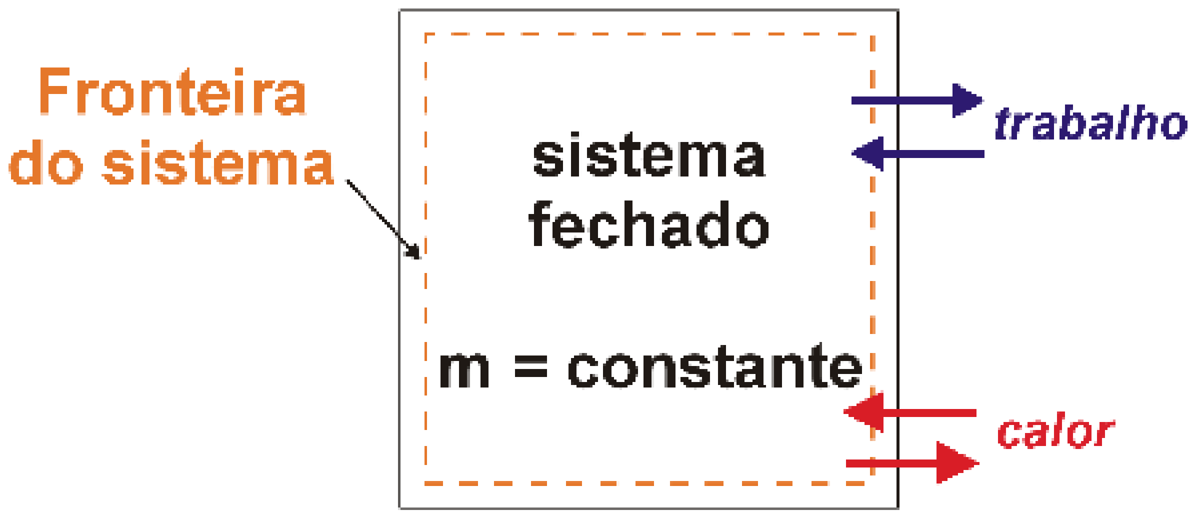
Termodinâmica

Trabalho e calor

Trabalho e calor

✣Energia pode atravessar a fronteira de um sistema fechado apenas através de duas formas distintas: *trabalho* ou *calor*. Ambas são interações energéticas entre um sistema e a sua vizinhança.

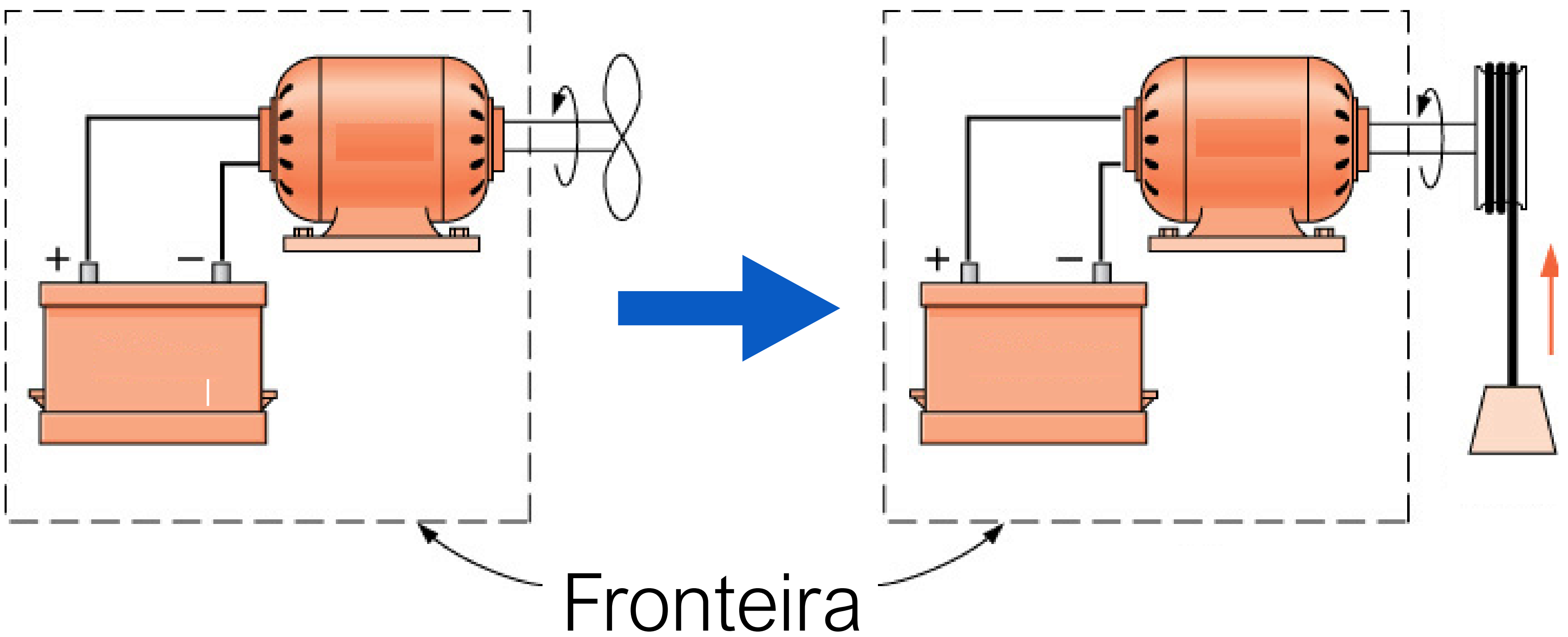


✣**Calor** – interação energética entre o sistema e a vizinhança provocada por uma diferença de temperatura.

✣**Trabalho** – interação energética entre o sistema e a vizinhança cujo único efeito sobre as vizinhanças é equivalente ao levantamento de um peso.

Interações de trabalho e calor?

Exemplo 1:

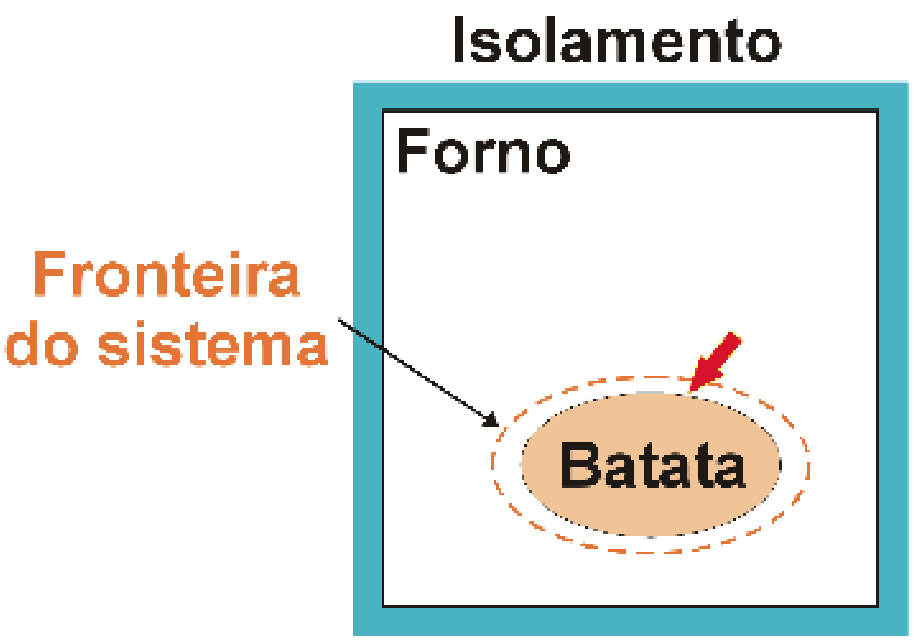


Levantamento de um peso!

Resp. Trabalho.

Interações de trabalho e calor?

