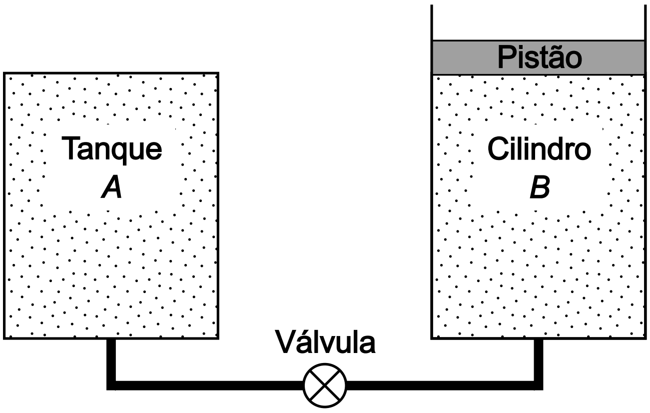
PME3398 – Fundamentos de Termodinâmica e Transferência de Calor
Professores Bruno Carmo e Antonio Pacífico

Lista de exercícios resolvidos 02 – Trabalho

1- A figura abaixo mostra um conjunto cilindro-pistão que está conectado ao tanque *A*, que tem volume de 1m³, através de uma tubulação com válvula de controle. Inicialmente, o tanque *A* contém vapor d'água saturado a 100kPa e o conjunto *B* apresenta volume de 1 m³ e contém água a 400°C e 300kPa. A válvula é, então, aberta e espera-se que a água atinja um estado uniforme em *A* e *B*. Se a temperatura do estado final for 200°C, calcule o trabalho no processo.



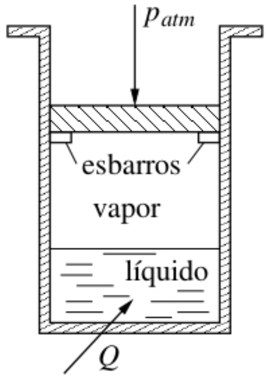
2- O processo de expansão dos gases produtos de combustão, num conjunto pistão-cilindro de um motor de combustão interna, foi monitorado e os dados de pressão e volume estão indicados na tabela abaixo. Sabendo que este processo pode ser modelado como um processo politrópico ($p.V^n = Constante$), determine:

a. O valor de *n* que melhor se ajusta aos dados experimentais
b. O trabalho realizado pelos gases durante a expansão do estado 1 ao estado 6.

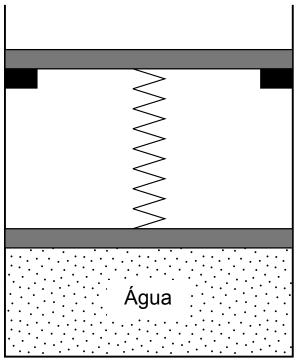
Medida	p [bar]	V [cm³]
1	15	300
2	12	361
3	9	459
4	6	644
5	4	903
6	2	1608

3- O cilindro mostrado na figura ao lado contém 0,1 kg de uma mistura de líquido e vapor de água (água saturada) a 38 °C. O êmbolo tem área seccional de 400 cm², uma massa de 60 kg e repousa sobre os esbarros como mostrado. O volume neste ponto é de 0,02 m³. A pressão atmosférica externa é de 96 kPa e a aceleração da gravidade local é 9,75 m/s². Transfere-se calor ao sistema até que o cilindro contenha apenas vapor saturado.

a. Qual é a temperatura da água quando o êmbolo deixa o esbarro?
b. Calcule o trabalho realizado pela água durante todo o processo.



4- O cilindro mostrado na figura, com área da seção transversal igual a 7,012 cm^2, contém 2 kg de água e apresenta dois pistões. O superior tem massa de 100 kg e inicialmente está encostado nos esbarros. O pistão inferior tem massa muito pequena, que pode ser desprezada, e a mola está distendida quando o pistão inferior está encostado no fundo do cilindro. O volume confinado no cilindro é igual a 0,3 m^3 se o pistão inferior toca os esbarros. No estado inicial, a pressão é 50 kPa e o volume é de 0,00206 m^3. Transfere-se calor à água até que se obtenha vapor saturado. Sabendo que a mola tem comportamento linear, que a pressão atmosférica no local é igual a 101,3 kPa e que a aceleração da gravidade vale 9,81 m/s^2, determine:



a. A temperatura e a pressão na água para que o pistão superior inicie o movimento.
b. O trabalho realizado pela água.

