

Professor: Valter Salles do Nascimento Jr
email: nascimento.valter@usp.br



1º Lei e Conceitos Mecânicos de
Energia / Transferência de energia
através de trabalho / Transferência de
energia através de calor

Calendário

agosto

d	s	t	q	q	s	s
26	27	28	29	30	31	1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29
30	31	1	2	3	4	5

setembro

d	s	t	q	q	s	s
30	31	1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30	1	2	3
4	5	6	7	8	9	10

outubro

d	s	t	q	q	s	s
27	28	29	30	1	2	3
4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	31
1	2	3	4	5	6	7

novembro

d	s	t	q	q	s	s
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12

24 - Aniversário de São Carlos

dezembro

d	s	t	q	q	s	s
29	30	1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30	31	1	2
3	4	5	6	7	8	9

Energia e 1º Lei da Termodinâmica

The diagram shows the equation $\Delta E = \Delta U + \Delta EC + \Delta EP = mu + \frac{mv^2}{2} + mgz$. Three callout boxes are present: 'Energia interna' points to ΔU , 'Energia cinética' points to ΔEC , and 'Energia potencial' points to ΔEP .

$$\Delta E = \Delta U + \Delta EC + \Delta EP = mu + \frac{mv^2}{2} + mgz$$

Energia pode ser armazenada no interior de sistemas sob várias formas macroscópicas. A energia pode ser transformada de uma forma para outra e transferida entre sistemas. Para sistemas fechados, a energia pode ser transferida por meio de trabalho e da transferência de calor. A quantidade total de energia é conservada em todas as transformações e transferências.

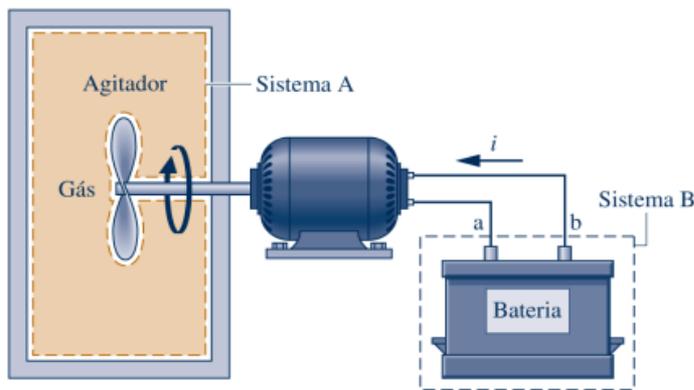
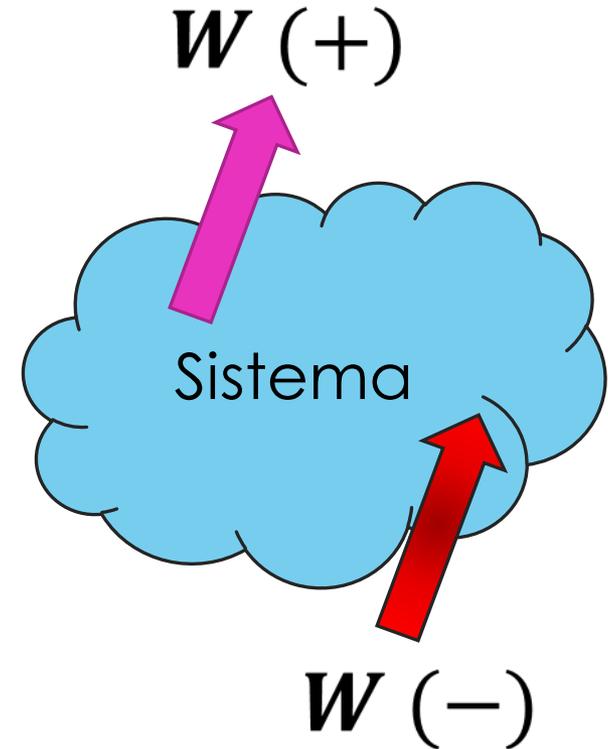
Convenções de sinais para o Trabalho

Convenção de sinais:

$W > 0$: trabalho realizado pelo sistema

$W < 0$: trabalho realizado sobre o sistema

$$W = \int_{s_1}^{s_2} F ds$$



Trabalho **não é uma propriedade** do sistema ou vizinhança.