Exemplo 2:

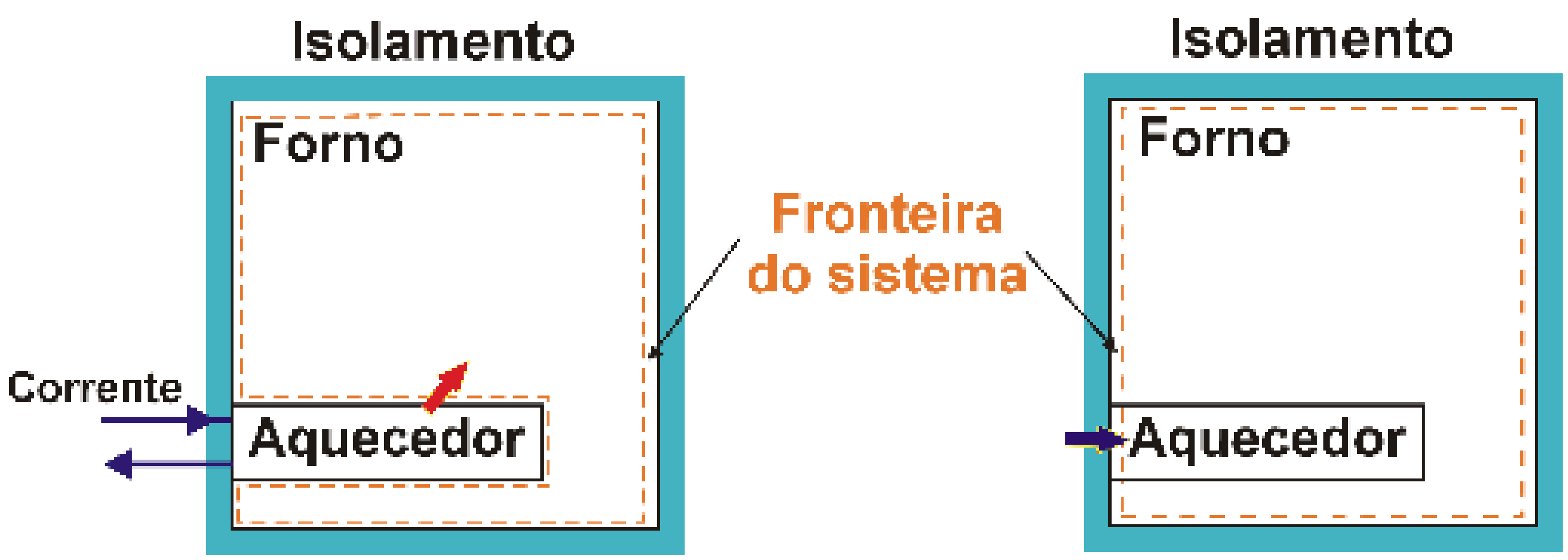


Diferença de temperatura entre os gases e a parede do forno e a batata!

Resp. Calor!

Interações de trabalho e calor?

Exemplo 3 e 4:



Resp. Calor!

Resp. Trabalho!

Trabalho e calor

1. Trabalho e calor são fenômenos de fronteira. Ambos são observados na fronteira do sistema e são responsáveis pela transferência de energia entre o sistema e sua vizinhança;

2. Trabalho e calor são fenômenos transitórios. Os sistemas não possuem trabalho ou calor, isto é, ambos não são propriedades termodinâmicas;

    a. Ambos estão associados a um processo e não a um estado. Portanto não são propriedades termodinâmicas;

    b. Ambos são funções de caminho e não de ponto.

Trabalho e calor

Função de ponto versus Função de caminho

São Paulo

Altura = 767 m

- **Altura é uma função de ponto!**
- **Distância é uma função de caminho!**

distância e altura?

Rodovias Anchieta (74,3km)

Rodovias dos imigrantes (83km)

Santos

Altura = 0 m

Definições

Trabalho: W kJ

Calor: Q kJ

Diferenciais de funções de caminho: δW e δQ

Trabalho específico: $w = W/m$ kJ/kg

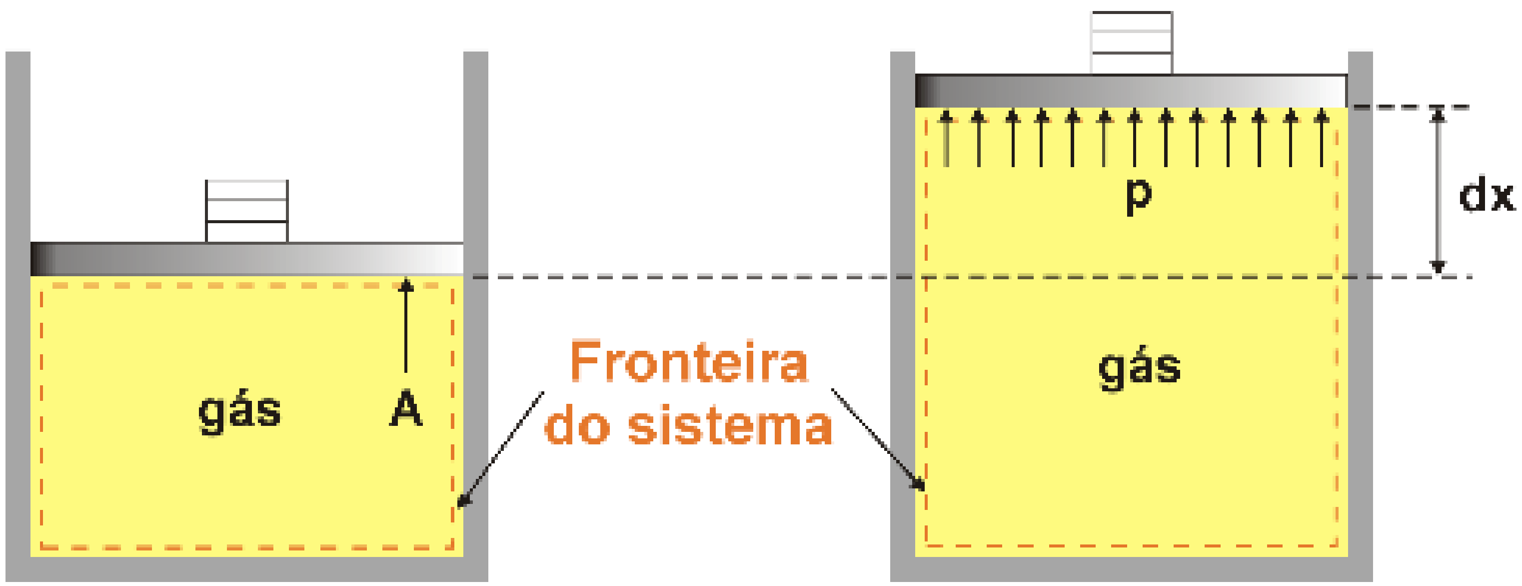
Calor por unidade de massa: $q = Q/m$ kJ/kg

Potência: $\dot{W} = \delta W/dt$ kW

Taxa de transferência de calor: $\dot{W} = \delta Q/dt$ kW

Trabalho realizado na fronteira móvel de um sistema simples compressível

Considere a figura:



Em Mecânica:

$$W = \int_1^2 \vec{F} \cdot d\vec{x}$$

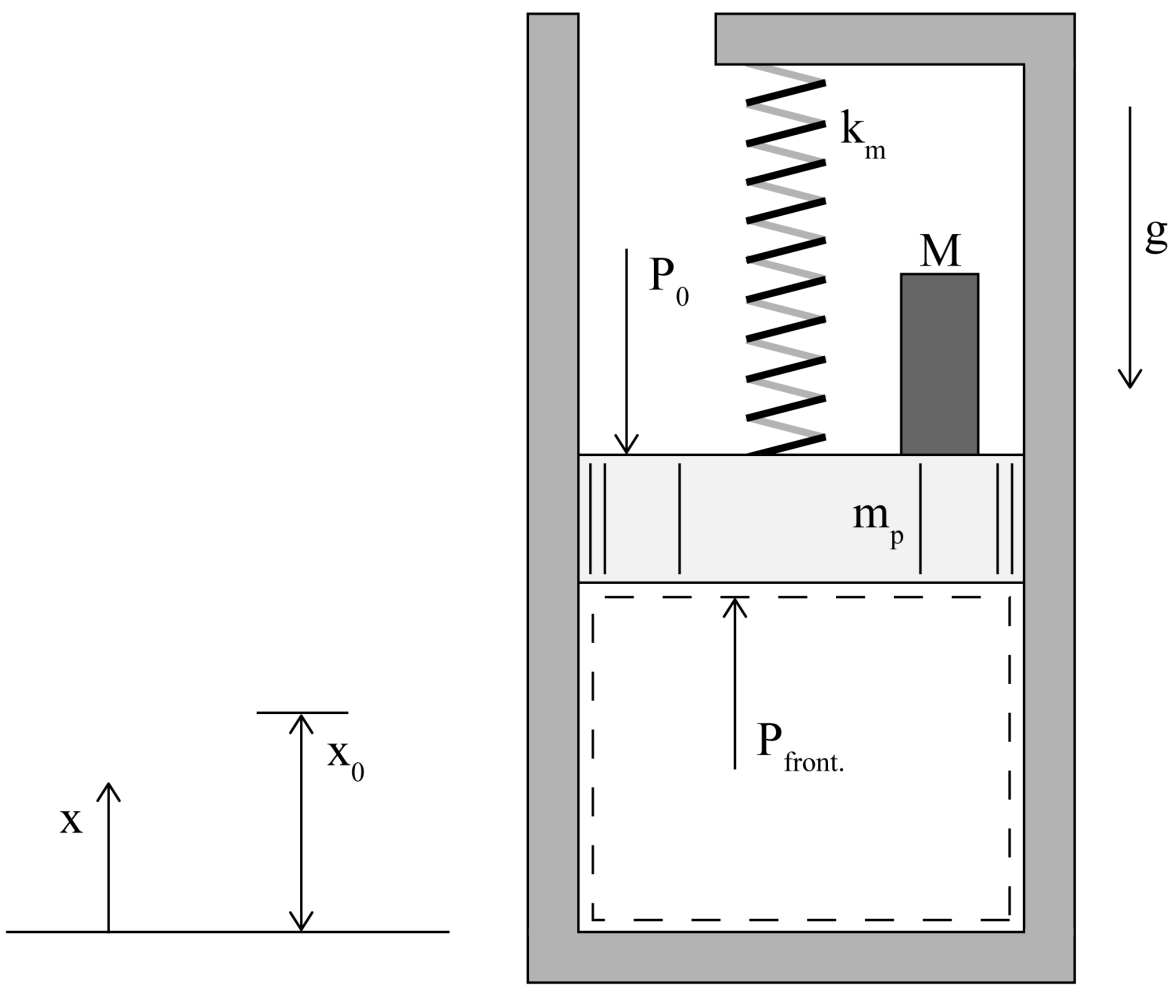
Assim:

$$\delta W = PAdx \rightarrow \delta W = PdV \rightarrow W = \int_1^2 PdV$$

Trabalho realizado na fronteira móvel de um sistema simples compressível – Forças Externas

Diagrama de corpo livre no êmbolo de área A e aceleração nula:

$$m_p a = 0 = \sum F_{\uparrow} - \sum F_{\downarrow}$$



Em x_0 a mola está distendida

$$\sum F_{\uparrow} = P_{front} A$$

$$\sum F_{\downarrow} = (M + m_p) g + P_o A + k_m (x - x_0)$$

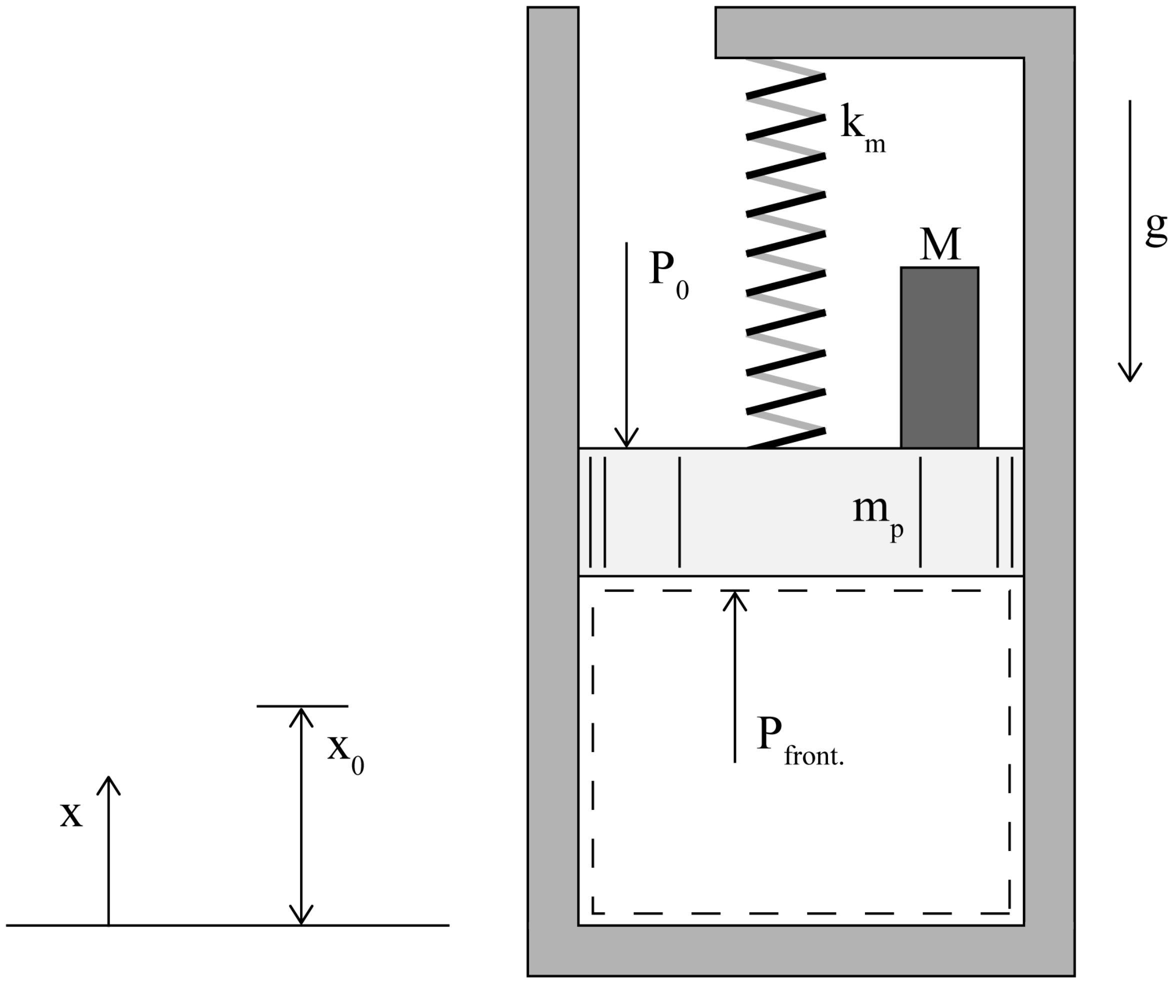
$$P_{front} A = (M + m_p) g + P_o A + k_m (x - x_0)$$

$$P_{front} = (M + m_p)\frac{g}{A} + P_o + \frac{k_m}{A}(x - x_0)$$

$$P_{front} = (M + m_p)\frac{g}{A} + P_o + \frac{k_m}{A^2}(V - V_0)$$

Trabalho realizado na fronteira móvel de um sistema simples compressível – Forças Externas

Diagrama de corpo livre no êmbolo de área A e aceleração nula:



$$P_{front} = (M + m_p)\frac{g}{A} + P_o + \frac{k_m}{A^2}(V - V_0)$$

$$P_{front} = \underbrace{(M + m_p)\frac{g}{A} + P_o - \frac{k_m}{A^2}V_0}_{C_1} + \underbrace{\frac{k_m}{A^2}}_{C_2}V$$

$$P_{front} = C_1 + C_2 V$$

Trabalho

Assim, conhecidos ($P_{front,1}$, V1) e ($P_{front,2}$,V2) pode-se determinar a expressão para pressão na fronteira:

$$P_{front,1} = C_1 + C_2 V_1 \qquad P_{front,2} = C_1 + C_2 V_2$$

Subtraindo uma da outra:

$$P_{front,2} - P_{front,1} = C_2 (V_2 - V_1)$$

$$ou$$

$$C_2 = \frac{P_{front,2} - P_{front,1}}{(V_2 - V_1)}$$

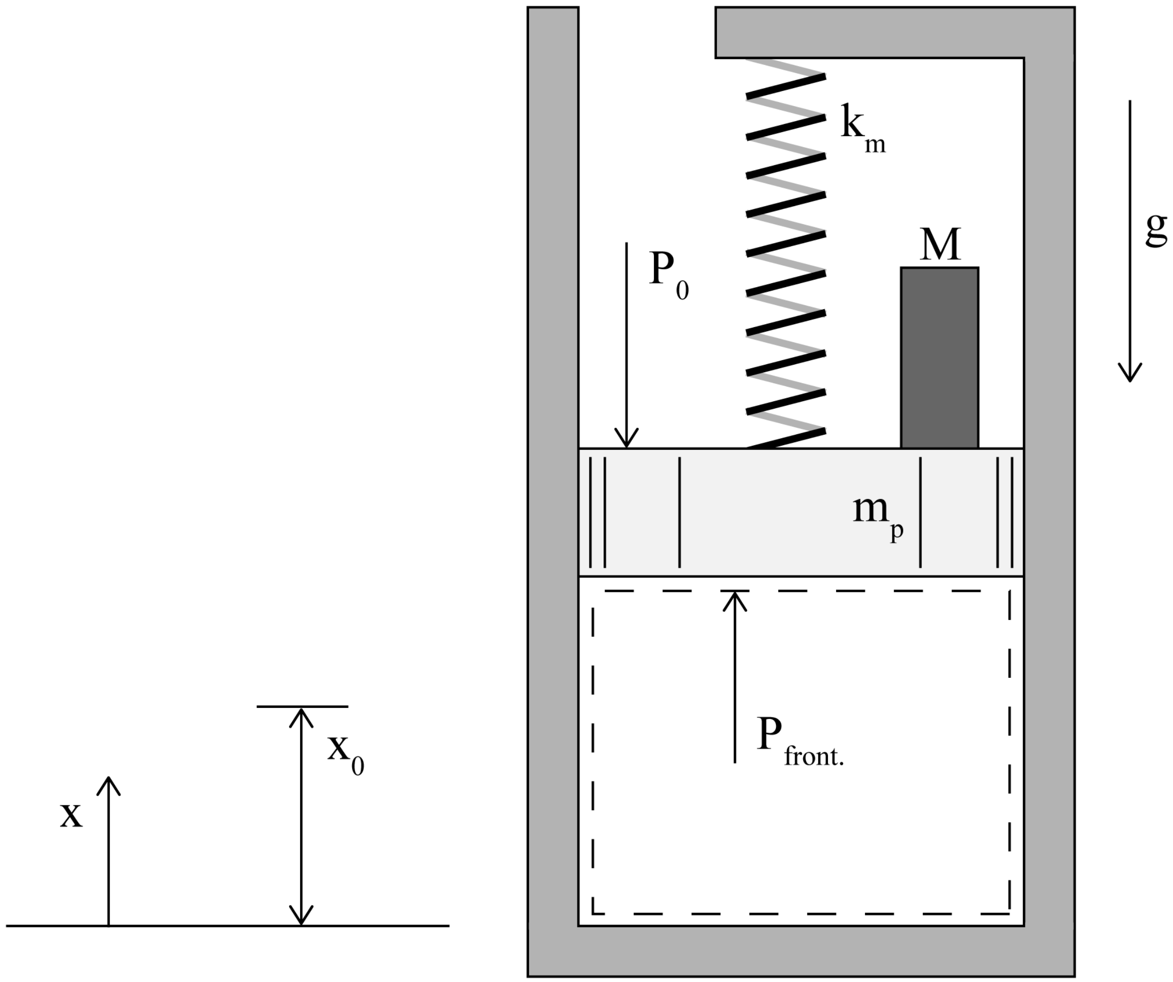
então

$$C_2 = \frac{k_m}{A^2} = \frac{P_{front,2} - P_{front,1}}{(V_2 - V_1)}$$

$$e$$

$$C_1 = P_{front,1} - \left(\frac{P_{front,2} - P_{front,1}}{(V_2 - V_1)} \right) V_1$$

Trabalho realizado na fronteira móvel de um sistema simples compressível – Forças Externas



$$W = \int_1^2 \vec{F} \cdot d\vec{x}$$

$$W_{sist} = \int_1^2 \vec{F}_{front} \cdot d\vec{x}$$

Para uma fronteira que se expande:

$$W_{sist} = \int_1^2 \left|F_{front}\right| \left|dx\right|$$

Para uma fronteira que se contrai:

$$W_{sist} = -\int_1^2 \left|F_{front}\right| \left|dx\right|$$

Trabalho realizado na fronteira móvel de um sistema simples compressível – Forças Externas

Substituindo-se a expressão de P_{front}:

$$W_{1-2} = \int_1^2 (C_1 + C_2 V)dV = C_1 \left(V\right)_1^2 + \frac{1}{2} C_2 \left(V^2\right)_1^2$$

$$W_{1-2} = C_1 (V_2 - V_1) + \frac{1}{2} C_2 \left(V_2^2 - V_1^2\right)$$

$$W_{1-2} = \left(P_{front,1} - \left(\frac{P_{front,2} - P_{front,1}}{(V_2 - V_1)} \right) V_1 \right)(V_2 - V_1) + \frac{1}{2}\left(\frac{P_{front,2} - P_{front,1}}{(V_2 - V_1)} \right)\left(V_2^2 - V_1^2\right)$$

$$W_{1-2} = \left(\frac{(V_2 - V_1)P_{front,1} - (P_{front,2} - P_{front,1})V_1}{(V_2 - V_1)} \right)(V_2 - V_1) + \frac{1}{2}\left(\frac{P_{front,2} - P_{front,1}}{(V_2 - V_1)} \right)\left(V_2 - V_1\right)\left(V_2 + V_1\right)$$

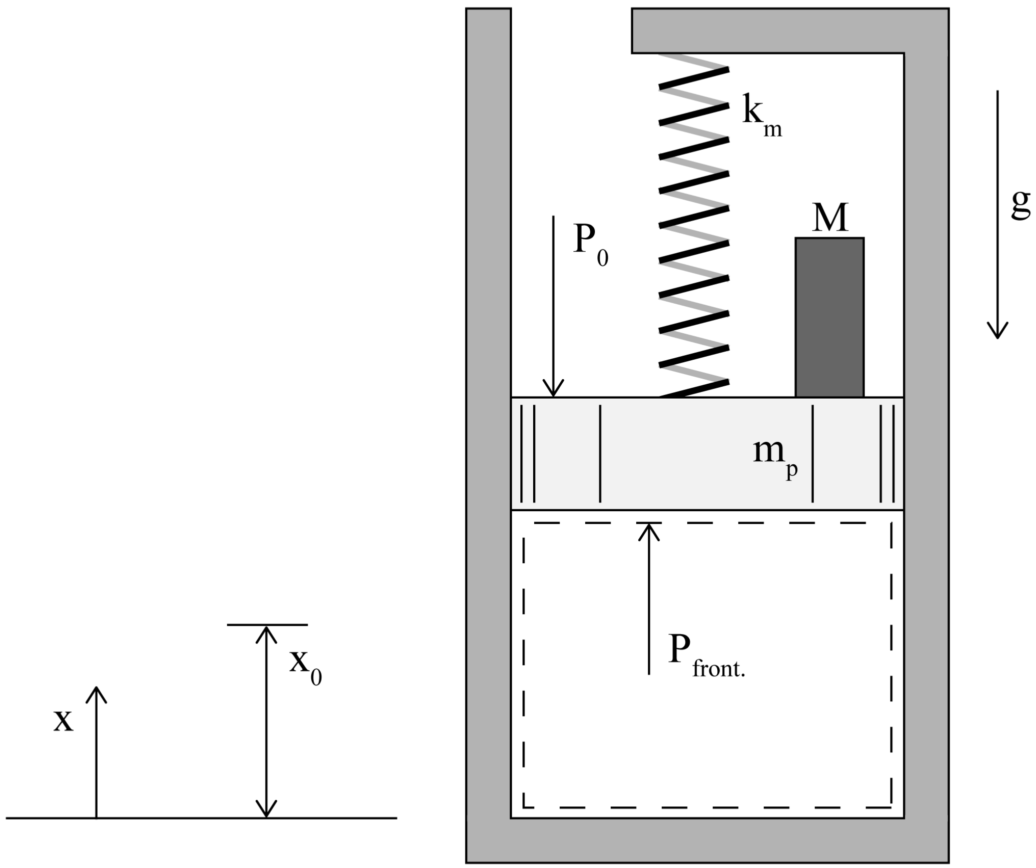
Trabalho realizado na fronteira móvel de um sistema simples compressível – Forças Externas

