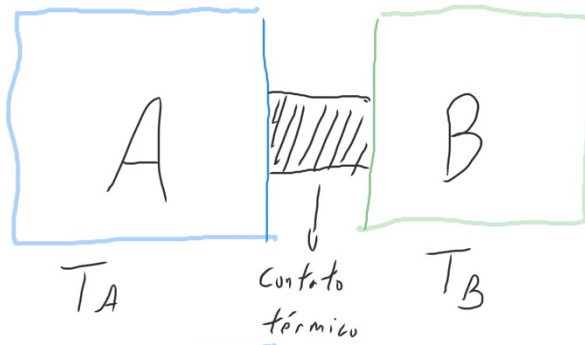
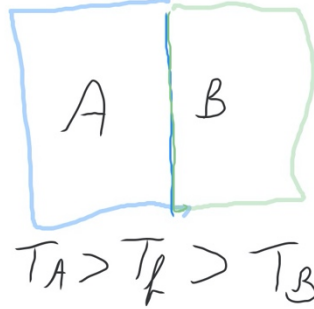


Calor:



Fluxo  
→ variação de  
temperatura

Fluxo de quê?

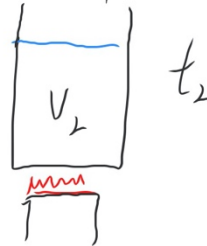


Fluxo de calor  $\Rightarrow$  variação de temperatura



$t_1 \rightarrow$  ebulição

$$\frac{t_1}{V_1} = \frac{t_2}{V_2}$$



$\Delta Q \rightarrow$  Fluxo de calor

$$\Delta Q \propto m$$

$$\Delta Q \propto \Delta T$$

$$\Delta Q \propto m \cdot \Delta T \Rightarrow \Delta Q = c \cdot m \cdot \Delta T$$

Fluxo de calor  $\rightarrow$  capacidade térmica  $\rightarrow C$   
 $\rightarrow$  calor específico  $\rightarrow c$

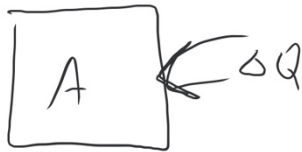
$$\Delta Q = m \cdot c \Delta T = C \cdot \Delta T$$

$\downarrow$   
 substância pura  
 homogênea

$\hookrightarrow$  corpo qualquer

$\downarrow$   
 $C = m_1 \cdot c_1 + m_2 \cdot c_2 + \dots$

$$c = c(T) = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta Q}{\Delta T} \right) \cdot \frac{1}{m} = \frac{1}{m} \cdot \frac{\partial Q}{\partial T}$$



$$\Delta Q = \int_{T_i}^{T_f} m \cdot c(T) dT =$$

$$= m \int_{T_i}^{T_f} c(T) dT = m \cdot \bar{c} (T_f - T_i)$$

Unidade

$\Delta Q \rightarrow \Delta T = 1^\circ\text{C}, \bar{T} = 15^\circ\text{C}, p = 1 \text{ atm}, 1 \text{ g}, \text{Água pura}$

$\boxed{1 \text{ g}} \quad T_i = 14,5^\circ\text{C} \rightarrow T = 15,5^\circ\text{C} \quad \Delta Q = 1 \text{ cal}$   
 (caloria)

Água  $c = 1 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}}$

Calor específico  $\rightarrow$  Capacidade térmica molar

$$c \rightarrow \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}} \quad \rightarrow \quad C_m \Rightarrow \frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

$\hookrightarrow$  massa definida da substância  $\rightarrow N_A$  átomos

mols grama

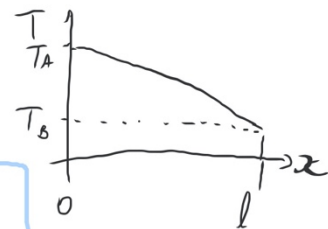
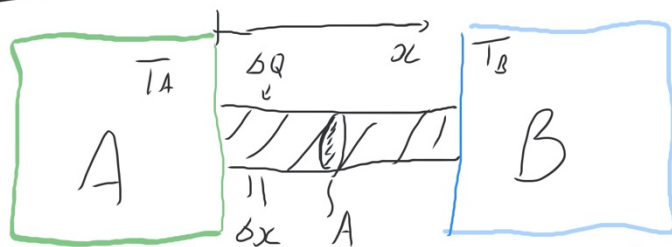
Dulong & Petit (1810)

$$C_m \sim 6 \frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

$\rightarrow$  relação empírica sólidos

$\hookrightarrow$  Mecânica Quântica

## Condução Térmica



$$\frac{\partial T}{\partial x} < 0$$

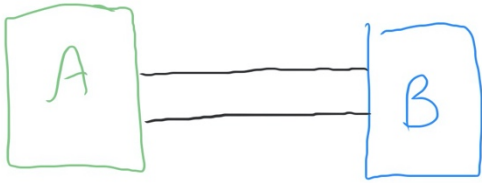
$\kappa \rightarrow$  condutividade térmica

