20	1,394	1005	0,02211	$1,578 \times 10^{-5}$	$1,630 \times 10^{-5}$	$1,169 \times 10^{-5}$	0,7408
-10	1,341	1006	0,02288	$1,696 \times 10^{-5}$	$1,680 \times 10^{-5}$	$1,252 \times 10^{-5}$	0,7387
0	1,292	1006	0,02364	$1,818 \times 10^{-5}$	$1,729 \times 10^{-5}$	$1,338 \times 10^{-5}$	0,7362
5	1,269	1006	0,02401	$1,880 \times 10^{-5}$	$1,754 \times 10^{-5}$	$1,382 \times 10^{-5}$	0,7350
10	1,246	1006	0,02439	$1,944 \times 10^{-5}$	$1,778 \times 10^{-5}$	$1,426 \times 10^{-5}$	0,7336
15	1,225	1007	0,02476	$2,009 \times 10^{-5}$	$1,802 \times 10^{-5}$	$1,470 \times 10^{-5}$	0,7323
20	1,204	1007	0,02514	$2,074 \times 10^{-5}$	$1,825 \times 10^{-5}$	$1,516 \times 10^{-5}$	0,7309
25	1,184	1007	0,02551	$2,141 \times 10^{-5}$	$1,849 \times 10^{-5}$	$1,562 \times 10^{-5}$	0,7296
30	1,164	1007	0,02588	$2,208 \times 10^{-5}$	$1,872 \times 10^{-5}$	$1,608 \times 10^{-5}$	0,7282
35	1,145	1007	0,02625	$2,277 \times 10^{-5}$	$1,895 \times 10^{-5}$	$1,655 \times 10^{-5}$	0,7268
40	1,127	1007	0,02662	$2,346 \times 10^{-5}$	$1,918 \times 10^{-5}$	$1,702 \times 10^{-5}$	0,7255
45	1,109	1007	0,02699	$2,416 \times 10^{-5}$	$1,941 \times 10^{-5}$	$1,750 \times 10^{-5}$	0,7241
50	1,092	1007	0,02735	$2,487 \times 10^{-5}$	$1,963 \times 10^{-5}$	$1,798 \times 10^{-5}$	0,7228
60	1,059	1007	0,02808	$2,632 \times 10^{-5}$	$2,008 \times 10^{-5}$	$1,896 \times 10^{-5}$	0,7202
70	1,028	1007	0,02881	$2,780 \times 10^{-5}$	$2,052 \times 10^{-5}$	$1,995 \times 10^{-5}$	0,7177
80	0,9994	1008	0,02953	$2,931 \times 10^{-5}$	$2,096 \times 10^{-5}$	$2,097 \times 10^{-5}$	0,7154
90	0,9718	1008	0,03024	$3,086 \times 10^{-5}$	$2,139 \times 10^{-5}$	$2,201 \times 10^{-5}$	0,7132
100	0,9458	1009	0,03095	$3,243 \times 10^{-5}$	$2,181 \times 10^{-5}$	$2,306 \times 10^{-5}$	0,7111

Atenção: As propriedades do ar a temperatura média

$$T = \frac{T_1 + T_2}{2}$$

Solução

A quantidade de energia transferida para o ar em regime de um processo a volume constante

$$E_{ent} - E_{sai} = \Delta E_{sis} = \Delta U_{ar} = m c_v \Delta T \quad E_{sai} = 0$$

$$m = \frac{pV}{RT} = \frac{pAH}{RT}$$

Da tabela: $c_p (15C) = 1007 \text{ J/kgK}$; $c_v = c_p - R = 720 \text{ J/kgK}$

$$R = R_0/\mu = 8,314 / 0.029 = 287 \text{ J/kgK}$$

Solução

$$\begin{aligned} A &:= 600 \text{ m}^2 & h &:= 2.75 \text{ m} & p &:= 82.7 \text{ kPa} \\ t_0 &:= 10 \text{ }^\circ\text{C} & t_1 &:= 20 \text{ }^\circ\text{C} & \Delta t &:= t_1 - t_0 = 10 \text{ K} \\ R &:= 287 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} & c_p &:= 1007 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} & c_v &:= c_p - R = 720 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \\ T &:= \frac{t_0 + t_1}{2} = 288.15 \text{ K} & m &:= \frac{p \cdot A \cdot h}{R \cdot T} = 1650.019 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$E_a := m \cdot c_v \cdot \Delta t = 1.188 \cdot 10^7 \text{ J}$$

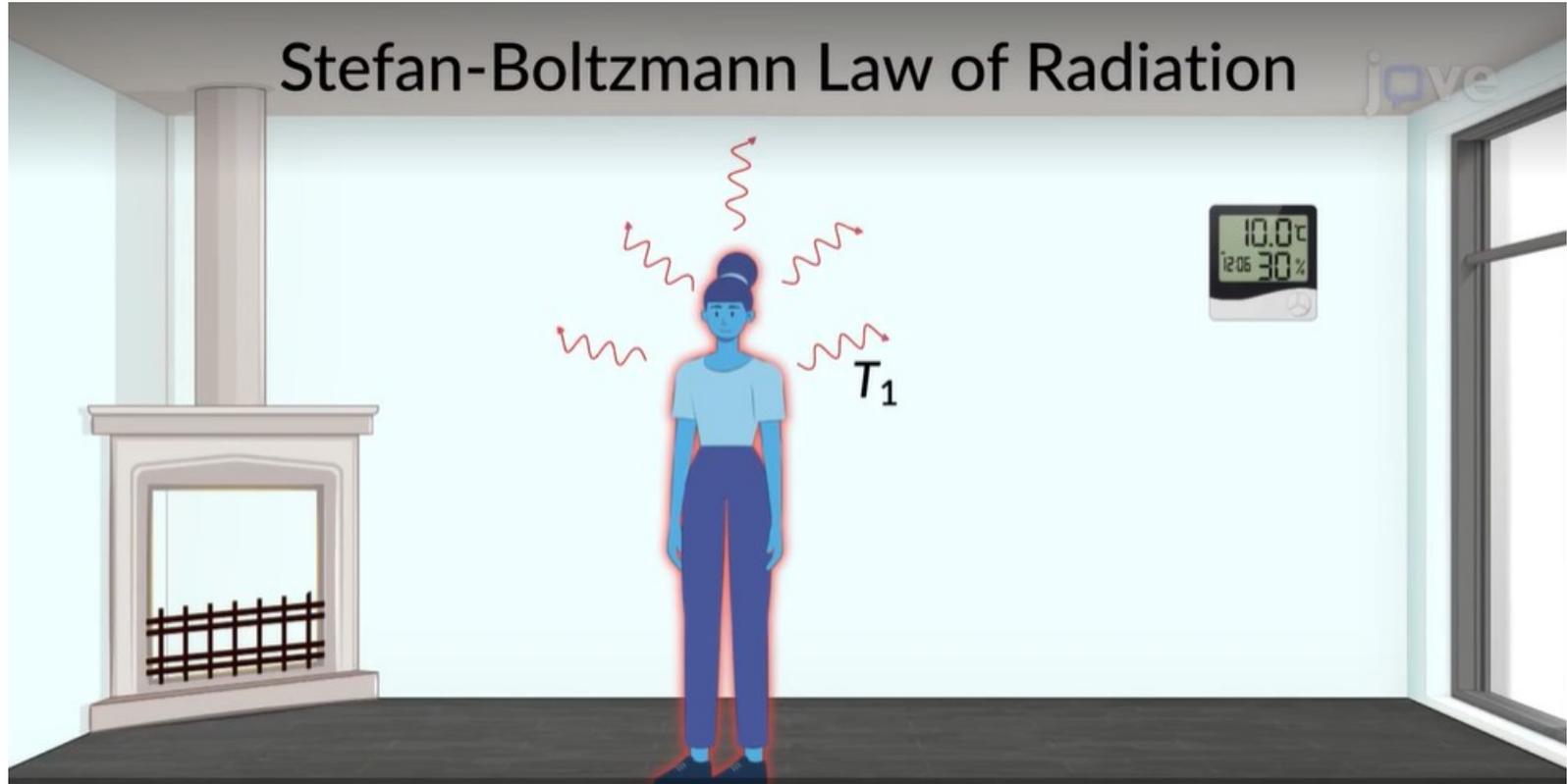
$$E_{a_kWh} := \frac{E_a}{3.6 \cdot 10^6 \text{ J}} = 3.3 \quad \text{Custo} := 0.75 \cdot E_{a_kWh} = 2.475$$

$$E_b := m \cdot c_p \cdot \Delta t = 1.662 \cdot 10^7 \text{ J}$$

$$E_{b_kWh} := \frac{E_b}{3.6 \cdot 10^6 \text{ J}} = 4.6155 \quad \text{Custo} := 0.75 \cdot E_{b_kWh} = 3.4616$$

