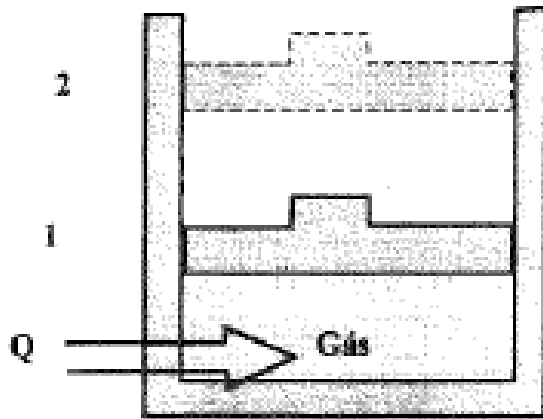


PROPRIEDADE TERMODINÂMICA ENTALPIA

O sistema passa por processo quase-estático à pressão constante

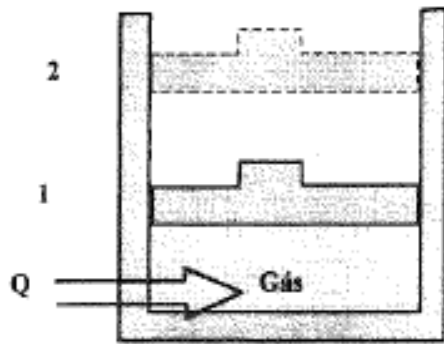


$${}_1Q_2 = U_2 - U_1 + \frac{m(V_2^2 - V_1^2)}{2} + mg(Z_2 - Z_1) + {}_1W_2$$

Não há energia cinética nem potencial

$${}_1Q_2 = U_2 - U_1 + {}_1W_2$$

PROPRIEDADE TERMODINÂMICA ENTALPIA



$${}_1Q_2 = U_2 - U_1 + {}_1W_2$$

O trabalho pode ser calculado pela expressão:

$${}_1W_2 = \int_1^2 p dV$$

Como a pressão é constante,

$${}_1W_2 = p \int_1^2 dV = p(V_2 - V_1)$$

Portanto:

$$\begin{aligned} {}_1Q_2 &= U_2 - U_1 + p_2V_2 - p_1V_1 \\ &= (U_2 + p_2V_2) - (U_1 + p_1V_1) \end{aligned}$$

Portanto a variação de energia nesse sistema pode ser calculada por essa propriedade chamada de ENTALPIA

$$H = U + pV$$

PROPRIEDADE TERMODINÂMICA ENTALPIA

A ENTALPIA específica é dada por:

$$h = u + pv \quad (8.13)$$

As tabelas de vapor contém os valores de ENTALPIA e não de Energia Interna. Mas para isso utilizam-se as tabelas e a Equação (8.13).

ENTALPIA é uma função do ponto e seu uso para calcular a Energia Interna não está relacionada nem depende do processo pelo qual o Sistema passou.

Para referência, nas tabelas de vapor d'água a Energia Interna é Zero para o líquido saturada a 0,01 Celsius.

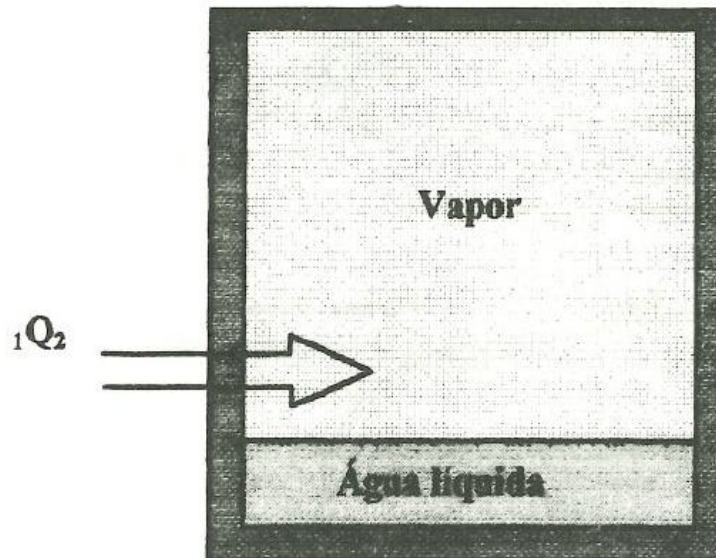
PROPRIEDADE TERMODINÂMICA ENTALPIA

Para uma substância em estado de saturação, com um certo Título, tem-se:

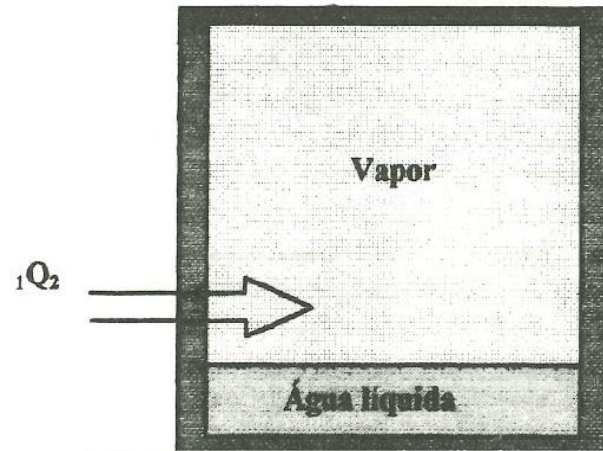
$$h = (1-x)h_f + xh_g$$

$$h = h_f + xh_{tot}$$

Um cilindro provido de pistão contém 0,5 kg de vapor d'água 0,4 MPa e apresenta inicialmente um volume de 0,1 m³. Transfere-se calor ao vapor até que a temperatura atinja 300°C, enquanto a pressão permanece constante. Determinar o calor transferido e o trabalho realizado nesse processo.



