

Física do calor

F.S. Navarra

navarra@if.usp.br

Monitor: Guilherme Germano

Guilherme.germano@usp.br

edisciplinas.if.usp.br

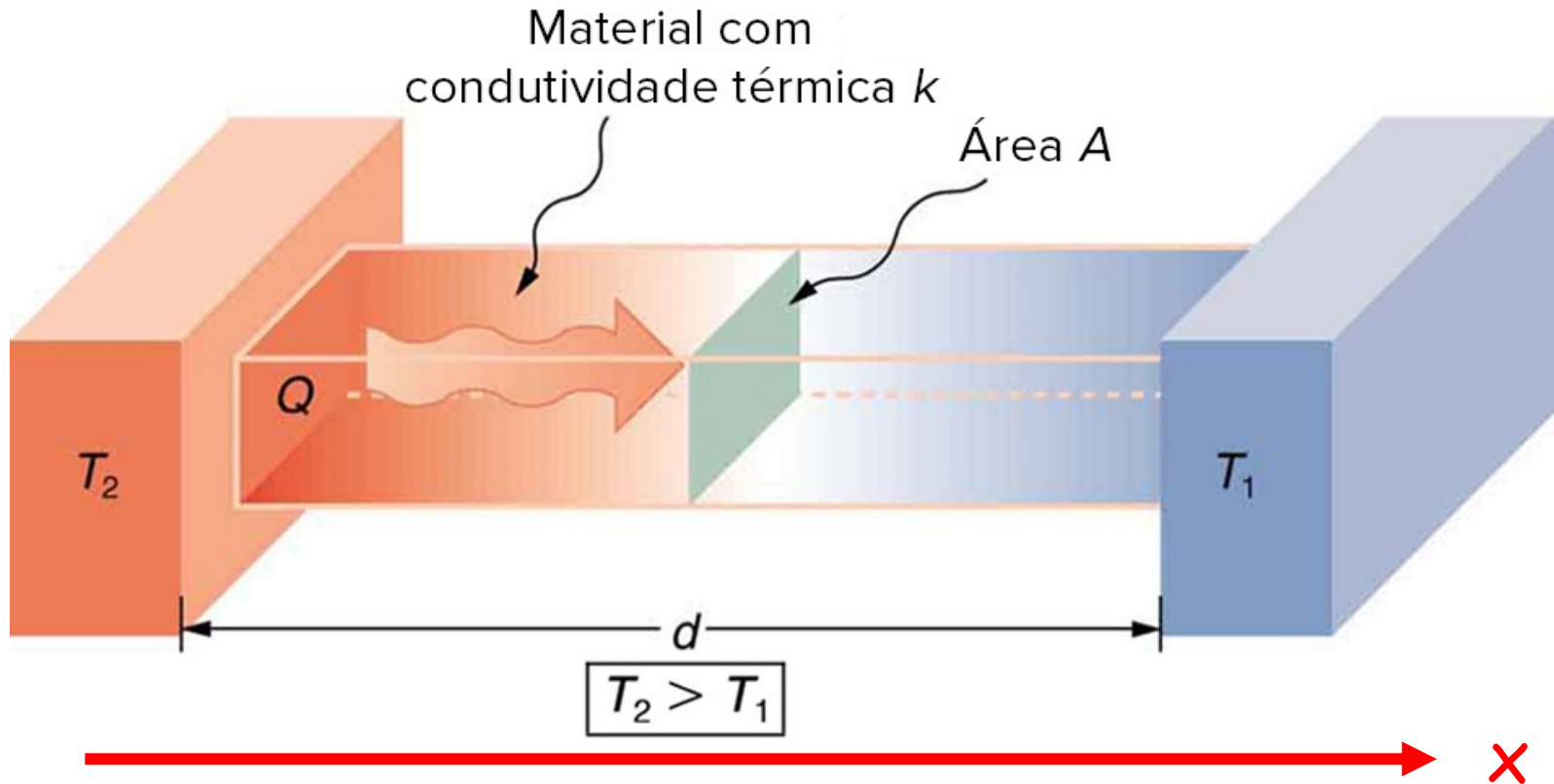
(buscar: física do calor 4300159)

Plano do Curso

22/03	Cap. 7		10/05	Evento	28/06	Exs. 12
25/03	Cap. 7		13/05	Exs. 9	01/07	P 3
29/03	Cap. 8		17/05	Cap. 10	05/07	
01/04	Cap. 8		20/05	Cap. 10	08/07	Sub
05/04	Cap. 8	←	24/05	Cap. 10		
08/04	Exs.7/8		27/05	Exs. 10		
12/04			31/05	P 2		
15/04			03/06	Cap. 11		
19/04	Exs. 7/8		07/06	Cap. 11		
22/04			10/06	Cap. 11		
26/04	P 1		14/06	Exs. 11		
29/04	Cap. 9		17/06	Cap. 12		
03/05	Cap. 9		21/06	Cap. 12		
06/05	Cap. 9		24/06	Cap. 12		

Condução de Calor

Condução de calor



$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -k A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad \longrightarrow \quad \frac{dQ}{dt} = -k A \frac{dT}{dx}$$

No regime estacionário a temperatura não muda com o tempo:

$$\frac{dT}{dx} = \text{constante no tempo}$$

$$\frac{dQ}{dt} = -k A \frac{dT}{dx} \quad \longrightarrow \quad \frac{dQ}{dt} = \text{constante no tempo}$$

$$\frac{dT}{dx} = \text{constante em } x \quad \longrightarrow \quad \frac{dT}{dx} = - \frac{T_2 - T_1}{L}$$

Gradiente de temperatura

$$\frac{dQ}{dt} = k A \frac{T_2 - T_1}{L}$$

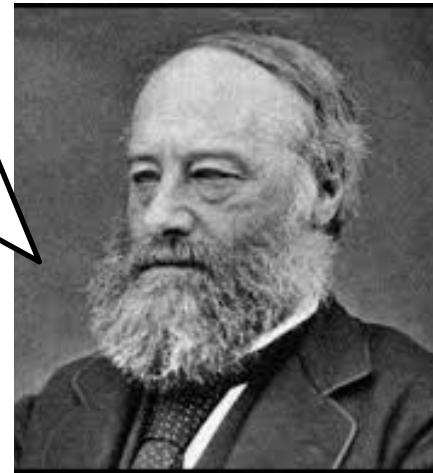
Fluxo de calor constante

1ª Lei da Termodinâmica

1ª Lei da Termodinâmica:

$$Q = \Delta U + W_{i \rightarrow f}$$

Conservação da energia !!!



James Joule

$$Q = \Delta U + W$$

$Q > 0$ Quando o calor **entra** no sistema

$\Delta U > 0$ Quando a temperatura do sistema **aumenta**

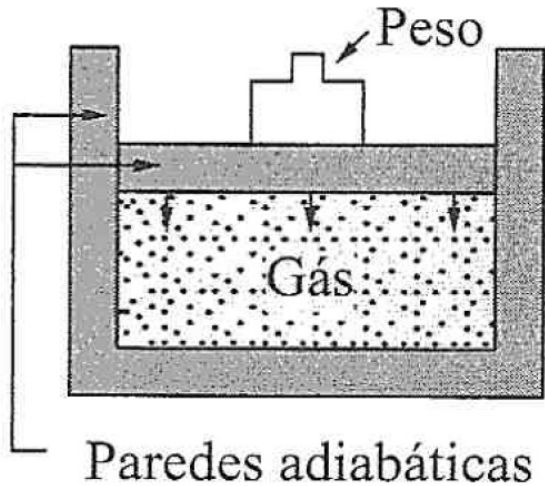
$W > 0$ Quando o volume do sistema **aumenta**

