

PROJETO MECATRÔNICA

Notas de Aula do Curso
PME2360

Vitor M. Martins
Régis S. Santos

Sumário

Sumário	1
1 Prefácio	3
1.1 Ex. 8.63	9
1.2 8.60	12
1.3 Convecção Natural x Convecção Forçada	14
1.4 12.44	17
1.5 13.119	21
1.6 Fator de Forma	23
1.7 Troca Radiante entre Superfícies	25
1.8 Ex. 6	28
1.9 Trocadores de calor	32
1.10 Exercício	33
1.11 Ex 11.35 da 6a Ed	35
1.12 11.70	37
1.13	39
1.14 Exercício 3	43

Prefácio

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

1. PREFÁCIO

8

1. 8.1 considerações fluido dinamicas
2. 8.2 considerações termicas
3. 8.3 balanço de energia
4. 8.4 escoamento laminar em tubos circulares
 - regime plenamente desenvolvido
 - região de entrada
5. 8.5 escoamento turbulento em tubos circulares
6. 8.6 tubos não circulares

8.1 Considerações fluido-dinamicas

$$R_{eD} = \frac{\rho \bar{u} D}{\mu} = \frac{\bar{u} D}{\nu}$$

$$R_{eD, critico} = 2300$$

Escoamento laminar:

$$\frac{X_{CD,v}}{D} = 0.05 R_{eD}$$

Escoamento turbulento:

$$\frac{X_{CD,v}}{D} = 10$$

No escoamento laminar:

$$u_m = -\frac{r_0^2}{8\mu} \frac{dp}{dx}$$

$$f = \frac{-\frac{dp}{dx}}{\frac{1}{2}\rho u_m^2}$$

$$c_f = \frac{\tau_\Delta}{\frac{1}{2}\rho u_m^2}$$

Demonstra-se que:

$$c_f = \frac{f}{4}$$

1. PREFÁCIO

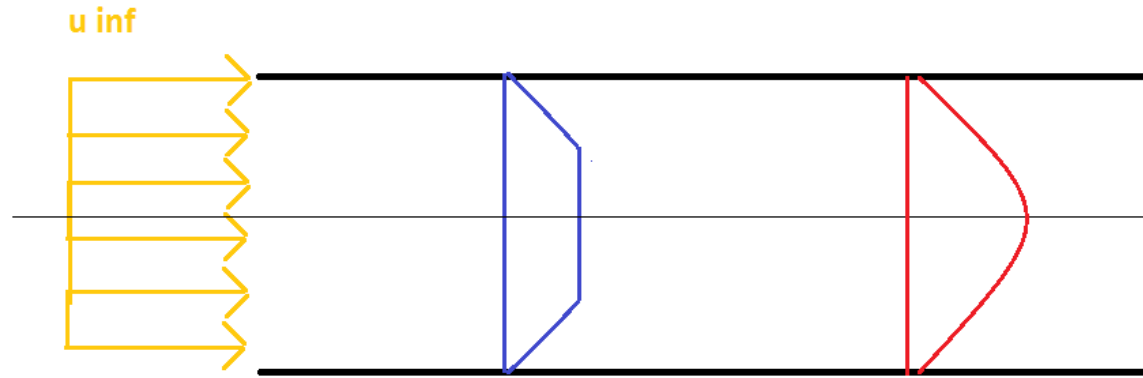


Figura 1.1: Desenvolvimento da C. L. fluidodinâmica laminar num tubo circular

Escoamento laminar:

$$f = \frac{64}{Re_d}$$

Escoamento turbulento (tubo liso):

$$f = 0.316 Re_D^{-\frac{1}{4}}$$

$$Re_D \leq 2 * 10^4$$

$$f = 0.316 Re_D^{-\frac{1}{4}}$$

$$Re_D \geq 2 * 10^4$$

$$f = (0.790 \ln(Re_D - 1.64))^{-2} \quad 3000 \leq Re_D \leq 5 * 10^6$$

1. PREFÁCIO

8.2 Considerações térmicas

escoamento laminar:

$$\frac{Xc_{D,t}}{D} = 0.05Re_DPr$$

escoamento turbulento:

$$\frac{Xx_{D,t}}{D} = 10$$

$$q_s'' = h(T_s - T_m)$$

8.3 Balanço de Energia

1. reg. permanente
2. liq. incompressível
3. dissipacao viscosa e desprezível
4. trans. calor por condução na direção x desprezível
5. propriedades constantes

tubo:

$$m_c(T_M|_x - (T_M|_x + \frac{dT_{mdx}}{dx})) + dq_{conv} = 0$$

$$\frac{dT_{mdx}}{dx} = -\frac{dq_{conv}}{\dot{m}c}$$

$$\frac{dT_M dx}{dx} = \frac{q_s'' P dx}{\dot{m}c}$$

$$\frac{dT_M}{dx} = \frac{q_s'' P}{\dot{m}c} = \frac{h(T_s - T_m)P}{\dot{m}c}$$

fluxo de calor uniforme na superfície:

$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{q_s''}{\dot{m}c}$$

Condições iniciais: $x=0$, $T_m = T_{m,e}$

$$T_m = \frac{q_s'' Px}{\dot{m}c} + T_{m,e}$$

1. PREFÁCIO

Temperatura superficial uniforme:

$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{hP(T_S - T_m)}{\dot{m}c}$$

$$\theta = T_S - T_m$$

Logo $d\theta = -dT_m$

$$\frac{d\theta}{dx} = -\frac{hP}{\dot{m}c}\theta$$

$$\ln(\theta)|_{\theta_e}^{\theta} = -\frac{hPx}{\dot{m}c}$$

$$\frac{\theta}{\theta_e} = \exp\left(-\frac{hPx}{\dot{m}c}\right)$$

$$\frac{T_m - T_s}{T_{m,e} - T_s} = \exp\left(-\frac{hPx}{\dot{m}c}\right)$$

8.4 Escoamento laminar em tubos circulares

reg desenvolvida Para q_S'' cte:

$$N_{Ud} = 4.36$$

Para T_S cte:

$$N_{Ud} = 3.66$$

reg. de entrada T_S cte

$$\bar{N}_{UD} = 3.66 + \frac{0.668(D/L)Re_DP_r}{1 + 0.04[(D/L)Re_DP_r]^{\frac{2}{3}}}$$

Onde $[(D/L)Re_DP_r]$ é o numero de Graetz (Gz_D) e com

$$\bar{N}_{UD} = \frac{h\bar{D}}{k}$$

Válida para comprimento de entrada e comprimento de entrada combinada se $Pr \geq 5$

1. PREFÁCIO

Seidel e Tate (comp. de entrada comb.)

$$\bar{N}_{UD} = 1.86 \left(\frac{Re_D Pr}{L/D} \right) \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)$$

com $N_{Ud} > 3.66$

$$0.6 \leq Pr \leq 5$$

$$0.0044 \leq \frac{\mu}{\mu_s} \leq 9.75$$

8.5 Escoamento turbulento em tubos circulares

Dittus-Boelter:

$$N_{UD} = 0.023 Re_D^{\frac{4}{5}} (Pr)^n$$

Com $n = 0.4$, $T_s > T_m$ e $0.7 \leq Pr \leq 100$ E para $n = 0.3$, $T_s < T_m$ e $Re_D \geq 10000$, $L/D \geq 10$

Bibliografia Figuras retiradas de Incropera - Fundamentals of Heat and Mass Transfer-Incropera (6ª edição)