$$\int_1^2 \delta W = W$$

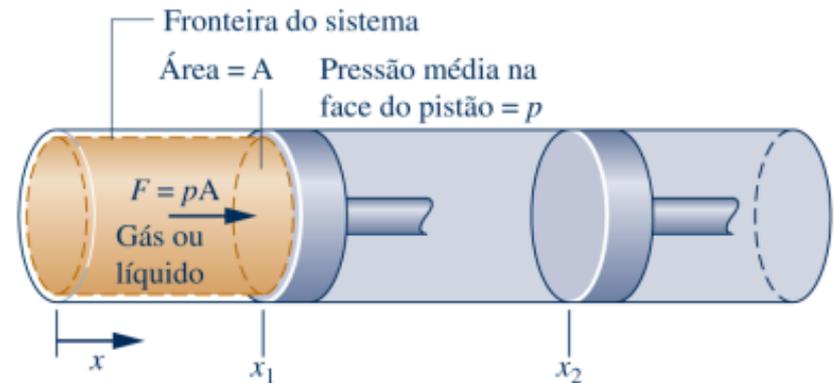
Potência e trabalho de compressão

Potência → Taxa de transferência de energia por intermédio de trabalho.

$$\boxed{\dot{W} = Fv} \quad W = \int_{t_1}^{t_2} \dot{W} dt = \int_{t_1}^{t_2} Fv dt \quad \rightarrow \quad P = \dot{W} = \frac{W}{t}$$

Trabalho de expansão ou compressão:

$$W = \int_{s_1}^{s_2} F ds \quad \rightarrow \quad p = \frac{F}{A}$$
$$W = \int_{s_1}^{s_2} p A ds \quad \text{ou} \quad W = \int_{V_1}^{V_2} p dV$$



Trabalho de compressão

Para calcular o trabalho, precisamos conhecer $p = p(V)$ quando:

$$pV^n = cte$$

→ Processo politrópico

$$n = 0$$

→ Processo isobárico

$$n = 1$$

→ Processo isotérmico

$$n = k = \frac{cp}{cv}$$

→ Processo isentrópico

$$n = +\infty$$

→ Processo isocórico

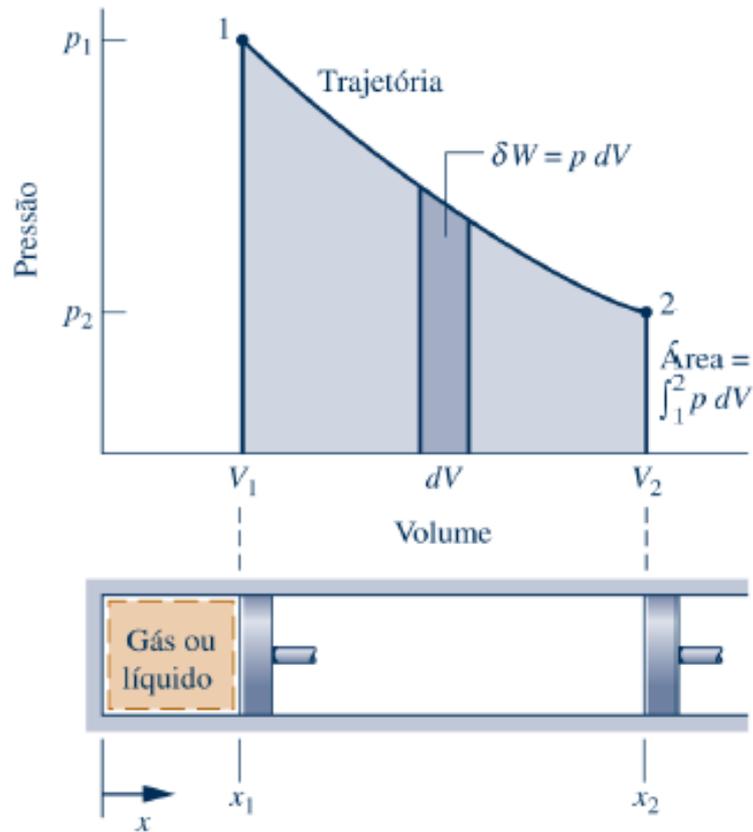


Fig. 2.7 Trabalho de um processo de expansão ou compressão em quase equilíbrio.

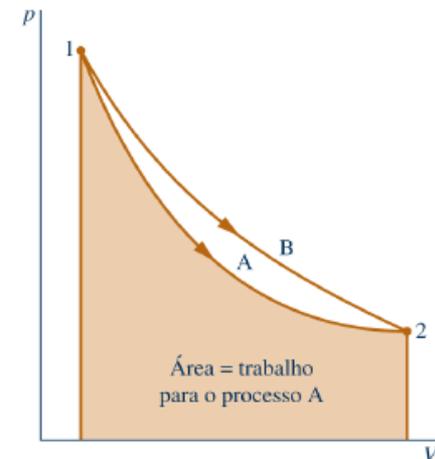


Fig. 2.8 Ilustração de que o trabalho depende do processo.