PROPRIEDADE TERMODINÂMICA ENTALPIA



$${}_1Q_2 = U_2 - U_1 + \frac{m(V_2^2 - V_1^2)}{2} + mg(Z_2 - Z_1) + {}_1W_2$$

Não há variação de energia cinética nem potencial

$${}_1Q_2 = U_2 - U_1 + {}_1W_2$$

$${}_1W_2 = \int_1^2 p dV = p \int_1^2 dV = p(V_2 - V_1) = m(p_2 v_2 - p_1 v_1)$$

portanto o primeiro princípio da termodinâmica fica:

$${}_1Q_2 = m(u_2 - u_1) + {}_1W_2$$

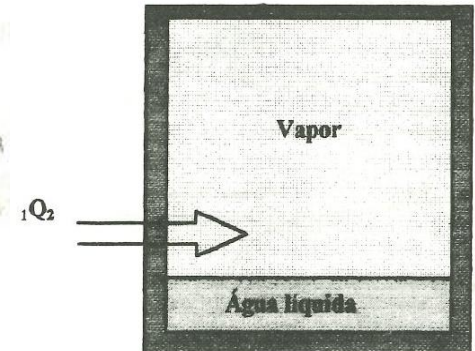
$$= m(u_2 - u_1) + m(p_2 v_2 - p_1 v_1) = m(h_2 - h_1)$$

PROPRIEDADE TERMODINÂMICA ENTALPIA

Pode-se agora calcular empregando-se a energia interna ou a entalpia. Utilizando-se esta última:

$$v_1 = \frac{V_1}{m} = \frac{0.1}{0.5} = 0.2 = 0.001084 + x \cdot 0,4625$$

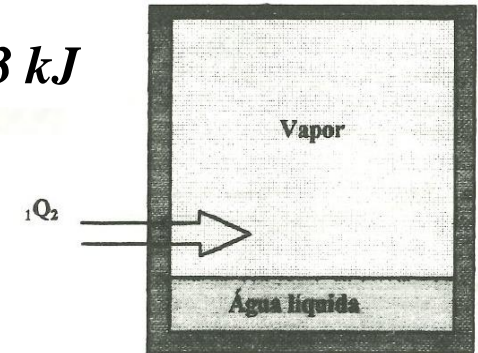
$$x_1 = \frac{0.1989}{0,4625} = 0,4300$$



Temp. T, °C	Pressão P, kPa	Volume específico, m ³ /kg		Energia interna, kJ/kg			Entalpia, kJ/kg	
		líquido sat. v _l	vapor sat. v _v	líquido sat. u _l	Evap. u _{lv}	vapor sat. u _v	líquido sat. h _l	Evap. h _{lv}
0,350	138,88	0,001 079	0,5243	583,95	1965,0	2548,9	584,33	2148,1
0,375	141,32	0,001 081	0,4914	594,40	1956,9	2551,3	594,81	2140,8
0,40	143,63	0,001 084	0,4625	604,31	1949,3	2553,6	604,74	2133,8
0,45	147,93	0,001 088	0,4140	622,77	1934,9	2557,6	623,25	2120,7

PROPRIEDADE TERMODINÂMICA ENTALPIA

$$h_1 = h_f + x_1 h_{\text{tot}} = 604.74 + 0,4300 \times 2133.8 = 1552,3 \text{ kJ}$$

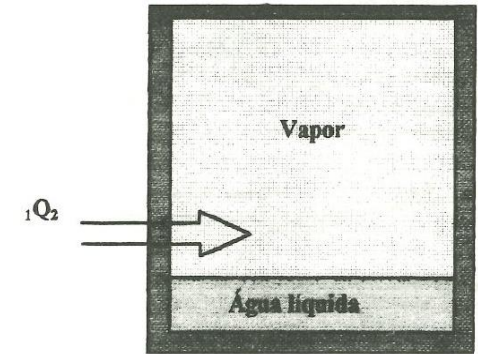


Temp. T, °C	Pressão p, kPa	Volume específico, m ³ /kg		Energia interna, kJ/kg			Entalpia, kJ/kg	
		líquido sat. v _l	vapor sat. v _v	líquido sat. u _l	Evap. u _{lv}	vapor sat. u _v	líquido sat. h _l	Evap. h _{lv}
0,350	138,88	0,001 079	0,5243	583,95	1965,0	2548,9	584,33	2148,1
0,375	141,32	0,001 081	0,4914	594,40	1956,9	2551,3	594,81	2140,8
0,40	143,63	0,001 084	0,4625	604,31	1949,3	2553,6	604,74	2133,8
0,45	147,93	0,001 088	0,4140	622,77	1934,9	2557,6	623,25	2120,7

