



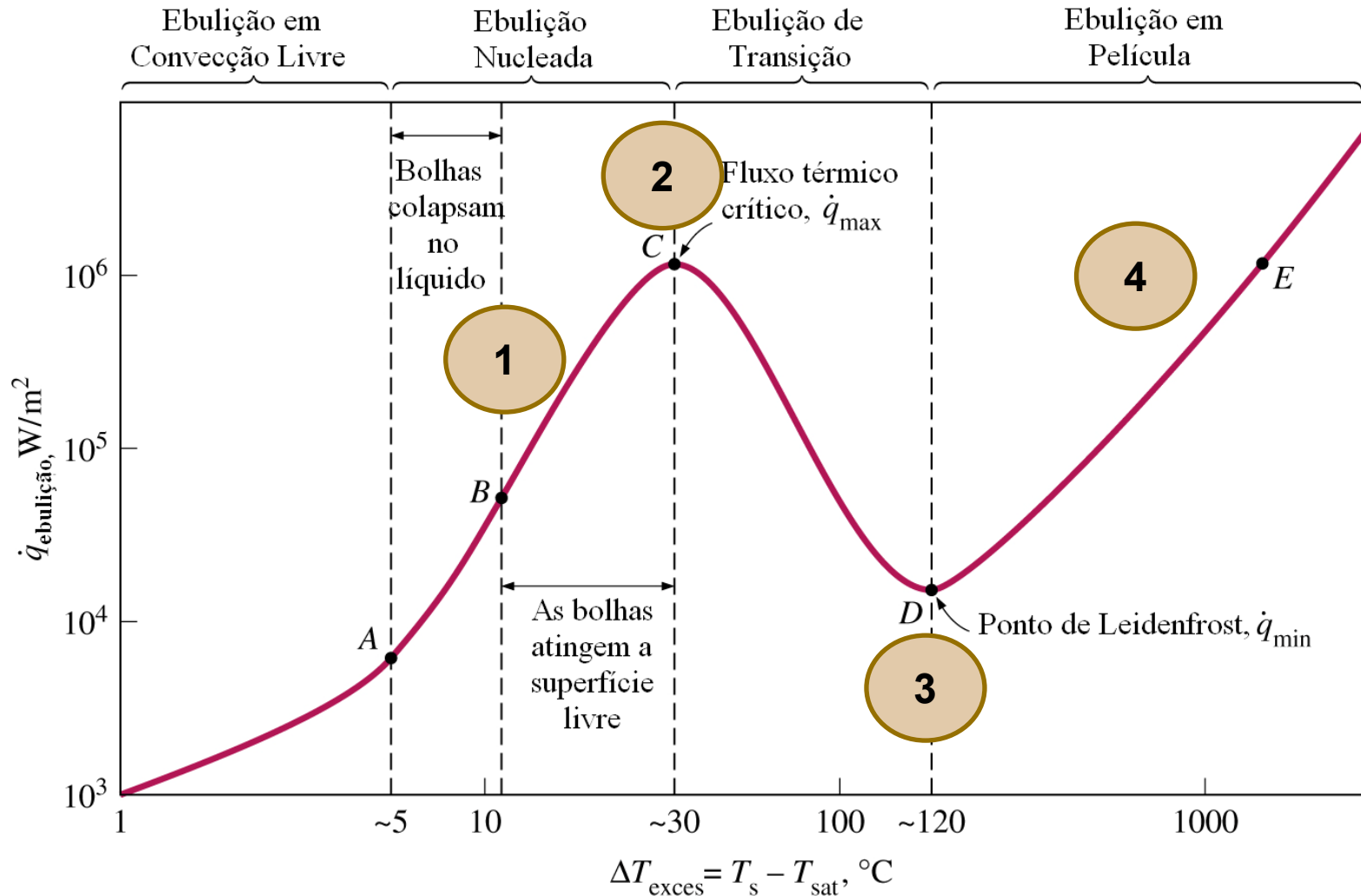
Transmissão de calor

3º Ano

Aula 24 ▫ Aula Prática-9

- ▣ Convecção com mudança de fase

Regimes e Curva de Ebulição



Regimes e Curva de Ebulição

1

$$q_{nucleada} = \mu_l h_{fg} \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{1/2} \left(\frac{c_{p,l} \Delta T_e}{C_{s,f} h_{fg} Pr_l^n} \right)^3 \quad [W/m^2]$$