Trabalho de compressão

** Uma série de relações são obtidas de processos politrópicos (em especial para gases ideais), **essas relações serão discutidas no Capítulo 3** do livro do Moran & Shapiro, mas podemos adiantar algumas relações, como:

$$p_1 V_1^n = p_2 V_2^n \quad \longrightarrow \quad \frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^n$$

$$\int_1^2 p dV = \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{1 - n} \quad (n \neq 1)$$

$$\int_1^2 p dV = cte \cdot \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (n = 1)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(n-1)/n} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1} \quad (\text{gás ideal})$$

$$\int_1^2 p dV = \frac{mR(T_2 - T_1)}{1 - n} \quad (\text{gás ideal}, n \neq 1)$$

$$\int_1^2 p dV = mRT \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (\text{gás ideal}, n = 1)$$

Exemplo

Avaliando Trabalho de Expansão

Um gás em um conjunto cilindro - pistão passa por um processo de expansão, cuja relação entre a pressão e o volume é dada por

$$pV^n = \text{constante}$$

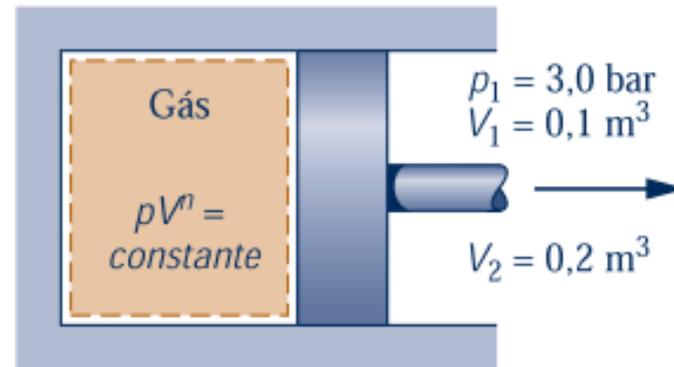
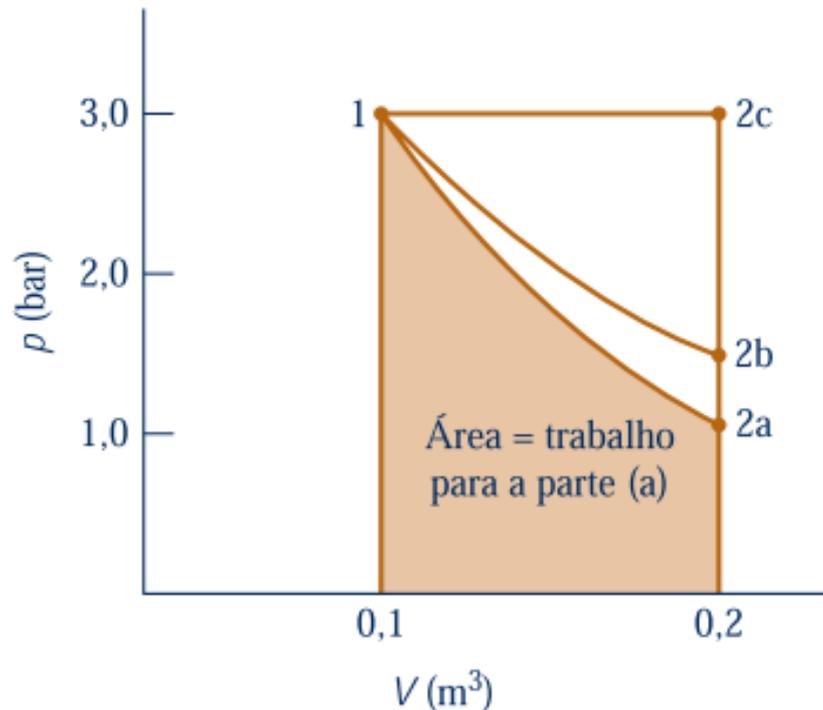
A pressão inicial é de 3 bar, o volume inicial é de $0,1 \text{ m}^3$ e o volume final é de $0,2 \text{ m}^3$.

Determine o trabalho para o processo, em kJ, no caso de

(a) $n = 1,5$

(b) $n = 1,0$

(c) $n = 0$.



Exemplo

Demonstração

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

$$W = \int_1^2 \frac{cte}{V^n} dV$$

$$W = cte \int_1^2 \frac{1}{V^n} dV = pV^n \cdot \left[\frac{V^{(1-n)}}{(1-n)} \right]_{V_1}^{V_2}$$

$$W = pV^n \cdot \left[\frac{V^{(1-n)}}{(1-n)} \right]_{V_1}^{V_2} = pV^n \cdot \left(\frac{V_2^{1-n} - V_1^{1-n}}{1-n} \right)$$

$$W = \left(\frac{p_2 V_2^n V_2^{1-n} - p_1 V_1^n V_1^{1-n}}{1-n} \right)$$

$$W = \int_1^2 p dV = \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{1-n}$$

Exemplo

Avaliando Trabalho de Expansão

Um gás em um conjunto cilindro - pistão passa por um processo de expansão, cuja relação entre a pressão e o volume é dada por

$$pV^n = \text{constante}$$

A pressão inicial é de 3 bar, o volume inicial é de 0,1 m³ e o volume final é de 0,2 m³.