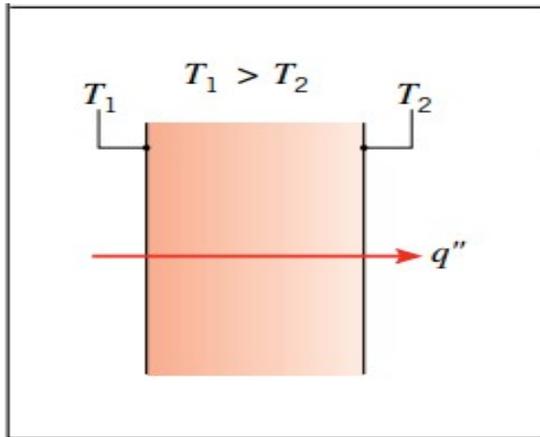


Absorção de radiação

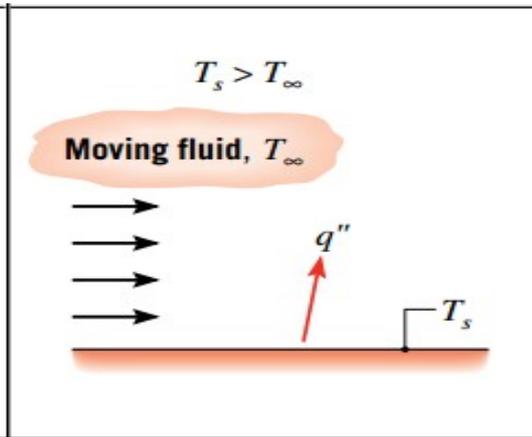


Modos de transferência de calor

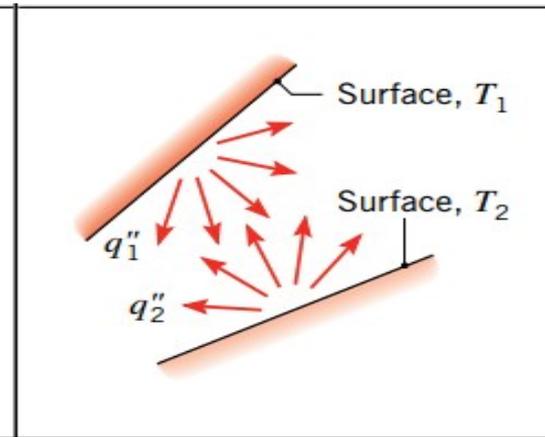
Condução através de um sólido ou de um fluido estacionário



Convecção de uma superfície para um fluido em movimento

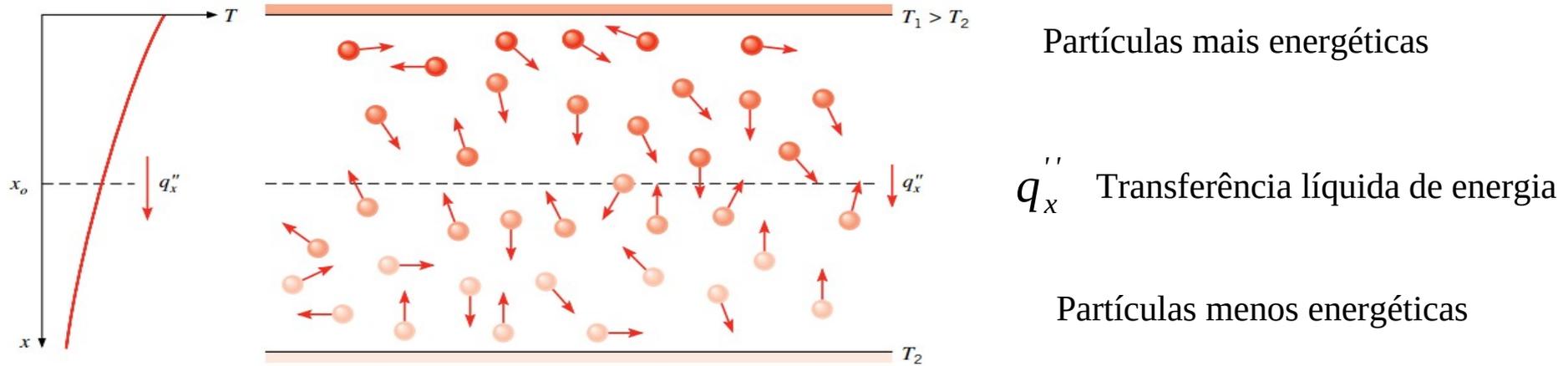


Troca líquida de calor por **radiação** entre duas superfícies



Condução

A condução – é a transferência de energia das partículas mais energéticas para as menos energéticas de uma substância devido às interações entre partículas



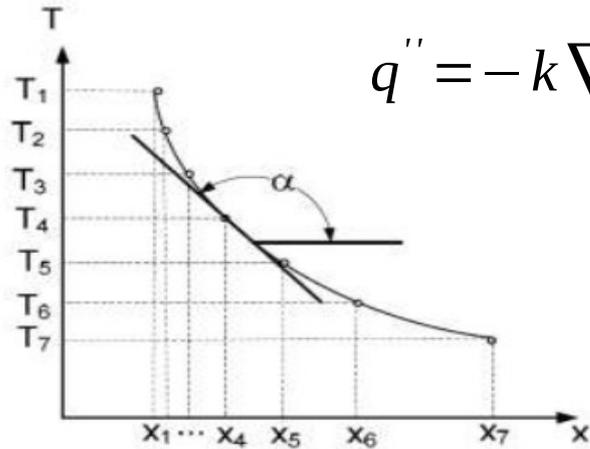
$$E \sim \frac{mu^2}{2} = \frac{3}{2} k_B T$$

Constante de Boltzmann relaciona temperatura e energia de moléculas

$$k_B = \frac{R}{N_A} = \frac{8.314 \text{ J/K mol}}{6.022 \times 10^{23} \text{ 1/mol}} = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

Condução

Transferência de calor por condução: **Lei de Fourier**



$$\mathbf{q}'' = -k \nabla T = -k \left(\frac{\partial T}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \mathbf{k} \right)$$

Caso unidimensional

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx}$$

q_x'' - densidade de fluxo térmico (W/m^2) é a taxa de transferência de calor q_x na direção x por unidade de área perpendicular à direção da transferência

k - condutividade térmica, $\text{W}/(\text{m K})$

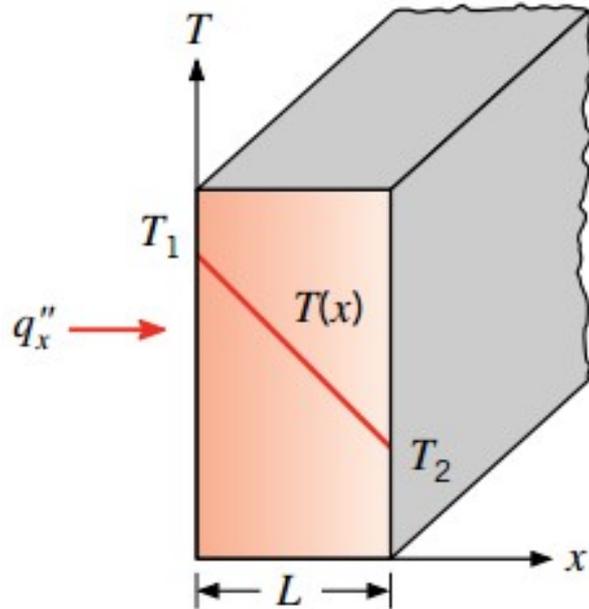
$\frac{dT}{dx}$ - gradiente de temperatura (K/m) na direção x



Jean Baptiste Joseph Fourier
(1768 – 1830)