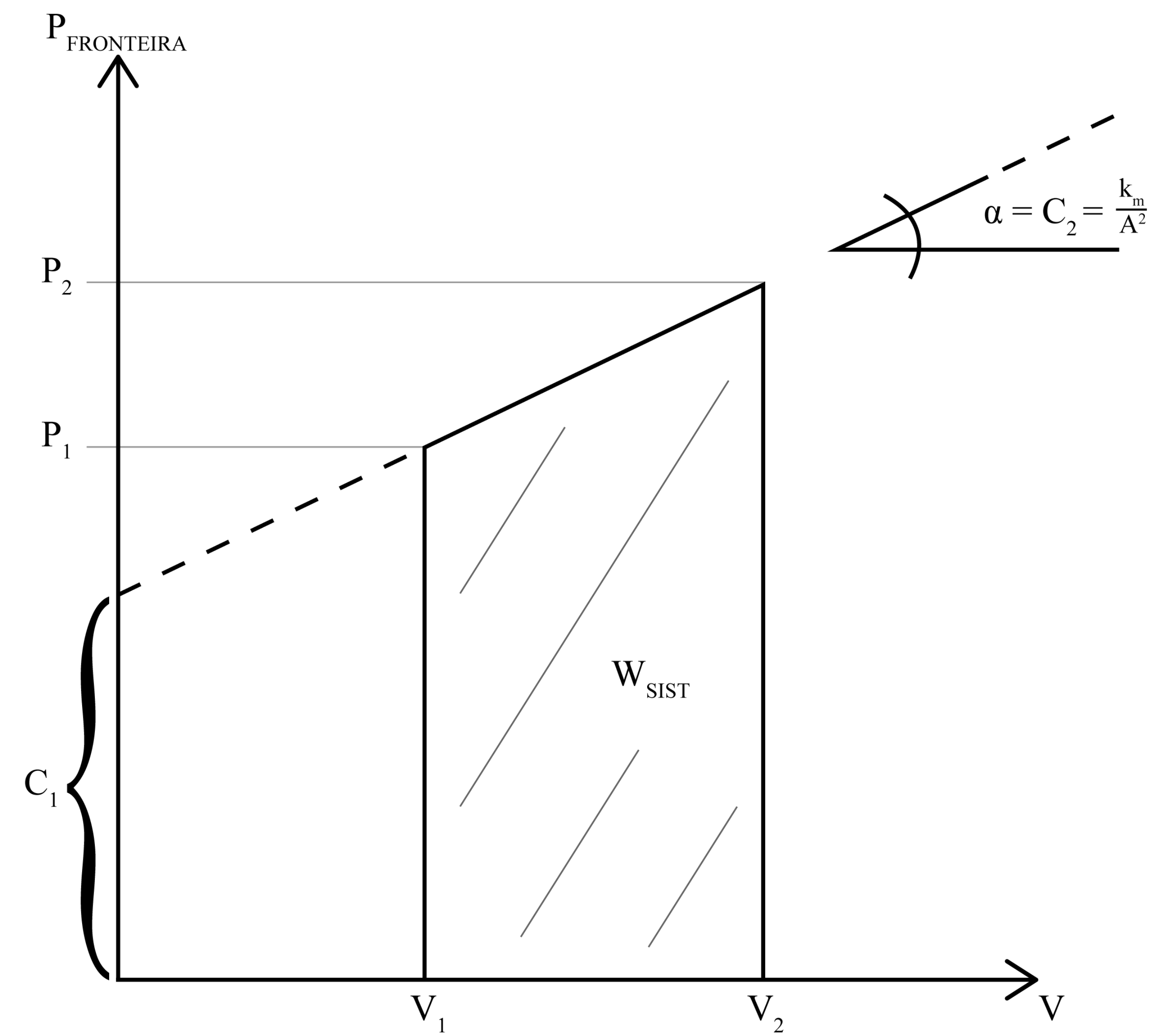
$$W_{1-2} = \left(\frac{(V_2 - V_1)P_{front,1} - (P_{front,2} - P_{front,1})V_1}{(V_2 - V_1)} \right)(V_2 - V_1) + \frac{1}{2}\left(\frac{P_{front,2} - P_{front,1}}{(V_2 - V_1)} \right)\left(V_2 - V_1\right)\left(V_2 + V_1\right)$$

$$W_{1-2} = \frac{1}{2}\left(P_{front,2} + P_{front,1}\right)\left(V_2 - V_1\right)$$

Trabalho realizado na fronteira móvel de um sistema simples compressível – Forças Externas

$$W_{1-2} = \frac{1}{2}\left(P_{front,2} + P_{front,1}\right)\left(V_2 - V_1\right)$$





$$P_{front} = \underbrace{(M + m_p)\frac{g}{A} + P_o - \frac{k_m}{A^2}V_0}_{C_1} + \underbrace{\frac{k_m}{A^2}}_{C_2}V$$

Trabalho realizado na fronteira móvel de um sistema simples compressível – Forças Externas

$$W_{1-2} = \frac{1}{2}\left(P_{front,2} + P_{front,1}\right)\left(V_2 - V_1\right)$$

Para pensar:

1) Onde está a parcela do trabalho da Pressão Atmosférica?

2) Como ficaria a expressão do trabalho nas seguintes situações:

•Se houvesse duas molas lineares;

•Se o cilindro fosse fechado e houvesse um gás na parte superior do êmbolo;

•Se houvesse, na parte de cima do êmbolo, um líquido que transbordasse à medida que o êmbolo subisse.

Trabalho

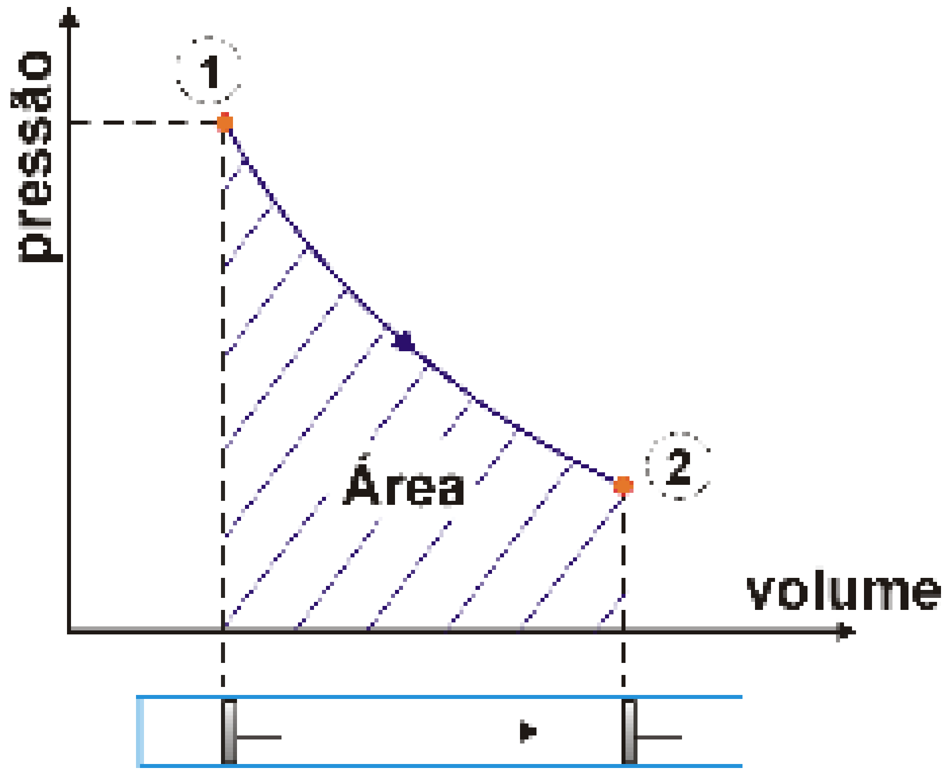
Trabalho realizado na fronteira móvel de um sistema simples compressível

Deduzimos: $W = \int_1^2 P dV$ **_considerando que a pressão na superfície inferior do pistão é uniforme_**

Se o processo ocorrer lentamente, processo quase-estático, podemos dizer que um único valor de pressão é representativo do sistema!

Trabalho realizado na fronteira móvel de um sistema simples compressível

Note, ainda, que em um processo quase-estático, o módulo do trabalho é igual a área sob a curva em um diagrama P (sistema) - v:



Observe, também, que se fossemos de um 1 a 2 por outros caminhos a área sob a curva seria diferente e, consequentemente, o trabalho.

Trabalho

Trabalho realizado na fronteira móvel de um sistema simples compressível

Trabalho pode ser negativo ou positivo. Recorde-se que em Mecânica ele é definido como o produto escalar entre força e deslocamento.

$$W = \int_1^2 \vec{F} \cdot d\vec{x}$$

□W > 0 quando força e deslocamento têm o mesmo sentido, trabalho realizado pelo sistema sobre a vizinhança;

□W < 0 quando força e deslocamento têm sentidos opostos, trabalho realizado sobre o sistema pela vizinhança.

Trabalho de fronteira móvel

Na determinação da integral pela pressão do sistema:

$$W = \int_1^2 P dV$$

Temos duas classes de problemas:

- Relação P-V obtida experimentalmente ou dada na forma gráfica;
- Relação P-V tal que possa ser ajustada por uma função analítica.

O processo politrópico é um exemplo do segundo tipo.