1.1 Ex. 8.63

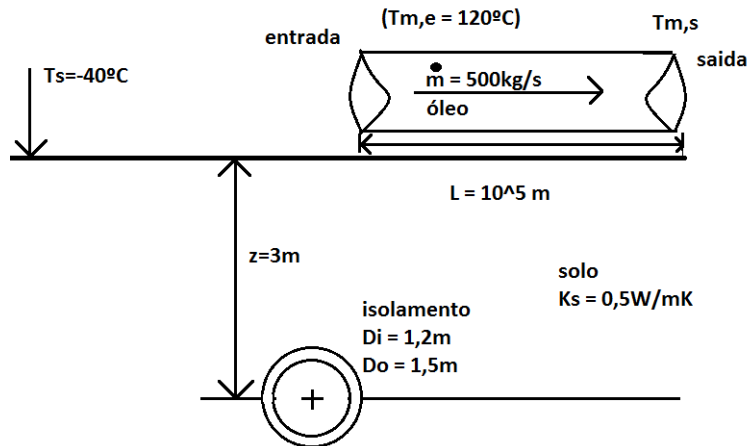


Figura 1.2

- $\rho = 900 \text{ kg/m}^3$
- $c_0 = 200 \text{ J/kgK}$
- $\nu_0 = 8.5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
- $k_0 = 0.140 \text{ W/mK}$
- $P_{R0} = 10^4$

Solução

$$R_{eq} = \frac{1}{hPdx} + \frac{\ln(\frac{D_o}{D_i})}{2\pi dx k_I} + \frac{1}{sk_s}$$

s(tabela 4.1)-cilindro horizontal isotérmico de comprimento L enterrado em um meio semi-infinito

Para $L \gg D$

$$s' = \frac{2\pi L}{\text{arccosh}(\frac{2z}{D_0})}$$

$$s = s' \frac{dx}{L}$$

¹resistencia a conducao para uma parede cilindrica

1. PREFÁCIO

$$R_{eq} = \frac{1}{hPdx} + \frac{\ln(\frac{D_0}{D_i})}{2\pi dx k_I} + \frac{\text{arccosh}(\frac{2z}{D_0})}{2\pi dx k_S}$$

$$R_{eq} = \frac{R'_{eq}}{dx}$$

Balço de energia

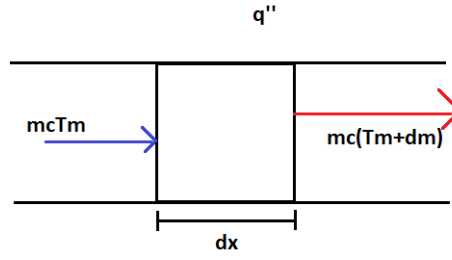


Figura 1.3

$$\dot{m}c_0T_m - \dot{m}c_0(T_m + dT_m) + q''Pdx = 0$$

$$\dot{m}c_0dT_m = q''Pdx$$

com:

$$q = \frac{T_s - T_m}{R_{eq}}$$

$$q'' = \frac{T_s - T_m}{PdxR_{eq}}$$

$$\dot{m}cdT_m = \frac{T_s - T_m}{R'_{eq}}dx$$

$$dT_m = \frac{(T_s - T_m)}{\dot{m}c_0R'_{eq}}dx$$

$$\theta = T_s - T_m$$

Portanto:

$$d\theta = -dT_m$$

$$d\theta = -\frac{\theta}{\dot{m}c_0R'_{eq}}dx$$

$$\int_{\theta_e}^{\theta_s} \frac{d\theta}{\theta} = \int_{x=0}^{x=L} -\frac{dx}{\dot{m}c_0R'_{eq}}$$

$$\frac{T_{m,s} - T_s}{T_{m,e} - T_s} = \exp\left(-\frac{L}{\dot{m}c_0 R'_{eq}}\right) \quad (1.1)$$

Cálculo de \bar{h}

$$Re_D = \frac{\mu \bar{D}_i}{v_0} = \frac{\dot{m} D_i}{v_0 \rho_0 A_{tr}}$$

Onde $A_{tr} = \frac{\pi D_i^2}{4}$

$$\dot{m} = \rho_0 \bar{\mu} A_{tr}$$

$$Re_D = \frac{4\dot{m}}{v_0 \rho_0 \pi D_i} = \frac{4 * 500}{8,5 * 10^{-4} * 900 * \pi * 1.2} = 694$$

Como o resultado < 2300 , o regime é laminar

$$x_{CD,v} = 0.05 Re_D D$$

$$x_{CD,t} = x_{CD,v} * Pr$$

$$x_{CD,t} = 4.16 * 10^5 m$$

Estamos na região de entrada. Hausen T_{sup} cte - interior do tubo.

$$\bar{Nu}_D = 3.66 + \frac{0.0668 \left(\frac{D_i Re_D Pr}{L} \right)}{1 + 0.04 \left[\frac{D_i}{L} Re_D Pr \right]} = 6.82$$

$$Pr > 5$$

$$\bar{h} = \frac{Nu_D D_I}{k_0} = 0.8 W/m^2 K$$

$$R_{eq} = \frac{1}{\bar{h}P} + \frac{\ln\left(\frac{D_0}{D_i}\right)}{2\pi k_I} + \frac{\text{arccosh}\left(\frac{2z}{D_0}\right)}{2\pi k_S}$$

$$R'_{eq} = 0.33 + 0.71 + 0.66 = 1.7 K m/W$$

$$\dot{q} = \dot{m}c_0(T_{m,e} - T_{m,s}) = 9.1 * 10^6 W$$

Da equação 1.8 $T_{m,s} = 111^\circ C$

1. PREFÁCIO

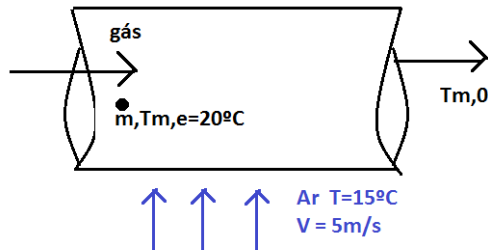


Figura 1.4

1.2 8.60

62 da 5a ed.

Entregar no dia da P2.

Tubo de parede delgada é usado pra transportar gases.

gas entra no tubo... ventos a uma temp de 15°C em direcao cruzada ao tubo a 5m/s . Considere as propriedades termofisicas Estime coeficientes...

Temp media do fluido na saida -> balanço de volume de controle infinitesimal. Igual ao inicio do exercicio anterior.

Temos 2 fluidos trocando energia entre quantas resistencias em série? R: 3 (a de conveccao, a de conducao (parede do tubo) e a de conveccao)

$$R_{eq} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{cond}{d} + \frac{1}{h_e A_e}$$

Precisa verificar qual tipo de escoamento: no caso é turbulento. Precisa verificar qual as regiões de entrada: 10 x o diametro. Tem 60 mm de comprimento. A correlação que a gente usa é a Dittus- (Reynolds + Prandt) Cálculo de h_i Eu avalio em qual temperatura? R: T média entre a entrada e a saída. Deverá imaginar e chutar uma temperatura na saída. Avaliar as temperaturas médias e verificar o que resulta.

Cálculo de h_e :Kukauskas

$$Nu_D = c Re^m \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{\frac{1}{4}} Pr^n$$

²praticamente 0

1.2 8.60

$$P_R \, d\epsilon \, T_\infty$$

$$h_i(T_m - T_s) = h_e(T_S - T_\infty)$$

1. PREFÁCIO

1.3 Convecção Natural x Convecção Forçada

É muito semelhante ao que nós já fizemos para convecção forçada. Agente externo provocando o movimento do fluido: convecção forçada. O que define convecção natural: transferência de calor devido a diferença de temperatura. Convecção Mista: mistura das outras duas anteriores. É possível calcular um número de Nusselt que seja a soma das convecções natural e forçada.

Se eu tenho um fluido quente embaixo e um fluido frio em cima formam-se correntes de convecção.

Em convecção forçada, os coeficientes não dependiam da temperatura. Agora, em convecção mista, também vão depender.

