



---

# Transmissão de calor

---

3º Ano

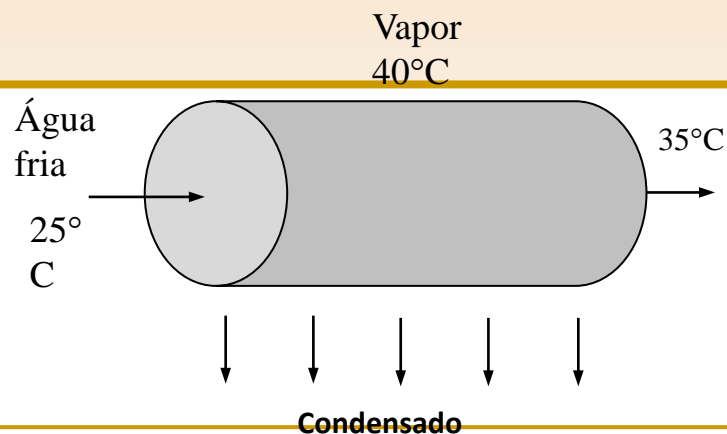
---

# Aula 26 ▫ Aula Prática-9

- Convecção com mudança de fase
- Condensação

## Problema -26.1(I)

Vapor a uma temperatura de saturação de  $T_{\text{sat}} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$  condensa na parte externa de um tubo fino horizontal que se encontra a  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ . O calor é transferido para a água de resfriamento que entra no tubo a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  e sai a  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ . A água escoia a  $2 \text{ m/s}$  e o diâmetro do tubo é de  $0,03 \text{ m}$ . Determine a taxa de condensação de vapor, o calor transferido, o coeficiente global de transferência de calor e o comprimento do tubo.



---

# Problema -26.1 (Resolução I)

## **Assume-se:**

1. Condições de regime estacionário;
2. O tubo pode ser considerado isotérmico;
3. Fluxo de líquido através do tubo está completamente desenvolvido;
4. A espessura e resistência térmica do tubo é desprezível.

## Problema -26.1 (Resolução II)

Propriedades da água à temperatura de saturação  $T_{\text{sat}}=40\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$h_{\text{fg}} = 2407 \times 10^3 \text{ J/kg e } \rho_v = 0.05 \text{ kg/m}^3$$

Propriedades da água à temperatura média do filme  $T_f$  e a temperatura do fluido (Tabela A-9)

$$T_f = \frac{(T_{\text{sat}} + T_s)}{2} = \frac{40 + 30}{2} = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_b = \frac{(T_{\text{in}} + T_{\text{out}})}{2} = \frac{25 + 35}{2} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$$

**Para 35°C:**

$$\begin{aligned}\rho_l &= 994.0 \text{ kg/m}^3 \\ \mu_l &= 0.720 \times 10^{-3} \text{ kg/m}\cdot\text{s} \\ C_{pl} &= 4178 \text{ J/kg}\cdot^{\circ}\text{C} \\ k_l &= 0.623 \text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C}\end{aligned}$$

**Para 30°C:**

$$\begin{aligned}\rho_l &= 996.0 \text{ kg/m}^3 \\ \nu_l &= \mu_l / \rho_l = 0.801 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \\ C_{pl} &= 4178 \text{ J/kg}\cdot^{\circ}\text{C} \\ k_l &= 0.615 \text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C} \\ \text{Pr} &= 5.42\end{aligned}$$

## Problema -26.1 (Resolução III)

O fluxo mássico da água e o calor transferido para a água determinam-se de:

$$\dot{m}_{\text{água}} = \rho v A_c = (996 \text{ kg/m}^3)(2 \text{ m/s})[\pi(0,03 \text{ m})^2 / 4] = 1,408 \text{ kg/s}$$

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p (T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) = (1,408 \text{ kg/s})(4178 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C})(35 - 25)^\circ\text{C} = \mathbf{58\,820 \text{ W}}$$

O calor latente de vaporização modificado será:

$$\begin{aligned} h_{fg}^* &= h_{fg} + 0,68 C_{pl} (T_{\text{sat}} - T_s) \\ &= 2407 \times 10^3 \text{ J/kg} + 0,68 \times 4178 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C} (40 - 30)^\circ\text{C} = 2435 \times 10^3 \text{ J/kg} \end{aligned}$$