Processo politrópico

Obedece a relação: $P.V^n = constante$

$c/\ n$ entre ∞ e $-\infty$

Isto é: $P_1.V_1^n = P_2.V_2^n = ... = constante$

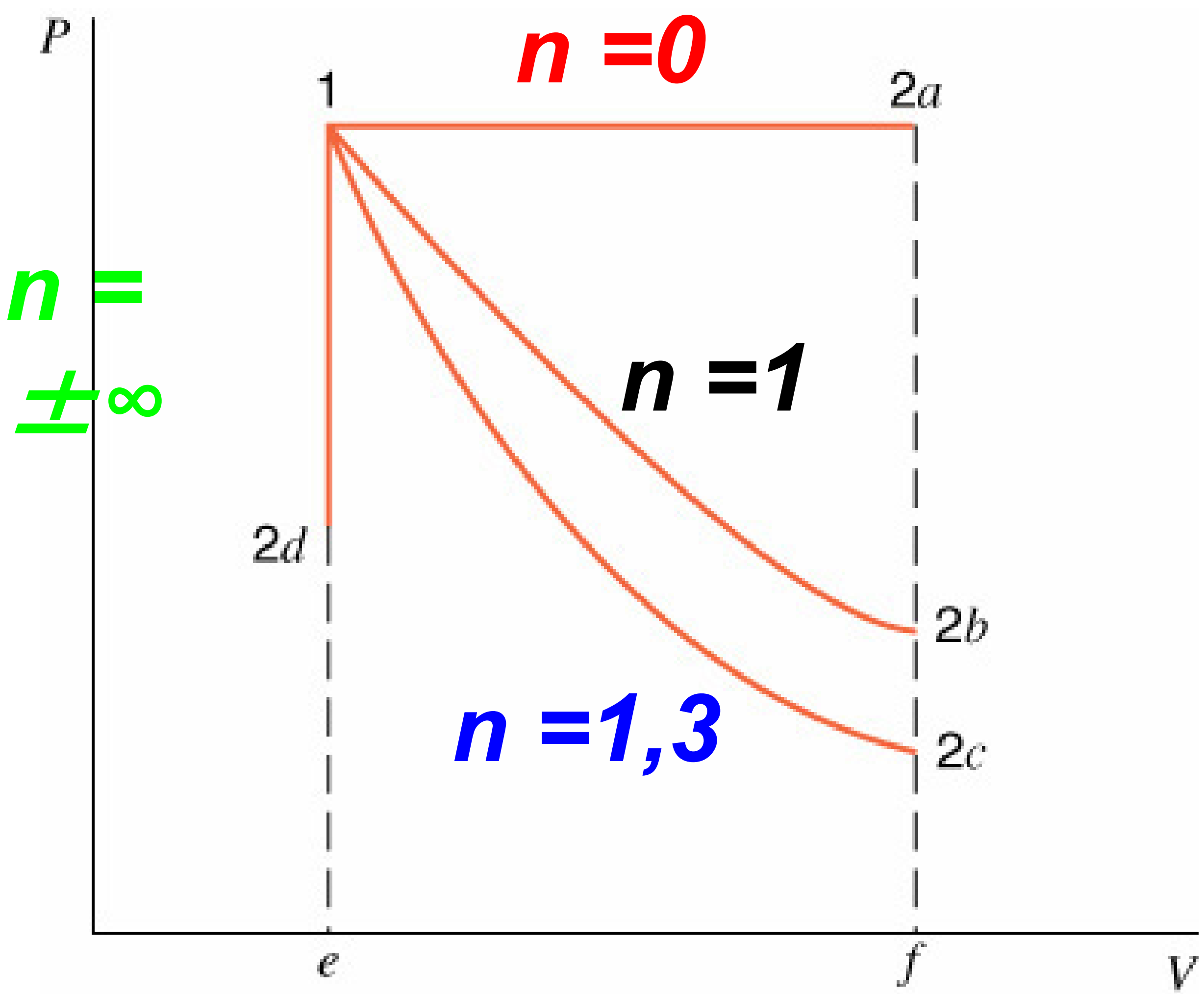
Conhecida a relação entre P e V podemos realizar a integração:

$$\int_1^2 P\,dV = \frac{P_2V_2 - P_1V_1}{1-n} \qquad n \neq 1$$

ou

$$\int_1^2 P\,dV = P_1V_1 \ln\frac{V_2}{V_1} \qquad n = 1$$

Processo politrópico: $P.V^n$ = constante



n =0: pressão constante

n =1,3

n = ±∞: volume constante

n =1: isotérmico (se válido o modelo de Gás perfeito), PV = mRT

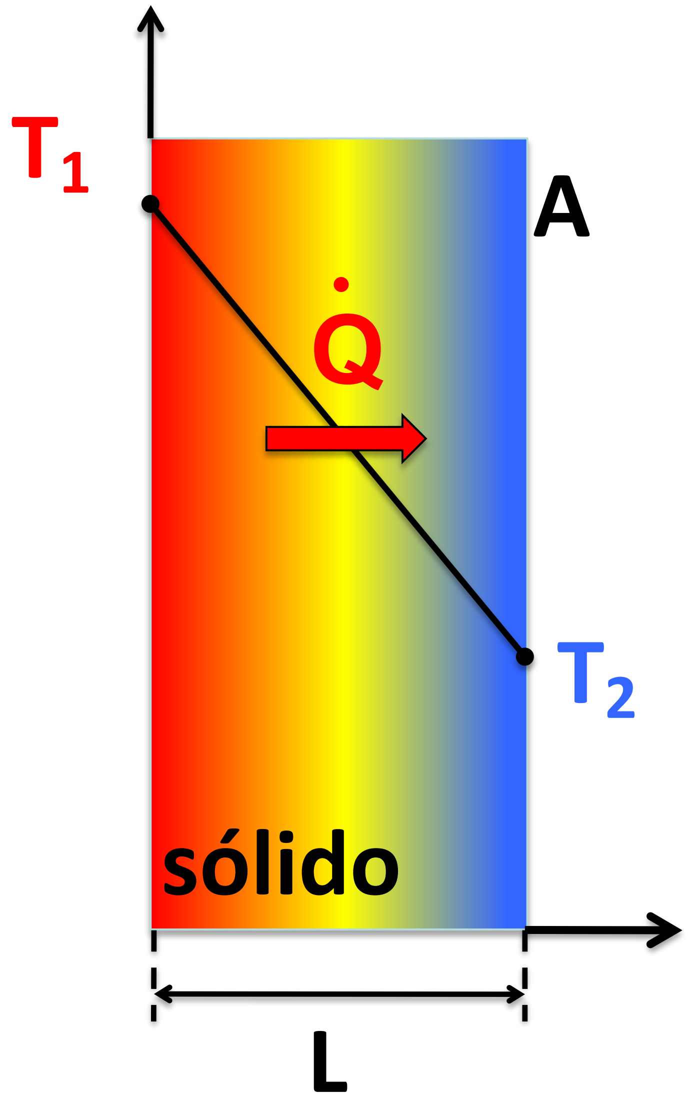
Mecanismos de transferência de calor

Mecanismos

- ***Condução – transferência em sólidos ou líquidos estacionários devido ao movimento aleatório de átomos, moléculas e/ou elétrons constituintes;***
- ***Convecção – transferência devido ao efeito combinado do movimento global e aleatório de um fluido sobre uma superfície;***
- ***Radiação – energia emitida pela matéria devido a mudanças na configuração de seus elétrons e transportada por ondas eletromagnéticas (ou fótons).***

Mecanismos de transferência de calor

Condução



Joseph Fourier
(1768-1830)

Lei de Fourier:

$$\dot{Q} = -kA\frac{\Delta T}{L}$$

$\dot{Q}$ *-Taxa de transferência de calor* W

k - Condutividade térmica $\frac{W}{m \cdot K}$

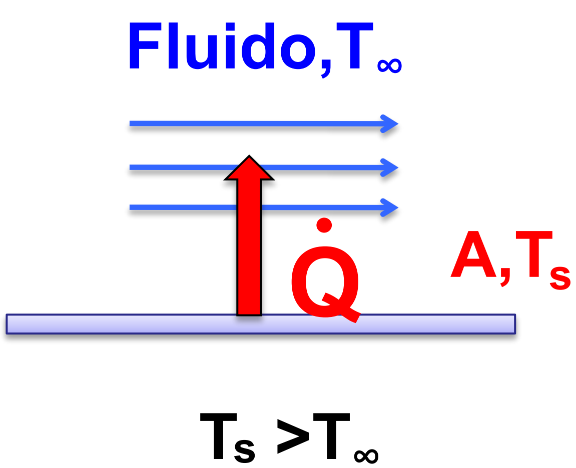
Condutividade térmica de alguns materiais a temperatura ambiente

Material	k, W/(m·K)
Cobre	401
Alumínio	240
Ferro	80,2
Aço (AISI 1010)	63,9
Aço inox (AISI 304)	14,9
Vidro	1,4
Tijolo, comum	0,72
Solo	0,52
Pele	0,50
Tijolo refratário (Si)	0,25
Ar	0,0263

Material	k, W/(m·K)
Fibra de vidro (placa)	0,058
Placa de fibra mineral	0,049
Fibra de vidro (manta)	0,038
Poliestireno, expandido	0,027
Uretana, espuma	0,026
Materiais em camadas,	
Folhas de alumínio,	0,0016
vácuo	

Fonte: Incropera, F.P., DeWitt, D.P., Bergman, T.L., Lavine, A.S. *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa, 6a ed., Rio de Janeiro, LTC, 2008*.

