



## OPERAÇÕES UNITÁRIAS II

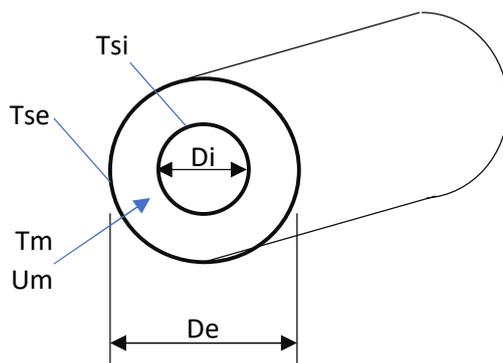
Prof. Antonio Carlos da Silva

### CÁLCULO DE COEFICIENTE DE PELÍCULA EM TROCADORES TUBULARES

Reposição para o período de suspensão de aulas devido à pandemia de COVID 19

#### COEFICIENTE DE PELÍCULA NA SEÇÃO ANULAR DE UM TROCADOR TUBULAR

(aula que seria dada no dia 20 de março de 2018)



$$Dh = \frac{4 \cdot Atr}{Pm}$$

Dh ... diâmetro hidráulico

Di ... diâmetro interno (diâmetro **externo** do tubo interno)

De ... diâmetro externo (diâmetro interno do tubo externo)

Tm ... temperatura média do fluido no escoamento anular

Um ... velocidade média do fluido no escoamento anular

Tsi ... temperatura na superfície interna anular (superfície externa do tubo interno)

Tse ... temperatura na superfície externa anular (superfície interna do tubo externo)

Pm ... Perímetro molhado (perímetro da seção dos tubos em contato com o líquido (interno e externo))

Atr ... Área da seção transversal ao escoamento na seção anular

Equações:

$$Atr = \frac{\pi}{4} \cdot De^2 - \frac{\pi}{4} \cdot Di^2 = \frac{\pi}{4} \cdot (De^2 - Di^2)$$

$$Pm = \pi \cdot De + \pi \cdot Di = \pi \cdot (De + Di)$$

$$Dh = \frac{4 \cdot (\frac{\pi}{4}) \cdot (De^2 - Di^2)}{\pi \cdot (De + Di)} \quad \therefore \boxed{Dh = De - Di}$$

Número de Nusselt para escoamento interno:  $Nu_i = \frac{h_i \cdot Dh}{k}$

Número de Nusselt para escoamento anular:  $Nu_e = \frac{h_e \cdot Dh}{k}$

hi ... coeficiente de película interno (no escoamento no interior do tubo)

he ... coeficiente de película externo (no escoamento na seção anular)

k ... condutividade térmica do fluido escoando

Para o escoamento turbulento é válida a relação de Dittus-Boelter:

$$Nu = \frac{h \cdot Dh}{k} = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^n$$

n = 0,4 ... fluido aquecendo

n = 0,3 ... fluindo esfriando

Nu ... Número de Nusselt

Re ... Número de Reynolds

Pr ... Número de Prandtl

Tabela 1 - Números de Nusselt para escoamento laminar plenamente desenvolvido em regiões anulares circulares com uma superfície isolada e a outra a temperatura constante:

<u>Di/De</u>	<u>Nu<sub>i</sub></u>	<u>Nu<sub>e</sub></u>
0,00	---	3,66
0,05	17,46	4,06
0,10	11,56	4,11
0,25	7,37	4,23
<b>0,50</b>	5,74	4,43
≈ 1,00	4,86	4,86

Nui ... Número de Nusselt na superfície interna da seção anular (superfície externa do tubo interno)

Nue ... Número de Nusselt na superfície externa da seção anular (superfície interna do tubo externo)

### Exemplo:

Um trocador de calor bitubular (tubos concêntricos), com configuração de escoamento contracorrente, é empregado para resfriar óleo lubrificante de um motor de turbina a gás industrial.

A vazão mássica de água através do tubo interno ( $D_i = 25 \text{ mm}$ ) é de  $0,2 \text{ kg/s}$ , enquanto a vazão do óleo através da região anular ( $D_e = 45 \text{ mm}$ ) é de  $0,1 \text{ kg/s}$ .

O óleo entra a  $100^\circ\text{C}$  ( $C_p = 2131 \text{ J/kg.K}$ ,  $\mu = 3,25 \cdot 10^{-2} \text{ N.s/m}^2$ ,  $k = 0,138 \text{ W/m.K}$ ) e a água entra a  $30^\circ\text{C}$  ( $c_p = 4178 \text{ J/kg.K}$ ,  $\mu = 725 \cdot 10^{-6} \text{ N.s/m}^2$ ,  $k = 0,625 \text{ W/m.K}$ ).

Qual deve ser o comprimento do trocador de calor se a temperatura de saída do óleo deve ser de  $60^\circ\text{C}$ ?

