

7.5. EXEMPLO: PROJETO TÉRMICO DE UM CONDENSADOR

Dimensionar um trocador de calor para condensar $20.000 \text{ lbm}/h$ de propano com temperatura inicial de $150^\circ F$ e pressão de saturação de 300 psia , tendo como fluido frio água aquecendo de $70^\circ F$ até $120^\circ F$, e pressão de operação igual a 90 psia . A perda de carga permitida é de 2 psi para o propano e 15 psi para a água.

Solução:

7.5.1 DADOS INICIAIS

Fluido	Vazão (lbm/h)	T_1 ($^\circ F$)	T_2 ($^\circ F$)	P_{op} (psia)	ΔP (psi)
Propano	20.000	150	?	300	2
Água	?	70	120	90	15

7.5.2 LOCALIZAÇÃO DOS FLUIDOS

água de resfriamento \Rightarrow no lado dos tubos

propano \Rightarrow no lado do casco

7.5.3 TEMPERATURAS MÉDIAS

A pressão de saturação do propano $p_{sat} = 300 \text{ psia}$ corresponde a uma temperatura de saturação $T_{sat} = T_2 = 138^\circ F$.

Temperaturas médias:

$$T_{mc} = \frac{150 + 138}{2} = 144^\circ F \quad T_{mt} = \frac{70 + 120}{2} = 95^\circ F$$

7.5.4 PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS FLUIDOS

Obs: Como os dados iniciais fornecem as temperaturas de entrada e saída dos dois fluidos é possível determinar a temperatura média de cada fluido e as propriedades, caso contrário seria necessário realizar primeiro o balanço de calor.

Fluido	Propano	Água
Temperatura média ($^\circ F$)	144	95
Massa específica (lbm/ft^3)		62,08
Calor específico ($\text{BTU}/\text{lbm.}^\circ F$)		1,0
Condutividade térmica ($\text{BTU}/h.\text{ft.}^\circ F$)		0,359
Viscosidade dinâmica ($\text{lbm}/\text{ft.h}$)		1,56

Temperatura de saturação ($^{\circ}F$)	138	
Massa específica do líquido (lbm/ft^3)	34,24	
Calor específico do líquido ($BTU/lbm.^{\circ}F$)	0,71	
Condutividade térmica do líquido ($BTU/h.ft.^{\circ}F$)	0,066	
Viscosidade dinâmica do líquido ($lbm/ft.h$)	0,19	
Massa específica do vapor (lbm/ft^3)	2,04	
Calor específico do vapor ($BTU/lbm.^{\circ}F$)	0,44	
Condutividade térmica do vapor ($BTU/h.ft.^{\circ}F$)	0,0124	
Viscosidade dinâmica do vapor ($lbm/ft.h$)	0,022	
Calor latente (BTU/lbm)	115	
Fator de incrustação ($h.ft.^2.^{\circ}F/BTU$)	0,002	0,003

7.5.5 BALANÇO DE ENERGIA

$$\dot{Q} = \dot{Q}_s + \dot{Q}_l = \dot{m}_c \cdot C_{p_c} \cdot \Delta T_c + \dot{m}_c \cdot \lambda$$

$$\dot{Q} = 20000 \cdot 0,44 \cdot (150 - 138) + 20000 \cdot 115$$

$$\dot{Q} = 105600 + 2300000 = 2405600 \text{ BTU/h}$$

$$\text{Razão entre calor sensível e calor latente } \frac{\dot{Q}_s}{\dot{Q}_l} = \frac{105600}{2300000} = 0,046 = 4,6\%$$

O calor sensível representa uma parcela pequena do calor total (<5%), portanto, o dimensionamento pode ser feito considerando apenas troca de calor latente, mas considerando o valor do calor total.

Vazão de água:

$$\dot{Q}_{\text{água}} = \dot{m}_t \cdot C_{p_t} \cdot \Delta T_t$$

$$\dot{m}_{\text{água}} = \frac{\dot{Q}}{C_{p_t} \cdot \Delta T_t} = \frac{2405600}{1,0(120 - 70)} = 48112 \text{ lbm/h}$$

7.5.6 TEMPERATURA DA ÁGUA NO INÍCIO DA CONDENSAÇÃO

$$T'_{t2} = T_{t2} - \frac{\dot{Q}_s}{\dot{m}_t \cdot C_{p_t}} = 120 - \frac{105600}{48112 \cdot 1} = 117,8^\circ F$$