$\hookrightarrow$  seção transversal

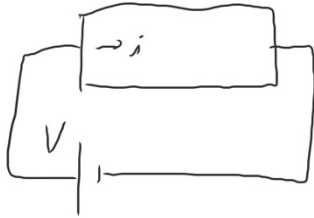
$$\begin{aligned} \Delta Q &\propto (T_A - T_B) \\ \Delta Q &\propto A \\ \Delta Q &\propto \frac{1}{l} \quad \Delta Q \propto \Delta t \end{aligned}$$

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

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Rightarrow \frac{dQ}{dt} = -\kappa A \frac{dT}{dx}$$



$$\frac{dQ}{dt} = -\kappa \cdot A \frac{dT}{dx} = -\kappa A \cdot \frac{\Delta T}{l}$$



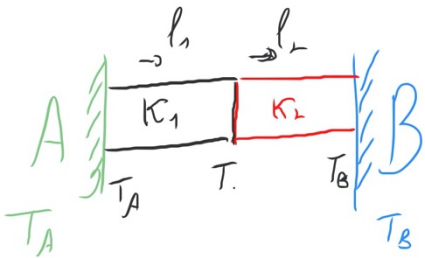
$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{V}{R} = \sigma \cdot A \cdot \frac{V}{l} \rightarrow \text{corrente elétrica}$$

Wiedemann, Frank (1853)  $\frac{\kappa}{\sigma} \rightarrow \text{cte. metais}$

Lorenz (1872)  $\frac{\kappa}{\sigma} = T_0 \cdot L \quad L = 2,4 \cdot 10^8 \frac{\text{W} \cdot \Omega}{\text{K}^2}$

Bons condutores elétricos  $\rightarrow$  bons condutores de calor

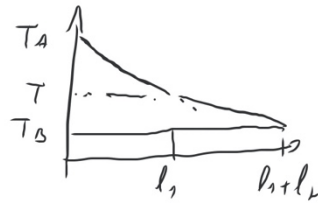
(metais)



$$\frac{dQ}{dt} = -\kappa_1 \frac{A}{l_1} (T - T_A) = -\kappa_2 \frac{A}{l_2} (T_B - T)$$

uniforme ao longo da haste

$$\frac{dQ}{dt} = D(T_B - T_A)$$



$$\frac{dQ}{dt} = \left(\frac{k_1}{l_1}\right) A (T_A - T)$$

$$\left(\frac{dQ}{dt}\right) \cdot \left(\frac{l_1}{k_1}\right) \frac{1}{A} = (T_A - T) > 0$$

$$\frac{dQ}{dt} = \left(\frac{k_2}{l_2}\right) A (T - T_B)$$

$$+ \left(\frac{dQ}{dt}\right) \cdot \left(\frac{l_2}{k_2}\right) \frac{1}{A} = (T - T_B) > 0$$

$$\frac{1}{A} \left(\frac{dQ}{dt}\right) \left(\frac{l_1}{k_1} + \frac{l_2}{k_2}\right) = T_A - T_B$$

$$\frac{dQ}{dt} = A (T_A - T_B)$$

$$\frac{1}{\frac{l_1}{k_1} + \frac{l_2}{k_2}}$$

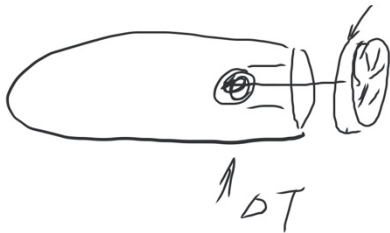
$\nearrow \frac{k_{ef}}{(l_1+l_2)}$

O que é o calor?