Quantidade de movimento na direção x:

$$u \frac{du}{dx} + v \frac{du}{dy} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp_\infty}{dx} - g + v \frac{d^2u}{dy^2} \quad (1.2)$$

Fora da camada limite:

$$\frac{dp_\infty}{dx} = -\rho_\infty g \quad (1.3)$$

$$\Delta\rho = \rho_\infty - \rho$$

Combinando as equações 1.8 e 1.9

$$u \frac{du}{dx} + v \frac{du}{dy} = g \frac{\Delta\rho}{\rho} + v \frac{d^2u}{dy^2} \quad (1.4)$$

Coefficiente de expansão volumétrica:

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{d\rho}{dT} \right) = \frac{1}{\rho} \frac{\rho_\infty - \rho}{T_\infty - T} \quad (1.5)$$

$$\rho_\infty - \rho = -\rho\beta(T_\infty - T) \quad (1.6)$$

Combinando as equações 1.10 e 1.11

$$u \frac{du}{dx} + v \frac{du}{dy} = g \frac{\beta(T_\infty - T)}{u_0^2} + \frac{1}{Re_L} \frac{d^2u}{dy^2} \quad (1.7)$$

³aproximação de Boussinesq

1.3 Convecção Natural x Convecção Forçada

$$u^* \frac{du^*}{dx^*} + v^* \frac{du^*}{dy^*} = g \frac{\beta(t_S - T_\infty)}{u_0^2} T^* + \frac{1}{Re_L} \frac{d^2 u^*}{dy^{*2}}$$

$$u^* \frac{dT^*}{dx^*} + v^* \frac{dT^*}{dy^*} = \frac{1}{Re_L Pr} \frac{d^2 T^*}{dy^{*2}}$$

$$u^* \frac{du^*}{dx^*} + v^* \frac{du^*}{dy^*} = \frac{Gr_L}{Re_L^2} T^* + \frac{1}{Re_L} \frac{d^2 u^*}{dy^{*2}}$$

$$u^* \frac{dT^*}{dx^*} + v^* \frac{dT^*}{dy^*} = \frac{1}{Re_L Pr} \frac{d^2 T^*}{dy^{*2}}$$

Espera-se

$$Nu_L = f(Re_L, Gr_L, Pr)$$

Condições de contorno:

- $y = 0, u = v = 0, T = T_S$
- $y \rightarrow \infty, u \rightarrow 0, T \rightarrow T_\infty$

O que acontece quando você varia a espessura da camada limite? A variação da velocidade é menor com a maior espessura da camada limite (devido ao número de Nusselt).

Parâmetro de similaridade:

$$\eta = \frac{y}{x} \left(\frac{Gr_x}{4} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$f''' + 3ff'' - 2(f')^2 + T^* = 0$$

Exemplo placa vertical com T_S uniforme de 130° C e ar quiescente a 25° C. Determinar δ e u_{max} para $x=0.25$ m

$$T_f = 350K$$

$$Pr = 0.7$$

$$Gr_x = 6.718 * 10^9 x^3$$

$$\nu = 20.92 * 10^{-6} m^2/s$$

$$\eta = \frac{y}{x} \left(\frac{Gr_x}{4} \right)^{1/4} = \frac{\delta}{0.25} \left(\frac{6.718 * 10^9 * 0.25^3}{4} \right)^{1/4} = 5$$

$$\delta = 1.746 * 10^{-3} m = 17.5 mm$$

1. PREFÁCIO

$$u_{max} = 0.47m/s$$

$$f'(n) = \frac{ux}{2v} Gr_x^{-1/2} = 0.275$$

$$Nu_x = (\frac{Gr_x}{4})g(Pr) = (\frac{6.718 * 10^9 * 0.25^3}{4}) * 0.5 = 35.8$$

$$h = 35.8 * 0.030 / 0.25 = 4.3W/m^2K$$

$$g(Pr) = \frac{0.75Pr^{1/2}}{(0.609 + 1.22Pr^{1/2})}$$

$$Ra_{x,c} = Gr_{x,c}Pr = 6.718 * 10^9 x^3 * 0.7$$

1.4 12.44

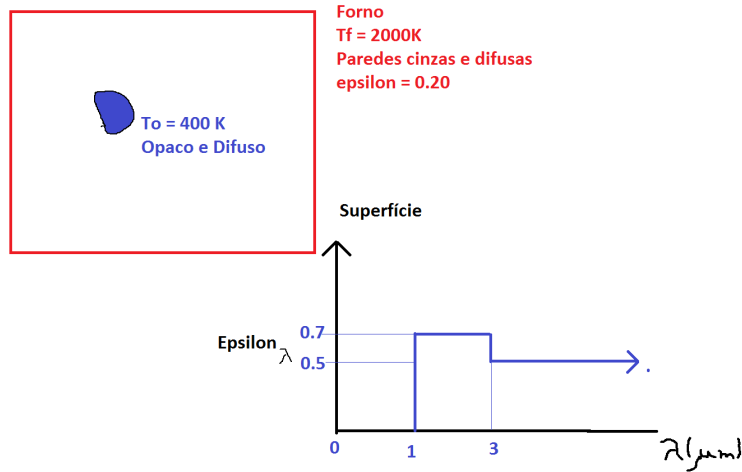


Figura 1.5

a) emissividade total e absorvidade total

Quer que calculemos ε (poder emissivo espectral de um corpo negro) e α

Emissividade total computa a radiação emitida por toda uma superfície
 poder emissivo espectral de um corpo negro
 emissividade também depende da temperatura da superfície
 3 níveis da lei de kirchhoff

$$\varepsilon = \frac{\int_0^\infty \varepsilon(\lambda) E_{CN,\lambda}(\lambda, T) d\lambda}{E_{CN}(T)}$$

$$\alpha = \frac{\int_0^\infty \alpha_\lambda G(\lambda) d\lambda}{G}$$

$$\varepsilon = \frac{\int_0^{1\mu m} \varepsilon_\lambda E_{CN,\lambda} d\lambda}{E_{CN}(T)} + \frac{\int_1^{3\mu m} \varepsilon_\lambda E_{CN,\lambda} d\lambda}{E_{CN}(T)} + \frac{\int_3^{1\infty} \varepsilon_\lambda E_{CN,\lambda} d\lambda}{E_{CN}(T)}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{1 \rightarrow 3} \frac{\int_0^{1\mu m} \varepsilon_\lambda E_{CN,\lambda} d\lambda}{E_{CN}(T)} + \varepsilon_{3 \rightarrow \infty} \frac{\int_1^{3\mu m} \varepsilon_\lambda E_{CN,\lambda} d\lambda}{E_{CN}(T)}$$

1. PREFÁCIO

$$\varepsilon = \varepsilon_{1 \rightarrow 3} \times F_{1 \rightarrow 3\mu m} + \varepsilon_{3 \rightarrow \infty} \times F_{3 \rightarrow \infty}$$

Em que

- $F_{1 \rightarrow 3\mu m} = F_{0 \rightarrow 3} - F_{0 \rightarrow 1}$
- $F_{3 \rightarrow \infty} = 1 - F_{0 \rightarrow 3}$

Consultar a tabela 12.1

$$\lambda T = 1\mu m \times 400K = 400\mu mK \rightarrow F_{0 \rightarrow 1\mu m} = 0.000000$$

$$\lambda T = 3\mu m \times 400K = 1200\mu mK \rightarrow F_{0 \rightarrow 3\mu m} = 0.002134$$

$$\varepsilon = 0.7 \times (0.002134 - 0.000000) + 0.5 \times (1 - 0.002134)$$

$$\varepsilon = 0.500$$

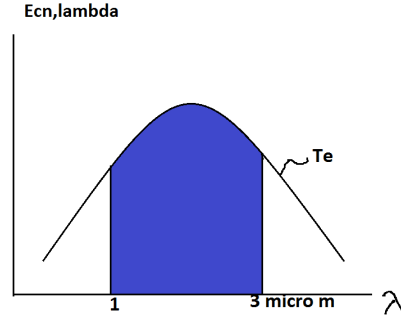


Figura 1.6

Difusa:

- $\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda$
- $G(\lambda) = E_{CN, \lambda}(T_f)$

Em que $E_{CN, \lambda}$ é a do forno.