7.5.7 DIFERENÇA MÉDIA DE TEMPERATURA

$$MLDT = \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\ln\left(\frac{\Delta T_a}{\Delta T_b}\right)} = \frac{(138 - 117,8) - (138 - 70)}{\ln\left(\frac{138 - 117,8}{138 - 70}\right)} = 39,4^\circ F$$

Fator de correção da MLDT

$$P = \frac{T'_{t2} - T_{t1}}{T_{c1} - T_{t1}} = \frac{117,8 - 70}{138 - 70} = 0,7$$

$$R = \frac{T_{c1} - T_{c2}}{T'_{t2} - T_{t1}} = \frac{138 - 138}{117,8 - 70} = 0$$

Logo: $F = 1$ e $\Delta T_m = 39,4^\circ F$

7.5.8 TEMPERATURA E PRESSÃO DE PROJETO

Casco: $T_{\text{projeto}} = 150 + 50 = 200^\circ F$

$$p_{\text{projeto}} = 300 \times 1,2 = 360 \text{ psi}$$

Tubos: $T_{\text{projeto}} = 120 + 50 = 170^\circ F$

$$p_{\text{projeto}} = 90 \times 1,2 = 108 \text{ psi}$$

7.5.9 CARACTERÍSTICAS DO PROJETO MECÂNICO

$$T_m = \frac{T_{mc} + T_{mt}}{2} = \frac{138 + 95}{2} = 116,5^\circ F$$

$$\Delta T = T_{mc} - T_m = 138 - 116,5 = 21,5^\circ F < 50^\circ F$$

Permite uso de espelhos fixos. Tipo construtivo AEL.

7.5.10 BOCAIS

a) Bocal 1 – carcaça (vapor)

$$V_{\max} = 16,1 \sqrt{\frac{p}{\rho_{\text{vapor}}}} = 16,1 \sqrt{\frac{300}{2,04}} = 195,2 \text{ ft/s}$$

$$D_{bc1} = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{m}_c}{\pi \cdot \rho \cdot V_{\max}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 20000}{\pi \cdot 2,04 \cdot 195,2 \cdot 3600}} = 0,133 \text{ ft} = 1,6 \text{ in}$$

Adotaremos $D_{bc1} = 3''$

b) Bocal 2 – carcaça (líquido)

$$V_{\max} = \sqrt{\frac{3000}{\rho_{\text{liquido}}}} = \sqrt{\frac{3000}{34,24}} = 9,36 \text{ ft/s}$$

$$D_{bc2} = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{m}_c}{\pi \cdot \rho \cdot V_{\max}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 20000}{\pi \cdot 34,24 \cdot 9,36 \cdot 3600}} = 0,149 \text{ ft} = 1,78 \text{ in}$$

Adotaremos $D_{bc2} = 3''$

c) Bocal 1 e 2 – tubos

$$V_{\max} = 10 \text{ ft/s}$$

$$D_{bt} = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{m}_t}{\pi \cdot \rho_t \cdot V_{\max}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 48112}{\pi \cdot 62,08 \cdot 10 \cdot 3600}} = 0,165 \text{ ft} = 1,98 \text{ in}$$

Adotaremos $D_{bt} = 2''$ **7.5.11 ESTIMATIVA DO NÚMERO DE TUBOS**Coeficiente global de troca térmica estimado: $U = 80 \text{ BTU} / \text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ \text{F}$

$$A = \frac{\dot{Q}}{U \cdot \Delta T_m} = \frac{2405600}{80 \cdot 39,4} = 763,2 \text{ ft}^2$$

Escolha do tubo:

espessura: $p_{\text{projeto}} = 360 \text{ psi}$ tensão admissível do latão (64/36) na $T = 200^\circ \text{F}$, $\sigma = 410 \text{ kgf} / \text{cm}_2 = 6000 \text{ psi}$

$$\text{A espessura é estimada por: } e = \frac{p \cdot d}{2 \cdot \sigma} + C = \frac{360 \cdot 0,75}{2 \cdot 6000} + 0,04 = 0,09 \text{ in}$$

Empregaremos tubos BWG 12, com $de = \frac{3}{4}''$ (Obs: A espessura da parede dos tubos deve ser verificada no projeto mecânico, principalmente quanto à rigidez e a resistência à

pressão externa)

Espessura da parede = 0,109"

Diâmetro externo = 0,75"

Diâmetro interno = 0,532"