Condução

Caso estacionário, parede plana



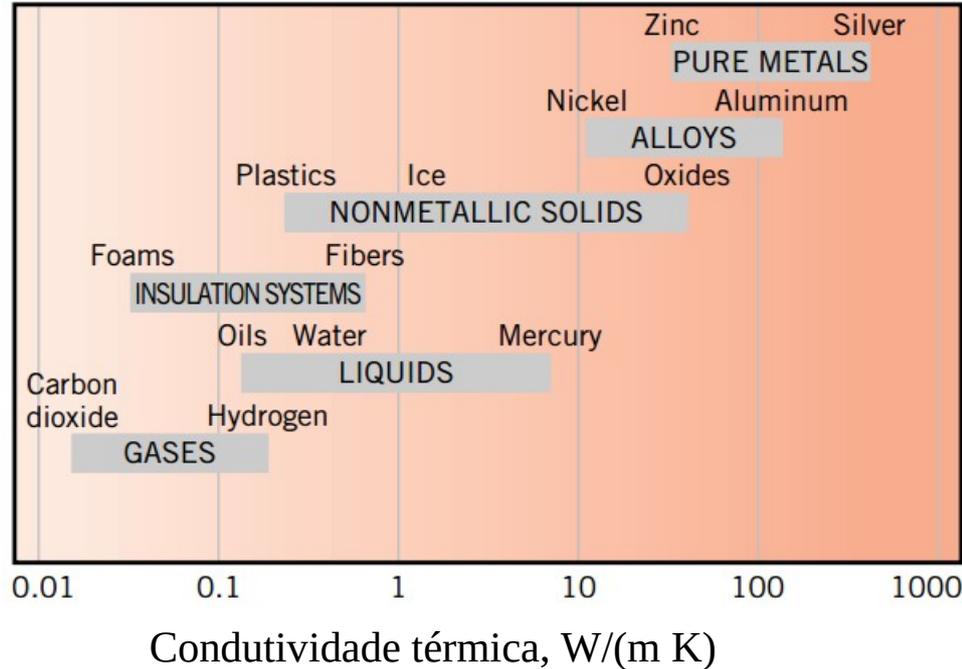
$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L}$$

$$q_x'' = k \frac{T_1 - T_2}{L} = k \frac{\Delta T}{L}$$

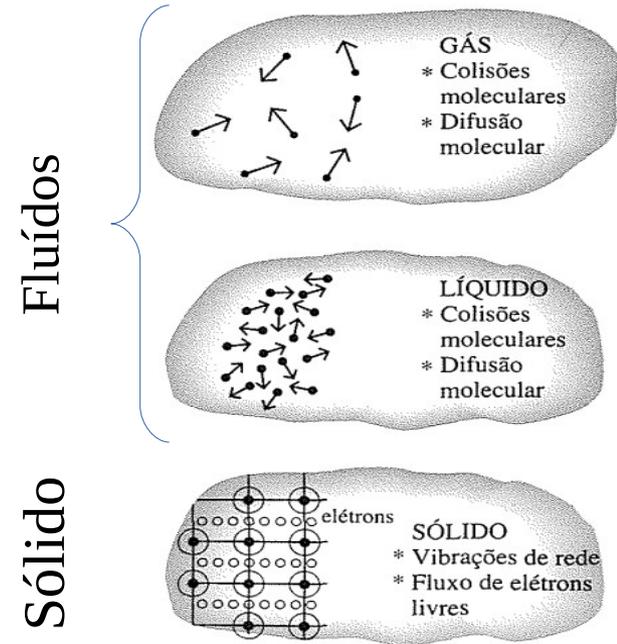
$$q_x = q_x'' A = k A \frac{\Delta T}{L}$$

Condução

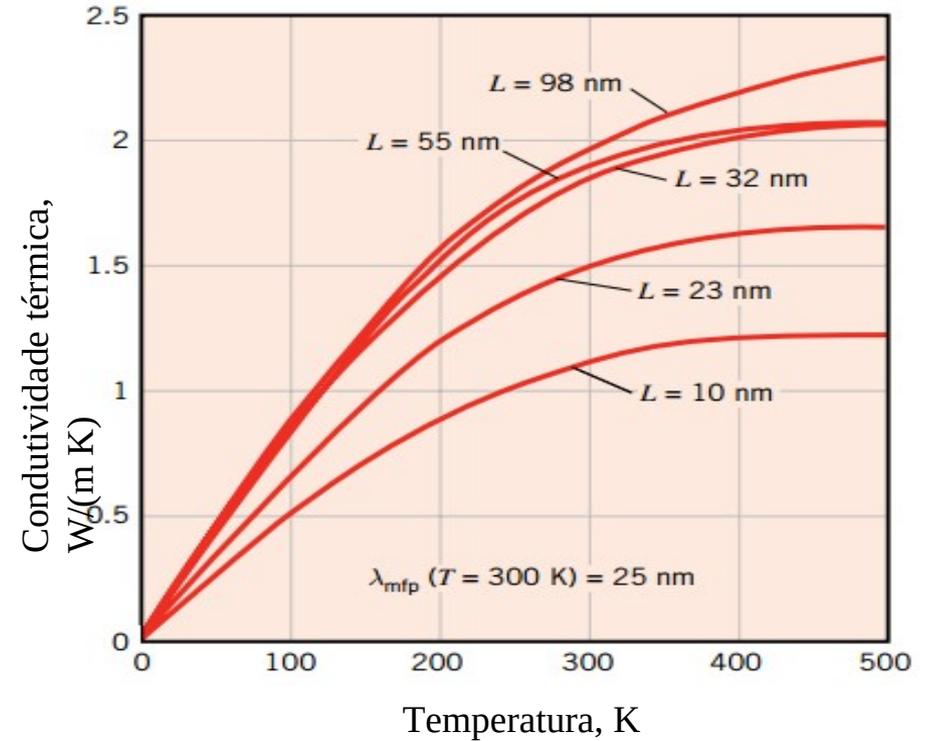
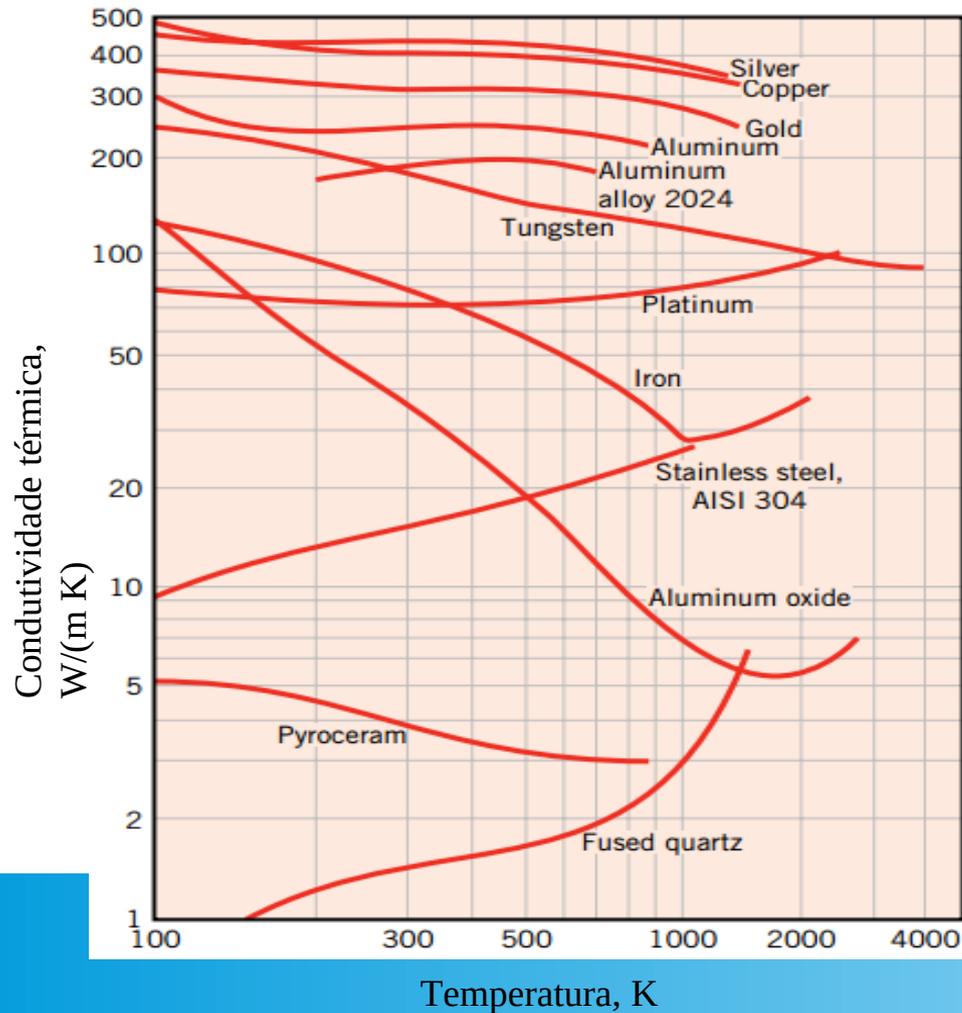
Faixas de condutividades térmicas de vários estados da matéria a temperatura e pressões normais