Calórico  $\rightarrow$  Lavoisier  
 $\hookrightarrow$  fluido

Agitação dos componentes  
 de um corpo

Calor  $\rightarrow$  "inesgotável"



Joule  $\leftarrow$  Calor

a partir do trabalho  
 Mecânico

Correspondência: Trabalho mecânico  $\leftrightarrow$  Calor

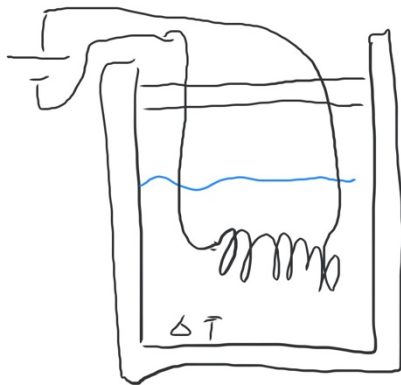
$$1 \text{ cal} = 4,186 \text{ Nm} \xrightarrow{\text{trabalho}}$$
$$= 4,186 \cdot \text{J} \xrightarrow{\text{Joule}} \text{unidade de energia mecânica}$$

Calor é energia

térmica

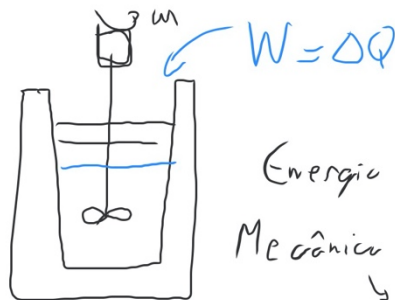
energia intrínseca  $\rightarrow$

energia cinética, energia potencial



$$\Delta Q = m \cdot c \cdot \Delta T \Rightarrow V \cdot I \cdot \Delta t = E_e$$

$$\Delta Q = E_e$$



Energia convertida

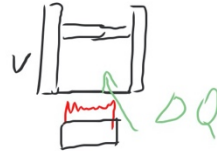
Mecânica      Eléctrico

↓      ↓  
Calor

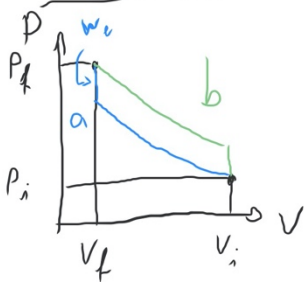
# Trabalho $\leftrightarrow$ Calor $\leftrightarrow$ Energia

Joule  $E = \Delta W_m$   
 $\Delta W_e$  } Equivalência  
 $T_i \rightarrow T_f \leftrightarrow \Delta Q = C \cdot \Delta T$

Mudar o estado  $\rightarrow$   
 $\Delta Q \rightarrow$  calor  
 ou  $\Delta W \rightarrow$  trabalho



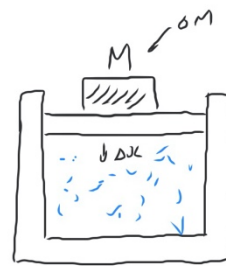
## 1ª Lei da Termodinâmica



$(P_i, V_i) \rightarrow (P_f, V_f)$

$P, V, T \rightarrow$  Estado do Fluido

$U_i \rightarrow U_f$



Parades  $\rightarrow$  adiabáticas

$\Delta Q = 0$

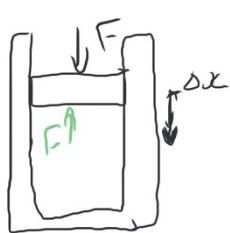
$U_i \rightarrow U_f \Rightarrow W_i \rightarrow f$   
 $\hookrightarrow$  diferentes rotas

Compressão adiabática + Trabalho  
 $v.$  constante

Funções de Estado :  $U \rightarrow$  energia interna

$$\Delta U = U_f - U_i = -W_{i \rightarrow f} \text{ (adiabático)}$$

trabalho realizado pel sistema (p.ex. gás)



$$F \cdot dx > 0$$

$$W_{i \rightarrow f} < 0$$

$$\Delta U = U_f - U_i = W_{f \rightarrow i}$$

processo adiabático reverso

Variação adiabática da energia interna

$\Rightarrow$  Trabalho realizado sobre o sistema

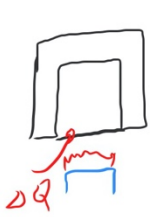
Fluido  $\rightarrow P, V, T$

$$U = U(P, V); \quad U = U(P, T); \quad U = U(V, T)$$

De um par, determinamos a 3ª variável



Calor  $\rightarrow$  variação de energia interna



$$P_i, V_i \rightarrow P_f, V_f$$

$$U_i \rightarrow U_f$$

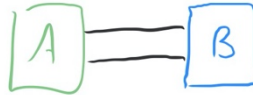
$$\Delta W = 0$$

$$\Delta U = \Delta Q$$

$\Delta Q > 0 \rightarrow$  calor Fornecido  
ao sistema.