PROPRIEDADE TERMODINÂMICA ENTALPIA

O estado 2, está na região de vapor superaquecido
Tabela A1.2

$$h_2 = 3066.8$$



	$P = 0,20 \text{ MPa (120,23)}$				$P = 0,30 \text{ MPa (133,55)}$				$P = 0,40 \text{ MPa (143,63)}$			
Sat.	0,8857	2529,5	2706,7	7,1272	0,6058	2543,6	2725,3	6,9919	0,4625	2553,6	2738,6	6,8959
150	0,9596	2576,9	2768,8	7,2795	0,6339	2570,8	2761,0	7,0778	0,4708	2564,5	2752,8	6,9299
200	1,0803	2654,4	2870,5	7,5066	0,7163	2650,7	2865,6	7,3115	0,5342	2646,8	2860,5	7,1706
250	1,1988	2731,2	2971,0	7,7086	0,7964	2728,7	2967,6	7,5166	0,5951	2726,1	2964,2	7,3789
300	1,3162	2808,6	3071,8	7,8926	0,8753	2806,7	3069,3	7,7022	0,6548	2804,8	3066,8	7,5662
400	1,5493	2966,7	3276,6	8,2218	1,0315	2965,6	3275,0	8,0330	0,7126	2964,4	3273,4	7,8985

$${}_1Q_2 = 0,5 (3066.8 - 1552,3) = 757,25 \text{ kJ}$$

$${}_1W_2 = mp(v_2 - v_1) = 0,5 \times 400(0.6548 - 0.2) = 91,6 \text{ kJ}$$

PROPRIEDADE TERMODINÂMICA ENTALPIA

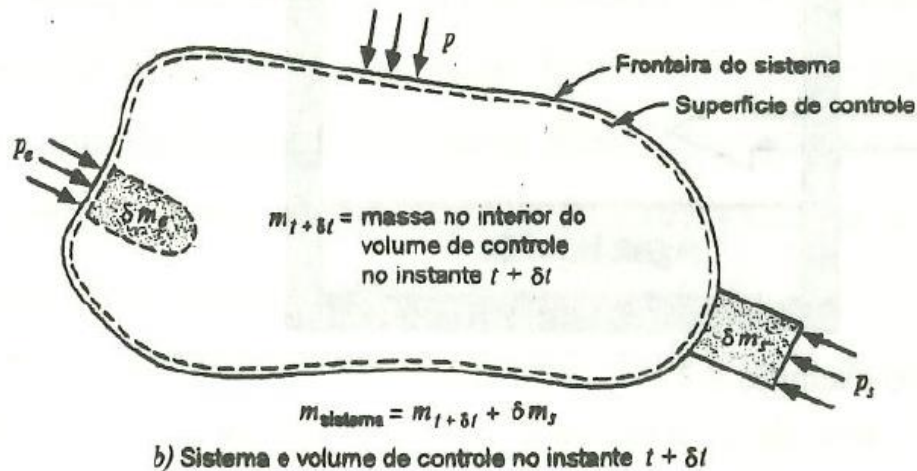
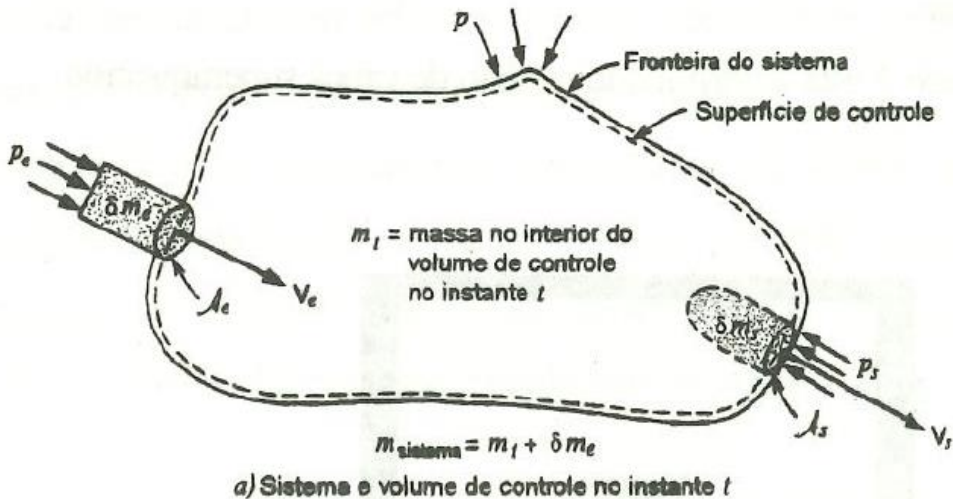
Portanto:

$$U_2 - U_1 = {}_1Q_2 - {}_1W_2 = 757,25 - 91,6 = 665,65 \text{ kJ}$$

Esta é a variação da energia interna no sistema

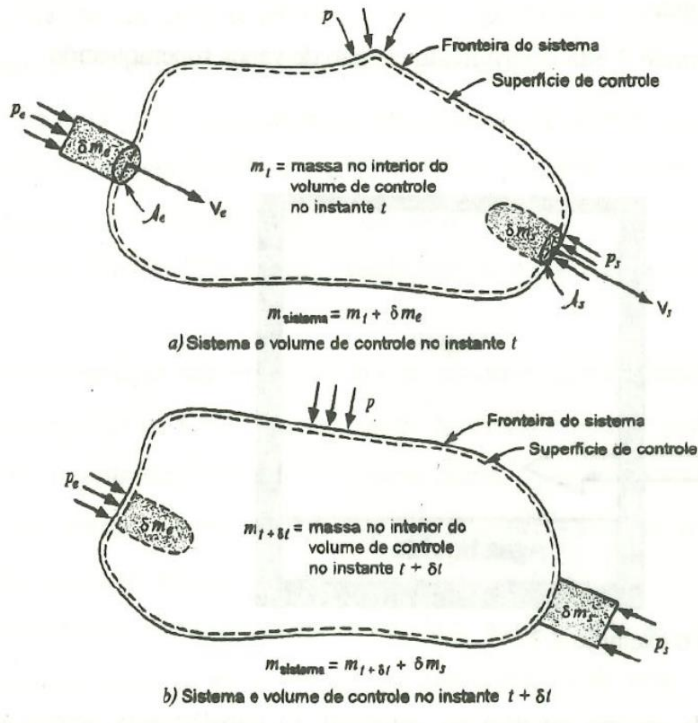
PROPRIEDADE TERMODINÂMICA ENTALPIA

CONSERVAÇÃO DE MASSA E O VOLUME DE CONTROLE



Durante o intervalo δt , a massa δm_e entra no VC e a massa δm_s sai. Também a massa no início do intervalo é m_t e no final $m_{t+\delta t}$. Sendo assim, pode-se escrever:

PROPRIEDADE TERMODINÂMICA ENTALPIA



Durante o intervalo δt , a massa δm_e entra no VC e a massa δm_s sai.

Também a massa no início do intervalo é m_t e no final $m_{t + \delta t}$. Sendo assim, pode-se escrever:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Massa para} \\ t + \delta t \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Massa} \\ \text{inicial} \\ t \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Massa que} \\ \text{entrou} \\ \text{durante } \delta t \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Massa que} \\ \text{saiu} \\ \text{durante } \delta t \end{array} \right]$$

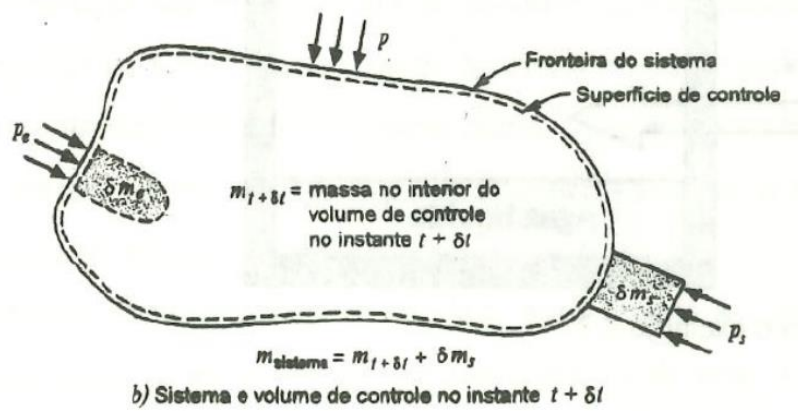
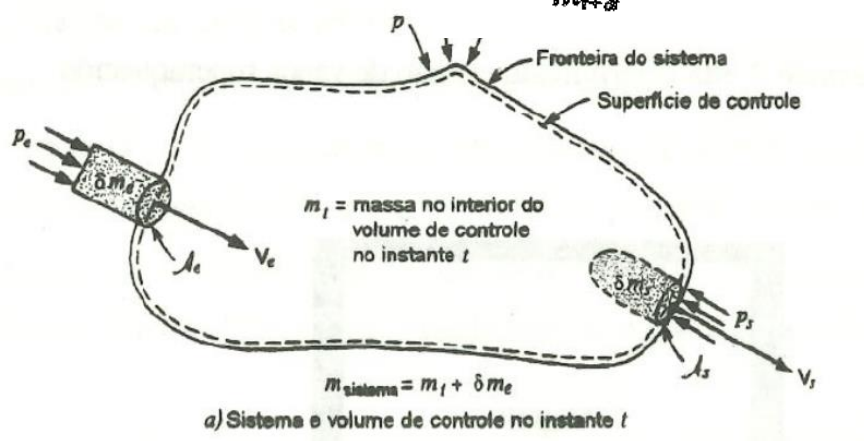
PROPRIEDADE TERMODINÂMICA ENTALPIA