## Problema -26.1 (Resolução IV)

O coeficiente de troca de calor por condensação determina-se de:

$$\begin{aligned} h_o = h_{\text{horizontal}} &= 0.729 \left[ \frac{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) h_{fg}^* k_l^3}{\mu_l (T_{\text{sat}} - T_s) D} \right]^{1/4} \\ &= 0.729 \left[ \frac{(9.8 \text{ m/s}^2)(994 \text{ kg/m}^3)(994 - 0.05 \text{ kg/m}^3)(2435 \times 10^3 \text{ J/kg})(0.623 \text{ W/m} \cdot \text{°C})^3}{(0.720 \times 10^{-3} \text{ kg/m} \cdot \text{s})(40 - 30) \text{°C}(0.03 \text{ m})} \right]^{1/4} \\ &= 9292 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C} \end{aligned}$$

O coeficiente médio de troca de calor para escoamento dentro de tubos determina-se de:

$$\begin{aligned} \text{Re} &= \frac{V_m D}{\nu} = \frac{(2 \text{ m/s})(0.03 \text{ m})}{0.801 \times 10^{-6}} = 74,906 \\ \text{Nu} &= 0.023 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.4} = 0.023(74,906)^{0.8} (5.42)^{0.4} = 359 \\ h_i &= \frac{k \text{Nu}}{D} = \frac{(0.615 \text{ W/m} \cdot \text{°C}) \times 359}{0.03 \text{ m}} = 7357 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C} \end{aligned}$$

## Problema -26.1 (Resolução V)

Note que a resistência térmica do tubo é desprezada e portanto o coeficiente global de troca de calor será:

$$U = \frac{1}{1/h_i + 1/h_o} = \frac{1}{1/7357 + 1/9292} = \mathbf{4106 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}}$$

A temperatura média logarítmica determina-se de:

$$\Delta T_{\ln} = \frac{\Delta T_i - \Delta T_e}{\ln(\Delta T_i / \Delta T_o)} = \frac{15 - 5}{\ln(15/5)} = \mathbf{9,10^\circ\text{C}}$$

E o comprimento do tubo será:

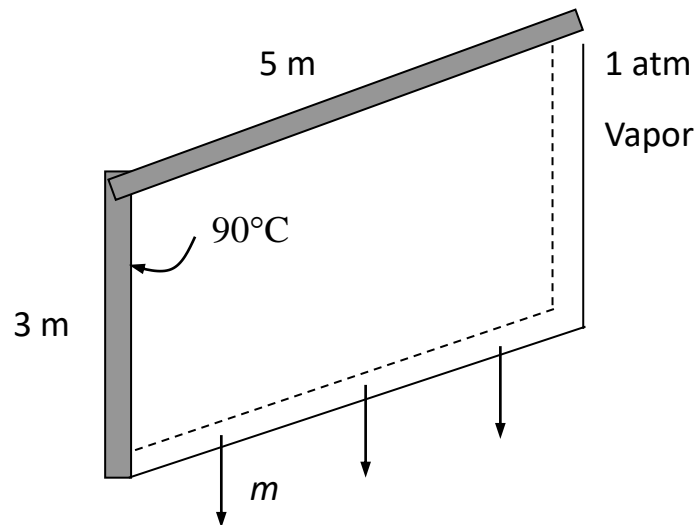
$$\dot{Q} = UA_s \Delta T_{\ln} \rightarrow L = \frac{\dot{Q}}{U(\pi D) \Delta T_{\ln}} = \frac{58820 \text{ W}}{(4106 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}) \pi (0,03 \text{ m}) (9,10^\circ\text{C})} = \mathbf{16,7 \text{ m}}$$

Que é maior que  $10D = 0,3 \text{ m}$  e portanto é correcto assumir que o escoamento é completamente desenvolvido.



## Problema -26.2 (I)

Vapor saturado à pressão atmosférica, portanto, a uma temperatura de saturação do  $T_{\text{sat}} = 100^\circ\text{C}$  condensa em uma placa vertical, que é mantida a  $90^\circ\text{C}$  por circulação de água de refrigeração através do outro lado. Determine a taxa de transferência de calor para a chapa e a taxa de condensação de vapor.



# Problema -26.2 (Resolução I)

## Assume-se:

1. Condições de regime estacionário;
2. A placa é isotérmica;
3. O Fluxo do condensado é onda laminar (a verificar);
4. A densidade do vapor é infinitamente pequena em relação a densidade do líquido.  $\rho_v \ll \rho_l$

