TEA007 - TERMODINÂMICA AMBIENTAL
Curso de Graduação em Engenharia Ambiental
Departamento de Engenharia Ambiental, UFPR
P02, 6 Setembro 2017
Prof. Michael Mannich

P02

NOME: GABARITO Assinatura: _____

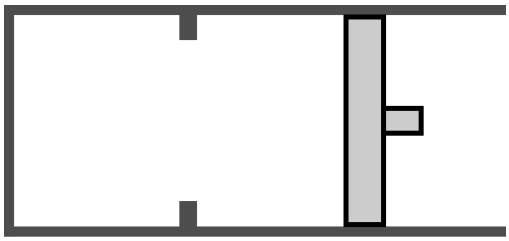
1 [65] Um conjunto cilindro-pistão equipado com esbarros contém 0.1 kg de água, inicialmente a 1.0 MPa e $T = 500\,°C$. A água passa por dois processos em série:

- **Processo 1-2**: Resfriamento a pressão constante até a face do pistão pare ao atingir os esbarros. O volume ocupado pela água é então metade do seu volume inicial.
- **Processo 2-3**: Com a face do pistão em repouso sobre os esbarros, a água é resfriada até $T = 25\,°C$.

Desprezando os efeitos das energias cinética e potencial

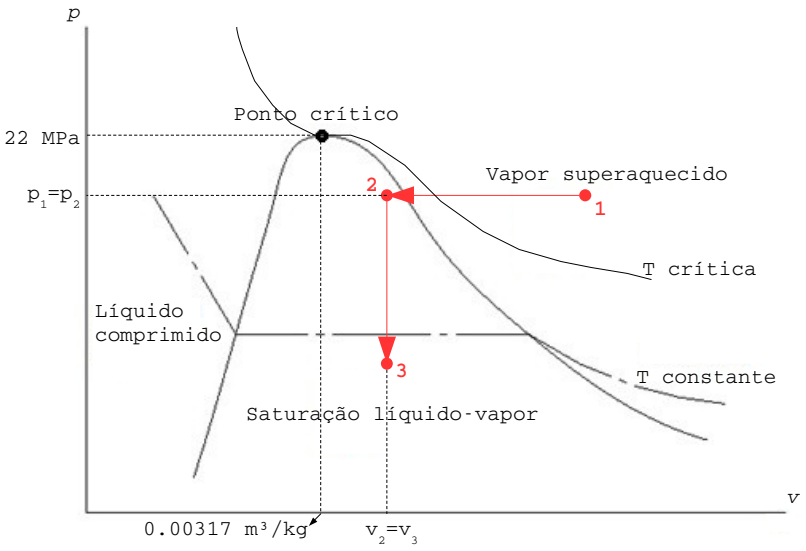
a) [15] Esboce os dois processos em série nos diagramas $p - v$, $T - v$ e $p - T$

b) [50] Determine para cada processo o trabalho e o calor transferido.