$$G = E_{CN}(T_f)$$

$$\alpha = \alpha_{1 \rightarrow 3} F_{1 \rightarrow 3} + \alpha_{3 \rightarrow \infty} F_{3 \rightarrow \infty}$$

$$\lambda T = 1 \mu m \times 2000 K = 2000 \mu m K \rightarrow F_{0 \rightarrow 1 \mu m} = 0.066728$$

$$\lambda T = 3 \mu m \times 2000 K = 6000 \mu m K \rightarrow F_{0 \rightarrow 3 \mu m} = 0.737818$$

$$\alpha = 0.7 \times (0.737818 - 0.066728) + 0.5 \times (1 - 0.737818)$$

$$\alpha = 0.6$$

b) refletida

$$(1 - \alpha)G = 0.4 \times \sigma \times 2000^4 = 3.621 \times 10^5 W/m^2$$

Líquido:

$$q'' = \alpha G - \varepsilon E_{CN}(T_s)$$

Em que $G = E_{CN}(T_f)$

$$q'' = \alpha \sigma T_f^4 - \varepsilon \sigma T_s^4$$

$$q'' = 5.45 \times 10^5 W/m^2$$

c) $E_{\lambda=2\mu m}(T_s) = ?$

$$E_{\lambda, CN}$$

$$E_{\alpha} = 2 \mu m = \varepsilon_{\lambda} = 2 \mu E_{CN, \lambda}$$

Consultar a tabela 12.1:

λT	$\frac{I_{\lambda, CN}}{\sigma T^5}$
•	•

$$E_{CN, \lambda} = \pi I_{\lambda, CN}$$

Em que a unidade de $E_{CN, \lambda}$ é $W/(m^2 \mu m)$

Para $\lambda T = 2 \times 400 = 800 \mu m K$

1. *PREFÁCIO*

$$\frac{I_{\lambda,CN}}{\sigma T^{54}} = 0.991126 \times 10^{-7}$$

$$I_{\lambda,CN} = 0.0575 \frac{W}{m^2 \mu m}$$

$$E_{\lambda=2\mu m} = 0.7 \times \pi \times 0.0575 = 0.126 \frac{W}{\mu m m^2}$$

d) $\lambda_{1/2} = ?$

Para $F_{0 \rightarrow \lambda_{1/2}} = 0.5$. Da tabela,

$$\lambda T = 4100 \mu m K$$

Onde $T = 400 \text{ K}$

$$\lambda_{1/2} = 10.3 \mu m$$

1.5 13.119

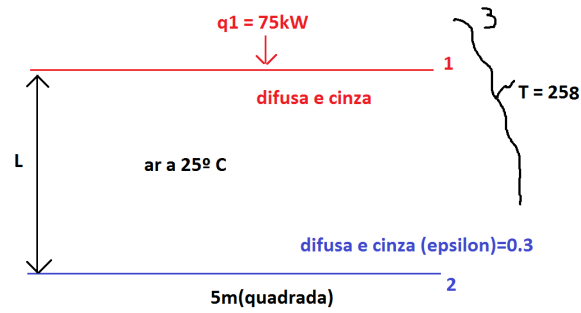


Figura 1.7

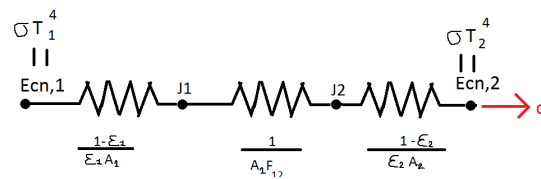


Figura 1.8

$$\frac{1}{A_1} \left[\frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1} + \frac{1}{F_{12} = 1} + \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2 A_2 / A_1} \right]$$

Falta a energia que sai do circuito. 3 superfícies equivalem a 3 nós.
Qual a superfície do 3º nó?

1. PREFÁCIO

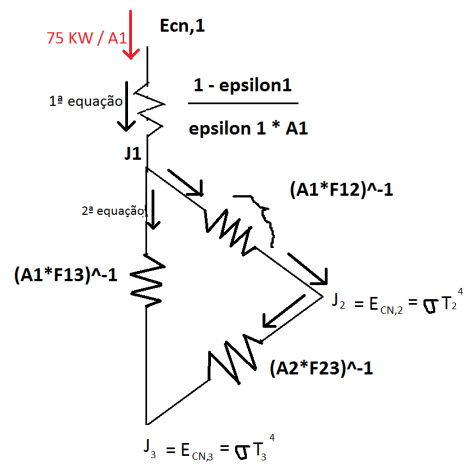


Figura 1.9

1.6 Fator de Forma

O fator de forma F_{ij} é definido como a fração da radiação que deixa a superfície i que é interceptada pela superfície j . Considerando as superfícies A_i e A_j orientadas arbitrariamente conforme a figura ??

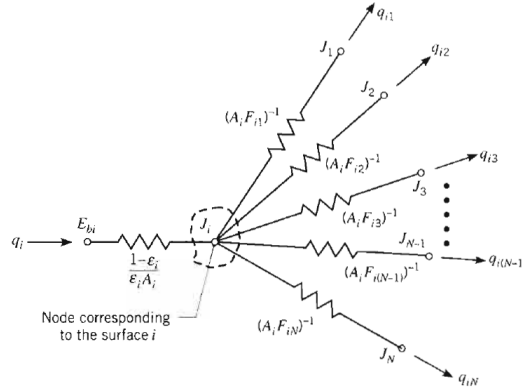


Figura 1.10: Fator de forma associado com a troca de radiação entre elementos de superfície de área dA_i e dA_j

Áreas elementares em cada superfície dA_i e dA_j são conectadas por uma reta de comprimento R , formando ângulos polares θ_i e θ_j com relação às normais \mathbf{n}_i e \mathbf{n}_j . Os valores de R , θ_i e θ_j variam de acordo com as posições das áreas elementares dA_i e dA_j .

A taxa na qual a radiação deixa dA_i e é interceptada por dA_j é definida como :

$$dq_{i \rightarrow j} = I_i \cos(\theta_i) dA_i d\omega_{j-i}$$

Onde:

- I_i é a intensidade da radiação que deixa a superfície i
- $d\omega_{j-i}$ é o ângulo sólido subtendido por dA_j visto de dA_i

Sendo $d\omega_{j-i} = (\cos \theta_i \cos \theta_j) / R^2$, segue que:

$$dq_{i \rightarrow j} = I_i \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{R^2} dA_i dA_j$$

Se a superfície i emite e reflete difusamente ($J = \pi I_{e+r}$), temos:

$$dq_{i \rightarrow j} = J_i \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j$$

1. PREFÁCIO

A taxa total na qual a radiação deixa a superfície i e é interceptada por j é obtida, portanto, integrando-se sobre as duas superfícies:

$$q_{i \rightarrow j} = J_i \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j$$

Onde J_i é considerada uniforme sobre a superfície A_i .

Da definição de fator de forma como sendo a fração da radiação que deixa A_i e chega em A_j :

$$F_{ij} = \frac{q_{i \rightarrow j}}{A_i J_i}$$

Temos que o fator de forma é definido por:

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j$$

1.7 Troca Radiante entre Superfícies

Seja q_i a taxa *líquida* na qual a radiação deixa uma superfície i , representada por:

$$q_i = A_i(J_i - G_i) \quad (1.8)$$

A irradiação da superfície i pode ser calculada a partir das radiosidades de todas as superfícies no invólucro. Em particular, da definição de *fator de forma*, a taxa total de radiação atingindo a superfície i oriunda de todas as superfícies, incluindo i é:

$$A_i G_i = \sum_{j=1}^N F_{ji} A_j J_j$$

Ou, usando a relação de reciprocidade,

$$A_i G_i = \sum_{j=1}^N A_i F_{ij} J_j \quad (1.9)$$

Eliminando a área A_i e substituindo 1.9 em 1.8

$$q_i = A_i \left(J_i - \sum_{j=1}^N F_{ij} J_j \right) \quad (1.10)$$

Seja a relação da Regra do Somatório:

$$\sum_{j=1}^N F_{ij} = 1 \quad (1.11)$$

De 1.11 em 1.10:

$$q_i = A_i \left(\sum_{j=1}^N F_{ij} J_i - \sum_{j=1}^N F_{ij} J_j \right)$$

Logo, usando a propriedade de linearidade da somatória

$$q_i = \sum_{j=1}^N A_i F_{ij} (J_i - J_j) = \sum_{j=1}^N q_{ij} \quad (1.12)$$

Ou seja, a taxa *líquida* na qual a radiação deixa uma superfície i equivale à soma das componentes q_{ij} relativas à troca radiativa com outras superfícies. Fazendo uma analogia a um circuito elétrico com seus vários componentes (figura ??), temos:

1. PREFÁCIO

- $(J_i - J_j)$ = potencial motriz
- $(A_i F_{ij})$ = resistência espacial ou geométrica

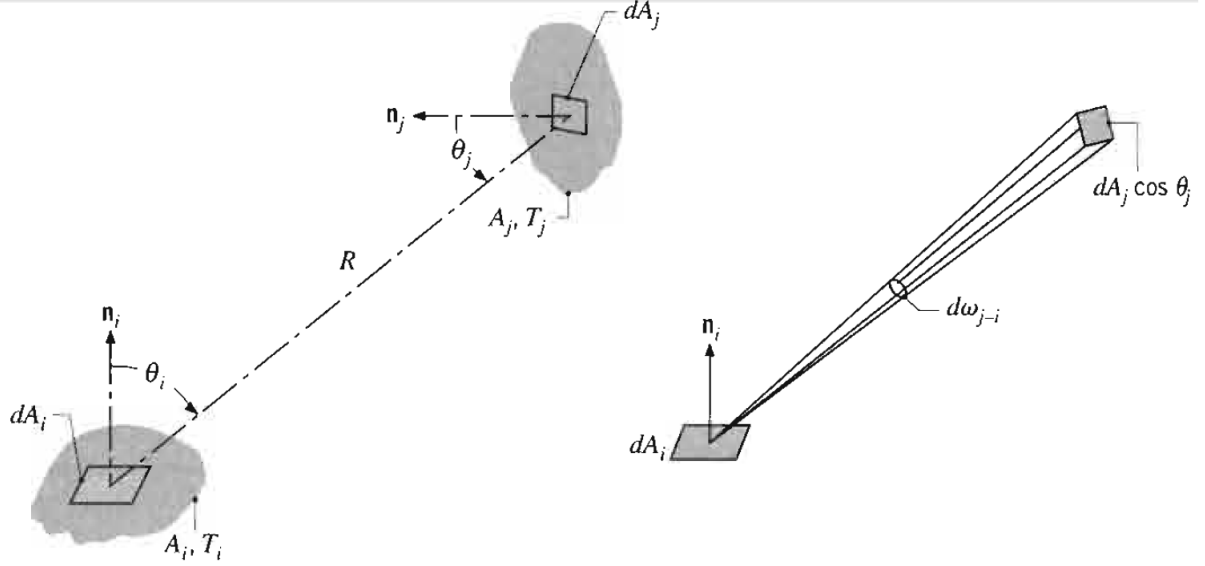


Figura 1.11: Representação do circuito equivalente

Seja agora q_i definida como:

$$q_i = \frac{E_{bi} - J_i}{(1 - \varepsilon_i)/\varepsilon_i A_i} \quad (1.13)$$

Em que ε_i é a *emissividade hemisférica total* da superfície i , J_i é a *radiosidade* da superfície, e E_b o *poder emissivo hemisférico total de um corpo negro*.

Combinando as equações 1.13 e 1.12, temos:

$$\frac{E_{bi} - J_i}{(1 - \varepsilon_i)/\varepsilon_i A_i} = \sum_{j=1}^N \frac{(J_i - J_j)}{(A_i F_{ij})^{-1}} \quad (1.14)$$

A equação 1.14 representa o balanço de radiação para o *nó* da radiosidade associado com a superfície i (figura ??). É especialmente útil quando a temperatura T_i (e portanto E_{bi}) da superfície é conhecida.

$$q_i = \sum_{j=1}^N \frac{(J_i - J_j)}{(A_i F_{ij})^{-1}} \quad (1.15)$$

1.7 Troca Radiante entre Superfícies

A equação 1.15 é especialmente importante quando a *taxa de transferência líquida de radiação na superfície* é conhecida.

1. PREFÁCIO

1.8 Ex. 6

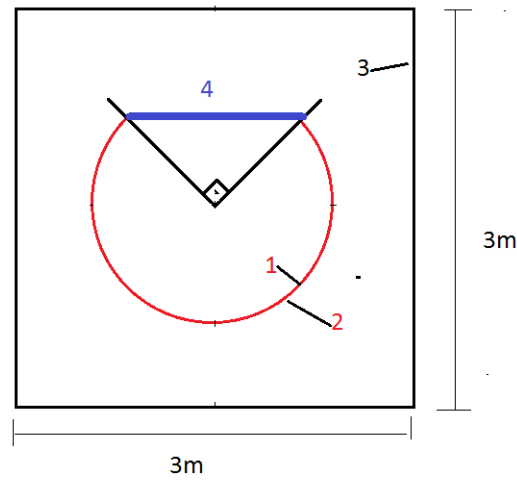


Figura 1.12

$$T_1 = T_2 = 1000 \text{ K}$$

$$T_3 = 300 \text{ K}$$

$$\varepsilon_3 = \alpha_3 = 0.2$$

$$\alpha_3 = 0.2$$

$$\varepsilon_1 = 0.3$$

$$\varepsilon_2 = 0.5256$$

$$\alpha_3 = 0.7180$$

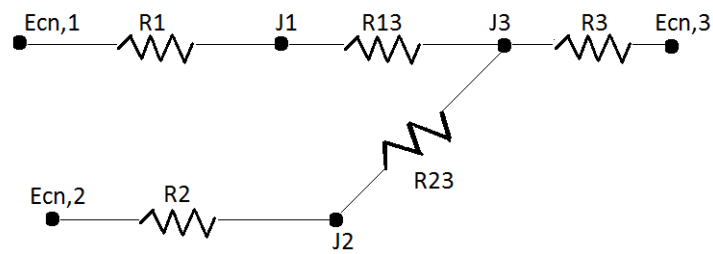


Figura 1.13

a $\varepsilon_2 = ?$

b $\alpha_2 = ?$

c $q_{13} = ?$

$$R_1 = \frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1}$$

$$R_2 = \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}$$

$$R_3 = \frac{1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_3 A_3}$$

$$R_{13} = (A_1 F_{13})^{-1}$$

$$R_{23} = (A_2 F_{23})^{-1}$$

Superfície difusa: radiação não tem uma direção específica, a superfície emite em todas as direções.

Superfície Cinzenta: emissividade e absorvidade não dependem do comprimento de onda. O exercício tem que dizer que a superfície é cinzenta para podermos montar um circuito, tal como o usado na resolução.

Radiosidade é a contribuição líquida da radiação do corpo, e compreende o que o corpo emite e reflete menos o que ele absorve da radiação ambiente. O tipo de resistência que liga as radiosidades num circuito é a geométrica (que tem a ver com o fator de forma). As outras resistências são ditas superficiais, e medem a "distância" da radiosidade da superfície do corpo em relação a um corpo negro.

A unidade de radiosidade é W/m^2 . Se a superfície é cinzenta, $\varepsilon = \alpha$