Isocórico  $\rightarrow V = \text{cte}$

Reservatório térmico:



$$\Delta Q_A = C \cdot \Delta T_A$$

$$\Delta T_A = \frac{\Delta Q_A}{C} \rightarrow$$

$$\lim_{C \rightarrow \infty} \left( \frac{\Delta Q_A}{C} \right) \Rightarrow \Delta T_A = 0$$

$$\Delta Q_A, T = \text{cte}$$

Exemplos: Atmosfera

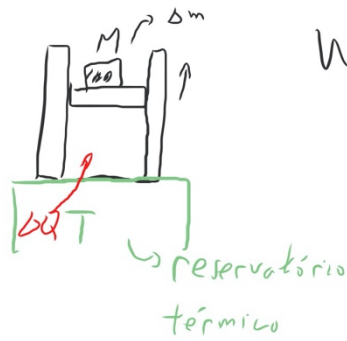
Piscina

Lago

Mar

Conceito útil

## Expansão isotérmica



$$W_{f-i}$$

1ª Lei da termodinâmica

Conservação de Energia

$$\Delta U = U_f - U_i = \Delta Q - W_{\text{inf}}$$

calor transferido para o sistema

trabalho realizado pelo sistema

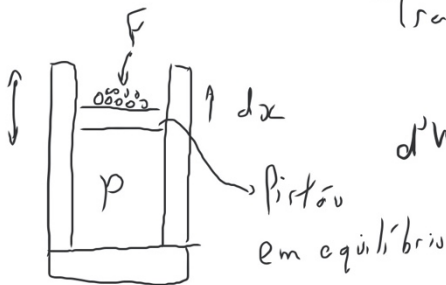
En. Mecânica

$$E = U + T \Rightarrow T = W_{Fc} + W_{Fvc}$$

↳ en. potencial

Conservação inclui o calor

## Processos Reversíveis



Trabalho realizado pelo Fluido =

- Trabalho realizado pela força F

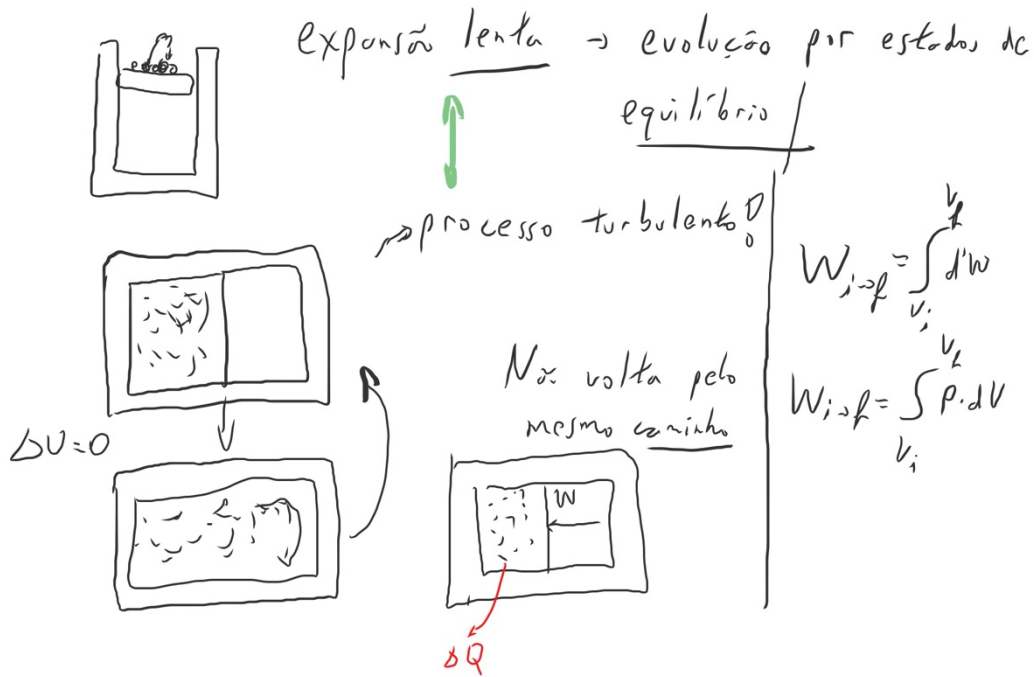
↳  $-F \cdot dx$

$$dW = F \cdot dx = P \cdot A \cdot dx$$

$$dW = P \cdot dV \quad P = P(V, T)$$

Não é uma definição exata de trabalho útil de cálculo

Vale em → processo é lento → aceleração é nula →  $V(t)$   
 atrito é desprezível → perda ou dissipação de energia