2

$$q_{max} = C_{cr} h_{fg} [\sigma g \rho_v^2 (\rho_l - \rho_v)]^{1/4} [W/m^2]$$

3

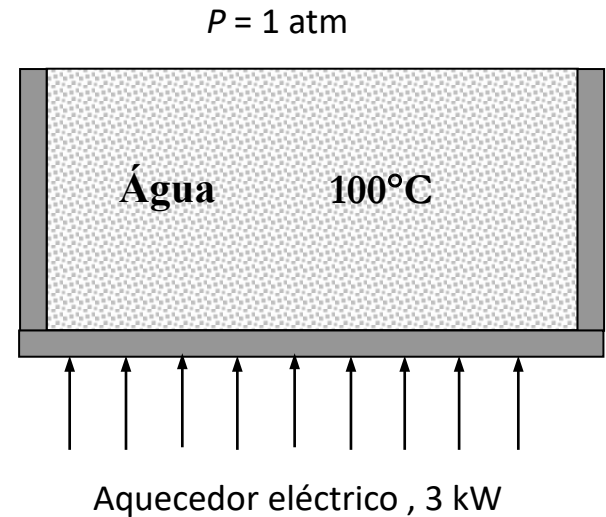
$$q_{min} = C \rho_v h_{fg} \left[\frac{\sigma g (\rho_l - \rho_v)}{(\rho_l + \rho_v)^2} \right]^{1/4} [W/m^2]$$

4

$$q_{película} = C_{película} \left[\frac{g k_v^3 \rho_v (\rho_l - \rho_v) [h_{fg} + 0,4 C_{pv} (T_s - T_{sat})]}{\mu_v D (T_s - T_{sat})} \right]^{1/4} (T_s - T_{sat})$$

Problema -24.1(I)

Água entra em ebulição a 1 atm e $T_{\text{sat}}=100^\circ\text{C}$ numa panela de aço polida mecanicamente, de 6 mm de espessura e 300 mm de diâmetro, colocada sobre um aquecedor eléctrico de potência de 3 kW. Apenas 60% do calor gerado pelo aquecedor é transferido para a panela. Determine a temperatura na superfície interna da panela e a diferença de temperaturas entre a parte interna e externa da panela.



Problema -24.1 (Resolução I)

Assume-se:

1. Existência de condições para fluxo estável;
2. Perdas de calor na panela desprezíveis;
3. Regime de ebulição nucleada;
4. escoamento unidimensional na base da panela.

Propriedades da água à temperatura de saturação

$$\rho_l = 957.9 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$h_{fg} = 2257 \times 10^3 \text{ J} / \text{kg}$$

$$\rho_v = 0.60 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$\mu_l = 0.282 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m} / \text{s}$$

$$\sigma = 0.0589 \text{ N} / \text{m}$$

$$C_{pl} = 4217 \text{ J} / \text{kg} \cdot ^\circ \text{C}$$

$$\text{Pr}_l = 1.75$$

Tabela 23.1 Valores de $C_{s,f}$ para várias combinações superfície - líquido

Combinação Superfície - Fluido	$C_{s,f}$	n
Água Cobre		
Riscada	0,0068	1,0
Polido	0,0130	1,0
Água - aço inoxidável		
Atacada quimicamente	0,0130	1,0
Polido mecanicamente	0,0130	1,0
Esmerilada e polido	0,0060	1,0
Coberto de teflon	0,0058	1,0
Água - latão	0,0600	1,0
Água - níquel	0,0130	1,0
Água - platina	0,0154	1,0
n-pentano-cobre		
Polido	0,0154	1,7
Esmerilada	0,0049	1,7
Benzeno - cromo	0,01010	1,7
n-pentano-cobre		
Polido	0,0154	1,7
Álcool etílico - cromo	0,0027	1,7
Tetracloridrato de carbono - cobre	0,0130	1,7
Isopropanol – cobre	0,0025	1,7