$$\left[\begin{array}{c} \text{Massa para} \\ t + \delta t \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Massa} \\ \text{inicial} \\ t \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Massa que} \\ \text{entrou} \\ \text{durante } \delta t \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Massa que} \\ \text{saiu} \\ \text{durante } \delta t \end{array} \right]$$

$$m_{t+\delta t} = m_t + \delta m_e - \delta m_s$$

ou ainda:

$$\delta m_s + \delta m_e = m_{t+\delta t} - m_t$$



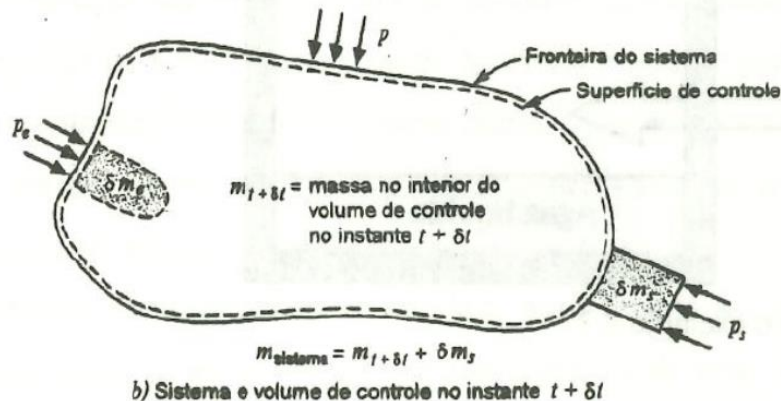
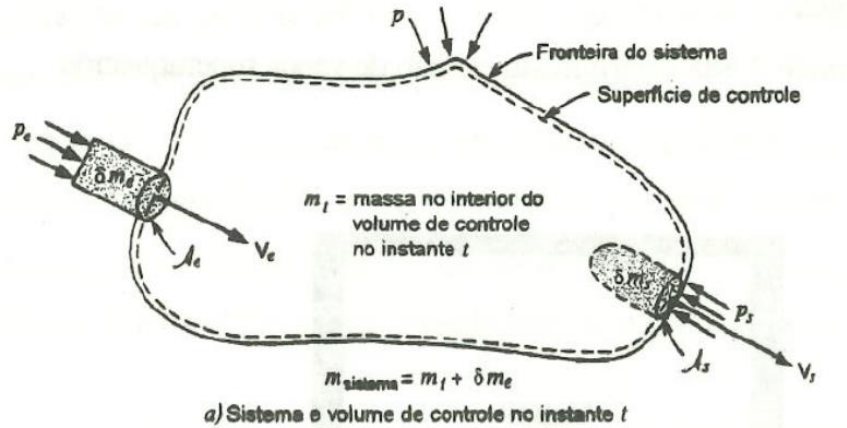
PROPRIEDADE TERMODINÂMICA ENTALPIA

Pode-se também pensar que o fluxo líquido de massa transferida ao VC no intervalo δt é igual ao acréscimo de massa dentro do mesmo.

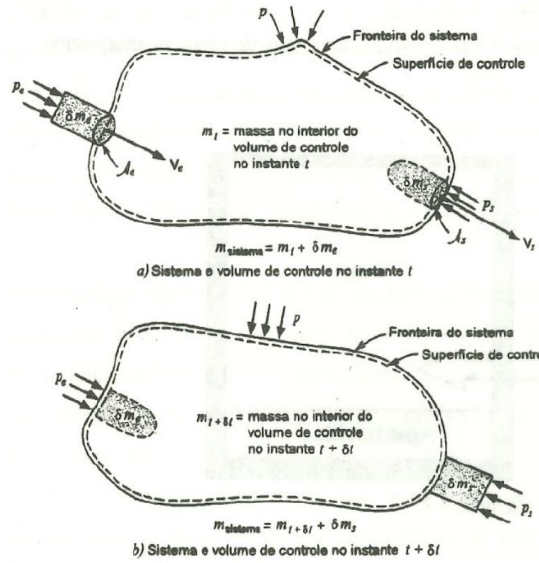
$$\begin{aligned}
 (\delta m_e - \delta m_s) &= m_{t+\delta t} - m_t \\
 (m_{t+\delta t} - m_t) + (\delta m_s - \delta m_e) &= 0
 \end{aligned}
 \tag{8.14}$$

Em um intervalo de tempo δt :

$$\left(\frac{m_{t+\delta t} - m_t}{\delta t} \right) + \frac{\delta m_s}{\delta t} - \frac{\delta m_e}{\delta t} = 0$$



PROPRIEDADE TERMODINÂMICA ENTALPIA



Para o intervalo de tempo tendendo zero:

$$\lim_{\delta t \rightarrow 0} \left(\frac{m_{t+\delta t} - m_t}{\delta t} \right) = \frac{dm_{VC}}{dt}$$

$$\lim_{\delta t \rightarrow 0} \left(\frac{\delta m_s}{\delta t} \right) = \dot{m}_s$$

$$\lim_{\delta t \rightarrow 0} \left(\frac{\delta m_e}{\delta t} \right) = \dot{m}_e$$