Determine o trabalho para o processo, em kJ, no caso de

(a) $n = 1,5$

(b) $n = 1,0$

(c) $n = 0$.

a)

$$W = \int_1^2 p dV = \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{1 - n}$$

$$W = \frac{p_2 \cdot 0,2 - 3 \cdot 10^5 \cdot 0,1}{1 - 1,5}$$

$$p_2 = p_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^n$$

$$p_2 = 3 \cdot 10^5 \left(\frac{0,1}{0,2} \right)^{1,5}$$

$$p_2 = 1,006066 \text{ bar}$$

$$W = 17,573592 \text{ kJ}$$

Exemplo

Avaliando Trabalho de Expansão

Um gás em um conjunto cilindro - pistão passa por um processo de expansão, cuja relação entre a pressão e o volume é dada por

$$pV^n = \text{constante}$$

A pressão inicial é de 3 bar, o volume inicial é de 0,1 m³ e o volume final é de 0,2 m³.

Determine o trabalho para o processo, em kJ, no caso de

(a) $n = 1,5$

(b) $n = 1,0$

(c) $n = 0$.

b)

c)

$$W = \int_1^2 p dV = cte \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$W = 3 \cdot 10^5 \cdot 0,1 \cdot \ln \left(\frac{0,2}{0,1} \right)$$

$$W = 20,794,4 \text{ kJ}$$

$$W = \int_1^2 p dV = p \cdot (V_2 - V_1)$$

$$W = 3 \cdot 10^5 \cdot (0,2 - 0,1)$$

$$W = 30 \text{ kJ}$$

Outros tipos de Trabalho

Eixo

$$T = F \cdot r$$

$$s = 2\pi \cdot r \cdot N = \omega \cdot r$$

$$W = F \cdot s = \frac{F}{r} \omega \cdot r$$

$$\boxed{W = T \cdot \omega}$$

Mola

$$F = k \cdot x$$

$$W = \int_1^2 k \cdot x \cdot dx \quad \rightarrow \quad \boxed{W = k \cdot \frac{x_2^2 - x_1^2}{2}}$$

Campo Eléctrico

$$\boxed{\delta W = -\vec{E} d(V\vec{P})}$$

$V \rightarrow$ Volume

$\vec{E} \rightarrow$ intensidade do campo eléctrico

$\vec{P} \rightarrow$ momento do dipolo eléctrico

Campo Magnético

$$\boxed{\delta W = -\mu_o \vec{H} d(V\vec{M})}$$

$V \rightarrow$ Volume

$\vec{H} \rightarrow$ intensidade do campo magnético

$\vec{M} \rightarrow$ momento do dipolo magnético

Convenção de sinais para calor

Convenção de sinais:

$Q > 0$: transferência de calor para o sistema

$Q < 0$: transferência de calor do sistema

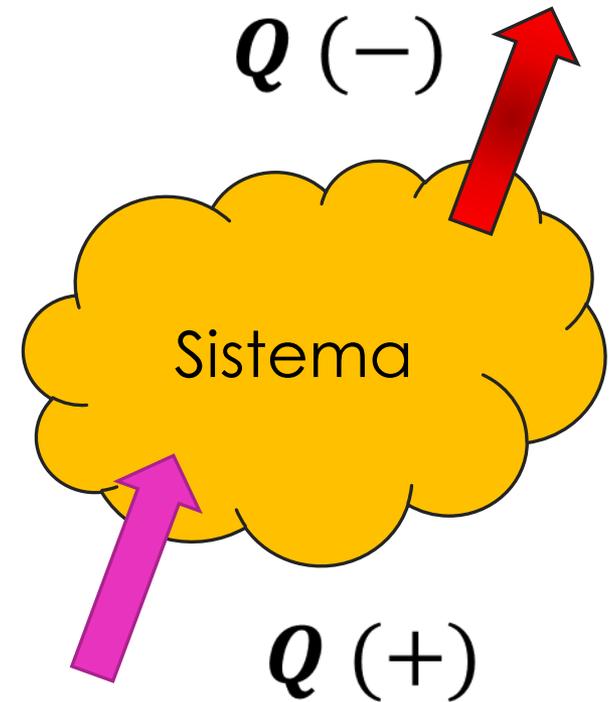
$$Q = \int_{t_1}^{t_2} \dot{Q} dt \quad [J] \quad \dot{Q} [W]$$

→ Fluxo de calor; a taxa de transferência de calor por unidade de área de superfície do sistema.

$$Q = \int_A q'' dA \quad [J] \quad q'' [W/m^2]$$

$$Q = \int_1^2 \delta Q \quad [J] \quad Q \neq Q_2 - Q_1$$

depende do caminho do processo



Calor **não é uma propriedade** do sistema ou vizinhança.