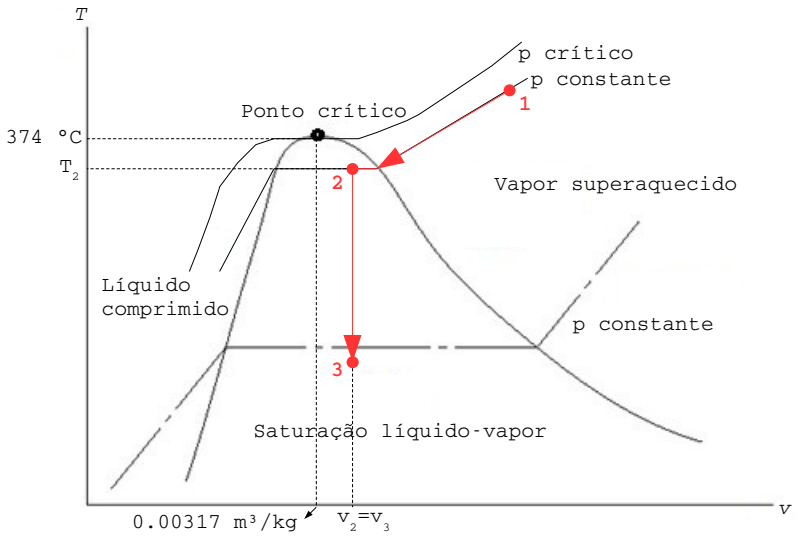


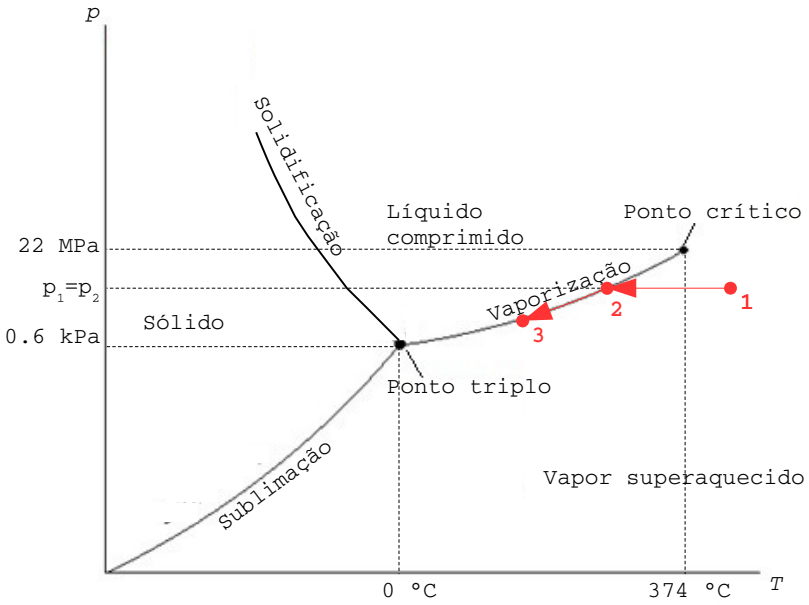
SOLUÇÃO DA QUESTÃO:

a)



Continue a solução no verso ⟹





b) Definindo como sistema a massa de água no interior do cilindro, procura-se as propriedades do sistema em cada estado.

Estado 1: $p_1 = 1.0\,\text{MPa}$, $T_1 = 500\,^\circ\text{C} > T_{sat} = 179.91\,^\circ\text{C}$ (vapor superaquecido). Da tabela B.1.3,

$$v_1 = 0.35411\,\text{m}^3\text{kg}^{-1},$$
$$u_1 = 3124.34\,\text{kJ}\,\text{kg}^{-1}.$$

Estado 2: $p_2 = p_1 = 1.0\,\text{MPa}$ (o processo 1-2 é isobárico), e como o volume neste estado é igual à metade do volume inicial,

$$V_2 = \frac{V_1}{2},$$
$$mv_2 = \frac{mv_1}{2},$$
$$v_2 = \frac{v_1}{2} = 0.177055\,\text{m}^3\text{kg}^{-1}.$$

pois a massa permanece a mesma. Da tabela B.1.2, vê-se $v_l < v_2 < v_v$. Trata-se portanto de mistura saturada com título

$$x_2 = \frac{v_2 - v_l}{v_v - v_l} \approx 0.91,$$

Continue a solução no verso ⟹

e a energia interna é

$$u_2 = u_l + x_2 u_{lv} \approx 2419.79\,\mathrm{kJ\,kg^{-1}}.$$

Estado 3: $T_3 = 25\,^\circ\mathrm{C}$ e $v_3 = v_2 = 0.177055\,\mathrm{m^3 kg^{-1}}$ (o processo 2-3 é isocórico). Da tabela B.1.1, vê-se $v_l < v_3 < v_v$. Trata-se portanto de mistura saturada com título

$$x_3 = \frac{v_3 - v_l}{v_v - v_l} \approx 0.004,$$

e a energia interna é

$$u_3 = u_l + x_3 u_{lv} \approx 114.22\,\mathrm{kJ\,kg^{-1}}.$$

Para processos em que não há variação das energias cinética e potencial do sistema, a primeira lei fica

$$\Delta E = \Delta U + \cancelto{0}{\Delta EC} + \cancelto{0}{\Delta EP} = m\Delta u = Q - W.$$

Como a pressão permanece constante no processo 1-2, o trabalho é dado por

$$W_{12} = \int_1^2 p\,\mathrm{d}\cancel{V} = p_1 \int_1^2 \mathrm{d}\cancel{V} = p_1\,(V_2 - V_1) = p_1 m(v_2 - v_1) = -17.7055\,\mathrm{kJ}.$$

Como esperado, o trabalho é negativo, já que é realizado sobre o sistema (compressão). Da primeira lei, obtém-se o calor transferido do sistema:

$$Q_{12} = m\,(u_2 - u_1) + W_{12} = (-70455 - 17705.5)\,\mathrm{J} = -88.1605\,\mathrm{kJ}.$$

Durante o processo 2-3, não há variação de volume, e $W_{23} = 0$. Assim,

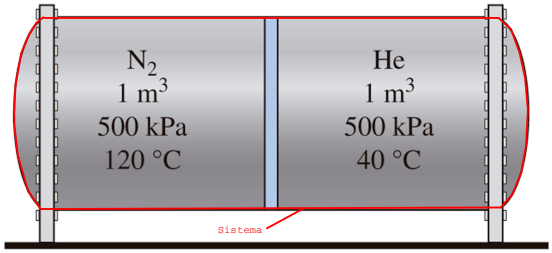
$$Q_{23} = m(u_3 - u_2) = -230.557\,\mathrm{kJ}. \quad \blacksquare$$

Continue a solução no verso ⟹

2 [35] Considere um cilindro rígido, horizontal e bem isolado, dividido em dois compartimentos por um pistão com liberdade de movimento, mas que não permite fuga de gás de um lado para o outro. Inicialmente, um lado do pistão contém 1 m^3 de N_2 a 500 kPa e 120 °C, enquanto o outro lado contém 1 m^3 de He a 500 kPa e 40 °C. O equilíbrio térmico no cilindro é então estabelecido como resultado da transferência de calor através do pistão.