A equação em termos de fluxo instantâneo é:

$$\frac{dm_{VC}}{dt} + \sum \dot{m}_s - \sum \dot{m}_e = 0$$

A equação da CONTINUIDADE

PROPRIEDADE TERMODINÂMICA ENTALPIA

PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA PARA UM VC:

$${}_1Q_2 = E_2 - E_1 + {}_1W_2$$

$$\frac{\delta Q}{\delta t} = \frac{E_2 - E_1}{\delta t} + \frac{\delta W}{\delta t}$$

E_1 = energia do VC no instante t

$E_{t+\delta t}$ = energia do VC no instante $t+\delta t$

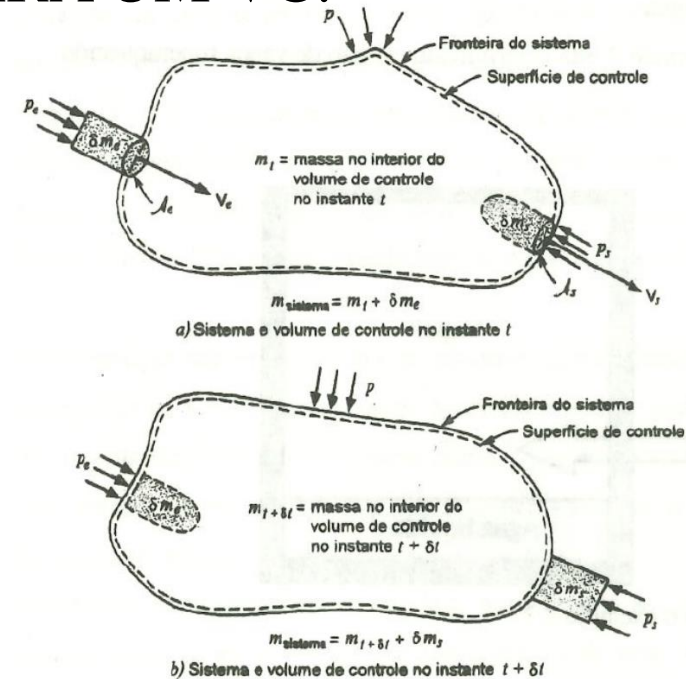
então

$E_1 = E_1 + e_c \delta m_c$ = energia do sistema no instante t

$E_2 = E_{t+\delta t} + e_s \delta m_s$ = energia do sistema no instante $t+\delta t$

Portanto:

$$\begin{aligned} E_2 - E_1 &= E_{t+\delta t} + e_s \delta m_s - E_1 - e_c \delta m_c \\ &= (E_{t+\delta t} - E_1) + (e_s \delta m_s - e_c \delta m_c) \end{aligned}$$



PROPRIEDADE TERMODINÂMICA ENTALPIA

PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA PARA UM VC:

$$E_2 - E_1 = E_{t+\delta t} + e_e \delta m_s - E_t - e_e \delta m_e$$

$$= (E_{t+\delta t} - E_t) + (e_e \delta m_s - e_e \delta m_e)$$

o termo $(e_e \delta m_s - e_e \delta m_e)$ representa o fluxo de energia que atravessa a superfície de controle durante δt e é associado às massas δm_e e δm_s , que cruzam a superfície de controle.

O trabalho realizado por δm_e pode ser dado por:

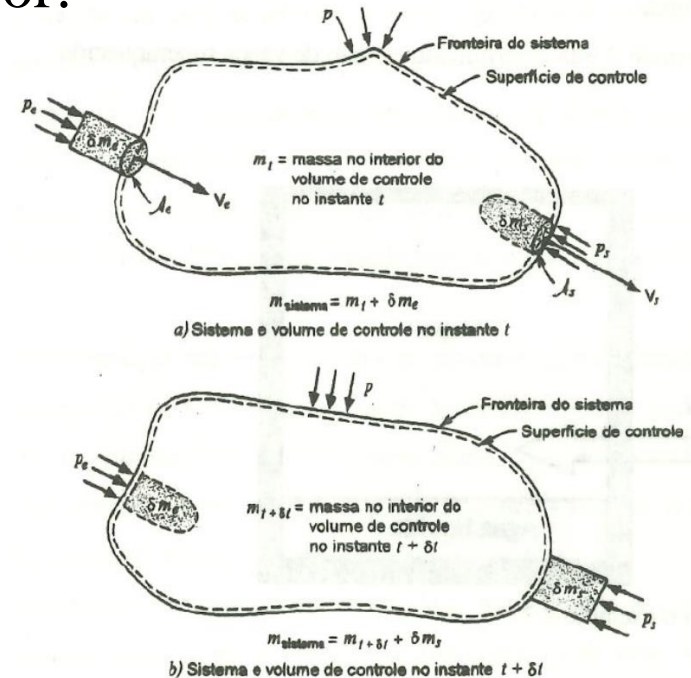
$$p_e v_e \delta m_e$$

por δm_s pode ser dado por:

$$p_s v_s \delta m_s$$

O trabalho realizado pelo sistema:

$$\delta W = \delta W_{VC} = (p_s v_s \delta m_s - p_e v_e \delta m_e)$$



PROPRIEDADE TERMODINÂMICA ENTALPIA

PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA PARA UM VC:

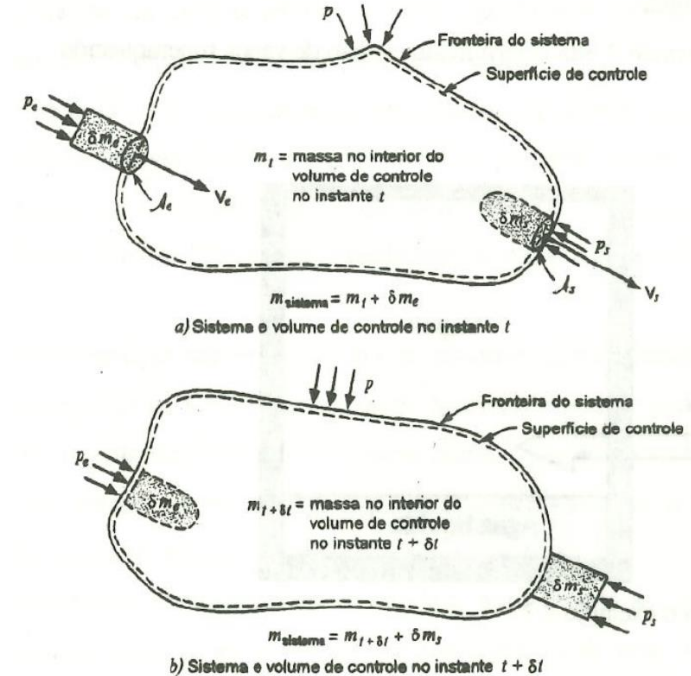
$$\frac{\delta Q}{\delta t} = \frac{E_2 - E_1}{\delta t} + \frac{\delta W}{\delta t} \quad (8.17)$$

$$\begin{aligned} E_2 - E_1 &= E_{t+\delta t} + e_s \delta m_s - E_t - e_e \delta m_e \\ &= (E_{t+\delta t} - E_t) + (e_s \delta m_s - e_e \delta m_e) \end{aligned} \quad (8.18)$$

$$\delta W = \delta W_{VC} = (p_s v_s \delta m_s - p_e v_e \delta m_e) \quad (8.20)$$

Dividindo-se as Eqs (8.18) e (8.20) por δt , substituindo-se na Eq. (8.17) e rearranjando:

$$\frac{\delta Q}{\delta t} + \frac{\delta m_e}{\delta t} (e_e + p_e v_e) = \left(\frac{E_{t+\delta t} - E_t}{\delta t} \right) + \frac{\delta m_s}{\delta t} (e_s + p_s v_s) + \frac{\delta W_{vc}}{\delta t}$$



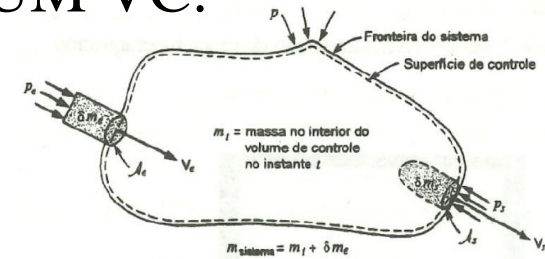
PROPRIEDADE TERMODINÂMICA ENTALPIA

PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA PARA UM VC:

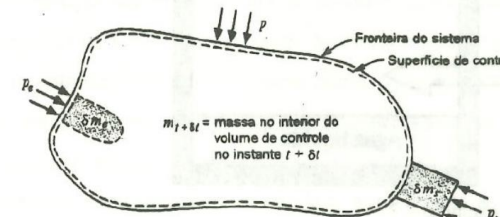
$$\frac{\delta Q}{\delta t} + \frac{\delta m_e}{\delta t} (e_e + p_e v_e) = \left(\frac{E_{t+\delta t} - E_t}{\delta t} \right) + \frac{\delta m_s}{\delta t} (e_s + p_s v_s) + \frac{\delta W_{vc}}{\delta t}$$

Cada um dos termos de fluxo pode ser escrito na forma:

$$e + pv = u + pv + \frac{V^2}{2} + gZ$$



a) Sistema e volume de controle no instante t



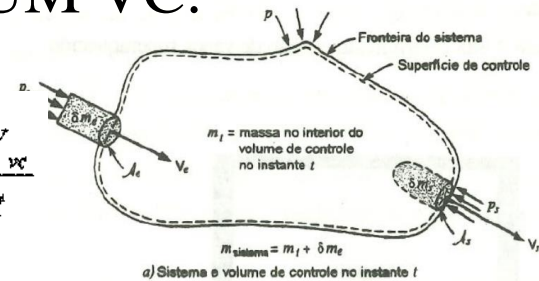
b) Sistema e volume de controle no instante $t + \delta t$

$$\frac{\delta Q}{\delta t} + \frac{\delta m_e}{\delta t} \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gZ_e \right) = \left(\frac{E_{t+\delta t} - E_t}{\delta t} \right) + \frac{\delta m_s}{\delta t} \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gZ_s \right) + \frac{\delta W_{vc}}{\delta t}$$