Transferência de Calor

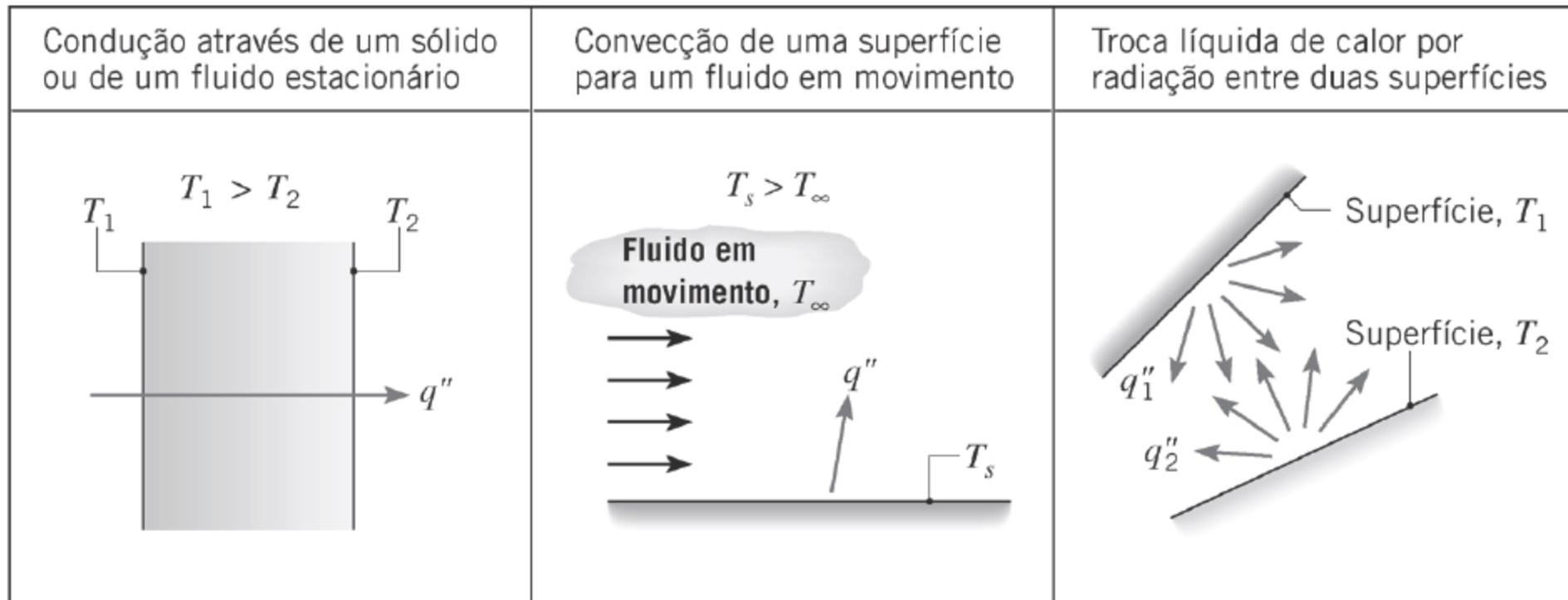


FIGURA 1.1 Modos de transferência de calor: condução, convecção e radiação.

Transferência de Calor - Condução

Lei de Fourier

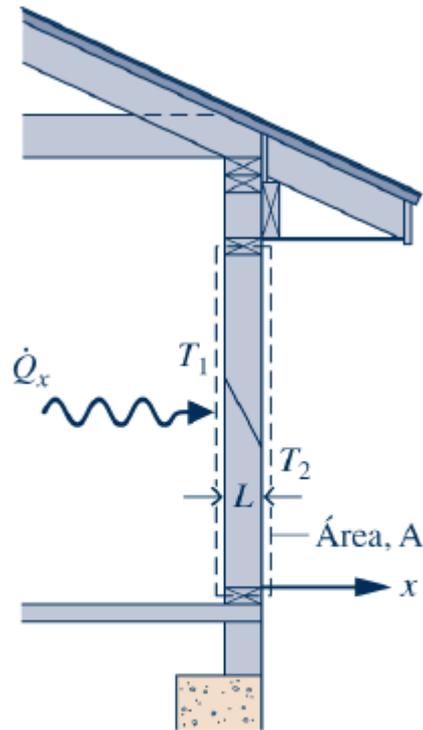
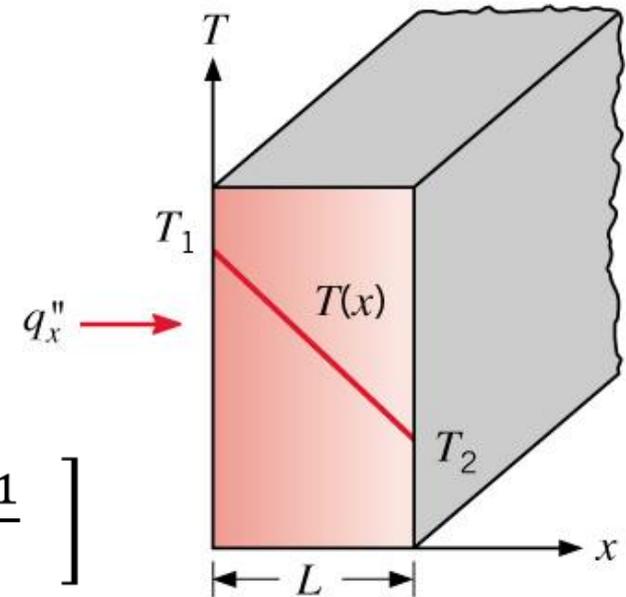