Propriedades da água à temperatura de saturação  $T_{sat}=100$   
°C

$$h_{fg} = 2257 \times 10^3 \text{ J/kg e } \rho_v = 0,60 \text{ kg/m}^3$$

## Problema -26.2 (Resolução II)

Propriedades da água à temperatura média do filme  $T_f$ :  
(Tabela A-9)

$$T_f = \frac{(T_{\text{sat}} + T_s)}{2} = \frac{100 + 90}{2} = 95 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\rho_l = 961,5 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu_l = 0,297 \times 10^{-3} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$$

$$\nu_l = \mu_l / \rho_l = 0,309 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$C_{pl} = 4212 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$$

$$k_l = 0,677 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$$

## Problema -26.2 (Resolução II)

O calor latente de vaporização modificado será:

$$\begin{aligned}h_{fg}^* &= h_{fg} + 0,68C_{pl}(T_{\text{sat}} - T_s) \\ &= 2257 \times 10^3 \text{ J/kg} + 0,68 \times 4212 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}(100 - 90)^\circ\text{C} = 2286 \times 10^3 \text{ J/kg}\end{aligned}$$

O n° de Reynolds para fluxo onda laminar determina-se de:

$$\begin{aligned}\text{Re} = \text{Re}_{\text{vertical,wavy}} &= \left[ 4,81 + \frac{3,70Lk_l(T_{\text{sat}} - T_s)}{\mu_l h_{fg}^*} \left( \frac{g}{\nu_l^2} \right)^{1/3} \right]^{0,820} \\ &= \left[ 4,81 + \frac{3,70 \times (3 \text{ m}) \times (0,677 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}) \times (100 - 90)^\circ\text{C}}{(0,297 \times 10^{-3} \text{ kg/m} \cdot \text{s})(2286 \times 10^3 \text{ J/kg})} \left( \frac{9,8 \text{ m/s}^2}{(0,309 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})^2} \right)^{1/3} \right]^{0,82} = 1112\end{aligned}$$

## Problema -26.2 (Resolução III)

O que se situa na faixa de 30 a 1800. Portanto assumiu-se correctamente o escoamento. O coeficiente de transferência de calor será:

$$h = h_{\text{vertical,wavy}} = \frac{\text{Re} k_l}{1,08 \text{Re}^{1,22} - 5,2} \left( \frac{g}{\nu_l^2} \right)^{1/3}$$
$$= \frac{1112 \times (0,677 \text{ W/m} \cdot \text{°C})}{1,08 \cdot (1112)^{1,22} - 5,2} \left( \frac{9,8 \text{ m/s}^2}{(0,309 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})^2} \right)^{1/3} = 6279 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

A área de troca de calor determina-se de:

$$A_s = W \times L = (3\text{m})(5\text{m}) = 15\text{m}^2$$

O calor transferido no processo calcula-se de:

$$\dot{Q} = h A_s (T_{\text{sat}} - T_s) = (6279 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C})(15 \text{ m}^2)(100 - 90) \text{°C} = \mathbf{941\,850 \text{ W}}$$

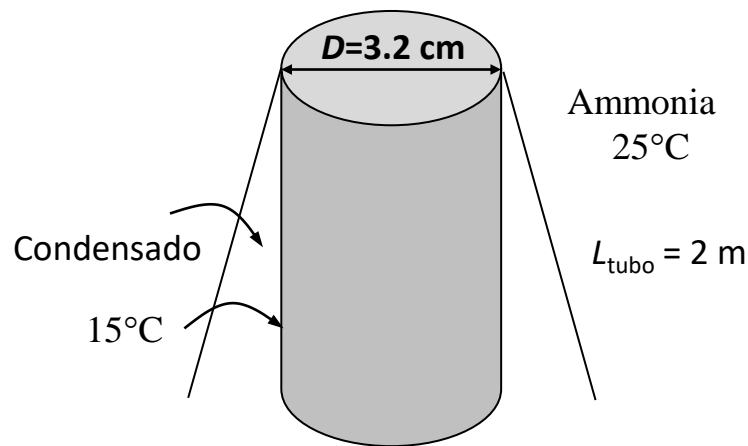
## Problema -26.2 (Resolução IV)

A taxa de condensação calcula-se de:

$$\dot{m}_{\text{condensation}} = \frac{\dot{Q}}{h_{fg}^*} = \frac{941850 \text{ J/s}}{2286 \times 10^3 \text{ J/kg}} = \mathbf{0,412 \text{ kg/s}}$$

## Problema -26.3 (I)

Amônio a uma temperatura de saturação de  $T_{\text{sat}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  condensa na superfície externa do tubo vertical que é mantida a  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  por circulação de água de refrigeração. Determine a taxa de transferência de calor para o refrigerante e a taxa de condensação do amônio.



# Problema -26.3 (Resolução I)

## Assume-se:

1. Condições de escoamento estacionário;
2. O tubo é isotérmico;
3. O tubo pode ser tratado como uma placa vertical;
4. O fluxo do condensado é turbulento sobre o tubo inteiro (esta hipótese deve ser verificada);
5. A densidade de vapor é muito menor do que a densidade do líquido.