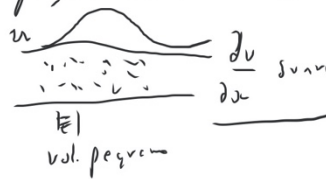
Equilíbrio → evolução lenta

irreversível → rápido e turbulento

Som → variação rápida de volume  
 ↓  
 adiabático → foco de calor

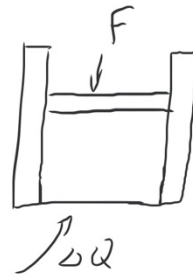
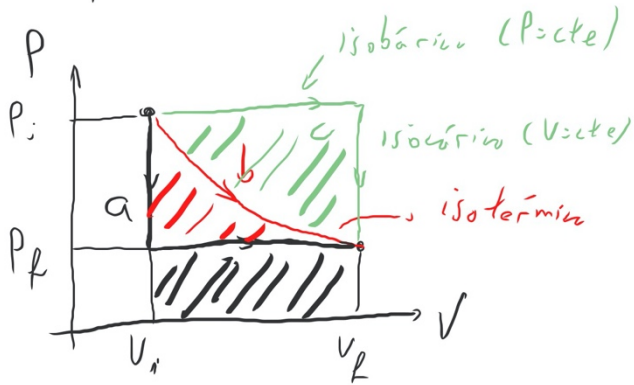
Cuidado : lento e rápido relativo a quê?

Equilíbrio → dinâmica microscópica do sistema  
 propagação de informação pelo volume



rápido → não troca calor  
 lenta → dinâmica do gás

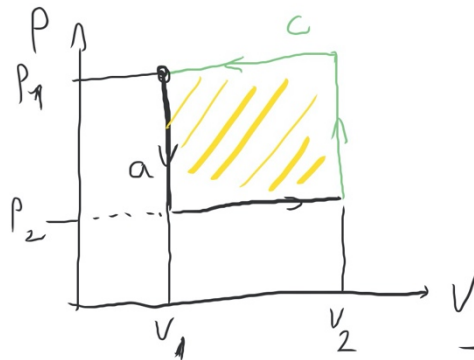
$W_{inf} = \int P \cdot dV \rightarrow$  depende da trajetória



$$W_{inf}^a < W_{inf}^b < W_{inf}^c$$

Condições de equilíbrio  $\rightarrow$  reversão de filme

Ciclo



$$W_c = \oint P \cdot dV =$$

$$= \int_{V_1}^{V_2} P_1 \cdot dV + \int_{V_2}^{V_1} P_2 \cdot dV$$

$$= \int_{V_1}^{V_2} P_a \cdot dV - \int_{V_1}^{V_2} P_b \cdot dV$$

Trajetoária  $\rightarrow$  espaço do estado  $\rightarrow P, V$

$$U(P, V) \rightarrow U(P, V)$$

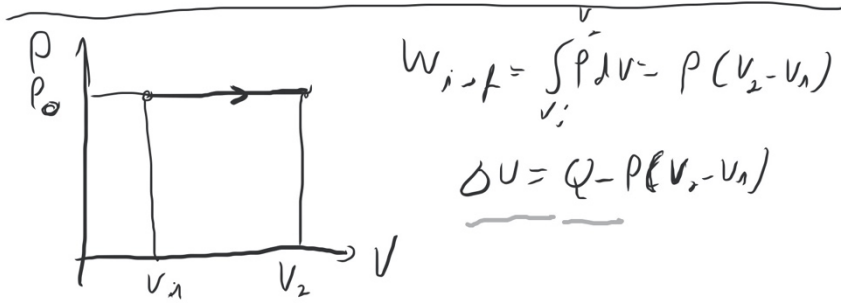
Troca de calor implícita  
Variáveis  $P, V \rightarrow$  extensivos  $\rightarrow$  equilíbrio

$$\Delta U = 0, W_c \neq 0 \rightarrow \Delta Q$$

Ciclo  $\Delta U = \Delta Q - W_{i \rightarrow f} = 0$

$$\Rightarrow W_{i \rightarrow f} = \Delta Q$$

↓ trabalho realizado      ↓ calor recebido



Processo adiabático  $\rightarrow \Delta Q = 0$

$$\Delta U = -W_{i \rightarrow f}$$