$Q = 0$ Processo adiabático

$\Delta V = 0$ Processo isocórico $W = p \Delta V$ $W = 0$

$\Delta T = 0$ Processo isotérmico $\Delta U = 0$

Processos adiabáticos: $Q = 0$



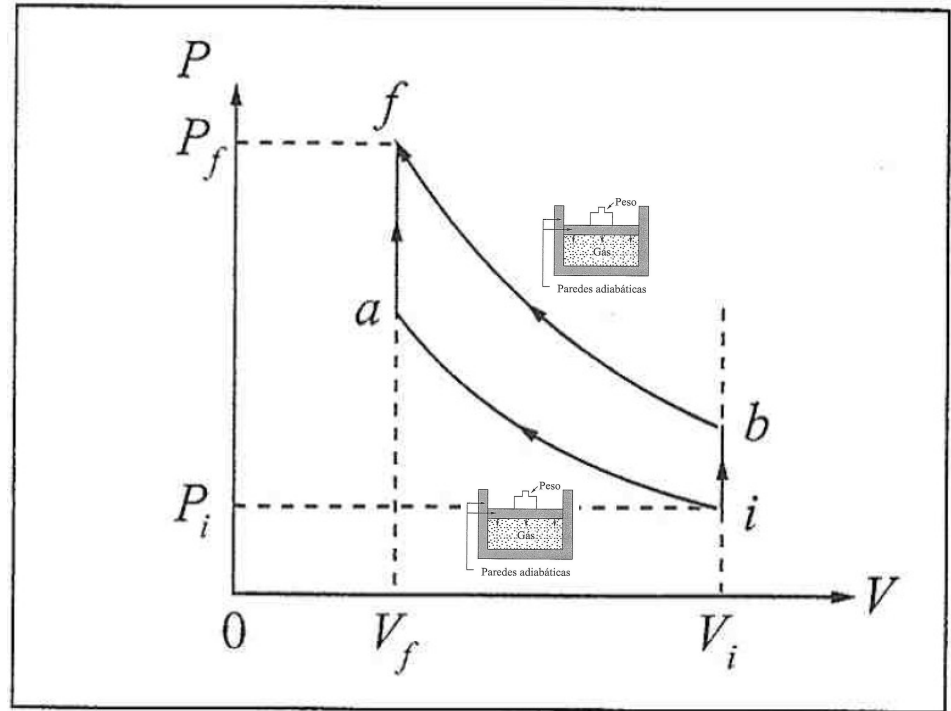
$$Q = \Delta U + W$$

$$Q = 0$$

$$\Delta U = -W$$

$$W < 0 \quad \longrightarrow \quad \Delta U > 0 \quad \longrightarrow \quad T_f > T_i$$

Diagrama pressão X volume



Processos não-adiabáticos: $Q \neq 0$

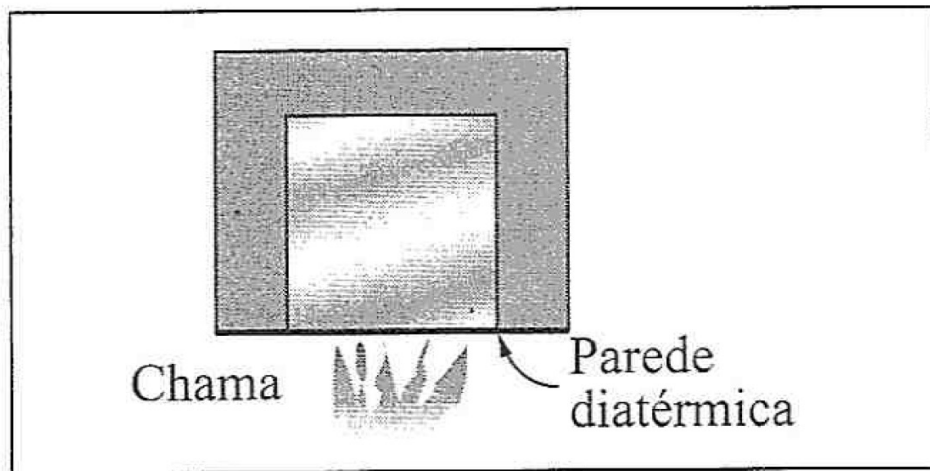


Figura 8.7 — Fornecimento de calor

$$V_f = V_i \quad W_{i \rightarrow f} = 0$$

$$Q = \Delta U \quad U_f > U_i$$

$$T_f > T_i$$

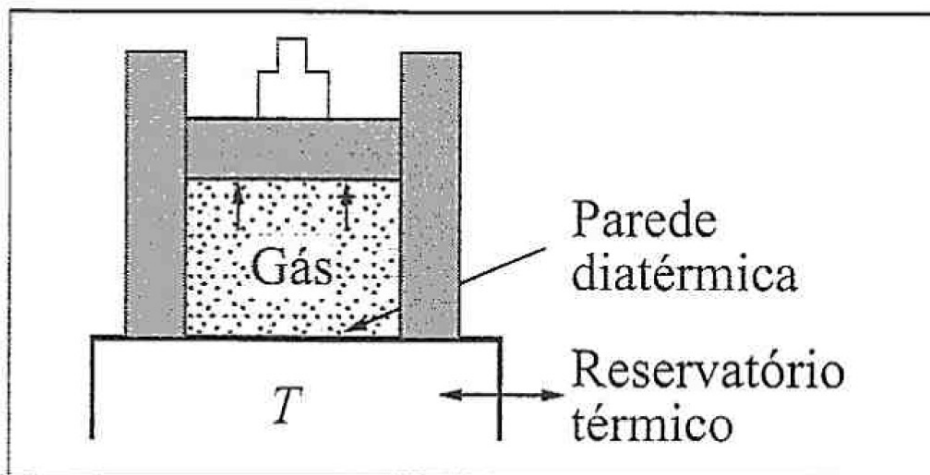


Figura 8.8 — Expansão isotérmica

$$T_f = T_i \quad \Delta U = 0$$

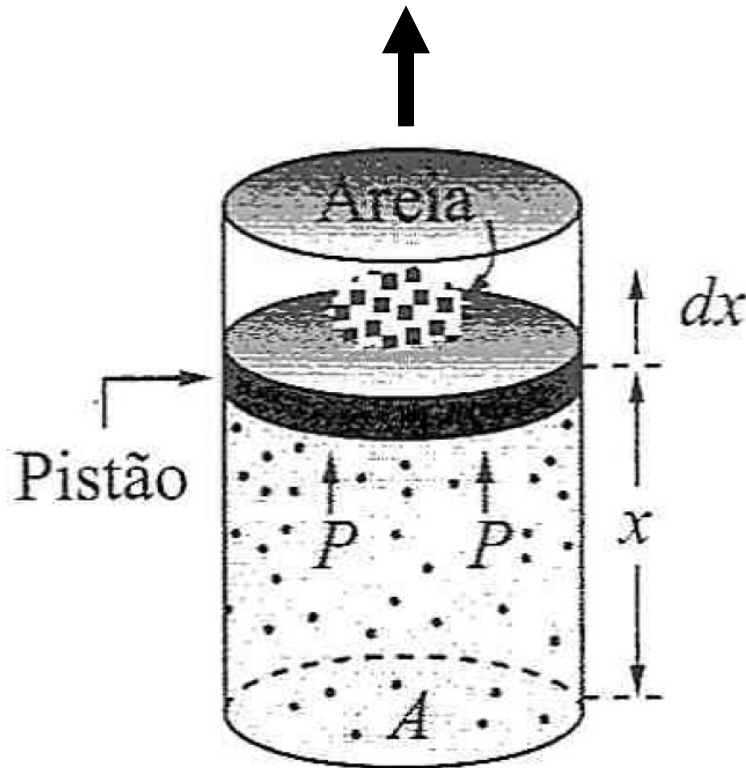
$$Q = W \quad W_{i \rightarrow f} > 0$$

$$V_f > V_i$$

Processos reversíveis

Processos **muito lentos**: "grão de areia por grão de areia"

O gás tem tempo de atingir o **equilíbrio** a cada mudança



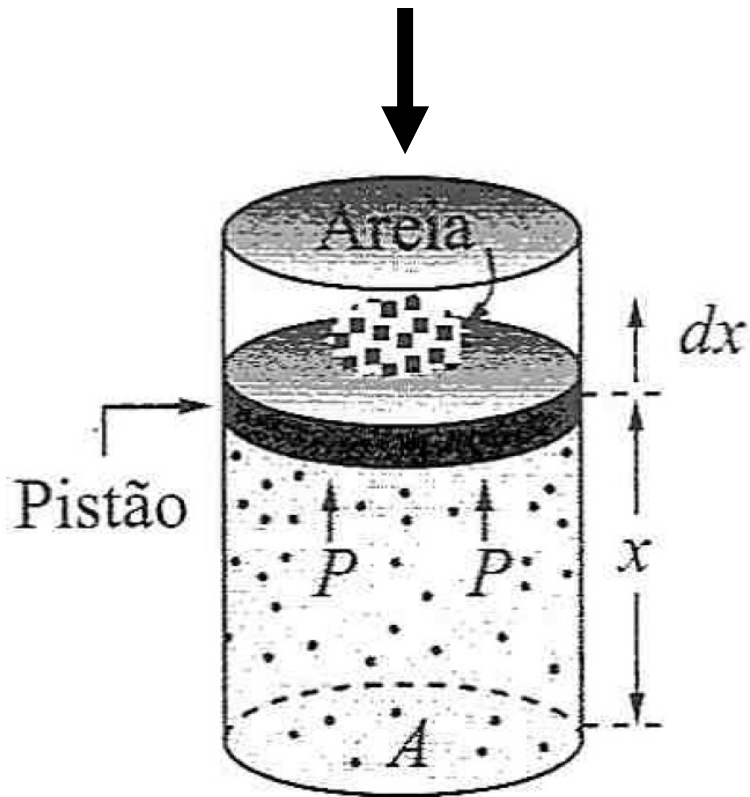
Remoção de um grão de areia de cada vez:
O gás se **expande** lentamente!