Fig. 2.12 Ilustração da lei de Fourier da condução de calor.

$$\dot{Q}_x = -kA \frac{dT}{dx}$$



$$\dot{Q}_x = -kA \left[\frac{T_2 - T_1}{L} \right]$$

$$\dot{Q}_{cd} = kA \left[\frac{T_1 - T_2}{L} \right]$$

Transferência de Calor (Radiação)

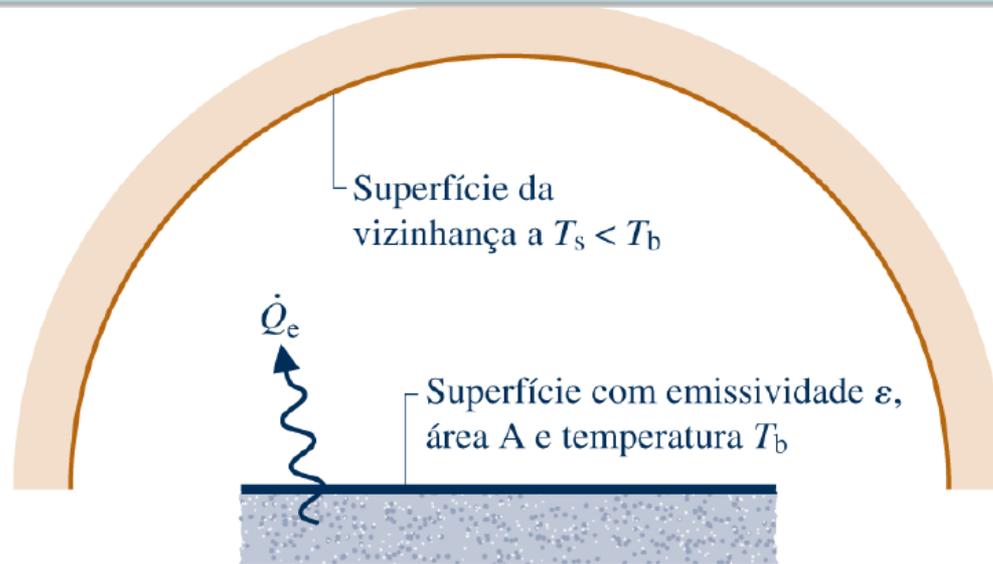


Fig. 2.13 Troca líquida de radiação.

$$\dot{Q}_{rad} = \epsilon\sigma A[T_s^4 - T_{viz}^4] \quad \dot{Q}_e = \epsilon\sigma A[T_s^4]$$

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

Transferência de Calor (Convecção)