Mecanismos de condução de calor em diferentes fases de uma substância

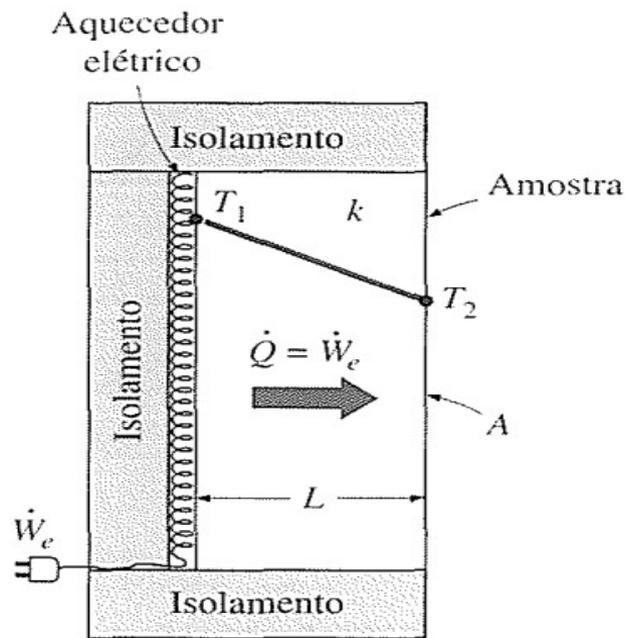


Condutividade térmica: Variação com temperatura



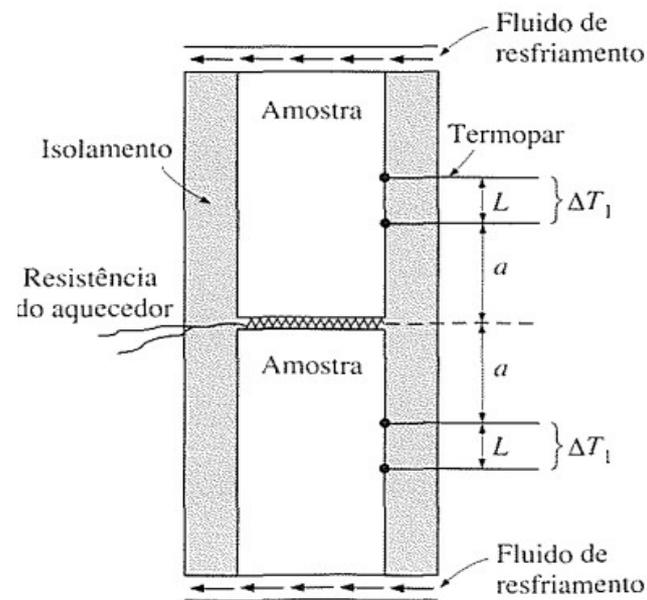
(Zr Y) zircônia estabilizada com ítrio.
Efeito do tamanho médio dos grãos.

Medidas da condutividade térmica



Um arranjo experimental simples

$$k = \frac{QL}{A(T_1 - T_2)}$$

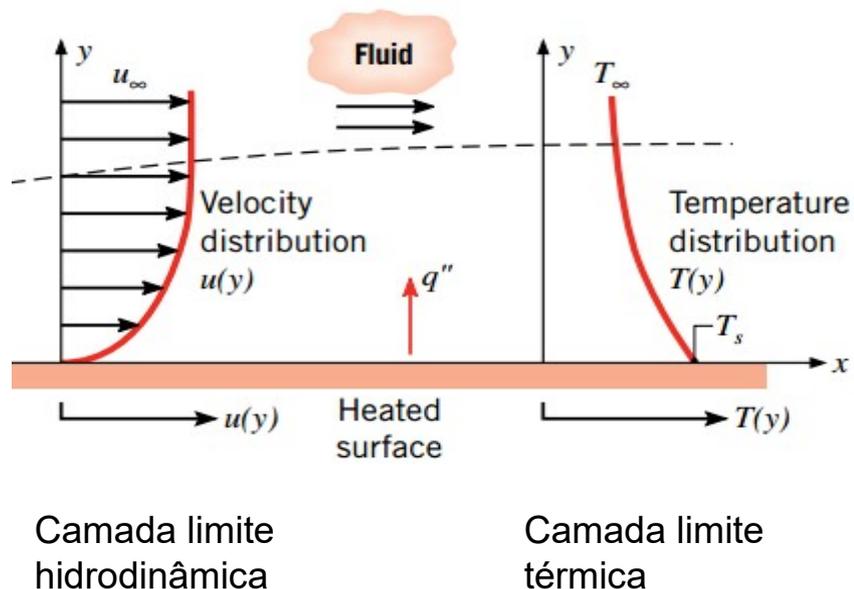


Aparelho para medir a condutividade térmica de um material usando duas amostras idênticas e um aquecedor com uma resistência fina

Para calcular será necessários: a energia térmica dissipada Q , a espessura da amostra L , a área de transferência de calor A e diferença de temperaturas $T_1 - T_2$ nas superfícies interna e externa

Convecção

Convecção = Movimento molecular aleatório (difusão) + Movimento global, macroscópico, do fluido



Transferência de calor ocorre com o contato entre um fluido em movimento e a superfície, estando com as temperaturas diferentes.

Lei de Newton

$$q'' = h(T_s - T_\infty)$$

q'' Densidade de fluxo de calor por convecção (W/m^2)