Processos reversíveis

Processo **inverso**: grão de areia por grão de areia

O gás tem tempo de atingir o **equilíbrio** a cada mudança



Adição de um grão de areia de cada vez:
O gás se **contrai** lentamente !

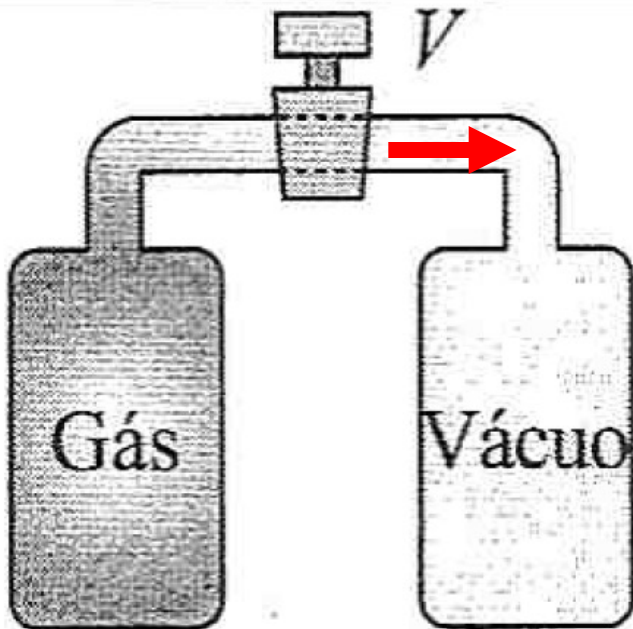


Processos irreversíveis

Processos **rápidos**: mudança brusca, p.e.x., de volume

O gás **sai do equilíbrio** depois da **mudança**

Expansão Livre



Escoamento **turbulento**
fora da termodinâmica
T, P, V não definidos



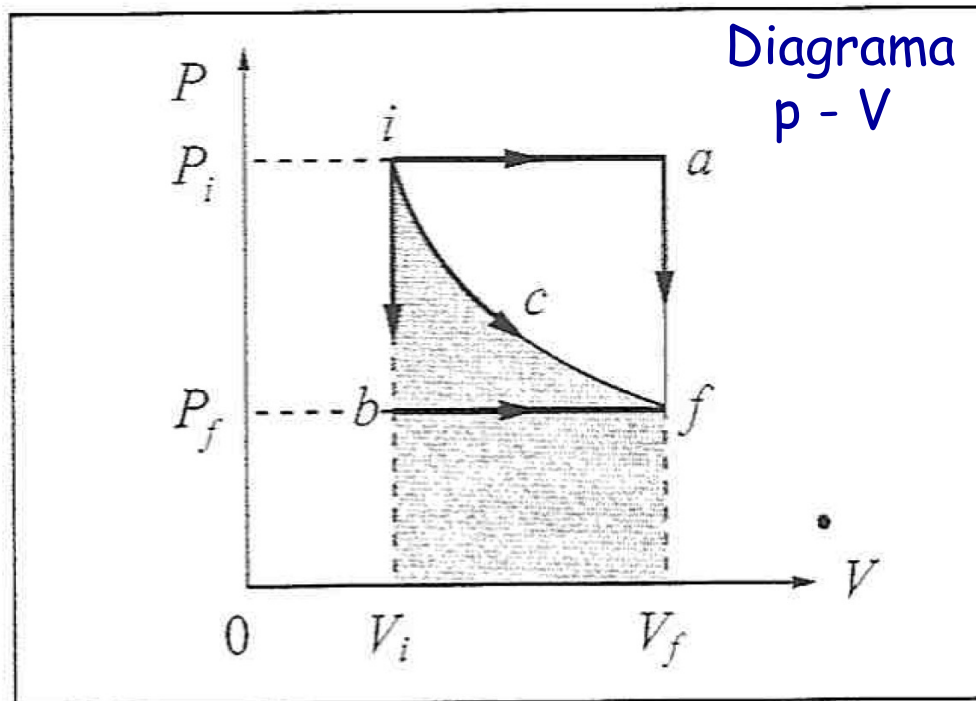
Trabalho no processo reversível

$$dW = p dV \quad \longrightarrow \quad W_{i \rightarrow f} = \int_{V_i}^{V_f} p dV$$

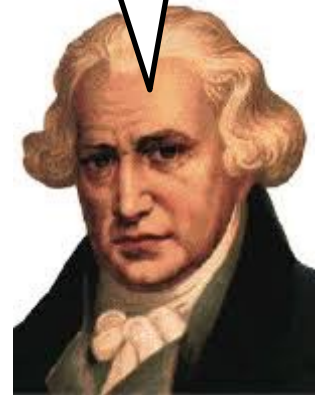
Trabalho = área debaixo da curva da função $p = p(V)$

Trabalho
depende
do caminho !

Não é uma
variável
do estado !

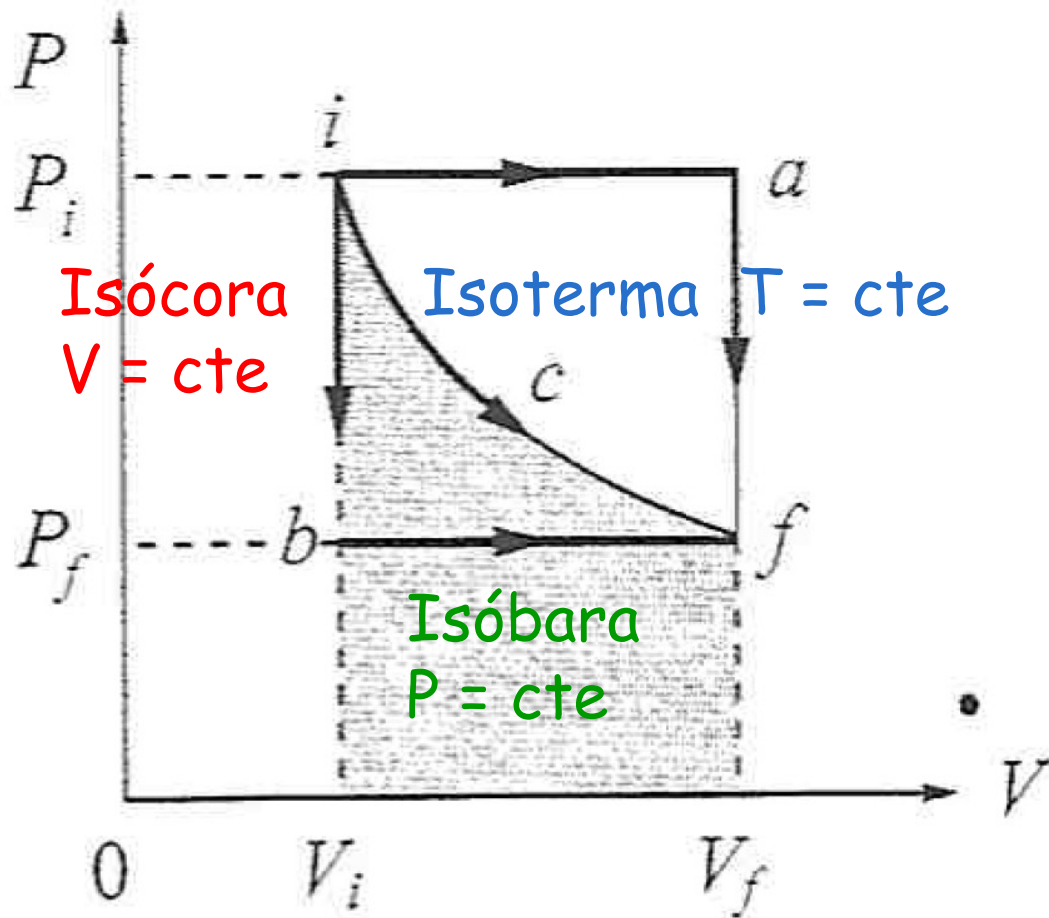


Eu que
inventei !