Tabela 23.2 Tensão superficial na interface líquido-vapor para água

T, ° C	$\sigma, \text{N/m}^2$
0	0,0757
20	0,0727
40	0,0696
60	0,0662
80	0,0627
100	0,0589
120	0,0550
140	0,0509
160	0,0466
180	0,0422
200	0,0377
220	0,0331
240	0,0284
260	0,0237
280	0,0190
300	0,0144
320	0,0099
340	0,0056
360	0,0019
374	0

Problema -24.1 (Resolução II)

Outros dados:

$$k_{\text{steel}} = 14.9 \text{ W/m}\cdot\text{°C} \text{ (Tabela A-3),}$$

$$C_{sf} = 0.0130 \text{ e } n = 1.0 \text{ Para superfície de aço polida mecanicamente} \\ \text{(Tabela 23-3).}$$

A taxa de calor recebida pela panela.

$$\dot{Q} = 0.60 \times 3 \text{ kW} = 1.8 \text{ kW} = 1800 \text{ W}$$

$$A_s = \pi D^2 / 4 = \pi (0.30 \text{ m})^2 / 4 = 0.07069 \text{ m}^2$$

$$\dot{q} = \dot{Q} / A_s = (1800 \text{ W}) / (0.07069 \text{ m}^2) = 25.46 \text{ W/m}^2$$

A diferença de temperature entre as duas superficies da panela pode ser determinada de:

$$\dot{q} = k_{\text{aço}} \frac{\Delta T}{L} \rightarrow \Delta T = \frac{\dot{q}L}{k_{\text{aço}}} = \frac{(25,460 \text{ W/m}^2)(0,006 \text{ m})}{14,9 \text{ W/m}\cdot\text{°C}} = \mathbf{10,3\text{°C}}$$

Tabela 23.3 Valores do coeficiente crítico C_{cr} para uso na Equação 12.3 do calor máximo

Parâmetro adimensional

$$L^* = L \left[g (\rho_l - \rho_v) / \sigma \right]^{1/2}$$

Geometria do aquecedor	C_{cr}	Dimensão Característica do aquecedor. L	Intervalo do L^*
Grande aquecedor plano horizontal	0,149	Largura ou diâmetro	$L^* > 27$
Pequeno aquecedor plano horizontal ¹	$18,9K_1$	Largura ou diâmetro	$9 < L^* < 20$
Grande cilindro horizontal	0,12	Raio	$L^* > 1,2$
Pequeno cilindro horizontal	$0,12L^{*-0,25}$	Raio	$0,15 < L^* < 1,2$
Grande esfera	0,11	Raio	$L^* > 4,26$
Pequena esfera	$0,227L^{*-0,5}$	Raio	$0,15 < L^* < 4,26$

$${}^1K_1 = \sigma / \left[g (\rho_l - \rho_v) A_{aquecedor} \right]$$

Problema -24.1 (Resolução III)

Assumindo que a ebulição é nucleada a temperatura da parte interna da panela pode ser determinada de:

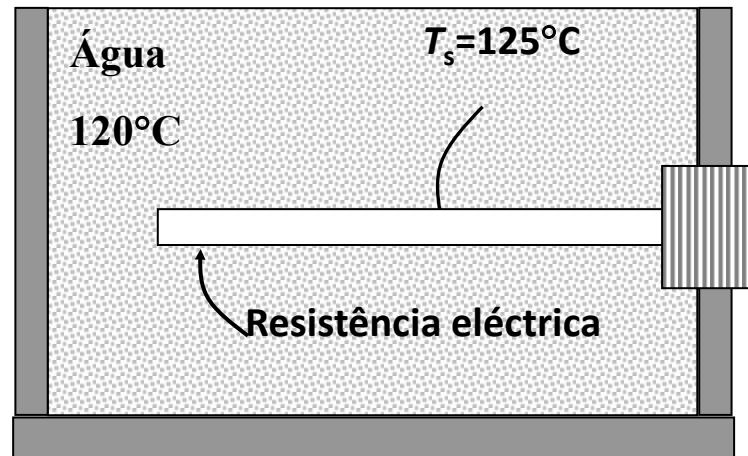
$$\dot{q}_{\text{nucleada}} = \mu_l h_{fg} \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{1/2} \left(\frac{C_{p,l} (T_s - T_{\text{sat}})}{C_{sf} h_{fg} \text{Pr}_l^n} \right)^3$$
$$25,460 = (0.282 \times 10^{-3})(2257 \times 10^3) \left[\frac{9.8(957.9 - 0.60)}{0.0589} \right]^{1/2} \left(\frac{4217(T_s - 100)}{0.0130(2257 \times 10^3)1.75} \right)^3$$

$$T_s = \mathbf{105.7^\circ \text{C}}$$

Que corresponde a faixa de variação de $T_s - T_{\text{sat}} = (5^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C})$ para ebulição nucleada. Portanto é válido o pressuposto assumido.

Problema -24.2 (I)

Água é fervida, num recipiente de aço esmerilado e polido, até a temperatura de saturação de 120°C por uma resistência eléctrica cuja temperatura da superfície não excede 125°C . Determine a taxa de evaporação da água, sabendo que a resistência eléctrica tem 20 mm de diâmetro e 0,65 m de comprimento.



Problema -24.2 (Resolução I)

Assume-se:

1. Existência de condições para fluxo estável;
2. Perdas de calor na panela desprezíveis;
3. Regime de ebulição nucleada, pois:

$$\Delta T = T_s - T_{\text{sat}} = 125 - 120 = 5^\circ \text{C}$$

Portanto, encontra-se na faixa correspondente a ebulição nucleada (5 to 30°C) para água.

Propriedades da água à temperature de saturação: Tabela 23-1
Tabela A-9

$$\rho_l = 943.4 \text{ kg / m}^3$$

$$h_{fg} = 2203 \times 10^3 \text{ J / kg}$$

$$\rho_v = 1.12 \text{ kg / m}^3$$

$$\mu_l = 0.232 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m / s}$$

$$\sigma = 0.0550 \text{ N / m}$$

$$C_{pl} = 4244 \text{ J / kg} \cdot ^\circ \text{C}$$

$$\text{Pr}_l = 1.44$$

Problema -24.2 (Resolução II)

Outros dados:

$C_{sf} = 0.0060$ e $n = 1.0$ para superfície de aço esmerilada e polida (Table 23-3).

Assumindo ebulição nucleada a taxa de transferência de calor por unidade de área nucleada determina-se de:

$$\begin{aligned}\dot{q}_{\text{nucleada}} &= \mu_l h_{fg} \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{1/2} \left(\frac{C_{p,l}(T_s - T_{\text{sat}})}{C_{sf} h_{fg} \text{Pr}_l^n} \right)^3 \\ &= (0,232 \times 10^{-3})(2203 \times 10^3) \left[\frac{9,8(943,4 - 1,12)}{0,0550} \right]^{1/2} \left(\frac{4244(125 - 120)}{0,0060(2203 \times 10^3)1.44} \right)^3 \\ &= 290190 \text{ W/m}^2\end{aligned}$$

Problema -24.2 (Resolução III)

A área superficial do aquecedor é:

$$A_s = \pi DL = \pi(0.02 \text{ m})(0.65 \text{ m}) = 0.04084 \text{ m}^2$$

A taxa de transferência de calor durante a ebulição nucleada determina-se de:

$$\dot{Q}_{\text{ebulição}} = A_s \dot{q}_{\text{nucleada}} = (0.04084 \text{ m}^2)(290,190 \text{ W/m}^2) = 11,852 \text{ W}$$