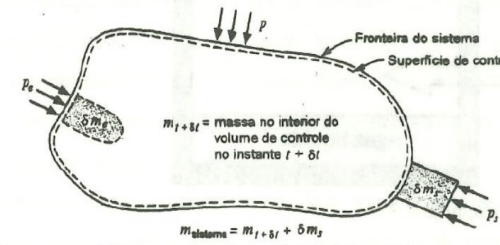
PROPRIEDADE TERMODINÂMICA ENTALPIA

PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA PARA UM VC:

$$\frac{\delta Q}{\delta t} + \frac{\delta m_e}{\delta t} \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gZ_e \right) = \left(\frac{E_{t+\delta t} - E_t}{\delta t} \right) + \frac{\delta m_s}{\delta t} \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gZ_s \right) + \frac{\delta W_{vc}}{\delta t}$$



No limite, quando δt tende a zero:



$$\dot{Q}_{vc} + \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gZ_e \right) = \frac{dE_{vc}}{dt} + \sum \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gZ_s \right) + \dot{W}_{vc}$$

Se não houver fluxo de massa passando pelas fronteiras do VC:

$$\dot{Q} = \frac{dE}{dt} + \dot{W}$$

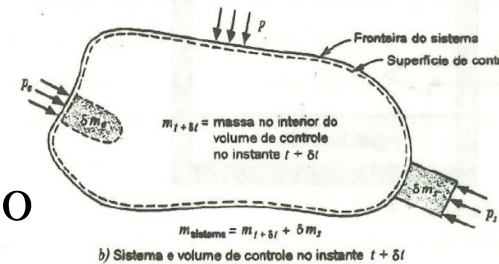
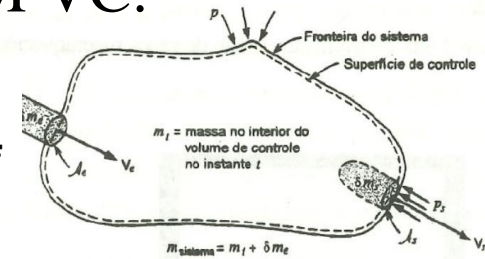
PROPRIEDADE TERMODINÂMICA ENTALPIA

PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA PARA UM VC:

$$\dot{Q}_{vc} + \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gZ_e \right) = \frac{dE_{vc}}{dt} + \sum \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gZ_s \right) + \dot{W}_{vc}$$

Se o processo está em regime permanente:

- 1 – O VC não se move
- 2 – O estado das substâncias não varia no tempo
- 3 – O fluxo de massa e seu estado não varia no tempo
- 4 – As taxas de **Calor** e **Trabalho** não variam no tempo



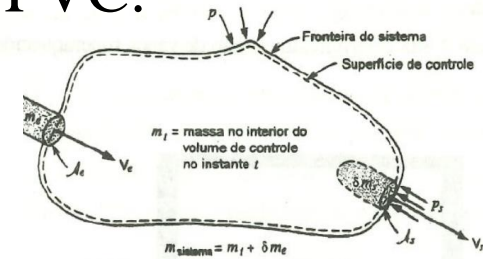
$$\frac{dm_{VC}}{dt} = 0 \quad \frac{dE_{VC}}{dt} = 0 \quad \sum \dot{m}_e = \sum \dot{m}_s$$

$$\dot{Q}_{vc} + \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gZ_e \right) = \sum \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gZ_s \right) + \dot{W}_{vc}$$

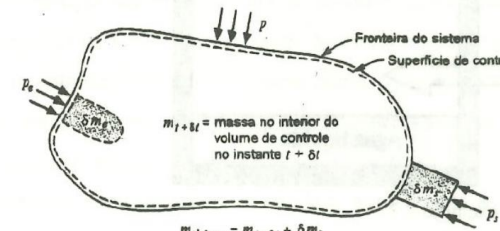
PROPRIEDADE TERMODINÂMICA ENTALPIA

PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA PARA UM VC:

$$\dot{Q}_{vc} + \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gZ_e \right) = \sum \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gZ_s \right) + \dot{W}_{vc}$$



a) Sistema e volume de controle no instante t



b) Sistema e volume de controle no instante $t + \delta t$

$$\dot{m}_e = \dot{m}_s = \dot{m}$$

$$\dot{Q}_{vc} + \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gZ_e \right) = \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gZ_s \right) + \dot{W}_{vc}$$

Rearranjando essa equação:

$$q + h_e + \frac{V_e^2}{2} + gZ_e = h_s + \frac{V_s^2}{2} + gZ_s + w$$

onde:

$$q = \frac{\dot{Q}_{vc}}{\dot{m}} \quad e \quad w = \frac{\dot{W}_{vc}}{\dot{m}}$$