James
Watt

Transformações reversíveis



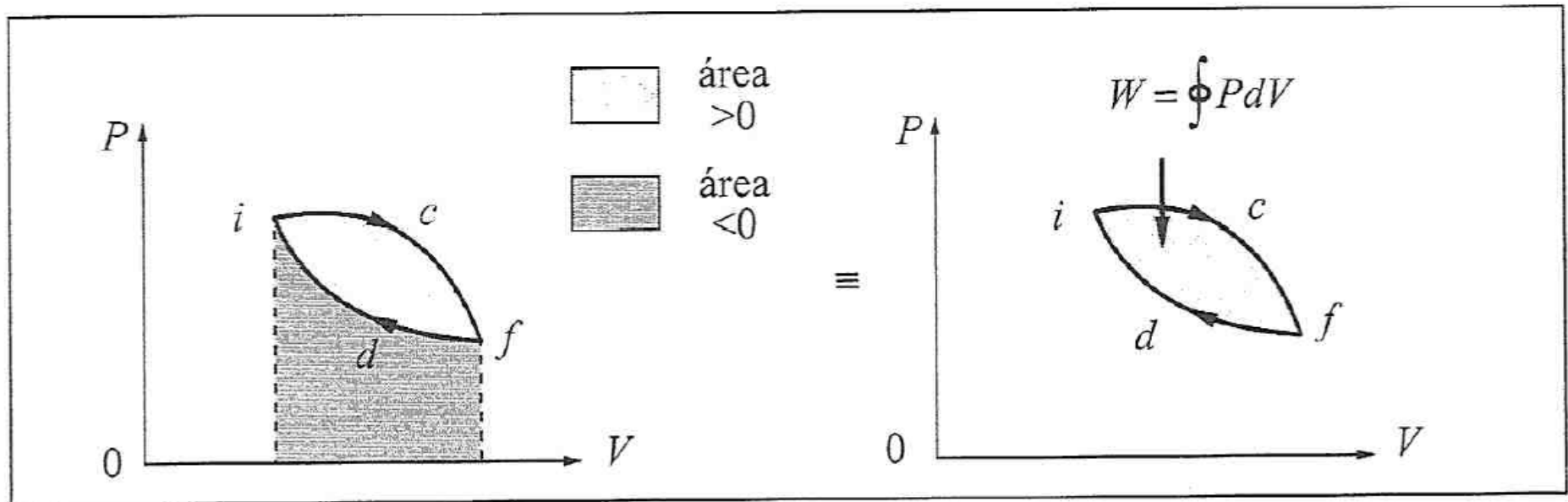
$i - c - f$:
Transf. Isotérmica

$i - b$, $a - f$
Transf. Isocórica

$i - a$, $b - f$:
Transf. Isobárica

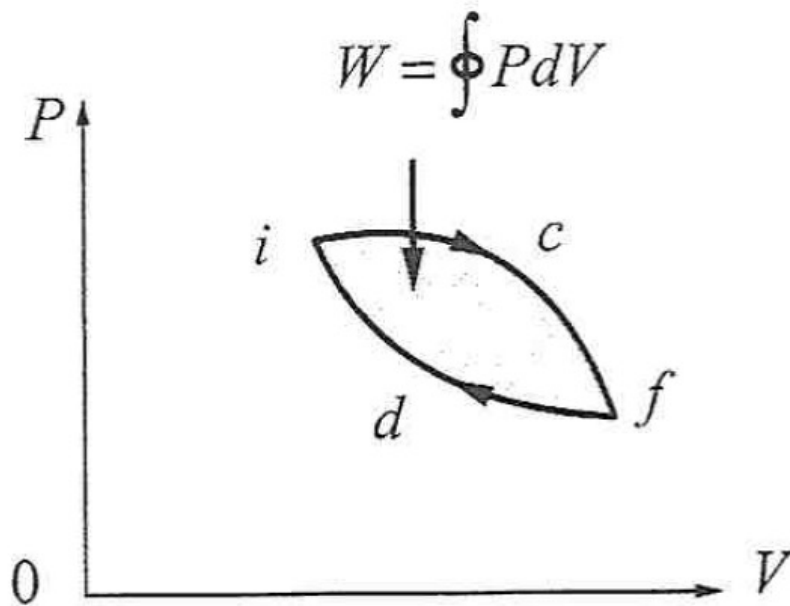
Ciclo : sistema volta ao estado inicial

$$W_{f \rightarrow i} = \int_{V_f}^{V_i} p dV = - \int_{V_i}^{V_f} p dV \quad W_{f \rightarrow i} = - W_{i \rightarrow f}$$



$$W = W_{i \xrightarrow{c} f} + W_{f \xrightarrow{d} i} = W_{i \xrightarrow{c} f} - W_{i \xrightarrow{d} f}$$

Ciclo : sistema volta ao estado inicial



$$i = f$$

$$U_i = U_f$$

$$\Delta U = U_f - U_i = 0$$

$$Q = \Delta U + W$$

$$W = Q$$

Calor no processo reversível

Processos **muito lentos**: aumento gradual da temperatura

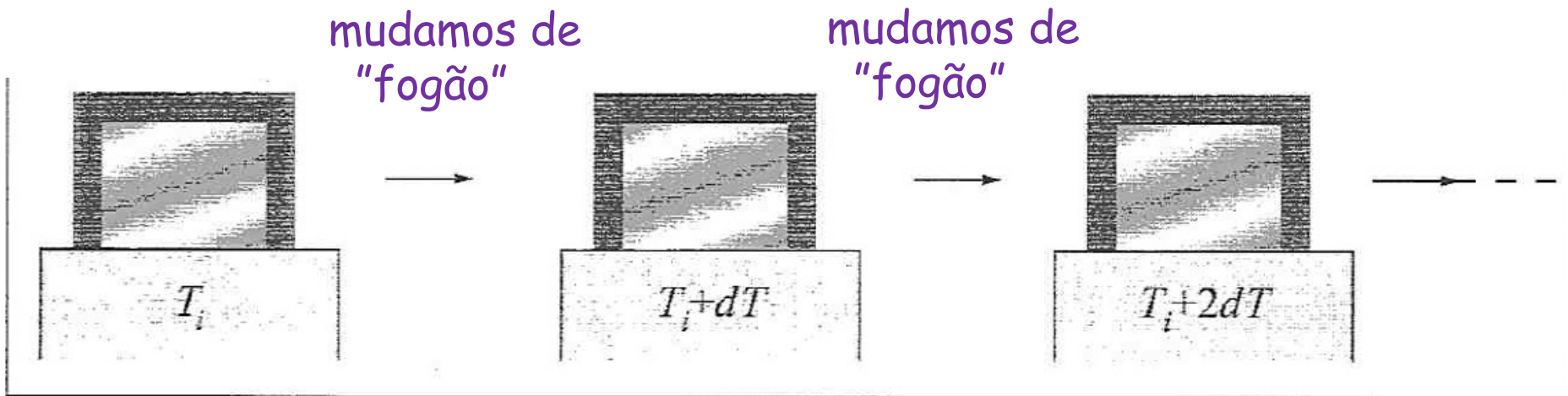


Figura 8.14 — Transferência reversível de calor

$$Q = \Delta U + W_{i \rightarrow f}$$

depende do
caminho

não depende
do caminho

depende do
caminho

$$\Delta Q = m c \Delta T \quad \longrightarrow \quad dQ = m c dT$$

$$C = m c \quad \longrightarrow \quad dQ = C dT$$

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} C dT$$

$$dQ = dU + dW$$

$$C dT = dU + p dV$$

Processo isobárico (pressão constante)