PME3398 – Fundamentos de Termodinâmica e Transferência de Calor
Professores Bruno Carmo e Antonio Pacífico

Soluções da Lista de Exercícios 02

1) Adota-se subscritos 1 e 2 para estados inicial e final, respectivamente, e A e B para designar os tanques, conforme figura do enunciado.

Estado 1A: $\mathcal{V}_{1A} = 1\,\mathrm{m}^3$, $p_{1A} = 100\,\mathrm{kPa}$, $x_{1A} = 1{,}0$

Estado 1B: $\mathcal{V}_{1B} = 1\,\mathrm{m}^3$, $T_{1B} = 400\,^\circ\mathrm{C}$, $p_{1B} = 300\,\mathrm{kPa}$, $v_{1B} = 1{,}03151\,\mathrm{m}^3/\mathrm{kg}$, $m_{1B} = \frac{\mathcal{V}_{1B}}{v_{1B}} = 0{,}9695\,\mathrm{kg}$

Estado 2: $T_2 = 200\,^\circ\mathrm{C}$, $p_2 = 300\,\mathrm{kPa}$ e $\mathcal{V}_2 \geq 1\,\mathrm{m}^3$ ou $p_2 < 300\,\mathrm{kPa}$ e $\mathcal{V}_2 < 1\,\mathrm{m}^3$, $m_2 = m_{1A} + m_{1B} = 1{,}5598\,\mathrm{kg}$

Testando situação onde $p_2 = 300\,\mathrm{kPa}$ e $\mathcal{V} \geq 1\,\mathrm{m}^3$:

Como $T_2 = 200\,^\circ\mathrm{C}$, teremos vapor superaquecido: $v_2 = 0{,}71629\,\mathrm{m}^3/\mathrm{kg} \rightarrow \mathcal{V}_2 = m_2 v_2 = 1{,}117\,\mathrm{m}^3$ (OK!)

Admitindo processo quase-estático:

$$_1W_2 = \int_1^2 p\,\mathrm{d}\mathcal{V} = p_b(\mathcal{V}_{2B} - \mathcal{V}_{1B}) = 300 \times (0{,}117 - 1) \rightarrow {}_1W_2 = -264{,}9\,\mathrm{kJ}$$

2) a. Do enunciado, $p\mathcal{V}^n = C$, onde C é uma constante. Aplicando logaritmo nos dois lados da equação (neperiano, por exemplo):

$$\ln p + n \ln \mathcal{V} = \ln C$$

$$\ln p = -n \ln \mathcal{V} + \ln C$$

A este ponto, ou se faz uma regressão linear, ou se testa para alguns pontos fornecidos na tabela. A resposta por regressão linear é $n = 1{,}1996$. Portanto pode-se aceitar como resposta:

$$n \cong 1{,}2$$

b. Recuperando a fórmula válida para processos politrópicos ($p\mathcal{V}^n = C$):

$$_1W_2 = \int_1^2 p\,\mathrm{d}\mathcal{V} = \int_1^2 C\mathcal{V}^{-n}\,\mathrm{d}\mathcal{V} = C\left[\frac{\mathcal{V}^{-n+1}}{-n+1}\right]_{\mathcal{V}_1}^{\mathcal{V}_2} = \frac{C\mathcal{V}_2^{1-n} - C\mathcal{V}_1^{1-n}}{1-n} =$$

$$= \frac{p_2\mathcal{V}_2^n\mathcal{V}_2^{1-n} - p_1\mathcal{V}_1^n\mathcal{V}_1^{1-n}}{1-n} = \frac{p_2\mathcal{V}_2 - p_1\mathcal{V}_1}{1-n}$$

Aplicando ao processo em questão:

$$_1W_6 = \frac{p_6\mathcal{V}_6 - p_1\mathcal{V}_1}{1-n} = \frac{2 \times 10^5 \times 1608 \times 10^{-6} - 15 \times 10^5 \times 300 \times 10^{-6}}{1 - 1{,}2} = 642\,\mathrm{J}$$

3) a. Quando o êmbolo deixar o esbarros teremos:

$$p_2 = p_{atm} + \frac{m_p g}{A_p} = 96 \times 10^3 + \frac{60 \times 9{,}75}{400 \times 10^{-4}} = 110625\,\text{Pa} = 110{,}625\,\text{kPa}$$

T_2 será a temperatura de saturação da água à p_2, uma vez que se o estado 1 tem $0 < x_1 < 1$ e o estado final tem $x_f = 1$, então qualquer estado intermediário entre 1 e f também será um estado saturado. Assim, das tabelas de saturação para a água, por interpolação:

$$T_2 = 102{,}3\,°\text{C}$$

b. No item acima designamos como estado 2 aquele para o qual o êmbolo deixa os esbarros. Designaremos, agora, de estado 3 o final, para o qual $x_3 = 1$.