Propriedades do amónio à temperatura de saturação

$$T_{\text{sat}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h_{\text{fg}} = 1166 \times 10^3 \text{ J/kg e } \rho_v = 7,809 \text{ kg/m}^3$$



## Problema -26.3 (Resolução II)

Propriedades do amónio à temperatura média do filme  $T_f$ :  
(Tabela A-11)

$$T_f = \frac{(T_{\text{sat}} + T_s)}{2} = \frac{25 + 15}{2} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\rho_l = 610,2 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu_l = 1,519 \times 10^{-4} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$$

$$\nu_l = \mu_l / \rho_l = 0,2489 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$C_{pl} = 4745 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$$

$$k_l = 0,4927 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$$

$$\text{Pr}_l = 1,463$$

## Problema -26.3 (Resolução III)

O calor latente de vaporização modificado será:

$$h_{fg}^* = h_{fg} + 0,68C_{pl}(T_{sat} - T_s)$$

$$= 1166 \times 10^3 \text{ J/kg} + 0,68 \times 4745 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C} (25 - 15)^\circ\text{C} = 1198 \times 10^3 \text{ J/kg}$$

O n° de Reynolds para fluxo turbulento determina-se de:

$$\text{Re}_{\text{vertical,turb}} = \left[ \frac{0,0690 L k_l P_r^{0,5} (T_{sat} - T_s) \left( \frac{g}{\nu_l^2} \right)^{1/3} - 151 P_r^{0,5} + 253}{\mu_l h_{fg}^*} \right]^{4/3}$$

$$\text{Re}_{\text{vertical,turb}} = \left[ \frac{0,0690 \cdot 2 \cdot 0,4827 \cdot 1,463^{0,5} (25 - 15) \left( \frac{10}{(0,2489 \times 10^{-6})^2} \right)^{1/3} - 151 \cdot 1,463^{0,5} + 253}{1,519 \times 10^{-4} \cdot 1198 \times 10^3} \right]^{4/3}$$

$$\text{Re}_{\text{vertical,turb}} = 2110$$

O n° de Reynolds é maior que 1800. Portanto assumiu-se correctamente o escoamento

## Problema -26.3 (Resolução IV)

O coeficiente de transferência de calor será:

$$h = h_{\text{vertical,turbulento}} = \frac{Re k_l}{8750 + 58 Pr^{-0,5} (Re^{0,75} - 253)} \left( \frac{g}{\nu_l^2} \right)^{1/3}$$
$$= \frac{2110 \times (0,4827 \text{ W/m} \cdot \text{°C})}{8750 + 58 \times 1,463^{-0,5} (2110^{0,75} - 253)} \left( \frac{9,81 \text{ m/s}^2}{(0,2489 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})^2} \right)^{1/3} = 4802,7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

A área de troca de calor determina-se de:

$$A_s = \pi DL = \pi(0,032 \text{ m})(2 \text{ m}) = 0,2011 \text{ m}^2$$

O calor transferido no processo calcula-se de:

$$\dot{Q} = h A_s (T_{\text{sat}} - T_s) = (4802,7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C})(0,2011 \text{ m}^2)(25 - 15) \text{°C} = \mathbf{9658,22 \text{ W}}$$

## Problema -26.3 (Resolução V)

A taxa de condensação calcula-se de:

$$\dot{m}_{\text{condensação}} = \frac{\dot{Q}}{h_{fg}^*} = \frac{9658,22 \text{ J/s}}{1198 \times 10^3 \text{ J/kg}} = \mathbf{8,062 \times 10^{-3} \text{ kg/s}}$$



# Trabalho Para Casa 10

Vapor saturado a  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  condensa sobre um dos lados de uma placa de  $3\text{ m} \times 3\text{ m}$  que está inclinada um ângulo  $\theta$  com a vertical. A placa é mantida a  $T_s$  por resfriamento do outro lado. Investigue os efeitos da temperatura da placa e do ângulo de inclinação da placa sobre, o coeficiente médio de transferência de calor e o fluxo mássico do condensado que escorre.

Fixe o ângulo em  $40^{\circ}$  e faça a temperatura da placa  $T_s$  variar de  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ , com o passo de  $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  e depois fixe a temperatura  $T_s$  em  $80^{\circ}\text{C}$  e faça o ângulo da placa  $\theta$  variar de  $0^{\circ}$  a  $60^{\circ}$  com o passo de  $3^{\circ}$ . Trace os gráficos do coeficiente de transferência de calor e do fluxo mássico do condensado que escorre, como funções da temperatura da placa e do ângulo de inclinação e comente os resultados.

Enviar até a 0 hora de quarta-feira dia 31 de Maio com o “subject”:  
TPCT10.