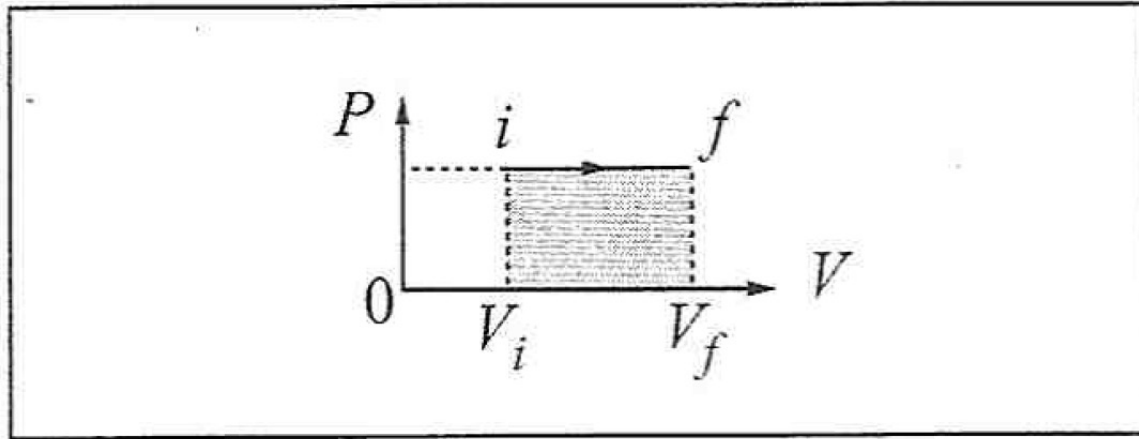


Figura 8.15 — Processo isobárico

$$W_{i \rightarrow f} = \int_{V_i}^{V_f} p \, dV = p (V_f - V_i)$$

$$Q = U_f - U_i + p (V_f - V_i)$$

c) Processo adiabático ($Q = 0$)

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

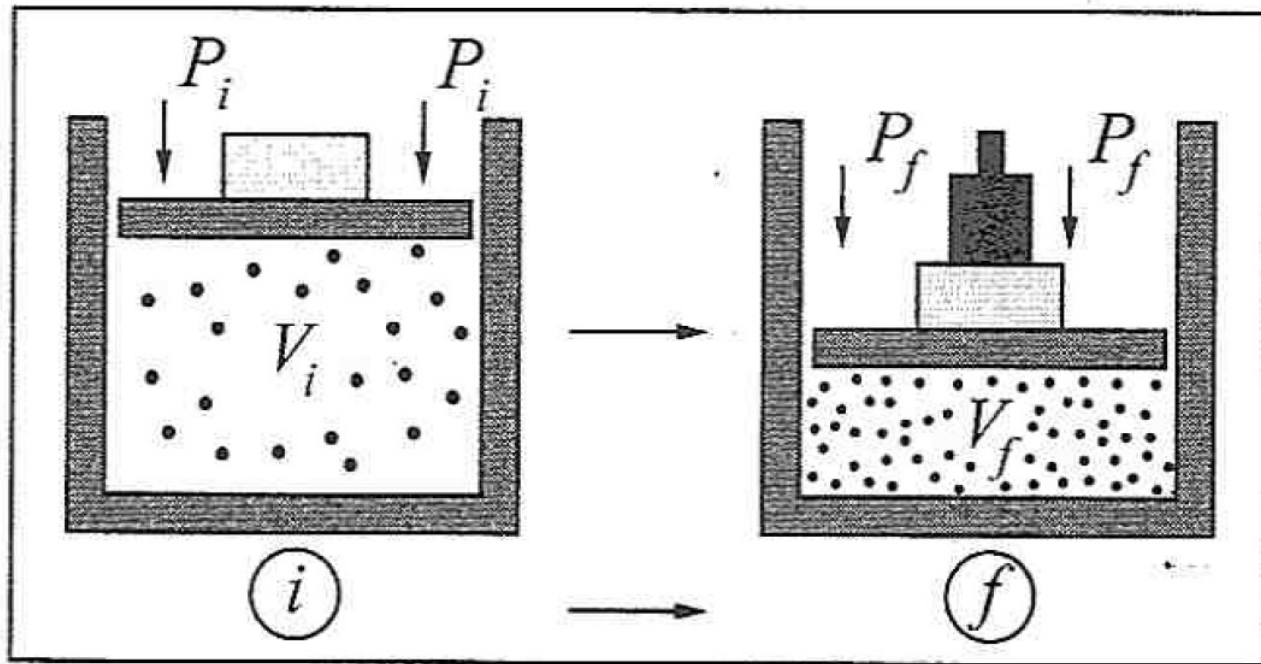


Figura 8.17 — Compressão adiabática

Capítulo 8

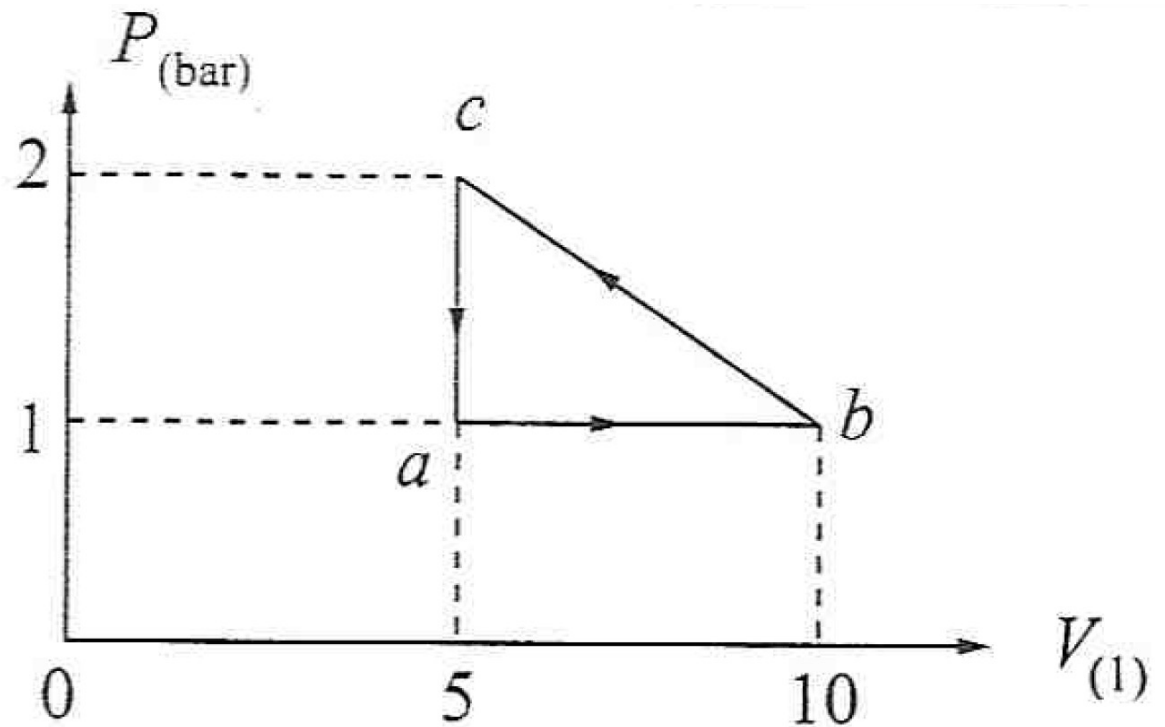
Exercício 19

SI:

1 Pascal = 1 N / m²

1 bar = 10⁵ Pascal

1 litro = 10⁻³ m³



Complete
a tabela

Etapa	W (J)	Q (J)	ΔU (J)
ab		800	
bc			
ca			-100
Ciclo ($abca$)			

I) ab:

$W = \text{Área ab:}$

$$W_{ab} = 5 \cdot 10^{-3} \cdot 10^5 \Rightarrow \boxed{W_{ab} = 500J}$$

Pela Primeira lei:

$$\Delta U = Q - W = 800 - 500 \therefore \boxed{\Delta U = 300J}$$

II) ca:

$$\boxed{W=0}$$

Pela Primeira lei:

$$\Delta U = Q - W \Rightarrow -100 = Q - 0 \therefore \boxed{Q_{ca} = -100J}$$

III) bc:

$W = -\text{Área bc:}$

$$W_{bc} = -(2 + 1) \cdot 10^5 \cdot \frac{5 \cdot 10^{-3}}{2} \therefore \boxed{W_{bc} = -750J}$$

$$\Delta U_{ciclo} = 0 = \sum \Delta U = 300 - \Delta U_{bc} - 100 = 0 \therefore \boxed{\Delta U_{bc} = -200J}$$

$$\Delta U = Q - W \Rightarrow -200 = Q + 750 \therefore \boxed{Q_{bc} = -950J}$$