Analisando os processos, conclui-se que o processo $1 \to 2$ é isocórico (isovolumétrico), pois o êmbolo não deixa os esbarros enquanto a água apresenta pressão inferior à soma da pressão atmosférica com a devida ao peso do êmbolo. Na sequência, o processo $2 \to 3$ deve ser, necessariamente, isobárico, pois tanto a pressão atmosférica como o peso do êmbolo são constantes.

Para os estados 1 e 2 termos:

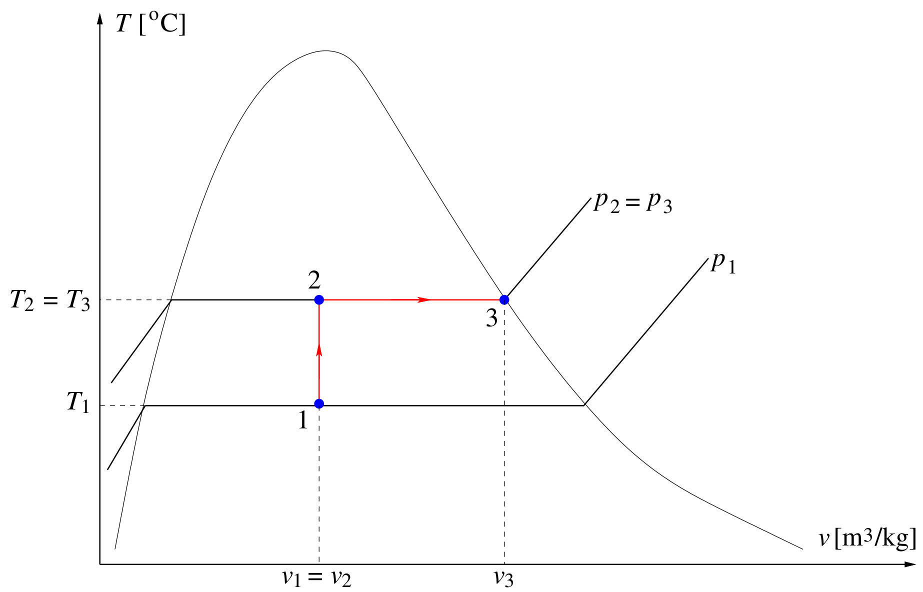
$$v_1 = \frac{\cancel{V}_1}{m} = \frac{0{,}02}{0{,}1} = 0{,}2\,\text{m}^3/\text{kg} = v_2$$

v_3 é v_v à $p_3 = p_2 = 110{,}625\,\text{kPa}$. Das tabelas de saturação para a água: $v_3 = 1{,}5584\,\text{m}^3/\text{kg}$

O trabalho realizado entre os processos 1 e 3 é dado por:

$${}_1W_3 = {}_1W_2 + {}_2W_3 = 0 + p_3 m\,(v_3 - v_2) = 110{,}625 \times 0{,}1 \times (1{,}5584 - 0{,}2) \cong 15\,\text{kJ}$$

A figura abaixo ilustra os processos num diagrama $T - v$



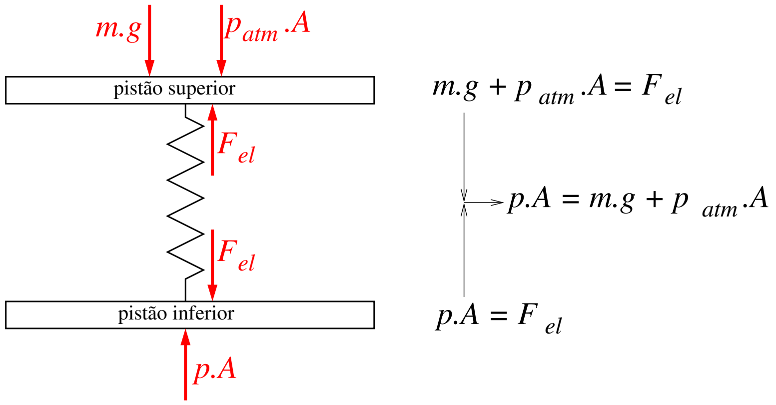
4) a. Sistema fechado. Substância: água (tabelas termodinâmicas). $m = 2\,\text{kg}$.

$A_t = 7{,}012\,\text{cm}^2$, $m_{ps} = 100\,\text{kg}$, $\mathcal{V}_{\text{max}} = 0{,}3\,\text{m}^3$.