Convecção



Isaac Newton
(1643-1727)

Lei de Newton do resfriamento:

$$\dot{Q} = hA\left(T_s - T_\infty\right)$$

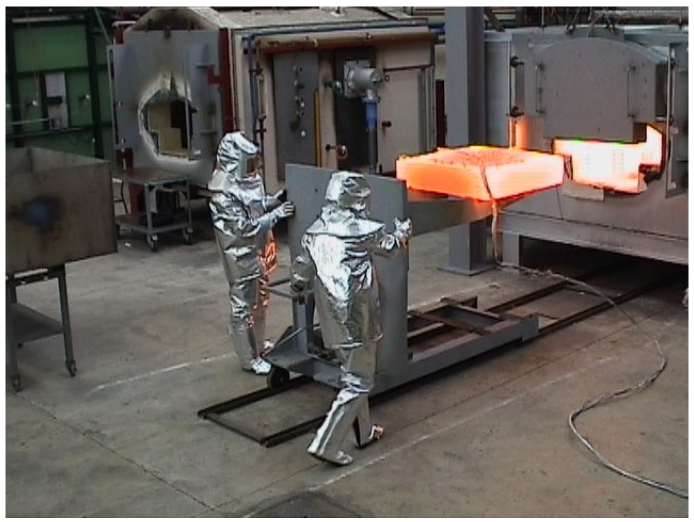
h Coeficiente de transferência de calor por convecção $\dfrac{W}{m^2 \cdot K}$

Valores típico de coeficientes do transferência de calor

Processo	**h, W/(m^2K)**
Convecção natural	
Gases	2 – 25
Líquidos	50 – 1.000
Convecção forçada	
Gases	10 – 300
Líquidos	100 – 2.000
Convecção com mudança de fase	
Ebulição e condensação	2.500 – 100.000

Calor

Radiação

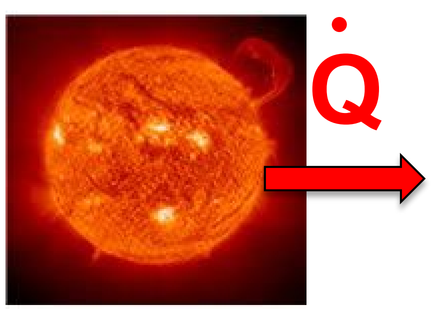


Joseph Stefan
(1835-1893)

Ludwig Boltzmann
(1844-1903)

Corpo negro

$$\dot{Q} = \sigma A T_s^4$$



σ Constante de Stefan-Boltzmann 5,67x10^{-8}W/m^{2}K^4.

Trabalho e calor

Convenções de sinal

□Q > 0 quando o calor é "transferido" da vizinhança para o sistema;

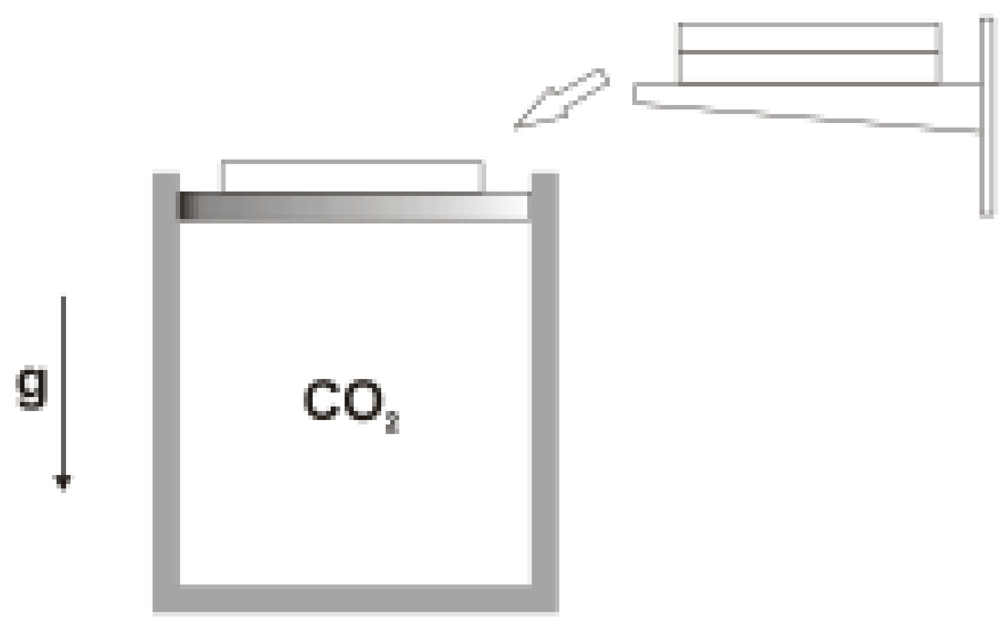
□Q < 0 quando o calor é "transferido" do sistema para a vizinhança;

□W > 0 trabalho realizado pelo sistema sobre a vizinhança;

□W < 0 trabalho realizado sobre o sistema pela vizinhança.

4.51:

O conjunto cilindro-êmbolo contém, inicialmente, 0,2 m^3 de dióxido de carbono a 300 kPa e 100 ^{o}C. Os pesos são então adicionados a uma velocidade tal que o gás é comprimido segundo a relação $p.V^{1,2}$=constante. Admitindo que a temperatura final seja igual a 200 ^{o}C determine o trabalho realizado neste processo.



4.51: Solução

Hipóteses:

1. O sistema é o CO_2 contido no conjunto;
2. O processo de 1 para 2 é de quase-equilíbrio;
3. Os estado 1 e 2 são estados de equilíbrio;
4. O gás se comporta como perfeito nos estados 1 e 2.

4.51: Solução

- **Trabalho realizado** $W = \int_1^2 P dV$

$$\int_1^2 P\,dV = \frac{P_2V_2 - P_1V_1}{1-n}$$

considerando gás perfeito, $P_2V_2 - P_1V_1 = m.R_{CO2}.(T_2 - T_1)$

Temos as duas temperaturas mas precisamos calcular a massa. Esta pode ser obtida a partir da equação dos gases perfeito e o estado 1.

$m = P_1V_1 / R_{CO2}T_1 = 300.0{,}2/0{,}189.373 = 0{,}851$ kg $\quad$ $m = 0{,}851$ kg

4.51: Solução

Trabalho realizado

considerando gás perfeito, $W_{1\text{-}2} = mR_{CO2}(T_2 - T_1) / (1-n)$

$$W_{1\text{-}2} = 0{,}851 . 0{,}189 . (200-100) / (1-1{,}2)$$

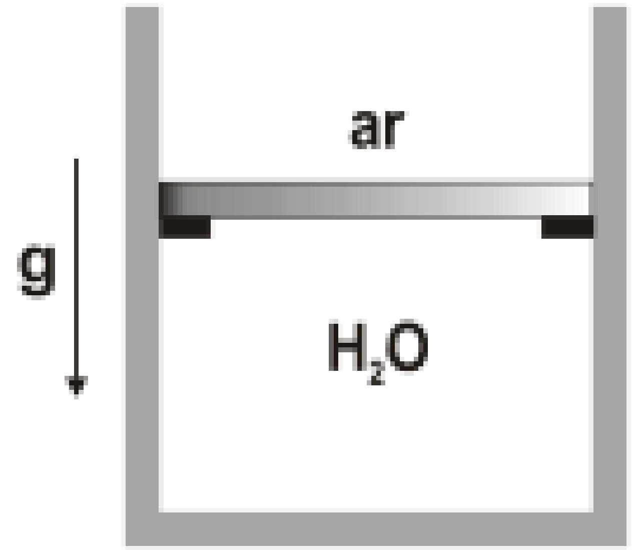
$$\mathbf{W_{1\text{-}2} = -80{,}4kJ}$$

Comentário

O sinal negativo indica que a vizinhança realizou trabalho sobre o sistema.

Extra 1:

Considere o conjunto cilindro-êmbolo mostrado na figura. A massa do êmbolo é de 101 kg e sua área de 0,01 m^2. O conjunto contém 1 kg de água ocupando um volume 0,1m^3. Inicialmente, a temperatura da água é 20 ^oC e o pistão repousa sobre os esbarros fixados na parede do cilindro, com sua superfície externa exposta à pressão atmosférica (p_0 = 101325 Pa). A que temperatura a água deve ser aquecida de modo a erguer o êmbolo? Se a água continuar a ser aquecida até o estado de vapor saturado, determine a temperatura final, o volume e o trabalho realizado no processo. Represente o processo em um diagrama p-V.