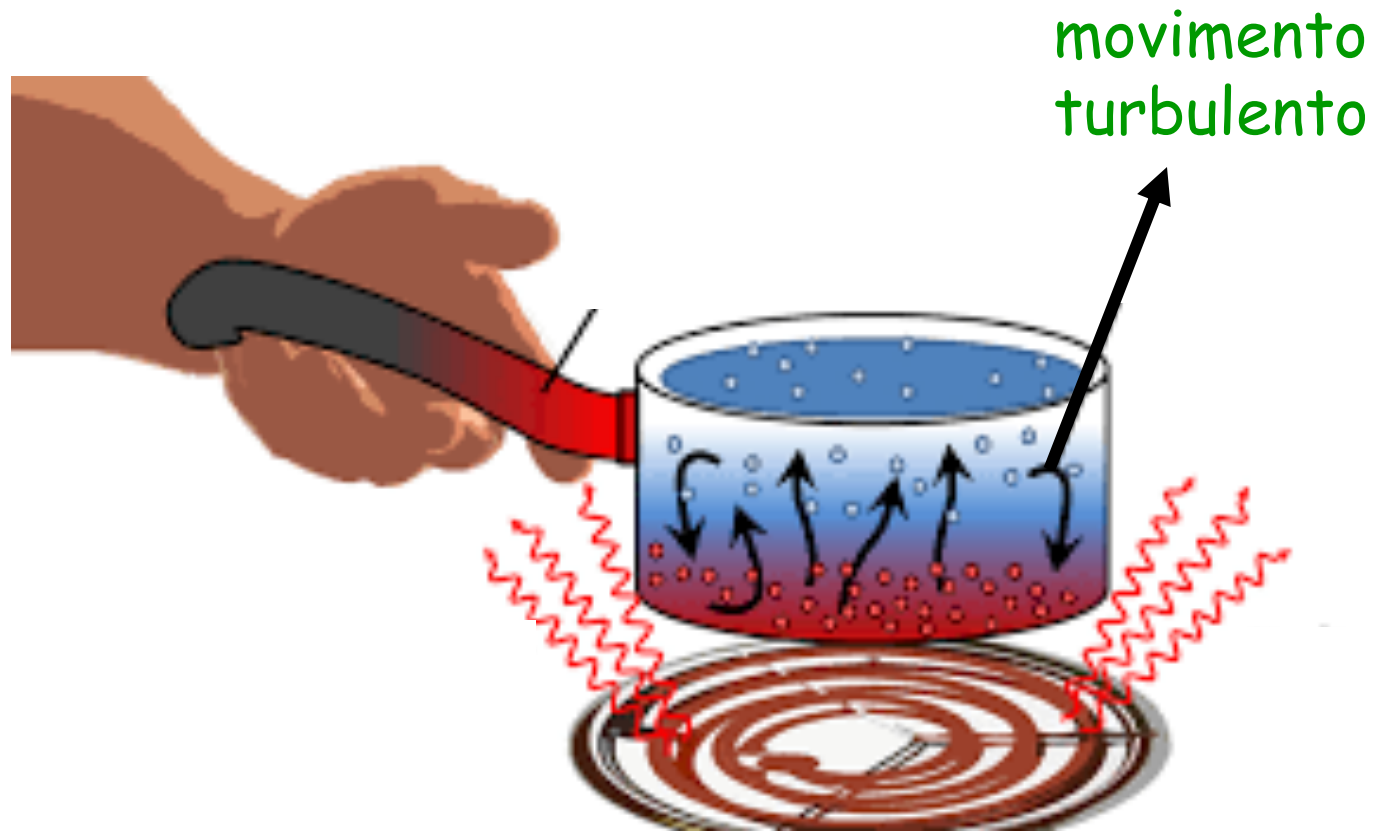
IV) Ciclo:

$$W_{ciclo} = \sum W = 500 - 750 + 0 \therefore \boxed{W_{ciclo} = -250J}$$

$$Q_{ciclo} = \sum Q = 800 - 950 - 100 \therefore \boxed{Q_{ciclo} = -250J}$$

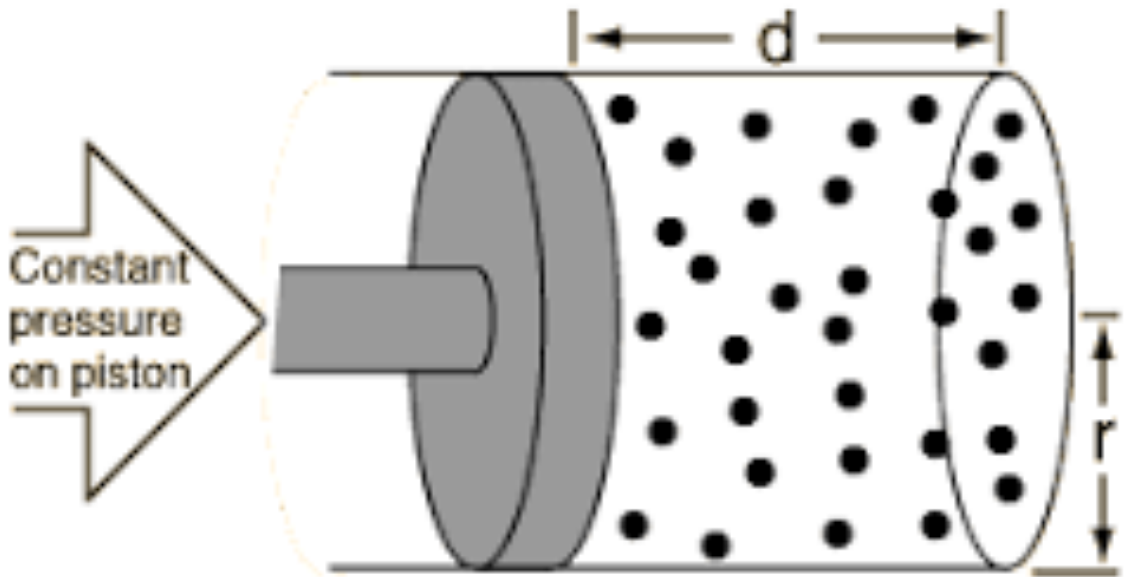
Fim

Calor no processo irreversível



P , V e T não estão bem definidos !

Pressão constante
na "tampa"



Trabalho feito
sobre o gas

Work done on gas:

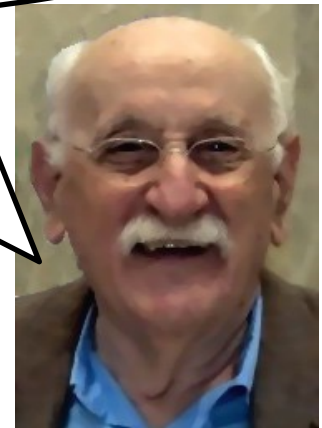
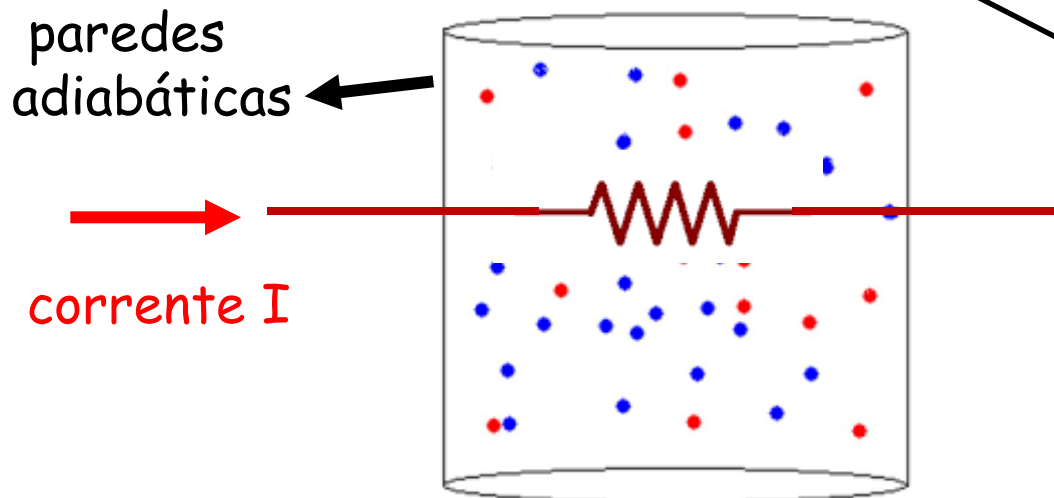
$$W = Fd = \left[\frac{F}{A} \right] [Ad] = P \Delta V$$

$$W = p (V_f - V_i) \left\{ \begin{array}{ll} V_f > V_i & W_{i \rightarrow f} > 0 \\ V_f < V_i & W_{i \rightarrow f} < 0 \end{array} \right.$$