### Resolução:

Dados do óleo (fluido quente)

$$m_q = 0,1 \text{ kg/s}$$

$$T_{qe} = 100^\circ\text{C}$$

$$T_{qs} = 60^\circ\text{C}$$

$$C_{pq} = 2131 \text{ J/kg.K}$$

$$\mu = 3,25 \cdot 10^{-2} \text{ N.s/m}^2$$

$$k = 0,138 \text{ W/m.K}$$

Dados da água (fluido frio)

$$m_f = 0,2 \text{ kg/s}$$

$$T_{fe} = 30^\circ\text{C}$$

$$T_{fs} = ?$$

$$C_{pf} = 4178 \text{ J/kg.K}$$

$$\mu = 725 \cdot 10^{-6} \text{ N.s/m}^2$$

$$k = 0,625 \text{ W/m.K}$$

Cálculo da carga térmica do trocador de calor:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad \therefore \quad Q = 0,1 \cdot 2131 \cdot (100 - 60) \quad \therefore \quad \underline{Q = 8524 \text{ W}}$$

Cálculo da temperatura de saída da água:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad \therefore \quad 8524 = 0,2 \cdot 4178 \cdot (T_{fs} - 30) \quad \therefore \quad \underline{T_{fs} = 40,2^\circ\text{C}}$$

Cálculo de  $\Delta T_{ML}$ :

$$\Delta T_1 = T_{qe} - T_{fs} \quad \therefore \quad \Delta T_1 = 100 - 40,2 \quad \therefore \quad \Delta T_1 = 59,8^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_2 = T_{qs} - T_{fe} \quad \therefore \quad \Delta T_2 = 60 - 30 \quad \therefore \quad \Delta T_2 = 30^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{ML} = (\Delta T_2 - \Delta T_1) / \ln (\Delta T_2 / \Delta T_1) \quad \therefore \quad \Delta T_{ML} = (59,8 - 30) / \ln (59,8 / 30) \quad \therefore \quad \underline{\Delta T_{ML} = 43,2^\circ\text{C}}$$

Para o escoamento no tubo (água):

Cálculo do Número de Reynolds:

$$Re = 4 \cdot m / \pi \cdot D \cdot \mu \quad \therefore \quad Re = 4 \cdot 0,2 / (\pi \cdot 0,025 \cdot 725 \cdot 10^{-6}) \quad \therefore \quad \underline{Re = 14050} \text{ (regime turbulento - válida a relação de Dittus-Boelter)}$$

Cálculo do Número de Prandtl:

$$\underline{Pr = c_p \cdot \mu / k} \quad \therefore \quad Pr = 4178 \cdot 725 \cdot 10^{-6} / 0,625 \quad \therefore \quad \underline{Pr = 4,85}$$

Cálculo do coeficiente de película pela relação de Dittus-Boelter:

$$Nu = h \cdot D / k = 0,023 \cdot 14050^{0,8} \cdot 4,85^{0,4} \quad (\text{água se aquecendo, } n = 0,4) \quad \therefore \quad h \cdot 0,025 / 0,625 = 0,023 \cdot 14050^{0,8} \cdot 4,85^{0,4} \quad \therefore \quad \underline{h_i = 2250 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}}$$

Para o escoamento na seção anular (óleo):

Cálculo do diâmetro hidráulico:

$$D_h = D_e - D_i \quad \therefore \quad D_h = 0,045 - 0,025 \quad \therefore \quad \underline{D_h = 0,020 \text{ m}}$$

Cálculo do Número de Reynolds:

$$Re = 4.m/\pi.Dh.\mu \quad \therefore \quad Re = 4.0,1/(\pi.0,02.3,25.10^{-2}) \quad \therefore \quad Re = 196 \text{ (regime laminar)}$$

Cálculo do Número de Nusselt:

$$Di/De = 0,025/0,045 \quad \therefore \quad Di/De = 5,556$$

Na Tabela 1 (para regime laminar), obtém-se o Nui por interpolação (Di/De entre 0,5 e 1,0, com Nui entre 5,74 e 4,86): Nui = 5,64

Cálculo do coeficiente de película pela relação de Dittus-Boelter:

$$h.Dh/k = Nu \quad \therefore \quad h.0,02/0,138 = 5,64 \quad \therefore \quad h_e = 38,92 \text{ W/m}^2.K$$

Cálculo do coeficiente global de troca de calor (desprezando as resistências condutivas na parede e nas incrustações):

$$U_i = 1/[(1/h_i) + (De/h_e.D_i)] \quad \therefore \quad U_i = 1/[(1/2250) + (1/38,92)] \text{ (considerando } D_i = D_e, \text{ não informados no enunciado)} \quad \therefore \quad U_i = 37,74 \text{ W/m}^2.K$$

Cálculo da área de troca de calor e do comprimento dos tubos:

$$Q = U.A.\Delta T_{ML} \quad \therefore \quad 8524 = 38,24.A.43,2 \quad \therefore \quad A = 5,16 \text{ m}^2$$

$$A = \pi.D.L \quad \therefore \quad 5,16 = \pi.0,25.L \quad \therefore \quad L = 65,7 \text{ m}$$