Lei de Resfriamento de Newton

$$\dot{Q}_{cv} = hA[T_s - T_\infty]$$

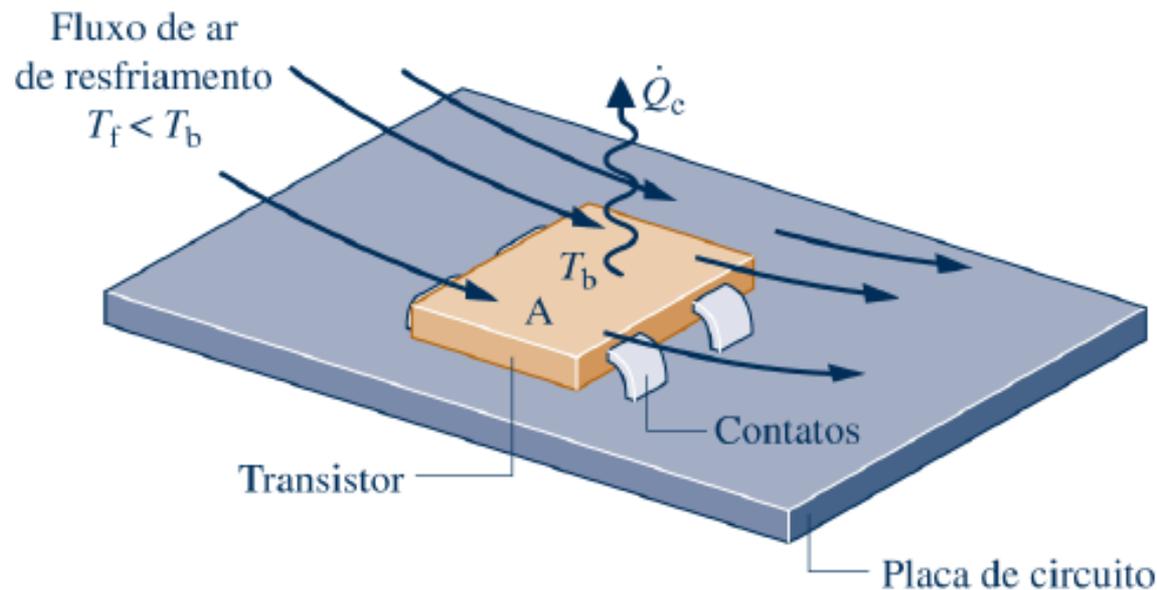


Fig. 2.14 Ilustração da lei do resfriamento de Newton.

Exercícios

Uma parede plana composta consiste em uma camada de isolante de 75 mm de espessura ($k_i = 0,05 \text{ W/m.K}$) e uma camada de tijolos de 25 mm de espessura ($k = 0,10 \text{ W/m.K}$). A temperatura interna relativa ao isolante é 20°C . A temperatura externa dos tijolos é -13°C . Determine, em regime permanente,

- (a) a temperatura na interface entre as duas camadas, em $^\circ\text{C}$;
- (b) a taxa de transferência de calor através da parede, em W por m^2 de área de superfície.

$$\dot{Q}_{cd} = kA \left[\frac{T_1 - T_2}{L} \right]$$

Exercícios

Dados

$$k_{iso} = 0,05 \text{ W/m.K}$$

$$K_{tij} = 0,10 \text{ W/m.K}$$

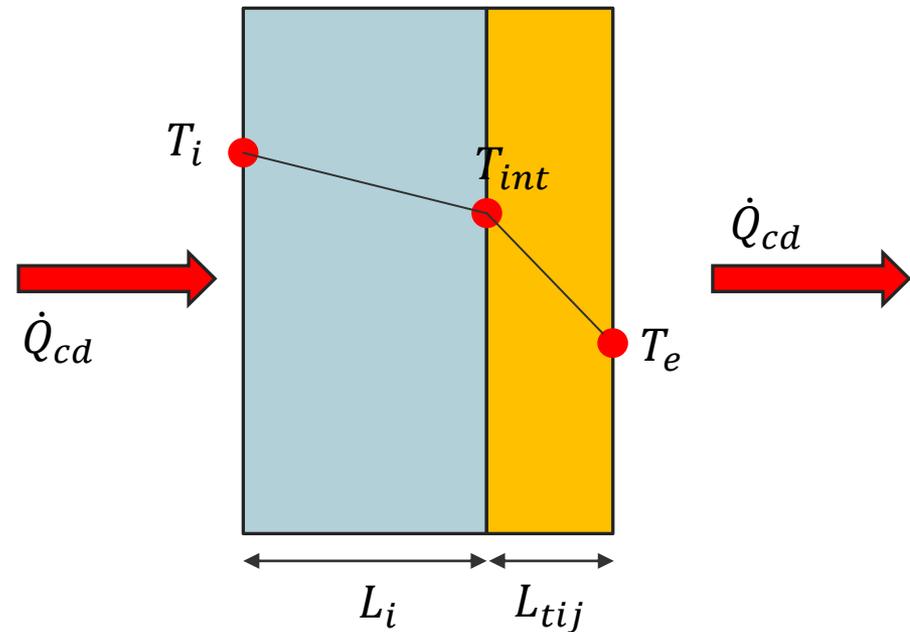
$$L_{iso} = 75 \text{ mm}$$

$$L_{tij} = 25 \text{ mm}$$

$$T_i = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_e = -13 \text{ }^\circ\text{C}$$

Figura



Hipóteses

- i) O fluxo de calor é unidimensional;
- ii) O mecanismo predominante de transferência de calor é a condução;
- iii) O fluxo de calor que passa pelo isolante é o mesmo fluxo que passa pelos tijolos.