$$R'_1 = \frac{1 - 0.3}{0.3(2\pi - \theta)R} = 0.4951m^{-1}$$

Em que R vale 1 metro

$$R'_2 = \frac{1 - 0.5256}{0.5256(2\pi - \theta)R} = 0.1914m^{-1}$$

$$R'_3 = \frac{1 - 0.2}{0.2(2\pi - \theta)R} = 0.333m^{-1}$$

$$R_{13} = (0.3(2\pi - \theta)R)^{-1} = 0.707m^{-1}$$

$$R_{23} = (1(2\pi - \theta)R)^{-1} = 0.2122m^{-1}$$

1. PREFÁCIO

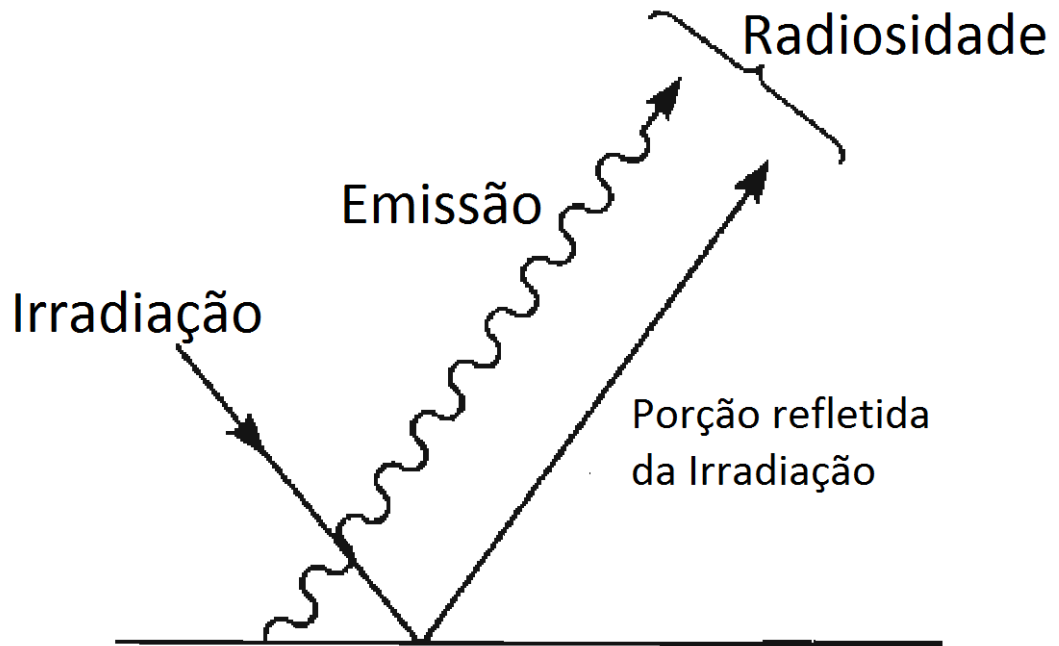


Figura 1.14: Radiosidade

Cálculo dos Fatores de Forma

A gente traça uma superfície fictícia, (4) , e toda radiação que deixa (1) e atinge (4) também atinge (3) (se (4) não existisse). O fator de forma $F_{41} = 1$ (toda radiação que deixa (4) (lado de dentro) atinge (1)) Logo pela relação de reciprocidade,

$$A_4 F_{41} = A_1 F_{14}$$

Portanto:

$$F_{14} = F_{13} = \frac{A_4}{A_1} F_{41}$$

Em que F_{41} vale 1.

$$F_{13} = \frac{2R \sin(\pi/4)}{(2\pi - \theta)R}$$

Em que θ vale $\pi/2$

$F_{23} = 1$ (toda a radiação que deixa (2) atinge $(3) \rightarrow (2)$ não pode atingir ela mesma)

Solução do circuito

- q_{13} é a corrente que sai de $E_{CN,1}$ e chega em J_3

- q_{23} é a corrente que sai de $E_{CN,2}$ e chega em J_3
- q_3 é a corrente que sai de J_3 e chega em $E_{CN,3}$

$$q'_{13} = \frac{E_{CN,1} - J_3}{R'_1 + R'_{13}} = 0.8318(56690 - J_3)$$

Com $E_{CN,1} = \sigma T_1^4$

$$q'_{23} = \frac{E_{CN,2} - J_3}{R'_2 + R'_{23}} = 2.480(56690 - J_3)$$

$$q'_3 = \frac{-E_{CN,3} + J_3}{R'_3} = 3.003(-459.19 + J_3)$$

Em que $E_{CN,3} = \sigma T_3^4$

$$q'_3 = q'_{13} + q'_{23}$$

$$J_3 = 29949 \text{ W/m}^2$$

$$q'_3 = 88559 \text{ W/m}(d)$$

$$q'_{23} = 66317 \text{ W/m}$$

$$q'_{13} = 22243 \text{ W/m}(c)$$

E)

$$T_2 = T_1 = ? \text{ para } q_3' = 2 \times q'_3 \text{ (item d)} = 2 \times 88559 = 177118 \text{ W/m}$$

$$\varepsilon_2 = 0.2F_{0 \rightarrow 1} + 0.5(F_{0 \rightarrow 10} - F_{0 \rightarrow 1})0.8(1 - F_{0 \rightarrow 10})$$

Para $T = 1000 \text{ K}$

$$\bullet F_{0 \rightarrow 10} = 0.914199$$

$$\bullet F_{0 \rightarrow 1} = 0.000321$$

Para a nova temperatura, $F_{0 \rightarrow 10} \text{ (novo)} > F_{0 \rightarrow 10}$ Hipótese: $F_{0 \rightarrow 10} \text{ (novo)} = 1$, portanto $\varepsilon_2^{(1)} = 0.5$.

$$F_{0 \rightarrow 1} = 0$$

$$177118 = 3.003(J_3 - 459.19)$$

$$q'_{23} = 2.3562(E_{CN,1} - 59439)$$

1. PREFÁCIO

Em que $E_{CN,2} = \sigma T_1^4$

$$q'_{13} = 0.8318(E_{CN,1} - 59439)$$

$$T_1^1 = 1193K$$

$$F_{0 \rightarrow 10} = 0.944378$$

$$F_{0 \rightarrow 1} = 0.002070$$

$$\varepsilon_2^2 = 0.5173$$

$$T_1^{(2)} = 1190 \text{ K}$$

$$\varepsilon_2^3 = \varepsilon_2^2$$

A gente duplicou a potência mas não sabemos qual a nova temperatura. Então, para resolver o item **e**), só trocamos os potenciais e algumas resistências do circuito anterior. Nenhuma resistência geométrica mudou, apenas a da emissividade 2. Então o formato do circuito anterior continua válido, só que agora com as trocas dos valores de potenciais e resistências.

Não sabemos os poderes emissivos dos corpos negros, mas sabemos q_{13} . Os potenciais são diferentes, e agora tenho que estimar os valores de emissividade. Temos que chutar uma emissividade. Achemos os valores de temperatura, achamos os valores de fração em cada banda, e então achamos a emissividade, e conferimos se bate com a emissividade chutada inicialmente.

1.9 Trocadores de calor

Calculos de trocador de calor, serve para (dado um trocador de calor), calcular as temperaturas na saída do trocador de calor, ou, dada uma temperatura final, determinar as dimensões desse trocador de calor.

O papel das chicanas é aumentar a superfície no interior do casco.

Trocadores de calor compactos tem áreas extremamente elevadas para volumes pequenos. O fluido passa por passagens extremamente extensas e finas, com escoamento laminar.

1.10 Exercício

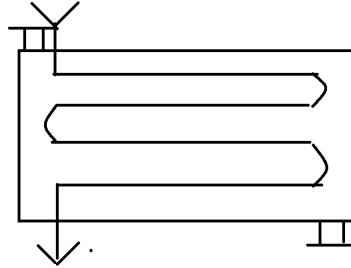


Figura 1.15

$$\dot{m}_{oleo} = 2 \text{ Kg/s}$$

$$T_{h,i} = 120^\circ\text{C}$$

$$T_{h,o} = 40^\circ\text{C}$$

$$c_{p,oleo} = 2118.0 \text{ J/kg}$$

$$U = 3000 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$T_{c,i} = 15^\circ\text{C}$$

$$T_{c,o} = 45^\circ\text{C}$$

$$c_{p,agua} = 4178 \text{ J/kg}$$

a

vazão mássica de água

$$\dot{m}_{oleo} \times c_{p,oleo}(T_{h,i} - T_{h,o}) = \dot{m} \times c_{p,agua}(T_{c,o} - T_{c,i})$$

$$2 \times 2118 \times (120 - 40) = \dot{m} * 4178 * (45 - 15) = \dot{q} = 33880 \text{ J/kg}$$

$$\dot{m}_{agua} = 2.70 \text{ kg/s}$$

b

Trocador de casco-tubo

1 passe na carcaça

6 passes nos tubos

1. PREFÁCIO

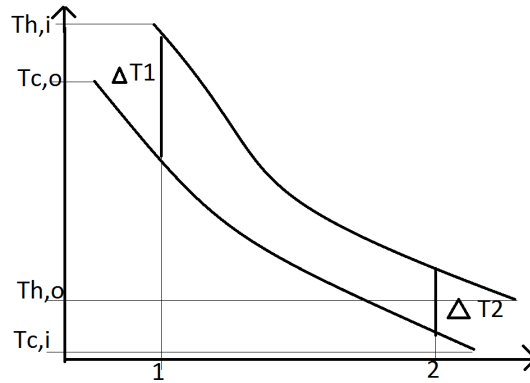


Figura 1.16

Método MLDT Método Logarítmico para trocador de calor em corrente contrária

$$\Delta T_{lm,cc} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)}$$

Em que lm é a média logarítmica e o cc é a corrente contrária

$$\Delta T_1 = T_{h,i} - T_{c,o} = 120 - 45 = 75$$

$$\Delta T_2 = T_{h,o} - T_{c,i} = 40 - 15 = 25$$

$$\Delta T_{lm,cc} = \frac{75 - 25}{\ln(75/25)} = 45.5^\circ C$$

$$q = UA\Delta T_{lm,cc}F$$

Pela figura 11.10, (pag 459, 5a ed.)