T_s Temperatura da superfície

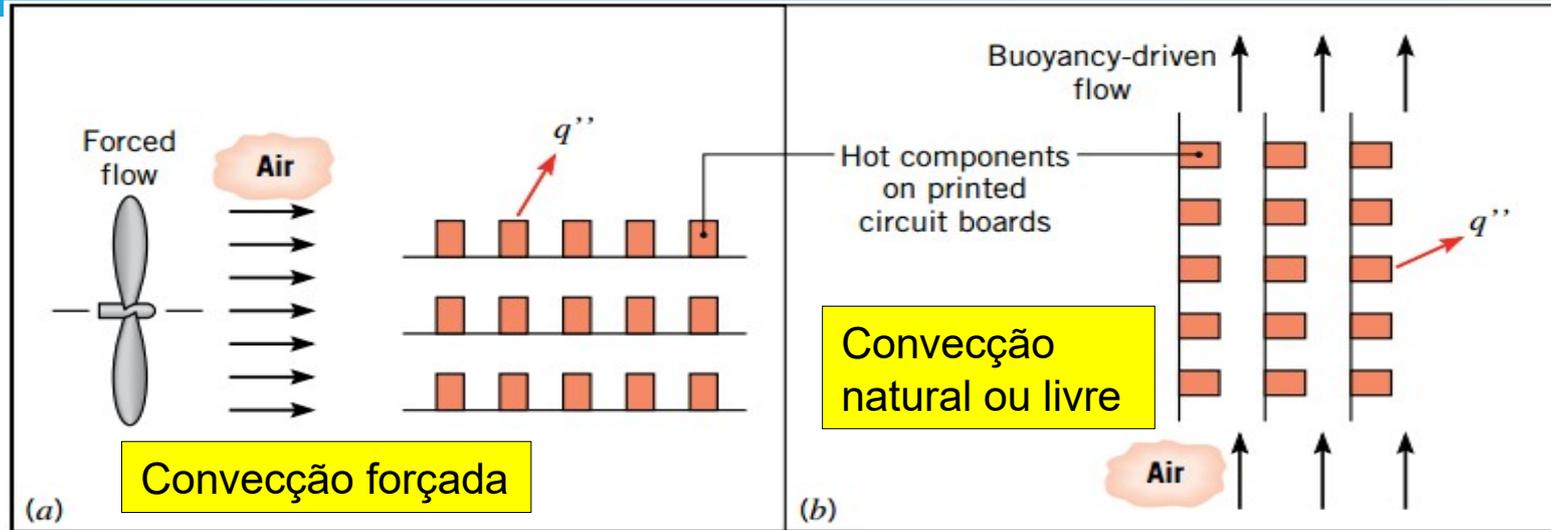
T_∞ Temperatura do fluido

h Coeficiente de transferência de calor por convecção

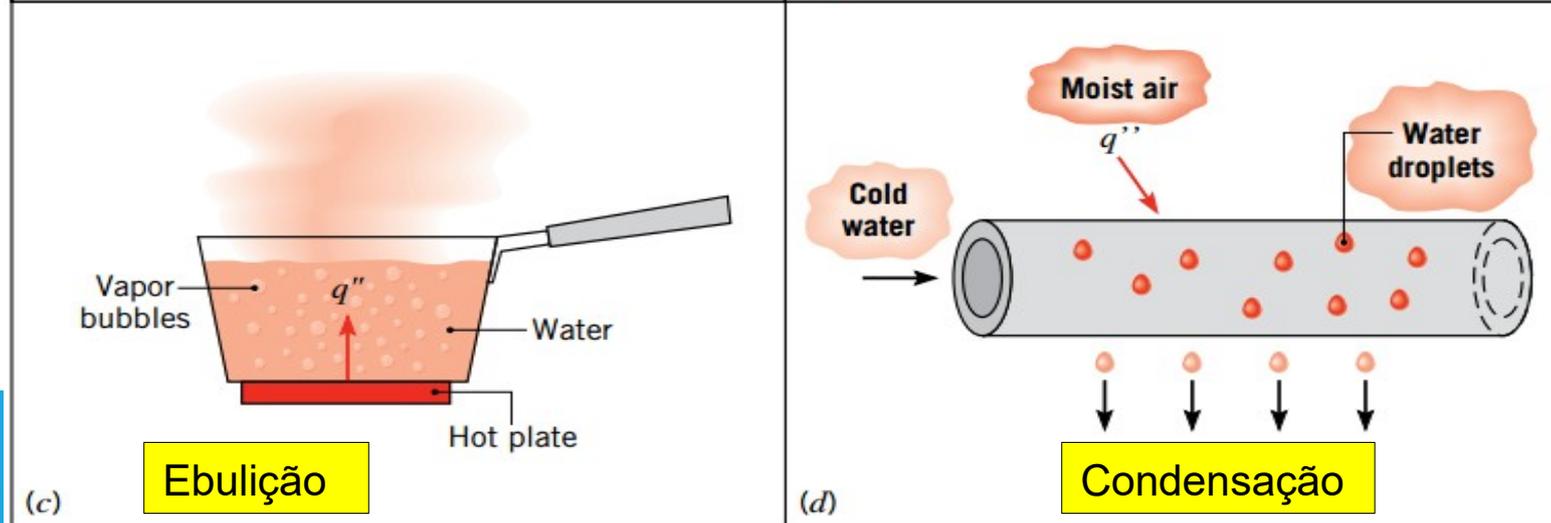
A distribuição da temperatura para caso de placa aquecida, $T_s > T_\infty$.

Tipos/formas diferentes de convecção

Troca de calor por meio da energia **sensível**



Troca de calor por meio da calor **latente**



Convecção

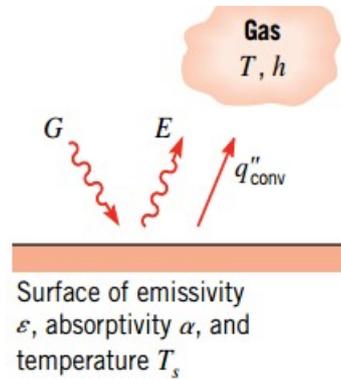
Valores típicos do coeficiente de transferência de calor por convecção

Processo	h , W/m ² K
Convecção livre:	
Gases	2 – 25
Líquidos	50 – 1000
Convecção forçada:	
Gases	25 – 250
Líquidos	100 – 20.000
Convecção com mudança de fases:	
Ebulição ou evaporação	2.500 – 100.000

Radiação

Radiação térmica – é a energia emitida pela matéria que se encontra a uma temperatura diferente de zero Kelvin (0K)

A energia é transportada por ondas eletromagnéticas (fótons), portanto não necessita a presença do meio material.



E – emissão

G – irradiação

G_{abs} – absorção

Lei de Stefan-Boltzmann

Emissor ideal ou corpo negro

$$E_b = \sigma T_s^4$$

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

Para superfícies reais introduzam o coeficiente de emissividade

$$E = \epsilon \sigma T_s^4$$

$$0 \leq \epsilon \leq 1 \quad \text{emissividade}$$

Absorção

Nem toda a energia incidente pode ser absorvida pela superfície

$$G_{\text{abs}} = \alpha G$$

$$0 \leq \alpha \leq 1$$

α - coeficiente de absorção

Radiação

A taxa líquida de transferência de calor por radiação **saindo** da superfície relativamente pequena em comparação com uma superfície isotérmica de tamanho muito maior e que envolve a superfície menor e assumindo $\alpha = \varepsilon$ (superfície cinza)

$$q''_{rad} = \frac{q}{A} = \varepsilon E_b - \alpha G = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{viz}^4)$$

Frequentemente é conveniente linearizar a equação e expressar a troca líquida de calor por radiação na forma similar a do Newton para convecção

$$q_{rad} = h_r A (T_s - T_{viz})$$

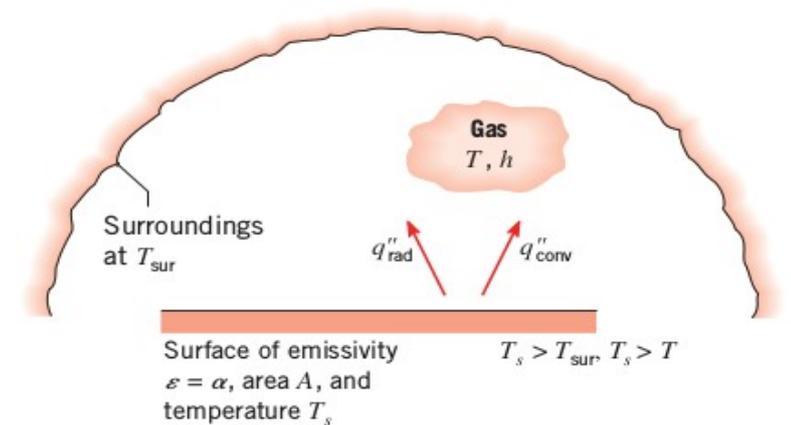
$$h_r \equiv \sigma \varepsilon (T_s + T_{viz})(T_s^2 + T_{viz}^2)$$

h_r é o coeficiente de transferência de calor por radiação

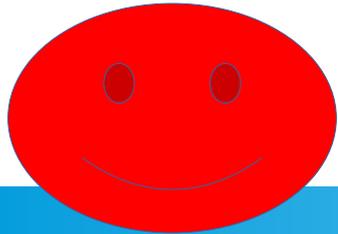
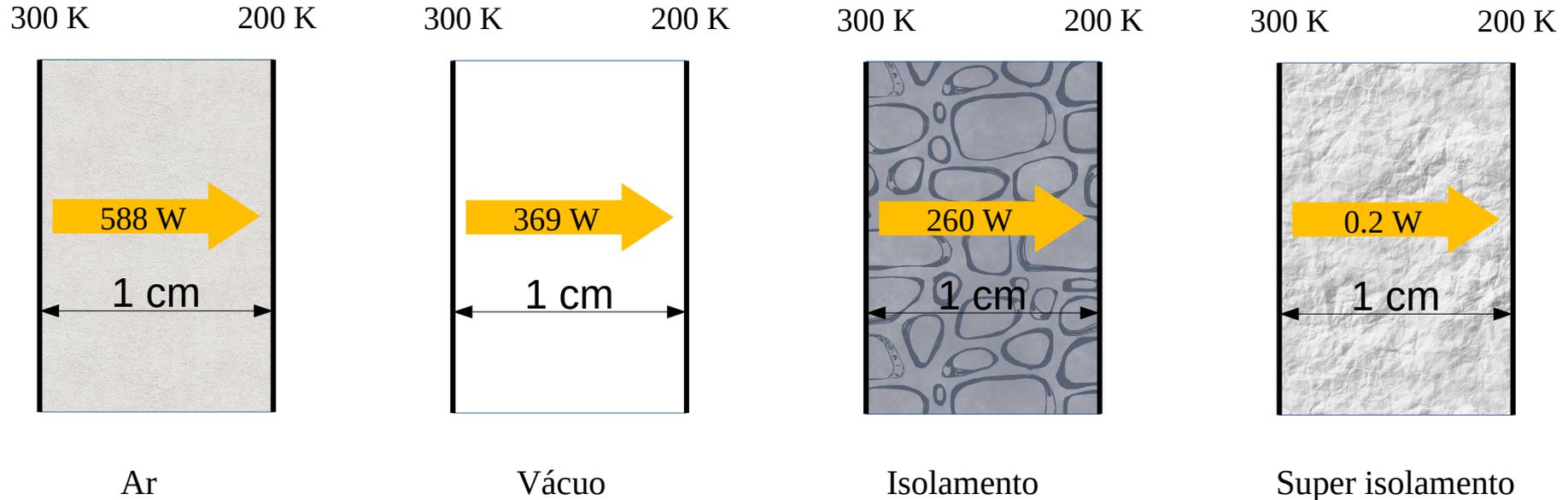
Na presença de transferência de calor por convecção