Exercícios

Análise

a)

$$\dot{Q}_{cd} = kA \left[\frac{T_1 - T_2}{L} \right]$$

$$(\dot{Q}_{cd})_{isolante} = (\dot{Q}_{cd})_{tijolos}$$

$$k_{iso}A \left[\frac{T_i - T_{int}}{L_{iso}} \right] = k_{tij}A \left[\frac{T_{int} - T_e}{L_{tij}} \right]$$

$$0,05 \left[\frac{20 - T_{int}}{0,075} \right] = 0,1 \left[\frac{T_{int} - (-13)}{0,025} \right]$$

$$T_{int} = -8,286 \text{ } ^\circ\text{C}$$

b)

$$(\dot{Q}_{cd})_{isolante} = k_{iso}A \left[\frac{T_i - T_{int}}{L_{iso}} \right]$$

$$\frac{(\dot{Q}_{cd})_{isolante}}{A} = 0,05 \left[\frac{20 - (-8,286)}{0,075} \right]$$

$$\frac{(\dot{Q}_{cd})_{isolante}}{A} = 18,857 \text{ W/m}^2$$

Exercícios

Um corpo cuja área superficial é $0,5 \text{ m}^2$, emissividade é $0,8$ e temperatura é 150°C é colocado em uma grande câmara de vácuo, cujas paredes estão a 25°C . Qual a taxa de radiação *emitida* pela superfície, em W ? Qual a taxa *líquida* de radiação *trocada* entre a superfície e as paredes da câmara, em W ?

$$\dot{Q}_e = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_s)^4$$

$$\dot{Q}_e = 0,8 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,5 \cdot (150 + 273,15)^4$$

$$\dot{Q}_e = 727,14 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_s - T_{viz})^4$$

$$\dot{Q}_{rad} = 0,8 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,5 \cdot ((150 + 273,15)^4 - (25 + 273,15)^4)$$

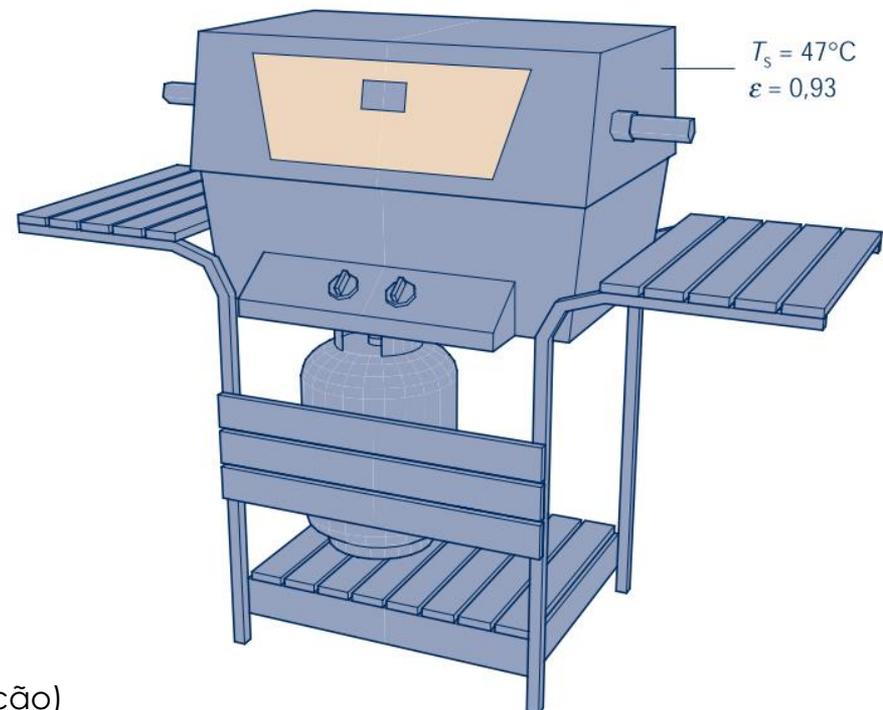
$$\dot{Q}_{rad} = 547,92 \text{ W}$$

Exercícios

A superfície externa da grelha com cobertura mostrada na figura está a $47\text{ }^{\circ}\text{C}$ e sua emissividade corresponde a $0,93$. O coeficiente de transferência de calor por convecção entre grelha e a vizinhança é de $10\text{ W}/\text{m}^2\text{K}$. Determine a taxa líquida de transferência de calor entre a grelha e a vizinhança por convecção e radiação, em KW por m^2 de área de superfície.

$$T_0 = 27^{\circ}\text{C}$$
$$h = 10\text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{k}$$

* Considerar $T_0 \approx T_{\infty} \approx T_{viz} = 27^{\circ}\text{C}$



Exercícios

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_s - T_{viz})^4$$

$$\dot{Q}_{rad}/A = 0,935,67 \cdot 10^{-8} \cdot ((47 + 273,15)^4 - (27 + 273,15)^4)$$

$$\dot{Q}_{rad}/A = 125,986 \text{ W/m}^2$$

$$\dot{Q}_{cv} = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty)$$

$$\dot{Q}_{cv}/A = 10 \cdot (47 - 27)$$

$$\dot{Q}_{cv}/A = 220 \text{ W/m}^2$$

$$\frac{\dot{Q}_{total}}{A} = \frac{\dot{Q}_{rad}}{A} + \frac{\dot{Q}_{cv}}{A} = 357,3 \text{ W/m}^2$$