Material = latão

Arranjo triangular com passo de 1"

Número de trajetos nos tubos, $N_t = 4$

Comprimento dos tubos = 16 ft

Espessura dos espelhos = 2" (estimada)

Número de tubos:

$$n = \frac{A}{\pi \cdot de \cdot (L - 2e)} = \frac{763,2}{\pi \cdot \left(\frac{0,75}{12}\right) \left(16 - \frac{2 \cdot 2}{12}\right)} = 248,1$$

Contagem de tubos no espelho, para tipo L, $n = 258$, e $Di = 19 \frac{1}{4}$ "

7.5.12 VAZÃO MÁSSICA NOS TUBOS

$$a = \frac{\pi \cdot di^2}{4} = \frac{\pi \cdot (0,532)^2}{4} = 0,223 \text{ in}^2 = 0,001548 \text{ ft}^2$$

$$G_t = \frac{\dot{m}_t}{\frac{n}{N_t} \cdot a} = \frac{48112}{\frac{258}{4} \cdot 0,001548} = 481862 \text{ lbm/h.ft}^2$$

7.5.13 COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO

$$Re_t = \frac{G_t \cdot di}{\mu_t} = \frac{481862 \cdot 0,532}{1,56 \cdot 12} = 13694 \Rightarrow \text{escoamento turbulento.}$$

$$Pr = \frac{\mu_t \cdot Cp_t}{k_t} = \frac{1,56 \cdot 1}{0,359} = 4,35$$

Equação de Dittus-Boelter: $Nu_t = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4} = 0,023 (13694)^{0,8} (4,35)^{0,4} = 84,40$

$$h_i = \frac{Nu_t \cdot k_t}{di} = \frac{84,4 \cdot 0,359 \cdot 12}{0,532} = 683,45 \text{ BTU/h.ft}^2 \cdot ^\circ F$$

7.5.14 PERDA DE CARGA NOS TUBOS

7.5.14.1 Nos bocais

Bocal com diâmetro nominal de 2", Sch 40 $\Rightarrow de = 2,38 \text{ in}$ e $di = 2,067 \text{ in}$.

$$V_{bt} = \frac{\dot{m}_t}{\rho_t \cdot \frac{\pi \cdot D_{bt}^2}{4}} = \frac{4 \cdot 48112 \cdot 144}{62,08 \cdot \pi \cdot (2,067)^2 \cdot 3600} = 9,24 \text{ ft/s}$$

$$\Delta p_{bt} = 1,8 \frac{\rho \cdot V_{bt}^2}{2g} = \frac{1,8 \cdot 62,08 \cdot (9,24)^2}{2 \cdot 32,2 \cdot 144} = 1,03 \text{ psi}$$

7.5.14.2 Na contração, expansão e retorno

$$V_t = \frac{G_t}{\rho_t} = \frac{525667}{62,08 \cdot 3600} = 2,35 \text{ ft/s}$$

$$\Delta p_{cer} = 1,6 \cdot N_t \frac{\rho \cdot V_t^2}{2g} = \frac{1,6 \cdot 4 \cdot 62,08 \cdot (2,35)^2}{2 \cdot 32,2 \cdot 144} = 0,23 \text{ psi}$$

7.5.14.3 Perda linear

Material do tubo = latão \Rightarrow rugosidade $E = 5 \times 10^{-6} \text{ ft}$

Fator de atrito de Churchill

$$A = \left(2,457 \ln \left(\frac{1}{\left(\frac{7}{Re} \right)^{0,9} + \frac{0,27 \cdot E}{di}} \right) \right)^{16} = \left(2,457 \ln \left(\frac{1}{\left(\frac{7}{14321} \right)^{0,9} + \frac{0,27 \cdot 5 \times 10^{-6} \cdot 12}{0,532}} \right) \right)^{16}$$

$$A = 3,97 \times 10^{19}$$

$$B = \left(\frac{37530}{Re} \right)^{16} = \left(\frac{37530}{14321} \right)^{16} = 4,95 \times 10^6$$

$$f = \left(\left(\frac{8}{Re} \right)^{12} + \frac{1}{(A+B)^{1,5}} \right)^{1/12} = \left(\left(\frac{8}{14321} \right)^{12} + \frac{1}{(3,97 \times 10^{19} + 4,95 \times 10^6)^{1,5}} \right)^{1/12} = 0,00355$$