Chamaremos o estado inicial de estado 1, o estado no qual o pistão superior inicia o movimento de estado 2 e o estado final de estado 3.

<u>Estado 1</u>: $p_1 = 50\,\text{kPa}$, $\mathcal{V}_1 = 0{,}00206\,\text{m}^3$, $v_1 = \mathcal{V}_1/m = 0{,}00103\,\text{m}^3/\text{kg} \Rightarrow$ líquido saturado
A tabela B.1.2 fornece $T_1 = 81{,}33\,°\text{C}$, $u_1 = 340{,}42\,\text{kJ/kg}$.

<u>Estado 2</u>: A pressão é aquela necessária para erguer o sistema dos dois pistões e mola levando em conta também a pressão atmosférica, como mostra o diagrama a seguir.



$$\boxed{p_2 = p_{\text{atm}} + \frac{m_{ps}g}{A_t} = 101300 + \frac{100 \times 9{,}81}{7{,}012 \times 10^{-4}} = 1500\,\text{kPa}}$$

Precisamos de uma outra propriedade termodinâmica para definir o estado. Podemos utilizar a informação de que a mola é linear e está distendida quando o pistão inferior encosta no fundo do cilindro para encontrar o volume.

Sendo F a força da mola, k sua constante de elasticidade e x a distância da face inferior do pistão inferior até o fundo do cilindro, temos $F = kx$. Manipulando algebricamente esta expressão:

$$\frac{F}{A_t} = p = \frac{k}{A_t}x, \qquad p = \frac{k}{A_t^2}(xA_t) = C\mathcal{V},$$

onde $C = k/A_t^2$ é uma constante, cujo valor pode ser determinado usando o estado 1:

$$p_1 = C\mathcal{V}_1 \quad \Rightarrow \quad C = \frac{p_1}{\mathcal{V}_1} = \frac{50}{0{,}00206} = 24272\,\text{kPa/m}^3$$

Podemos então encontrar o volume do estado 2:

$$p_2 = C\mathcal{V}_2 \quad \Rightarrow \quad \mathcal{V}_2 = \frac{p_2}{C} = \frac{1500}{24272} = 0{,}06180\,\text{m}^3 \quad \Rightarrow \quad v_2 = \frac{\mathcal{V}_2}{m} = \frac{0{,}06180}{2} = 0{,}03090\,\text{m}^3/\text{kg}$$

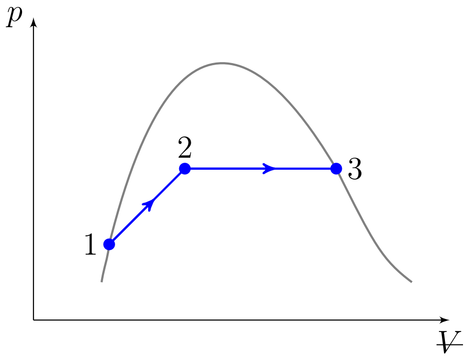
Para p_2 e v_2 concluímos que a água está em estado saturado com $\boxed{T_2 = 198{,}32\,°\text{C}}$.

b. <u>Estado 3</u>: para avaliar este estado, precisamos verificar se o pistão inferior encostará nos esbarros. Se não encostar, $p_3 = 1500\,\text{kPa}$ e $\mathcal{V}_3 < \mathcal{V}_{\text{max}}$. Se encostar, $p_3 > 1500\,\text{kPa}$ e $\mathcal{V}_3 = \mathcal{V}_{\text{max}}$. Vamos considerar que o pistão não encoste e verificar se as condições necessárias são satisfeitas.

$p_3 = p_2 = 1500\,\text{kPa},\ x_3 = 1{,}0 \quad \Rightarrow \quad v_3 = 0{,}13177\,\text{m}^3/\text{kg}$

$$\cancel{V}_3 = m v_3 = 2 \times 0{,}13177 = 0{,}26354\,\text{m}^3 < 0{,}3\,\text{m}^3$$

Portanto o pistão de fato não encosta nos esbarros.



$$
\begin{aligned}
{}_1W_3 &= {}_1W_2 + {}_2W_3 \\
{}_1W_3 &= \frac{(p_1 + p_2)(\cancel{V}_2 - \cancel{V}_1)}{2} + p_2(\cancel{V}_3 - \cancel{V}_2) = \\
&= \frac{(50 + 1500) \times (0{,}06180 - 0{,}00206)}{2} + \\
&\quad + 1500 \times (0{,}26354 - 0{,}06180) \\
{}_1W_3 &= 348{,}91\,\text{kJ}
\end{aligned}
$$