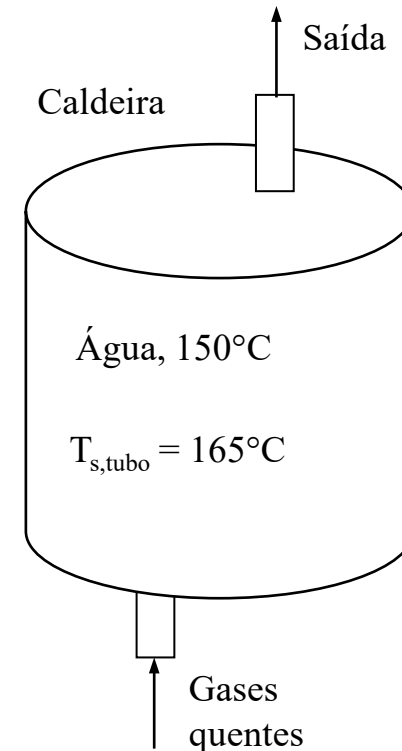
A taxa de evaporação da água resultante da ebulição será:

$$\dot{m}_{\text{evaporada}} = \frac{\dot{Q}_{\text{ebulição}}}{h_{fg}} = \frac{11,852 \text{ J/s}}{2203 \times 10^3 \text{ J/kg}} \left(\frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \right) = \mathbf{19,4 \text{ kg/h}}$$

Que representa a quantidade de vapor produzido.

Problema -24.3 (I)

Água é aquecida numa caldeira até temperatura de saturação $T_{\text{sat}} = 150\text{ °C}$ por gases quentes que fluem no interior de um tubo cilíndrico, de aço polido, submerso na água, cuja temperatura da superfície T_s é de 165 °C . Determine o fluxo de calor, a taxa de transferência de calor para a água, a taxa de evaporação, o fluxo máximo crítico, a razão entre os fluxos e a temperatura da superfície do tubo considerando o fluxo máximo.



Problema -24.3 (Resolução I)

Assumime-se:

1. Existência de condições para fluxo estável;
2. Perdas de calor no tubo desprezíveis;
3. Regime de ebulição nucleada, pois:

$$\Delta T = T_s - T_{\text{sat}} = 165 - 150 = 15^\circ \text{C}$$

Portanto, encontra-se na faixa correspondente a ebulição nucleada (5 to 30°C) para água.

Propriedades da água à temperature de saturação: Tabela 23-1
Tabela A-9

$$\rho_l = 916.6 \text{ kg / m}^3$$

$$\rho_v = 2.55 \text{ kg / m}^3$$

$$\sigma = 0.0488 \text{ N / m}$$

$$\text{Pr}_l = 1.16$$

$$h_{fg} = 2114 \times 10^3 \text{ J / kg}$$

$$\mu_l = 0.183 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m / s}$$

$$C_{pl} = 4311 \text{ J / kg} \cdot ^\circ \text{C}$$

Problema -24.3 (Resolução II)

O coeficiente $C_{sf} = 0.0130$ e $n = 1.0$ para superfície de aço polida mecanicamente (Tabela 23-3).

Assumindo que a ebulição é nucleada o fluxo de calor determina-se da relação de Rohsenow:

$$\begin{aligned}\dot{q}_{\text{nucleada}} &= \mu_l h_{fg} \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{1/2} \left(\frac{C_{p,l}(T_s - T_{\text{sat}})}{C_{sf} h_{fg} \text{Pr}_l^n} \right)^3 \\ &= (0,183 \times 10^{-3})(2114 \times 10^3) \left[\frac{9,8(916,6 - 2,55)}{0,0488} \right]^{1/2} \left(\frac{4311(165 - 150)}{0,0130(2114 \times 10^3)1.16} \right)^3 \\ &= 1383000 \text{ W/m}^2\end{aligned}$$

Problema -24.3 (Resolução III)

A área de transferência de calor é:

$$A_s = \pi DL = \pi(0,05 \text{ m})(50 \text{ m}) = 7,854 \text{ m}^2$$

Portanto a taxa de calor.