Correção devido ao escoamento não isotérmico

$$T_{pi} = T_t + U \left(R d_i + \frac{1}{h i} \right) \frac{de}{di} (T_c - T_t)$$

$$T_{pi} = 95 + 80 \left(0,002 + \frac{1}{683,45} \right) \frac{0,75}{0,532} (138 - 95) = 112^\circ F$$

Viscosidade da água na temperatura da parede: $\mu_t = 1,355 \text{ lbm/h.ft}$

$$\text{Fator de correção: } \alpha = \left(\frac{\mu}{\mu_t} \right)^{0,14} = \left(\frac{1,56}{1,355} \right)^{0,14} = 1,02$$

Coefficiente de atrito não isotérmico: $f' = \alpha \cdot f = 1,02 \cdot 0,00355 = 0,00362$

Perda de carga linear nos tubos:

$$\Delta p_l = 8 \cdot f' \cdot \frac{L}{di} \cdot \frac{\rho_t \cdot V_t^2}{2g} N_t$$

$$\Delta p_l = 8 \cdot 0,00362 \frac{16 \cdot 12}{0,532} \frac{62,08 \cdot 2,35^2}{2 \cdot 32,2 \cdot 144} 4 = 1,61 \text{ psi}$$

Fator de correção para levar em conta a formação de depósito

$$de = \frac{3}{4}''$$

$$\text{BWG 12} \quad \text{Tabela} \quad N_c = 1,26$$

Liga não ferrosa

Perda de carga total nos tubos:

$$\Delta p_{total} = \Delta p_{bt} + \Delta p_{cer} + \Delta p_f \cdot N_c$$

$$\Delta p_{total} = 1,03 + 0,23 + 1,61 \cdot 1,26 = 3,29 \text{ psi}$$

7.5.15 GEOMETRIA DO CASCO

7.5.15.1 Diâmetro do feixe de tubos

$$\text{Número de tubos na fileira central: } n_c = 1,1\sqrt{n} = 1,1\sqrt{258} = 17,67 \approx 18$$

$$\text{Diâmetro do feixe de tubos: } D_f = (n_c - 1)s + de = (18 - 1)1 + 0,75 = 17,75 \text{ in}$$

$$\text{Diâmetro interno do casco: } D_i = 19,25 \text{ in}$$

7.5.15.2 Número de chicanas

$$\text{a) Corte da chicana: } \frac{H}{Di} = 46\% \quad (\text{arbitrado})$$

$$\text{b) Espaçamento entre chicanas adjacentes: } \frac{Di}{l} = 1 \Rightarrow l = Di = 19,25 \text{ in}$$

c) Comprimento de tubo entre o espelho e a chicana de entrada

$$\text{Com } Di = 19,25 \text{ in e } p = 360 \text{ psi} \Rightarrow \text{Figura} \rightarrow l_{1f} = 7,6 \text{ in}$$

$$\text{Bocal com diâmetro nominal de } 3'' \text{, Sch 40} \Rightarrow de = 3,5 \text{ in e } di = 3,068 \text{ in.}$$

$$l_{1min} = D_{bc1} + l_{1f} = 3,068 + 7,6 = 10,67 \text{ in} \quad \text{adotado: } l_1 = 19 \text{ in}$$

d) Comprimento de tubo entre o espelho e a chicana de saída

$$\text{Com } Di = 19,25 \text{ in e } p = 360 \text{ psi} \Rightarrow \text{Figura} \rightarrow l_{2f} = 7,6 \text{ in}$$

$$\text{Bocal com diâmetro nominal de } 3'' \text{, Sch 40} \Rightarrow de = 3,5 \text{ in e } di = 3,068 \text{ in.}$$

$$l_{2min} = D_{bc2} + l_{2f} = 3,068 + 7,6 = 10,67 \text{ in} \quad \text{adotado: } l_2 = 19 \text{ in}$$

e) Número de chicanas

$$N_b = \frac{(L - l_1 - l_2)}{l} + 1 = \frac{(16 \cdot 12 - 19 - 19)}{19,25} + 1 = 8$$

7.5.16 COEFICIENTE DE PELÍCULA NO CASCO

$$\text{a) Fluxo de condensado no casco: } G'' = \frac{\dot{m}_c}{L \cdot n^{2/3}} = \frac{20000}{16 \cdot \sqrt[3]{258^2}} = 30,84 \text{ lbm/h.ft}$$

$$Re_\delta = \frac{4 \cdot G''}{\mu} = \frac{4 \cdot 30,84}{0,19} = 649,34$$

$$\text{b) Temperatura da película: } T_f = \frac{T_c + T_p}{2} = \frac{138 + 112}{2} = 125^\circ F$$

c) Propriedades do propano líquido na temperatura da película:

Temperatura da película ($^\circ F$)	125
Massa específica do líquido (lbm/ft^3)	34,24
Condutividade térmica do líquido ($\text{BTU/h.ft.}^\circ F$)	0,066
Viscosidade dinâmica do líquido (lbm/ft.h)	0,22
Viscosidade cinemática do líquido (ft^2/h)	0,006425

d) Coeficiente de película na condensação:

$$\frac{\bar{h}_L (v_i^2/g)^{1/3}}{k_l} = 1,514 Re_\delta^{-1/3} \Rightarrow \bar{h}_L = 1,514 Re_\delta^{-1/3} \frac{k_l}{(v_i^2/g)^{1/3}}$$

$$\bar{h}_L = 1,514 Re_\delta^{-1/3} \frac{k_l}{(v_i^2/g)^{1/3}} = 1,514 (649,34)^{-1/3} \frac{0,066}{((0,006425)^2 / (32,2 \cdot 3600^2))^{1/3}}$$

$$\bar{h}_L = 249,51 \text{ BTU/h.ft}^2 \cdot ^\circ F$$

7.5.17 COEFICIENTE GLOBAL DE TROCA TÉRMICA

$$U = \frac{1}{\frac{de}{hi \cdot di} + \frac{R \cdot di \cdot de}{di} + \frac{de}{2k_t} \ln\left(\frac{de}{di}\right) + R \cdot de + \frac{1}{he}}$$

$$\text{Condutividade térmica do latão na } T_p = 112^\circ F \Rightarrow k_{\text{latão}} = 58 \text{ BTU/h.ft.}^\circ F$$

$$U = \frac{1}{\frac{0,75}{683,45 \cdot 0,532} + \frac{0,003 \cdot 0,75}{0,532} + \frac{0,75}{2 \cdot 12 \cdot 58} \ln\left(\frac{0,75}{0,532}\right) + 0,002 + \frac{1}{249,51}}$$

$$U = 80,05 \text{ BTU} / \text{h.ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}$$

7.5.18 VERIFICAÇÃO DA ÁREA DE TROCA DE TÉRMICA

a) Área necessária:

$$A = \frac{\dot{Q}}{U \cdot \Delta T_m} = \frac{2405600}{80,05 \cdot 39,4} = 762,72 \text{ ft}^2$$

b) Área disponível:

$$A_d = n \cdot \pi \cdot de \cdot L'$$

$$A_d = 258 \cdot \pi \cdot \frac{0,75}{12} \left(16 - \frac{2 \cdot 2}{12} \right) = 793,64 \text{ ft}^2$$

c) Diferença de área:

$$\text{Erro} = \frac{A_d - A}{A} \times 100 = \frac{793 - 762,72}{762,72} \times 100 = 3,97\%$$

7.5.19 PERDA DE CARGA NO CASCO

a) Fluxo de massa:

$$\begin{aligned} \frac{s}{de} = 1,33 & \quad \Rightarrow \quad \text{Fig 5.13} \\ & \quad \quad \quad \Rightarrow \quad Np = 0,20 \\ \frac{Di}{l} = 1 & \quad \quad \quad Y = 6,8 \end{aligned}$$

$$Fp = \frac{1}{0,8 + Np \sqrt{\frac{Di}{s}}} = \frac{1}{0,8 + 0,2 \sqrt{\frac{19,25}{1}}} = 0,60$$

$$C_b = 0,97$$

$$C_a = C_b \frac{s - de}{s} = 0,97 \frac{1 - 0,75}{0,75} = 0,32$$

$$S_c = C_a \cdot l \cdot D_f = 0,32 \cdot 19,25 \cdot 17,75 = 110,48 \text{ in}^2 = 0,77 \text{ ft}^2$$

$$S_{cf} = \frac{S_c}{Fp} = \frac{0,77}{0,6} = 1,28 \text{ ft}^2$$

$$G_{cf} = \frac{\dot{m}_c}{S_{cf}} = \frac{20\,000}{1,28} = 15\,625 \text{ lbm} / \text{h.ft}^2$$

b) Número de Reynolds

$$Re = \frac{G_{cf} \cdot de}{\mu_{liq}} = \frac{15625 \cdot 0,75}{0,22 \cdot 12} = 4439$$