a) [25] Determine a temperatura final de equilíbrio no cilindro.

b) [10] Qual o resultado da temperatura final se o pistão não fosse livre para se mover? Explique.



a) Como o sistema composto por ambos os gases não troca calor com o ambiente e nem realiza trabalho, pois o cilindro é isolado e rígido, a energia interna total no interior do mesmo deve permanecer a mesma. Da primeira lei,

$$\Delta E = \Delta U + \cancelto{0}{\Delta EC} + \cancelto{0}{\Delta EP} = \cancelto{0}{Q} - \cancelto{0}{W} \Rightarrow \Delta U = m_{N_2}\Delta u_{N_2} + m_{He}\Delta u_{He} = 0.$$

Para determinar a variação da energia interna, considera-se a definição do calor específico a volume constante,

$$c_v \equiv \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v \approx \frac{\Delta u}{\Delta T},$$

já que o processo ocorre a volume constante, e supõe-se que os calores específicos dos gases não varia muito durante a troca de calor. Assim, pode-se escrever

$$m_{N_2} c_{v,N_2} \Delta T_{N_2} + m_{He} c_{v,He} \Delta T_{He} = 0.$$

Fazendo $\Delta T_{N_2} = T_{eq} - T_{N_2,0}$ e $\Delta T_{He} = T_{eq} - T_{He,0}$ (pois a temperatura de equilíbrio é a mesma para os dois gases) na expressão acima, tem-se, isolando T_{eq},

$$T_{eq} = \frac{m_{He} c_{v,He} T_{0,He} + m_{N_2} c_{v,N_2} T_{0,N_2}}{m_{N_2} c_{v,N_2} + m_{He} c_{v,He}}.$$

A massa de cada gás pode ser obtida a partir de seu volume através do volume específico no estado inicial.

Pode-se usar a equação de estado do gás ideal com $R_{N_2} = 0.2968\,\mathrm{kJ\,kg^{-1}}$ (tabela A.5):

$$v_{N_2,0} = \frac{R_{N_2} T_{N_2,0}}{p_{N_2,0}} = 0.23337\,\mathrm{m^3 kg^{-1}}.$$

Para o He, também por meio da equação de estado do gás ideal com $R_{He} = 2.0771\,\mathrm{kJ\,kg^{-1}}$ dado na tabela A.5, de onde

$$v_{He,0} = \frac{R_{He} T_{He,0}}{p_{He,0}} = 1.30\,\mathrm{m^3 kg^{-1}}.$$

As massas são

$$m_{N_2} = \frac{1\,\mathrm{m^3}}{0.23337\,\mathrm{m^3 kg^{-1}}} \approx 4.285\,\mathrm{kg}, \quad m_{He} = \frac{1\,\mathrm{m^3}}{1.30\,\mathrm{m^3 kg^{-1}}} \approx 0.769\,\mathrm{kg}.$$

Com o volume específico calculado através da equação do gás ideal, obtém-se $m_{N_2} = 4.28\,\mathrm{kg}$. Considerando ambos gases ideais, da tabela A.5, $c_v^{N_2} = 0.745\,\mathrm{kJ\,kg^{-1}}$ e $c_v^{He} = 3.116\,\mathrm{kJ\,kg^{-1}}$. Assim, encontra-se

$$T_{eq} \approx 358.86\,\mathrm{K},$$

ou cerca de 85.7 °C.

Para o N_2, é possível interpolar os valores dados na tabela B.6.2:

b) Como o sistema composto por ambos os gases no interior do cilindro continua isolado e sem realização de trabalho (cilindro rígido), a sua energia interna total não muda e a temperatura de equilíbrio é igual a 85.7 °C, independentemente se o pistão é livre para mover-se ou não.

Em ambos os casos, há transferência de energia entre a massa de N_2 e a massa de He. Quando o pistão não é livre para se mover, entretanto, a transferência de energia entre os dois gases ocorre apenas através de calor, enquanto que no primeiro caso também há realização de trabalho. Ainda assim, em nenhuma das duas situações há energia cruzando a fronteira do sistema composto por ambos os gases.

Continue a solução no verso ⟹

$\downarrow p \quad / \quad T \rightarrow$	350 K		393.15 K		400 K
400 kPa	$0.25982\,\mathrm{m^3kg^{-1}}$				$0.29712\,\mathrm{m^3kg^{-1}}$
	$\downarrow$				$\downarrow$
500 kPa	$0.21654\,\mathrm{m^3kg^{-1}}$	$\rightarrow$	$0.24339\,\mathrm{m^3kg^{-1}}$	$\leftarrow$	$0.24766\,\mathrm{m^3kg^{-1}}$
	$\uparrow$				$\uparrow$
600 kPa	$0.17326\,\mathrm{m^3kg^{-1}}$				$0.19819\,\mathrm{m^3kg^{-1}}$

Continue a solução no verso $\Longrightarrow$