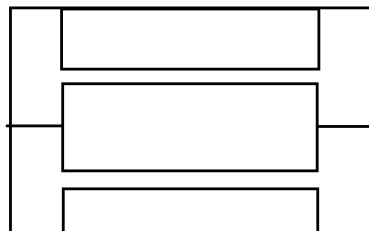


Figura 1.17

$$R = \frac{T_e - T_s}{t_s - t_e} = \frac{120 - 45}{45 - 15} = 2.66$$

$$P = \frac{t_s - t_e}{T_e - t_e} = \frac{45 - 15}{120 - 15} = 0.285$$

$$F = 0.85$$

$$338880 = 300 \times A \times 45,5 \times 0.85$$

$$A = 29.2m^2$$

c

Do trocador:

$$A = N\pi DL$$

$$L = \frac{29.20}{25 \times 6 \times \pi \times 0.02} = 3.09m$$

1.11 Ex 11.35 da 6a Ed

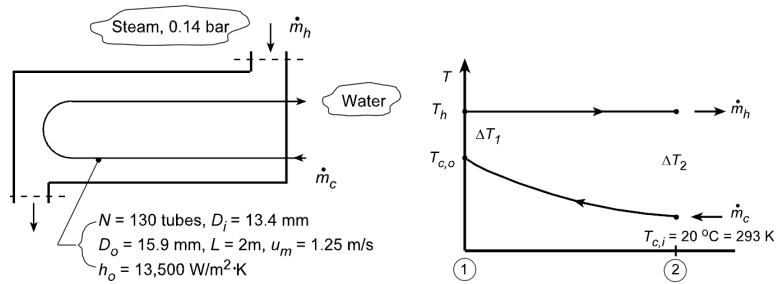


Figura 1.18

Trocador de calor casco tubo

1 passe carcaça

2 passes no tubo

130 tubos de latão

$$\phi_i = 13.4mm$$

$$\phi_e = 15.9mm$$

1. PREFÁCIO

$$2m/passe$$

- Escoamento Interno nos tubos

$$\bar{T}_m = \frac{20 + 40}{2} = 30^\circ C$$

$$\rho = 997 kg/m^3$$

$$\mu = 855 \times 10^{-6}$$

$$c_p = 4179 J/kgK$$

$$Pr = 5.83$$

$$K = 613 \times 10^{-3}$$

$$Re = \frac{U \phi_i}{\nu} = \frac{U \phi_i \rho}{\mu}$$

$$Re = \frac{1.25 \times 0.0134 \times 997}{855 \times 10^{-6}} = 19531$$

Turbulento

L/D > 10

$$\bar{Nu}_D = 0.023 Re_D^{4/5} Pr^{0.4} = 126$$

$$\bar{h} = \frac{126 \times 613 \times 10^{-3}}{0.0134} = 5767 W/m^2K$$

Coefficiente Global

$$\frac{1A_{ext}}{U_{ext}A_{ext}} = \frac{A_{ext}}{h_iA_i} + \frac{A_{ext} \ln(D_e/D_i)}{2\pi KL} + \frac{A_{ext}}{h_{ext}A_{ext}}$$

$$\frac{1}{U_{ext}} = \frac{A_{ext}}{h_iA_i} + \frac{A_e \ln(D_e/D_i)}{2\pi \times k_{latao} \times (130 \times 2 \times 2)} + \frac{1}{h_{ext}}$$

Substituindo $U_{ext} = 3422 W/m^2K$

Método da Efetividade

$$NUT = \frac{UA}{C_{min}} = \frac{3422 \times \pi \times D_e \times 130 \times 2 \times 2}{4179 \times (\rho V_{eloc} \pi \frac{Di^2}{4}) \times 130} = 0.934$$

Em que

$$\dot{m}_{agua} = 22.75 = (\rho V_{eloc} \pi \frac{Di^2}{4}) \times 130$$

$$q_{max} = c_{min}(T_{h,e} - T_{c,e}) = 4179 \times 22.75 \times (325 - 293) = 3035 kW$$

Para $C_r = 0$, para todo o trocador de calor:

$$\varepsilon = 1 - \exp(-NUT) = 1 - \exp(-0.934)$$

$$\varepsilon = 0.607$$

$$q = \varepsilon \times q_{max} = 0.607 \times 3035 = 1842 kW$$

$$\dot{q} = \dot{m}_v h_{lv}$$

$$\dot{m}_v = \frac{1842 \times 10^3}{2378 \times 10^3}$$

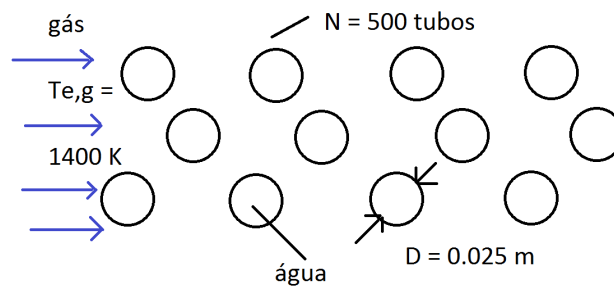
1.12 11.70

Figura 1.19

$$T_{l,g} = 1400 K$$

1. PREFÁCIO

$$c_{p,g} = 11205 J/kgK$$

$$\dot{m}_g = 10 kg/s$$

$$\dot{m}_{agua} = 3 kg/s$$

Entra $x = 0$ (T=450K)

Sai $x = 1$ (T=450K)

$$U = 50 W/m^2 K$$

Lembrando:

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{U_f A_f} = \frac{1}{U_q A_q} = \frac{1}{(\eta_0 h A)_f} + \frac{R''_{i,f}}{(\eta_0 A)_f} + R_p + \frac{K''_{i,q}}{(\eta_0 A)_q} + \frac{1}{(\eta_0 h A)_q}$$

$$-NUT = \frac{UA}{c_{min}}$$

c_{min} , lado dos gases:

$$c_{min} = c_{p,g} \times \dot{m}_g = 1120 \times 10 = 11200 W/K$$

Mudança de fase, $c_{vapor} \rightarrow \infty$, $c_r \rightarrow 0$

Area de troca?

$$A = 500 \times \pi \times 0.025 \times L = 39.27 L$$

$$q_{max} = c_{min} \times (T_{h,e} - T_{c,e}) = 1200 \times (1400 - 450)$$

$$q_{max} = 10.64 MW$$

$$q_{trocador} = \dot{m}_{agua} \times h_{lv}$$

Em que $h_{lv} = 2024 \times 10^3 J/kg$

$$\varepsilon = \frac{6.07}{10.64} = 0.571$$

Trocador de calor com mudança de fase:

$$NUT = -\ln(1 - \varepsilon)$$

$$NUT = -\ln(1 - 0.845)$$

$$NUT = \frac{UA}{c_{min}} = \frac{50 \times 39.27 L}{11200}$$

$$L = 4.82 m$$

1.13

[...]água passa por 32 tubos de 50 mm. O aquecimento da água será feito com gases de combustão (calor específico de $1200 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$) disponíveis a 700° C . A taxa de escoamento dos gases de combustão é de 6000 kg/hr e escoam em um único passe pelo lado do casco. Uma boa estimativa para o coeficiente global de troca de calor, nessa situação, é de $650 \text{ W/m}^2\text{K}$. Pede-se:

- a) a temperatura dos gases de aquecimento na saída;
- b) a área da troca de calor;
- c) o comprimento de cada passe de tubos, considerando-se que o trocador deve ser menor que 1.2 m ;
- d) Por necessidade de operação, muda-se a taxa de gases de combustão para 4000 kg/hr e a temperatura de entrada da água para 33° C . Quais serão as novas temperaturas de saída da água e dos gases de combustão, mantida a estimativa do coeficiente global de troca de calor?