$$\dot{Q}_{\text{ebulição}} = A_s \dot{q}_{\text{nucleada}} = (7.854 \text{ m}^2)(1,383,000 \text{ W/m}^2) = \mathbf{10,865,000 \text{ W}}$$

A taxa de evaporação determina-se de:

$$\dot{m}_{\text{evaporada}} = \frac{\dot{Q}_{\text{ebulição}}}{h_{fg}} = \frac{10865 \text{ kJ/s}}{2114 \text{ kJ/kg}} = \mathbf{5,139 \text{ kg/s}}$$

Para um elemento de aquecimento cilindro horizontal, o coeficiente C_{cr} determina-se da tabela 23.3.

$$L^* = L \left(\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right)^{1/2} = (0,025) \left(\frac{9,8(916,6 - 2,55)}{0,0488} \right)^{1/2} = 10,7 > 0,12$$

$$C_{cr} = 0,12 \quad (\text{como } L^* > 1,2 \text{ e é um cilindro grande})$$

Problema -22.3 (Resolução IV)

O fluxo máximo crítico determina-se de:

$$\begin{aligned}\dot{q}_{\max} &= C_{cr} h_{fg} [\sigma g \rho_v^2 (\rho_l - \rho_v)]^{1/4} \\ &= 0.12(2114 \times 10^3) [0.0488 \times 9.8 \times (2.55)^2 (916.6 - 2.55)]^{1/4} \\ &= 1,852,000 \text{ W / m}^2\end{aligned}$$

E a razão entre os fluxos será:

$$\frac{\dot{q}_{\max}}{\dot{q}_{\text{current}}} = \frac{1,852,000}{1,383,000} = \mathbf{1.34}$$

A temperatura na superfície do tubo considerando o fluxo máximo determina-se da relação de Rohsenow.

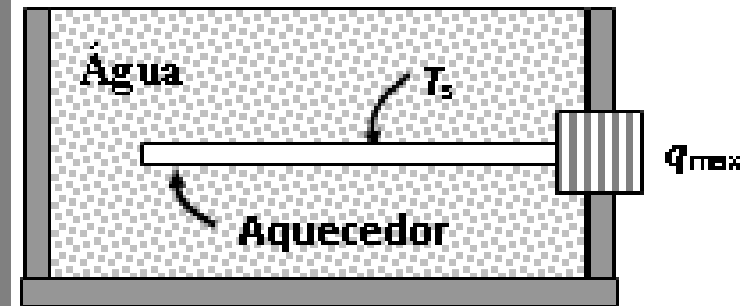
$$\begin{aligned}\dot{q}_{\text{nucleate,cr}} &= \mu_l h_{fg} \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{1/2} \left(\frac{C_{p,l}(T_{s,cr} - T_{\text{sat}})}{C_{sf} h_{fg} \text{Pr}_l^n} \right)^3 \\ 1,852,000 &= (0.183 \times 10^{-3})(2114 \times 10^3) \left[\frac{9.8(916.6 - 2.55)}{0.0488} \right]^{1/2} \left(\frac{4311(T_{s,cr} - 150)}{0.0130(2114 \times 10^3)1.16} \right)^3 \\ T_{s,cr} &= \mathbf{166.5^\circ\text{C}}\end{aligned}$$



Trabalho Para Casa 09

Para se entender o fenômeno da ebulição, foram conduzidas experiências com água usando um fio horizontal, niquelado, com 30 cm de comprimento e 3 mm de diâmetro, aquecido electricamente.

Investigue os efeitos da pressão atmosférica e da emissividade do fio no fluxo crítico de calor e no aumento da temperatura do fio.





Trabalho Para Casa 09

Varie a pressão atmosférica de 70 kPa até 101,3 kPa com a emissividade fixa em 0,5 e faça a emissividade variar de 0,1 a 1,0 com a pressão atmosférica fixa em 101,3 kPa. Trace um gráfico do fluxo de calor crítico e do aumento da temperatura, em função da pressão atmosférica, e outro em função da emissividade e apresente conclusões.

Enviar até a 0 hora da sexta-feira dia 24 de Maio de 2024 com o “subject”: TPC09.