Equivalente mecânico do calor

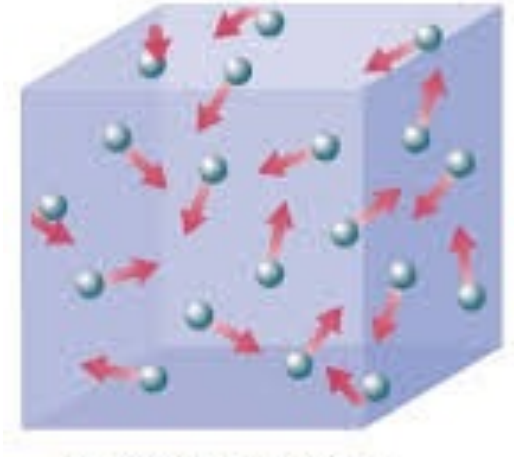
Da experiência de Joule: 1 caloria = 4.186 Joule

Exemplo: Uma resistência de $68\ \Omega$ é imersa em 1 l de água. Quando se faz passar uma corrente de 1A, a temperatura da água sobe de 1°C por minuto. Qual o valor correspondente do equivalente mecânico da caloria dado por essa experiência?



Moyses Nussenzveig

Equilíbrio Térmico

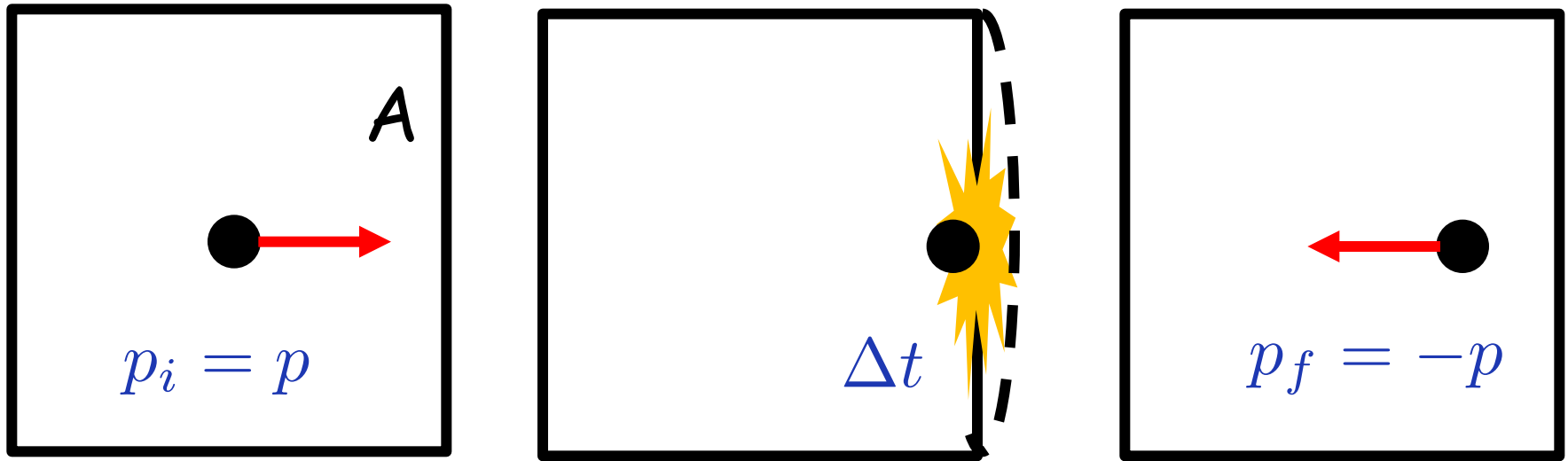


Distribuição de velocidades dada por:

$$f(v) = C e^{-mv^2/2kT}$$

Temperatura e pressão **constantes no tempo !**

Pressão



$$P = -\frac{2p}{A \Delta t} = -\frac{2mv}{A \Delta t}$$

maior velocidade (temperatura) maior pressão !

Lei zero da termodinâmica

"Se A está em equilíbrio com C e B está em equilíbrio com C, então A está em equilíbrio com B"

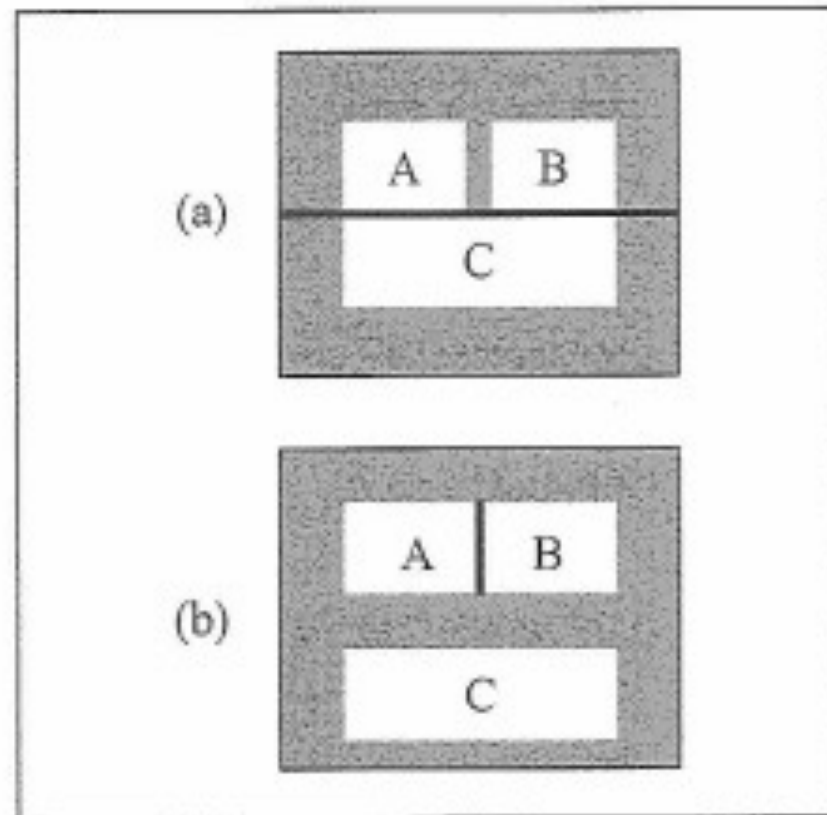
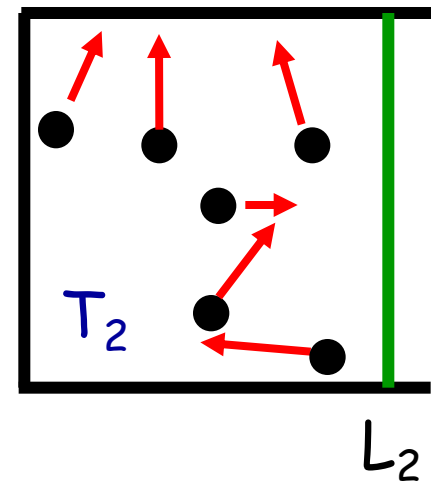
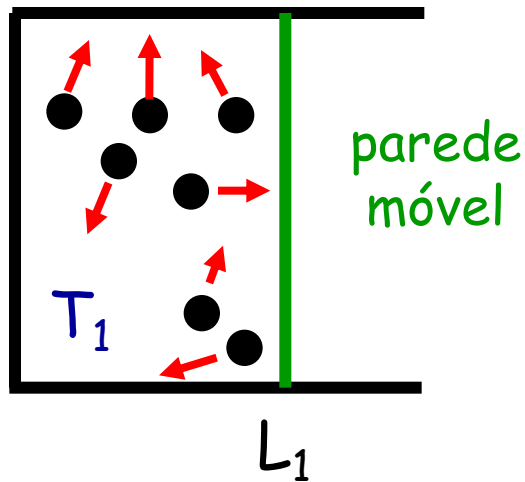