$$q = q_{conv} + q_{rad} = h A (T_s - T_{viz}) + \sigma \varepsilon A (T_s^4 - T_{viz}^4)$$

$$q = (h + h_r) A (T_s - T_{viz}) = h_{eff} A (T_s - T_{viz})$$



Transferência de calor entre placas isotérmicas



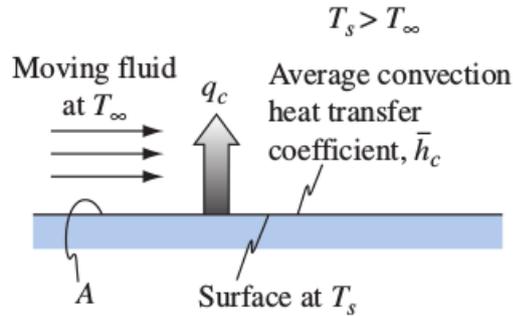
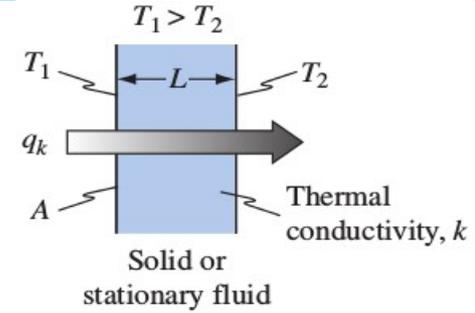
Maneiras de reduzir a transferência de calor

Conceito da resistência térmica

Condução

$$q_{cond} = k A \frac{T_1 - T_2}{L} = \frac{T_1 - T_2}{R_{cond}}$$

$$R_{cond} = \frac{L}{k A}$$



$$q_{conv} = \bar{h}_c A (T_s - T_\infty) = \frac{T_s - T_\infty}{R_{conv}}$$

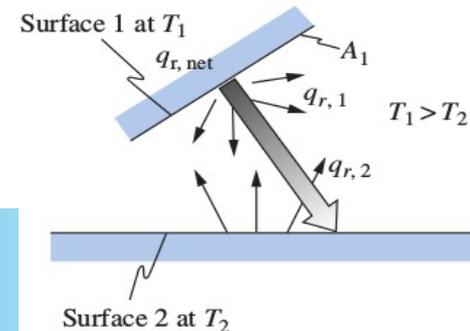
$$R_{conv} = \frac{1}{\bar{h}_c A}$$

Convec  o

Radia  o

$$q_{rad} = h_r A (T_1 - T_2) = \frac{T_1 - T_2}{R_{rad}}$$

$$R_{rad} = \frac{1}{h_r A}$$

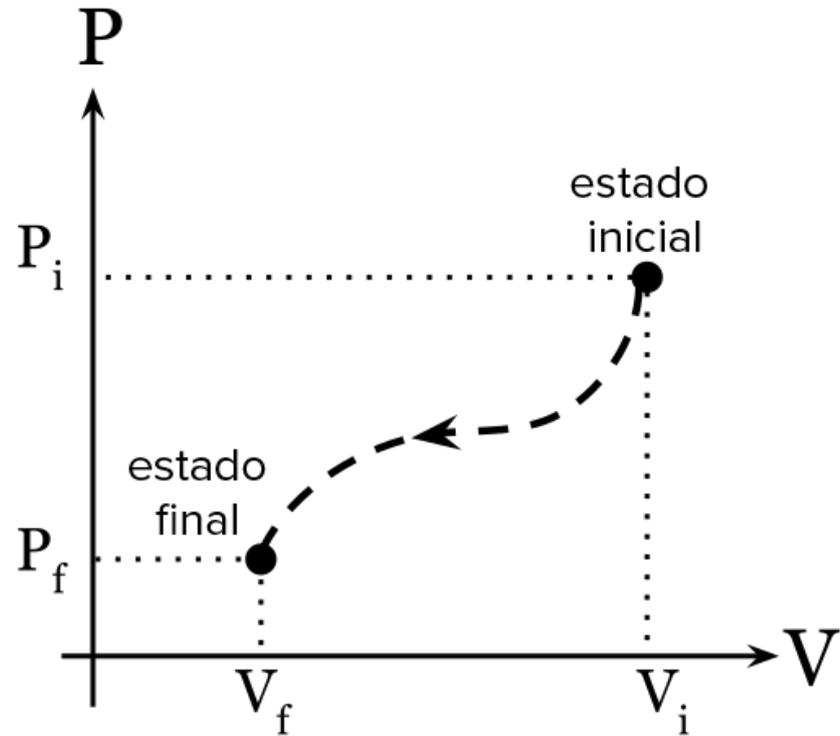


$$q = \frac{\Delta T}{\sum R_i}$$

Relações com a Termodinâmica

Termodinâmica

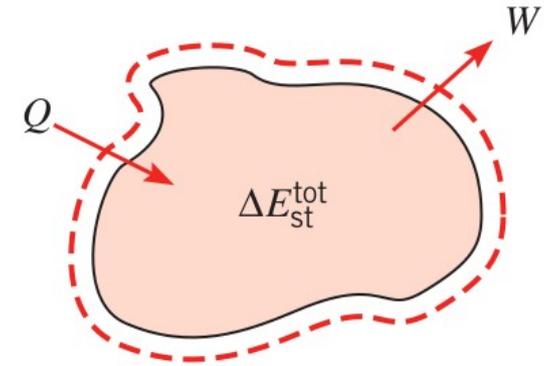
- Determina a quantidade de energia requerida na forma de calor para passar de um estado para outro
- Não trata dos mecanismos que promovem a troca de calor
- Não trata os métodos para determinação da taxa de troca de calor



Primeira lei da Termodinâmica

Conservação da energia

$$\Delta E_{total} = Q - W$$

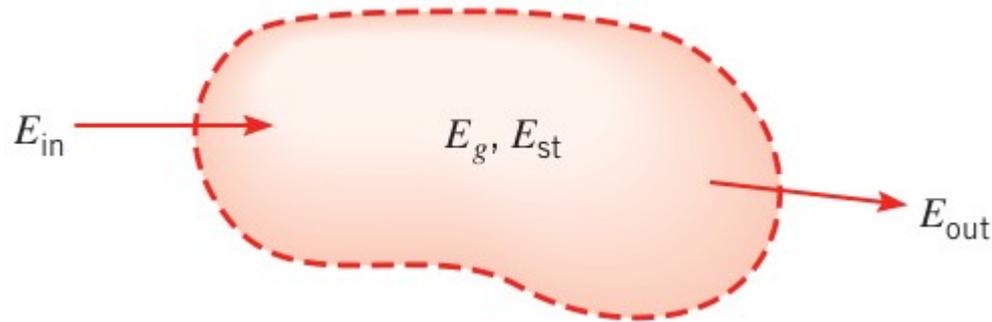


A variação da energia total do sistema ocorre devido ao valor líquido de calor transferido para o sistema e valor líquido do trabalho efetuado pelo sistema.