Resolução

Observação Como o enunciado do exercício está incompleto (o início da questão foi cortado quando a cópia foi feita), ficaram faltando os valores de temperatura da água na entrada $T_{c,i}$ e na saída $T_{c,o}$ e da taxa de escoamento da água \dot{m}_c . Por isto, será feita apenas uma resolução analítica do exercício para explicar o método de resolução.

Tipo de trocador de calor: casco e tubos com um passo no casco
Método a ser usado: ϵ -NUT

a

Devemos estimar um valor médio \bar{T}_c para a água, para podermos obter o calor específico da água $c_{p,c}$. No caso,

$$\bar{T}_c = \frac{T_{c,o} + T_{c,i}}{2}$$

Consultar a tabela A6 para verificar qual o $c_{p,c}(\bar{T}_c)$

Calcular C_c (água) e C_h (gases de combustão)

$$C_c = \dot{m}_c \times c_{p,c}$$

1. PREFÁCIO

$$C_h = \dot{m}_h \times c_{p,h}$$

Calcular q usando os valores que temos de $T_{c,i}$, $T_{c,o}$ e de C_c

$$q = C_c \times (T_{c,o} - T_{c,i})$$

Mas

$$q = C_h \times (T_{h,i} - T_{h,o})$$

Logo

$$T_{h,o} = T_{h,i} - \frac{q}{C_h}$$

b

Selecionar $C_{min} = \min(C_c, C_h)$ e $C_{max} = \max(C_c, C_h)$.

Calcular q_{max} com esses valores.

$$q_{max} = C_{min} \times (T_{h,i} - T_{c,i})$$

$$\epsilon = \frac{q}{q_{max}}$$

$$C_r = \frac{C_{min}}{C_{max}}$$

Com os valores de C_r e de ϵ , usando o gráfico $\epsilon \times NUT$ para um trocador de calor casco e tubos com um passe no casco do livro do Incropera para obter o NUT.

Com NUT, fazemos:

$$NUT = \frac{U_h A_h}{C_{min}}$$

$$A_h = \frac{C_{min} NUT}{U_h}$$

c

$$A_h = \pi \times D \times 32 \times L$$

$$L = \frac{A_h}{\pi \times D \times 32}$$

O comprimento deve satisfazer $L < 1.2$ m do enunciado

d

Calcular o novo valor da capacidade calorífica dos gases de combustão

$$C'_h = m'_h \times c_{p,h}$$

Obter o novo valor de C_{min}

$$C_{min} = \min(C_c, C'_h)$$

E então fazemos:

$$C'_r = \frac{C_{min}}{C_{max}}$$

$$NUT = \frac{U_h A_h}{C_{min}}$$

Com NUT e C'_r , encontramos

$$\epsilon'$$

através do gráfico $\epsilon \times NUT$ para um trocador de calor casco e tubos com um passe no casco do livro do Incropera.

Calculamos $q_{max} = C_{min}(T_{h,i} - T_{o,i})$

Com isso, calculamos q, fazendo:

$$q = \epsilon \times q_{max}$$

E substituímos q em

$$q = C_h \times (T_{h,i} - T_{h,o})$$

e

$$q = C_c \times (T_{c,i} - T_{c,o})$$

para obter $T_{h,o}$ e $T_{c,o}$

1. *PREFÁCIO*

1.14 Exercício 3

Em um transplante, há necessidade de aquecer e recircular 0.05kg/s do sangue hipotérmico, de 18°C a 25°C. Propõe-se fazer isso com um tubo duplo de cobre horizontal, isolado externamente, com diâmetros interno e externo do tubo interior, de 50 e 55mm, e diâmetro interno do tubo exterior, por onde passa a água, de 85mm. O calor específico do sangue é de 3500J/kg.K, e o coeficiente de transferência de calor do lado do sangue é de 100W/m²°C.

a) Dispondo-se de 0,1kg/s de água a 60°C, qual é o comprimento do tubo necessário?

b) Ao final da cirurgia deseja-se recuperar a temperatura normal do sangue dos 18°C para 36°C. Qual a nova vazão de água necessária?

Solução

Calculo da taxa calor trocado:

$$\dot{q} = \dot{m}_{\text{sangue}} \times c_{\text{sangue}} \times \Delta T_{\text{sangue}}$$

$$\dot{q} = 0,05 \times 3500 \times (25 - 18) = 1225W$$

Calculo da variação de temperatura da água:

Como $\dot{m}_{\text{agua}} \times c_{\text{agua}} \gg \dot{m}_{\text{sangue}} \times c_{\text{sangue}}$ e o sangue só varia 7°C vamos avaliar as propriedades da água para 60°C.

Tabela A.6:

$$c = 4186J/kg.K$$

$$\mu = 453 \times 10^{-6} N.s/m_2$$

$$k = 656 \times 10^{-3}$$

$$\dot{q} = \dot{m}_{\text{agua}} \times c_{\text{agua}} \times \Delta T_{\text{agua}}$$

$$1225 = 0,1 \times 4186 \times (60 - T_{\text{agua},2})$$

$$T_{\text{agua},2} = 57^\circ\text{C}$$

Calculo da temperatura média logaritmica:

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)}$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{(57 - 18) - (60 - 25)}{\ln\left(\frac{57-18}{60-25}\right)} = 37^\circ\text{C}$$

Calculo do coeficiente global de troca de calor:

$$\frac{1}{U_{ext}A_{ext}} = \frac{1}{h_{ext}A_{ext}} + \frac{\ln(D_e/D_i)}{2\pi kL} + \frac{1}{h_{int}A_{int}}$$

1. PREFÁCIO

Para isso é necessário conhecer o h_{ext} . Hipótese: Escoamento desenvolvido na região anular e temperatura da superfície não isolada constante.

Usá-se o diâmetro hidráulico $D_h = D_e - D_i$.

$$Re = \frac{4 \dot{m}_{agua}}{\pi(D_e + D_i)\mu}$$

$$Re = \frac{4 \times 0,1}{\pi \times (85 + 55) \times 10^{-3} \times 453 \times 10^{-6}} = 2008$$

Portanto o escoamento é laminar e podemos usar a Tabela 8.2 para determinar Nu.

Fazendo uma interpolação encontramos $Nu_i = 5,5$ e portanto $h_{ext} = \frac{Nu_i k}{D_h} = 120 W/m^2 \cdot ^\circ C$

Portanto da equação de U_{ext} .

$$\frac{1}{U_{ext} \pi 55 \times 10^{-3} \cdot L} = \frac{1}{120 \pi 55 \times 10^{-3} \cdot L} + \frac{\ln(55/50)}{2 \pi 656 \times 10^{-3} \cdot L} + \frac{1}{100 \pi 50 \times 10^{-3} \cdot L}$$

$$U_{ext} = 43 W/m^2 \cdot ^\circ C$$

Finalmente:

$$\dot{q} = U_{ext} A_{ext} \Delta T_{ml}$$

$$1225 = 43 \times \pi \times 55 \times 10^{-3} \times L \times 37$$

$$L = 4,46 m$$

Para uma variação de $18^\circ C$ no sangue:

Calculo do novo \dot{q}

$$\dot{q} = 0,05 \times 3500 \times (36 - 18) = 3150 W$$

Calculo da nova vazão, considerando a mesma variação de temperatura da água.

$$\dot{q} = \dot{m}_{agua} \times c_{agua} \times \Delta T_{agua}$$

$$3150 = \dot{m}_{agua} \times 4186 \times 3$$

$$\dot{m}_{agua} = 0,25 kg/s$$