Figura 7.2 — Lei zero da termodinâmica

Maior temperatura



Maior volume



Volume é proporcional à temperatura

$$T \propto L$$

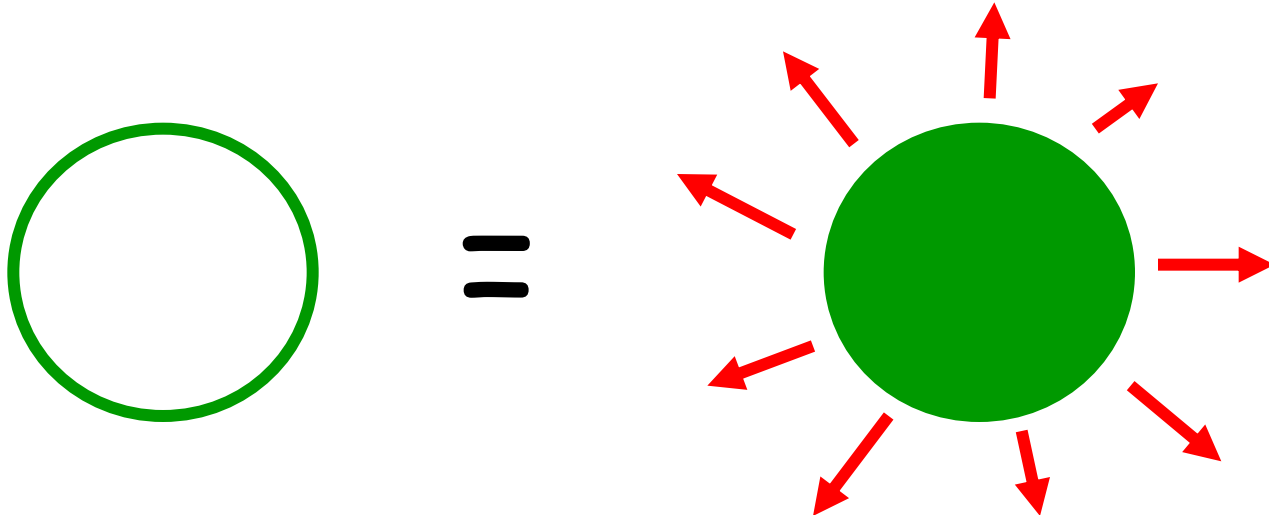
Termômetro

Problemas do capítulo 7

1 – Uma esfera oca de alumínio tem um raio interno de 10 cm e raio externo de 12 cm a 15°C. O coeficiente de dilatação linear do alumínio é $2,3 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$. De quantos cm^3 varia o volume da cavidade interna quando a temperatura sobe para 40°C? O volume da cavidade aumenta ou diminui?

$$\Delta V = V_0 \cdot 3\alpha \cdot \Delta T = [(4/3) \cdot \pi \cdot r^3] \cdot 3 \cdot (2,3 \cdot 10^{-5}) \cdot (40 - 15) = 2,3 \cdot \pi \cdot r^3, \text{ com } r = 10 \text{ cm}$$

$$\Delta V = 7,225 = 7,3 \text{ cm}^3$$



2 – Uma barra retilínea é formada por uma parte de latão soldada em outra de aço. A 20°C , o comprimento total da barra é de 30 cm, dos quais 20 cm de latão e 10 cm de aço. Os coeficientes de dilatação linear são $1,9 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ para o latão e $1,1 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ para o aço. qual o coeficiente de dilatação linear da barra?

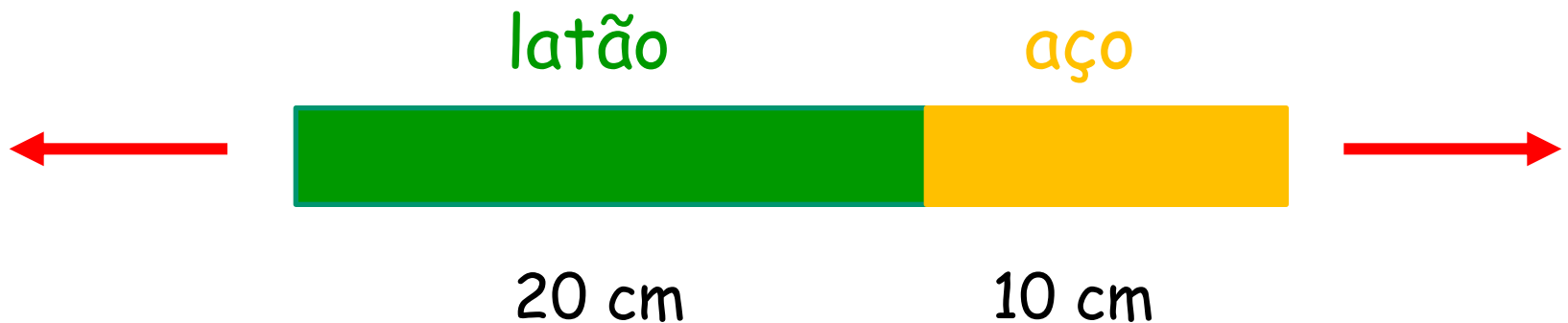
Para uma dada temperatura T: $\Delta T = T - T_0$

$$\left. \begin{aligned} \Delta L_L &= L_{0L} \cdot \alpha_L \cdot \Delta T = 20 \cdot 1,9 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta T \\ \Delta L_A &= L_{0A} \cdot \alpha_A \cdot \Delta T = 10 \cdot 1,1 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta T \end{aligned} \right\} \quad \text{(I)}$$

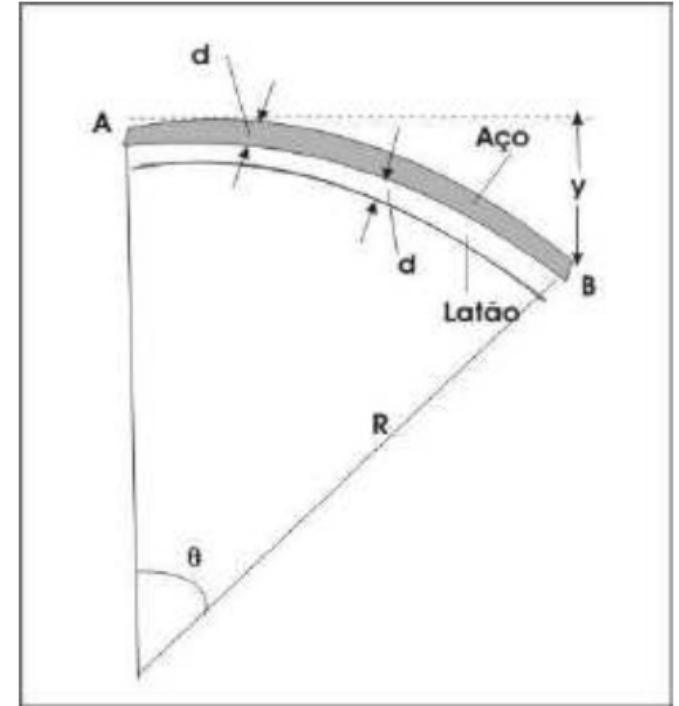
$$\Delta L = \Delta L_L + \Delta L_A = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad \text{(II)}$$

Somando (I) e substituindo em (II):

$$49 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta T = 30 \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad \Rightarrow \quad \boxed{\alpha = 1,63 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}}$$



3 - Uma tira bimetálica, usada para controlar termostatos, é constituída de uma lâmina estreita de latão, de 2 mm de espessura, presa lado a lado com uma lâmina de aço, de mesma espessura $d = 2 \text{ mm}$, por uma série de rebites. A 15°C , as duas lâminas têm o mesmo comprimento, igual a 15 cm, e a tira está reta. A extremidade A da tira é fixa; a extremidade B pode mover-se, controlando o termostato. A uma temperatura de 40°C , a tira se encurvou, adquirindo um raio de curvatura R, e a extremidade B se deslocou de uma distância vertical y. Calcule R e y, sabendo que o coeficiente de dilatação linear do latão é $1,9 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ e o do aço é $1,1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$.



$$\begin{aligned}
 \text{I)} \quad & \begin{cases} \Delta L = L_o \alpha_l \Delta T \Rightarrow L_l = L_o (1 + \alpha_l \Delta T) = 15,007125 \text{ cm} \\ \Delta L = L_o \alpha_a \Delta T \Rightarrow L_a = L_o (1 + \alpha_a \Delta T) = 15,004123 \text{ cm} \end{cases} \\
 & \theta = \frac{L_l}{R} = \frac{L_a}{R - d} \Rightarrow L_l(R - d) = L_a R \Rightarrow R = \frac{d L_l}{L_l - L_a} \\
 & \therefore R = \frac{3,00285}{0,00300} \Rightarrow \boxed{R = 10 \text{ m}}
 \end{aligned}$$