A energia térmica pode se converter em trabalho e vice-versa

Primeira lei da Termodinâmica (energia)

No intervalo do tempo o *aumento na quantidade da energia acumulada em um volume de controle (VC) deve ser igual à quantidade de energia que entra no VC menos a quantidade de energia que deixa o VC mais a quantidade de energia gerada no VC*

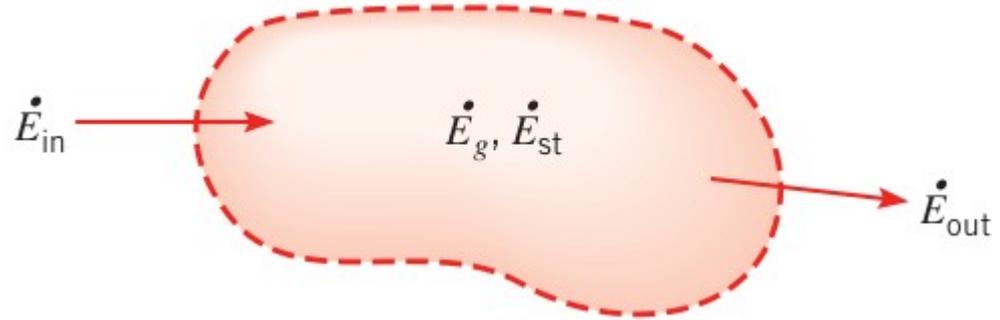


$$\Delta E_{ac} = E_{in} - E_{out} + E_g$$

Primeira lei da Termodinâmica (taxas)

No intervalo do tempo **a taxa** de aumento na quantidade da energia (térmica e mecânica) acumulada em um volume de controle (VC) deve ser igual à **taxa** na qual a energia entra no VC, menos a taxa de energia que deixa o VC, mais a **taxa** de energia gerada no VC

$$\dot{E}_{ac} \equiv \frac{dE_{ac}}{dt} = \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} + \dot{E}_g$$



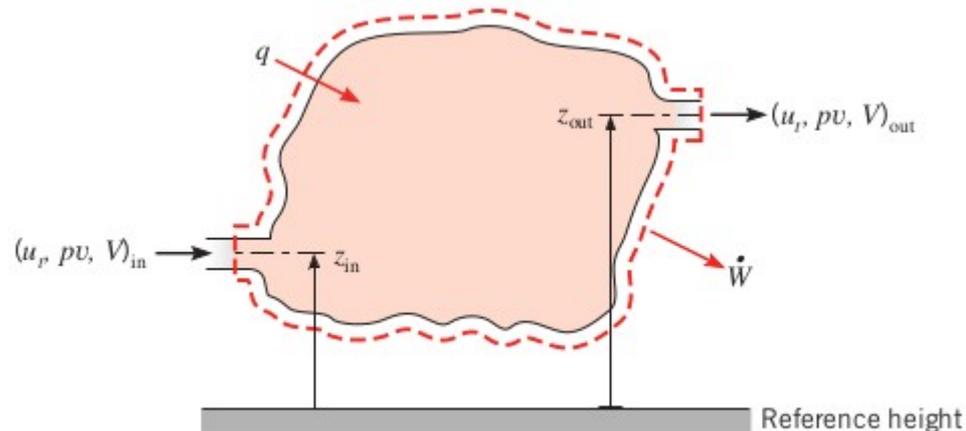
Equação simplificada com escoamento estacionário

Caso escoamento do fluido: massa entra e sai do VC

A taxa no qual energia térmica e mecânica entram no VC

$$\dot{m} \left(u_t + \frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz \right)_{\text{in}} - \dot{m} \left(u_t + \frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz \right)_{\text{out}} + \dot{q} - \dot{W} = 0$$

q – taxa de transferência de calor; W taxa do trabalho restante (não do escoamento)



Equação simplificada com escoamento estacionário

Caso escoamento do fluido: massa entra e sai do VC

A taxa no qual energia térmica e mecânica entram no VC

$$\dot{m} \left(u_t + \frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz \right)_{\text{in}} - \dot{m} \left(u_t + \frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz \right)_{\text{out}} + \dot{q} - \dot{W} = 0$$

\dot{q} – taxa de transferência de calor; \dot{W} taxa do trabalho restante (não do escoamento)

Entalpia $i = u_t + \frac{p}{\rho} = u_t + pv$

Para gases ideais $i_{\text{in}} - i_{\text{out}} = c_p (T_{\text{in}} - T_{\text{out}})$

Para fluidos incompressíveis $u_{\text{in}} - u_{\text{out}} = c (T_{\text{in}} - T_{\text{out}})$

$$q = \dot{m} c_p (T_{\text{out}} - T_{\text{in}})$$

Problema 1

A parede de um forno industrial 0.5 m x 1.2 m é construída com tijolo refratário com 15 cm de espessura e condutividade térmica 1.7 W/(m K). No regime de funcionamento estacionário a parede interna e externa mostraram a temperatura 1400 K e 1150 K, respectivamente.

Determinar a taxa de perda de calor pela parede.

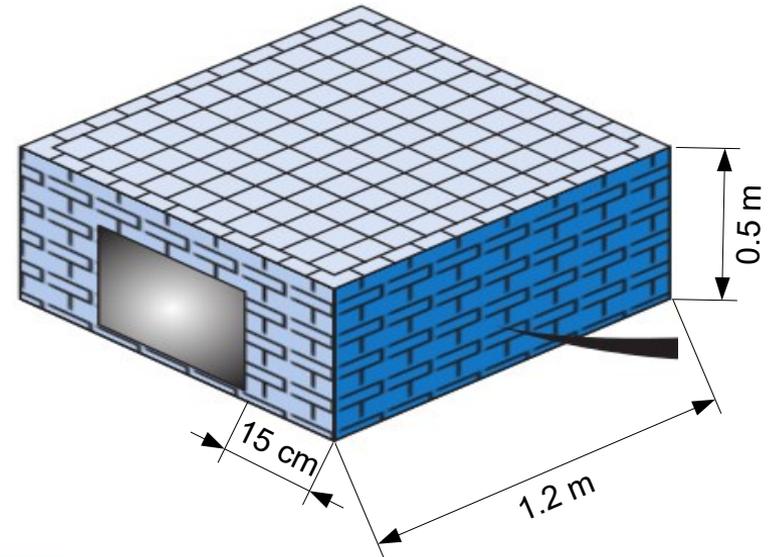
O fluxo térmico:

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} = k \frac{T_1 - T_2}{L}$$

$$q_x'' = 1.7 \frac{1400 - 1150}{0.15} = 2833 \text{ W/m}^2$$

A taxa de perda de calor

$$q_{cond} = q_x'' A = 2833 \cdot 0.5 \cdot 1.2 = 1700 \text{ W}$$



Problema 2

Calcular a taxa de transferência de calor por convecção natural entre um telhado do galpão de área 20×20 m e o ar ambiente, se a temperatura do telhado é de 27°C , a temperatura do ar -3°C e o coeficiente de transferência de calor por convecção médio é $10 \text{ W/m}^2\text{K}$



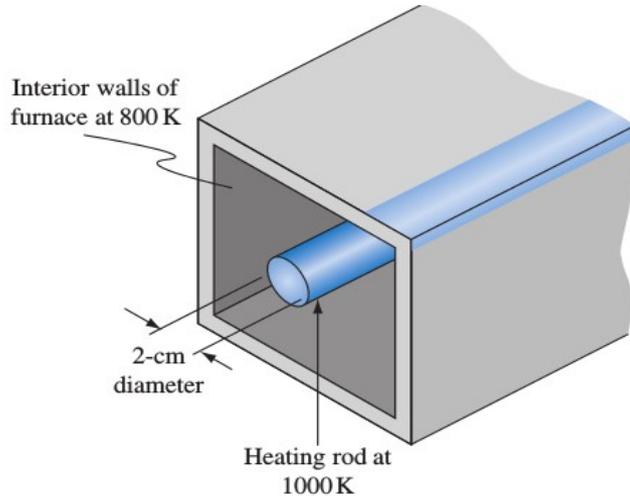
$$q_{conv} = \bar{h} A_{telhado} (T_{telhado} - T_{ar})$$

$$q_{conv} = 10 \times (20 \times 20) (27 - (-3)) = 120000 \text{ W}$$

Problema 3

Uma haste cilíndrica longa eletricamente aquecida, com 2 cm de diâmetro, é instalada em um forno a vácuo. A emissividade da superfície da haste (mantida a 1000 K) é 0.9 enquanto as paredes interiores do forno são pretas e estão a 800 K.