Extra 1: Solução

Temos dois processos e três estados. O estado 1 é o inicial, o 2 é quando o êmbolo não precisa mais do batente para se manter em repouso e o estado 3 é o final.

Hipóteses:

1. O sistema é a água contida no conjunto;
2. Os processos são de quase-equilíbrio;
3. Os estados 1, 2 e 3 são estados de equilíbrio;
4. Não há atrito entre o pistão e o cilindro.

Extra 1: Solução

📖 **Estado 1**: Definido, pois conhecemos v e T.

$v_1 = 1/0,1 = 0,1\ m^3/kg$

Para identificar o estado 1 devemos consultar a tabela de saturação com T_1 = 20 °C (P_{sat} = 2,3385 kPa) e comparar o valor de v_1 com v_l e v_v. Como $v_l < v_1 < v_v$, temos líquido + vapor. Logo $P_1 = P_{sat}$.

O título pode ser prontamente calculado, $x_1=(v_1-v_l)/(v_v-v_l) = 0,00171$

Extra 1: Solução

Estado 2: Definido, pois conhecemos v e P.

$v_2 = v_1 = 0{,}1\ m^3/kg$

$P_2 = P_0 + mg/A = 101{,}325 + 10^{-3}.101.9{,}8/0{,}01 = 200\ kPa$

Para identificar o estado 2 devemos consultar a tabela de saturação com P_2 = 200 kPa (T_{sat} = 120,23ºC) e comparar o valor de v_2 com v_l=0,001061 e v_v=0,8857 m³/kg. Como $v_l < v_2 < v_v$, temos líquido + vapor. Logo $T_2 = T_{sat}$.

Resp. A água deve ser aquecida até 120,23 ºC para que o êmbolo comece a subir.

Extra 1: Solução

Estado 3: Definido, pois conhecemos P e x.

$x_3 = 1$ (vapor saturado) e $P_3 = P_2 = 200kPa$

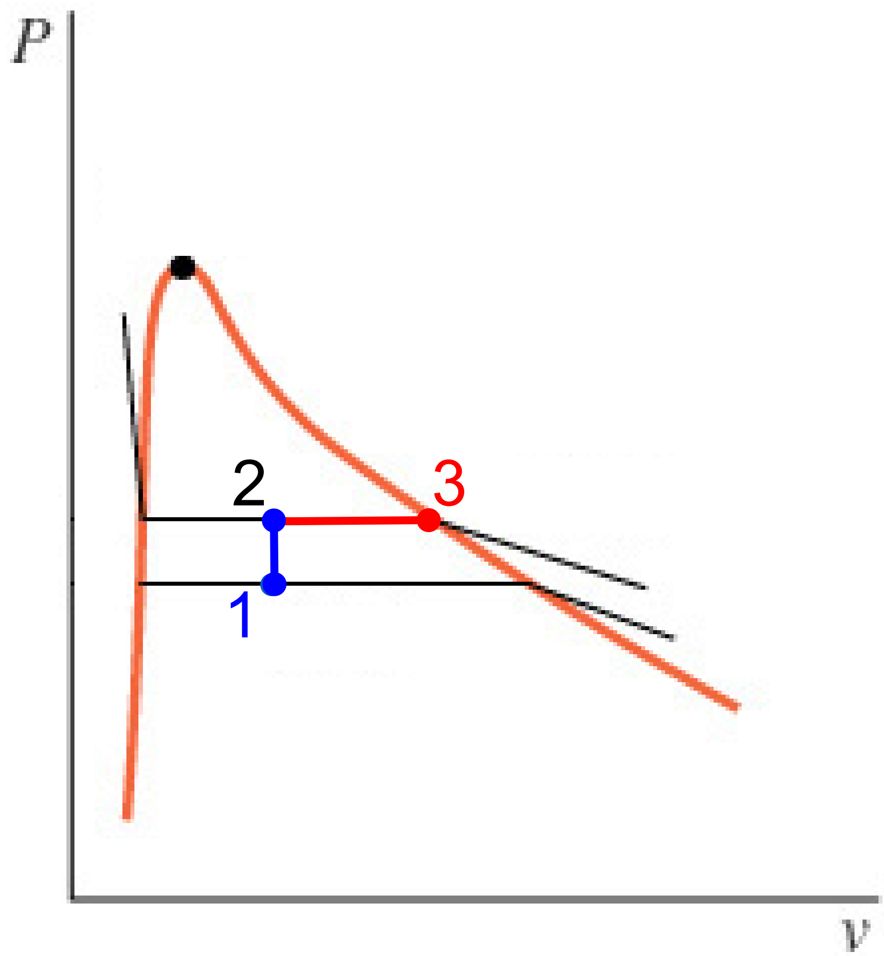
$V_3 = v_3.m = 0,8857.1 = 0,8857\ m^3$

Resp. O volume final é de 0,8857 m^3.

Extra 1: Solução

Diagrama P-v:

Antes de calcular o trabalho é preciso traçar o diagrama P-v:



Processo a v constante

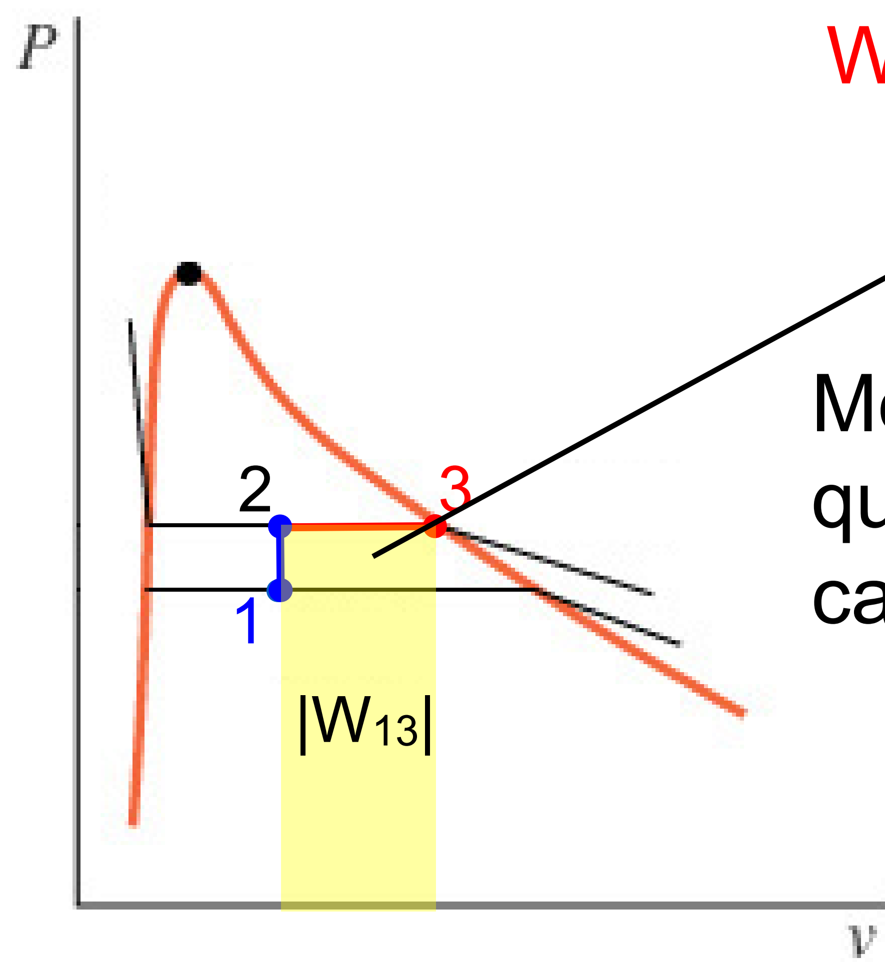
Processo a P constante

Extra 1: Solução

Trabalho realizado

Pelo diagrama P-v podemos determinar o trabalho já que o processo é quase-estático.

$W_{13} = P_2.(V_3-V_2)=157kJ$



Mesmo que o processo não fosse quase-estático, o trabalho poderia ser calulado pela expressão geral:

$$W_{1-2} = \frac{1}{2}\left(P_{front,2} + P_{front,1}\right)\left(V_2 - V_1\right)$$

$$W_{2-3} = P_{front,2}(V_3 - V_2)$$

Substância pura: Exercícios

Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo

Extra 1: Observações

- O sinal é positivo pois temos o sistema realizando trabalho sobre a vizinhança.;

- O diagrama T-v tem exatamente o mesmo aspecto do P-v. Trace-o você mesmo!