c) Coeficiente de atrito no casco:

$$\frac{s}{de} = 1,33 \quad \Rightarrow \quad \text{Fig 5.13}$$

$$Re = 4439 \quad \Rightarrow \quad f_c = 0,52$$

d) Fator C_x , Tabela 5.10 $\Rightarrow C_x = 1,154$

e) Massa específica média:

$$\rho_{\text{médio}} = \frac{2 \cdot \rho_{liq} \cdot \rho_{vap}}{\rho_{liq} + \rho_{vap}} = \frac{2 \cdot 34,24 \cdot 2,04}{34,24 + 2,04} = 3,85 \text{ lbm/ft}^3$$

f) Perda de carga para o escoamento através do casco:

$$\Delta P_c = 4 f_c \frac{G_{cf}^2}{2 \rho_c} C_x \left(1 - \frac{H}{Di}\right) \frac{Di}{s} N_B \left(1 + \frac{Y s}{Di}\right) \left(\frac{\mu_{te}}{\mu_c}\right)^{0,14}$$

$$\Delta P_c = 4 \cdot 0,52 \frac{(15625)^2}{2 \cdot 3,85} 1,154 (1 - 0,46) \frac{19,25}{1} (8 + 1) \left(1 + \frac{6,8 \cdot 1}{19,25}\right) \left(\frac{0,23}{0,19}\right)^{0,14} \frac{1}{32,2 \cdot (3600)^2 \cdot 144}$$

$$\Delta P_c = 0,14 \text{ psi}$$

f) Perda de carga no bocal de entrada (vapor):

Bocal com diâmetro nominal de 3", Sch 40 $\Rightarrow de = 3,5 \text{ in}$ e $di = 3,068 \text{ in}$.

$$V_{bc} = \frac{\dot{m}_c}{\rho_{vap} \left(\frac{\pi D_{bc}^2}{4}\right)} = \frac{20000}{2,04 \left(\frac{\pi (3,068)^2}{4}\right)} \cdot \frac{144}{3600} = 53,05 \text{ ft/s}$$

$$\text{parâmetro } \frac{\mu/\rho}{D_{bc}} = \frac{0,009091/2,04}{2,067} = 0,0022$$

μ em centipoise	0,009091
ρ em lbm/ft^3	2,04
D_{bc} em polegadas	2,067

$$\frac{\mu/\rho}{D_{bc}} = 0,0022 \quad \Rightarrow \quad \text{Fig 5.22}$$

$$Z = 75 \text{ ft}$$

$$V_{bc} = 53,05$$

$$\Delta P_{bc1} = \rho_{vap} \cdot g \cdot Z = \frac{2,04 \cdot 32,2 \cdot 75}{144 \cdot 32,2} = 1,06 \text{ psi}$$

g) Perda de carga no bocal de saída (líquido):

Bocal com diâmetro nominal de 3", Sch 40 $\Rightarrow de = 3,5 \text{ in}$ e $di = 3,068 \text{ in}$.

$$V_{bc} = \frac{\dot{m}_c}{\rho_{vap} \left(\frac{\pi D_{bc}^2}{4} \right)} = \frac{20000}{34,24 \left(\frac{\pi (3,068)^2}{4} \right)} \cdot \frac{144}{3600} = 3,16 \text{ ft/s}$$

parâmetro $\frac{\mu/\rho}{D_{bc}} = \frac{0,078512/34,24}{2,067} = 0,0011$

μ em centipoise	0,078512
ρ em lbm/ft^3	34,24
D_{bc} em polegadas	2,067

$$\frac{\mu/\rho}{D_{bc}} = 0,0011 \quad \Rightarrow \quad \begin{array}{l} \text{Fig 5.22} \\ Z = 0,28 \text{ ft} \end{array}$$

$$V_{bc} = 3,16$$

$$\Delta P_{bc1} = \rho_{vap} \cdot g \cdot Z = \frac{34,24 \cdot 32,2 \cdot 0,28}{144 \cdot 32,2} = 0,07 \text{ psi}$$

h) Perda de carga total no casco

$$\Delta P_{c \text{ total}} = \Delta P_c + \Delta P_{bc1} + \Delta P_{bc2}$$

$$\Delta P_{c \text{ total}} = 0,14 + 1,06 + 0,07$$

$$\Delta P_{c \text{ total}} = 1,27 \text{ psi}$$