Calcular a taxa de perda de calor por haste (por unidade de comprimento) e o coeficiente de transferência de calor por radiação.



A taxa de perda de calor por haste (por unidade de comprimento)

$$q_r = A \varepsilon \sigma (T_1^4 - T_2^4) = (\pi D L) \varepsilon \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

$$q_{rL} = q_r / L = 3.14 \cdot 0.02 \cdot 0.9 \cdot 5.67 \cdot 10^{-8} (1000^4 - 800^4)$$

$$q_{rL} = 1893 \text{ W/m}$$

Para o regime estacionário q_r , emitido pela haste, deve ser absorvido e dissipado pelas paredes do forno. O coeficiente de transferência de calor por radiação

$$h_r = \frac{q_r}{A(T_1 - T_2)} \equiv \sigma \varepsilon (T_1 + T_2)(T_1^2 + T_2^2) = 151 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad 44/50$$

Problema 4

Uma parede de concreto, que tem uma área superficial de 20 m^2 e espessura de 0.30 m , separa o ar refrigerado de um quarto do ar ambiente. A temperatura da superfície interna da parede é mantida a 25°C e a condutividade térmica do concreto é de $1 \text{ W}/(\text{m K})$.

a) Determine a perda de calor através da parede considerando que a temperatura de sua superfície externa varie de -15°C a 38°C , que correspondem aos extremos do inverno e do verão, respectivamente. Apresente os seus resultados graficamente.

b) No seu gráfico, represente também a perda de calor como uma função da temperatura da superfície externa para materiais da parede com condutividades térmicas de $0,75$ a $1,25 \text{ W}/(\text{m K})$. Explique a família de curvas que você obteve.

Problema 5

O fluxo térmico aplicado em uma face de uma parede plana é $q'' = 20 \text{ W/m}^2$. A face oposta está exposta ao ar a uma temperatura de $30 \text{ }^\circ\text{C}$, com um coeficiente de transferência de calor por convecção de $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. A temperatura da superfície exposta ao ar é medida, sendo igual a $50 \text{ }^\circ\text{C}$.

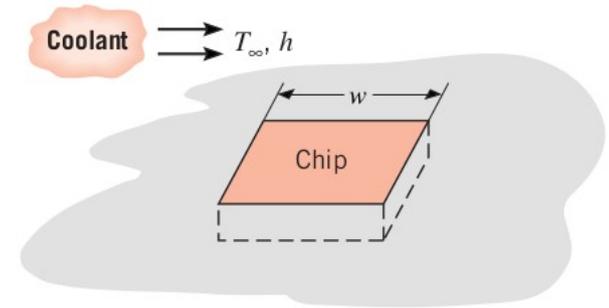
As condições correspondem a um regime estacionário? Se não, a temperatura da parede está aumentando ou diminuindo com o tempo?

Problema 6

Um chip quadrado, com lado $w = 5 \text{ mm}$, opera em condições isotérmicas. O chip é posicionado em um substrato de modo que suas superfícies laterais e inferior estão isoladas termicamente, enquanto sua superfície superior encontra-se exposta ao escoamento de um refrigerante a $T = 15 \text{ °C}$. A partir de considerações de confiabilidade, a temperatura do chip não pode exceder a $T = 85 \text{ °C}$.

Sendo a substância refrigerante o ar, com um coeficiente de transferência de calor por convecção correspondente $h = 200 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$, qual é a potência máxima permitida para o chip?

Sendo o refrigerante um líquido dielétrico para o qual $h = 3000 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$, qual é a potência máxima permitida?



Problema 7

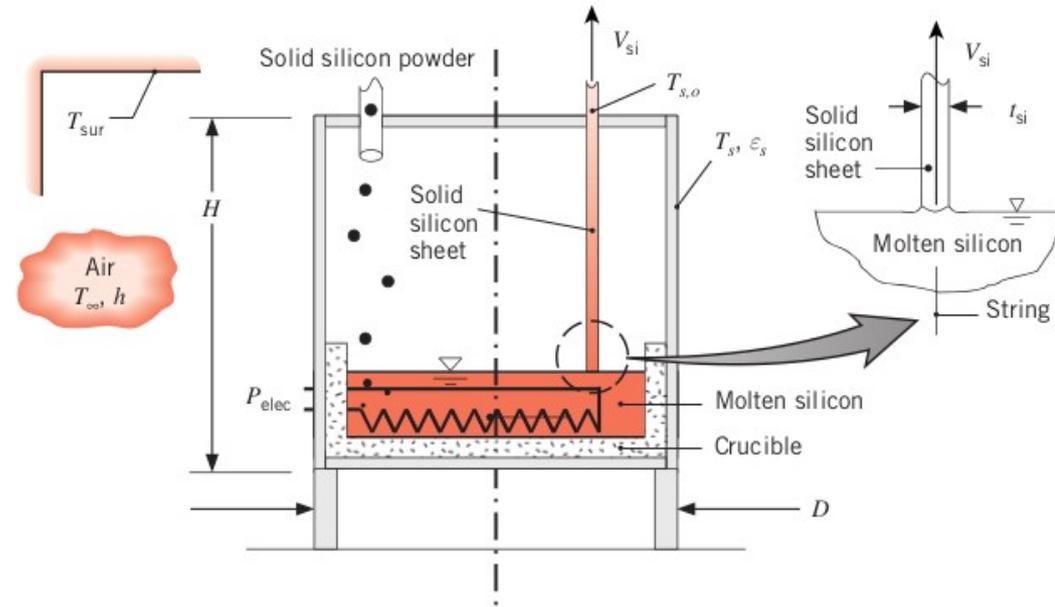
Uma tubulação industrial aérea de vapor d'água não isolada termicamente, com 25 m de comprimento e 100 mm de diâmetro, atravessa uma construção cujas paredes e o ar ambiente estão a 25 °C. Vapor pressurizado mantém uma temperatura superficial na tubulação de 150 °C e o coeficiente associado à convecção natural é de $h = 10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. A emissividade da superfície é $\varepsilon = 0,8$.

(a) Qual é a taxa de perda de calor na linha de vapor?

(b) Sendo o vapor gerado em uma caldeira alimentada por gás natural, operando com uma eficiência de $\eta = 0,90$, e o gás natural cotado a $C = \$0,02$ por MJ, qual é o custo anual da perda de calor na linha?

Problema 8

Um método para produzir finas lâminas de silício para uso em painéis solares fotovoltaicos é passar, de baixo para cima, duas fitas finas de material com alta temperatura de fusão por um banho de silício líquido. O silício se solidifica sobre as fitas próximo à superfície do líquido fundido, e as lâminas sólidas de silício são puxadas vagarosamente para fora do líquido. O silício é reabastecido pela adição de pó de silício sólido que é jogado no banho.



Problema 8

Considere uma lâmina de silício ($\rho = 2330 \text{ kg/m}^3$), que tem largura $W_{\text{si}} = 85 \text{ mm}$ e espessura $t_{\text{si}} = 150 \text{ }\mu\text{m}$, sendo puxada para fora do banho a uma velocidade de $V_{\text{si}} = 20 \text{ mm/min}$. O silício é fundido a partir do suprimento de potência elétrica à câmara cilíndrica de produção, com altura $H = 400 \text{ mm}$ e diâmetro $D = 350 \text{ mm}$. As superfícies expostas da câmara de produção estão a $T = 350 \text{ K}$, o coeficiente convectivo correspondente nas superfícies expostas é $h = 8 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ e a superfície é caracterizada por uma emissividade igual a $\varepsilon = 0,9$. O pó de silício sólido está a $T_i = 298 \text{ K}$ e a lâmina sólida de silício deixa a câmara a $T_{\text{si,sai}} = 420 \text{ K}$. As temperaturas da vizinhança e do ambiente são $T_\infty = T_{\text{viz}} = 298 \text{ K}$.

- (a) Determine a potência elétrica, P_{el} , necessária para operar o sistema em regime estacionário.
- (b) Se o painel fotovoltaico absorver um fluxo solar médio no tempo de $q'' = 180 \text{ W/m}^2$ e o painel tiver uma eficiência de conversão (razão entre a potência elétrica produzida e potência solar absorvida) de $\eta = 0,20$, quanto tempo o painel solar deve operar para produzir energia elétrica suficiente para compensar a energia elétrica consumida na sua fabricação?