

PQI – 3303 – Fenômenos de Transporte III

Exercícios – Listas 7

José Luís de Paiva

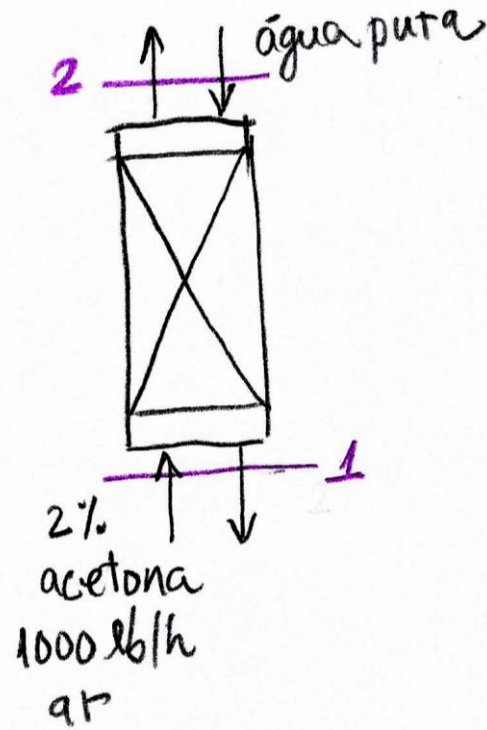
Departamento de Engenharia Química da EPUSP

7ª lista de exercícios

- 1) Em uma coluna recheada emprega-se uma amina para remoção de CO_2 . A corrente de gás alimentada à coluna contém 1,26 % (molar) de CO_2 e deve sair com 0,04%. A corrente líquida contendo amina, entra pura. Se em equilíbrio com o CO_2 , na entrada, a solução de amina atingiria a concentração de 0,8% de CO_2 . A vazão de gás é de 2,3 gmol/s e a de líquido 1,37 vezes a mínima. O diâmetro da coluna é de 0,4 m e $K_y a = 5 \cdot 10^{-5}$ gmol/(s cm^3). Determine a altura necessária. Para a altura calculada qual seria a concentração de CO_2 na saída para uma concentração na entrada de 2 % ? *Respostas: 3,23 m e 0,0006.*
- 2) (31.7 B&M) Dióxido de enxofre deve ser removido de uma corrente de ar no qual está presente com uma fração molar de 0,0296. Uma coluna recheada deve ser usada com um diâmetro tal que o fluxo de gás seja de $9,22 \times 10^{-3}$ kmol/s m^2 . Água pura deve ser alimentada ao topo da coluna e descer com vazão de 0,437 kmol/s m^2 em contracorrente com o gás que entra no fundo da coluna. A fração molar de SO_2 no gás efluente deve ser reduzida a 0,0030. Para tal coluna, operando a 20 °C, são dados: $k_x a = 0,943$ kmol/s m^3 , $k_y a = 0,0496$ kmol/s m^3 e $m = 29,6$. Calcule a altura de coluna necessária. *Resposta: 1,85 m.*
- 3) (31.9 B&M) Solute A está presente com fração molar 0,02 num gás alimentado no fundo de uma coluna recheada de 6 m de altura, e o gás que deixa o topo da coluna contém fração molar de A igual 0,001. O solvente é água pura, e deixa o fundo da coluna com fração molar de A igual a 0,02. A inclinação da linha de equilíbrio é de 0,80. Calcule H_{OG} . Determine H_G , sabendo-se que $H_L = 0,35$ m? *Resposta: 0,389 m.*
- 4) Uma coluna de absorção com área da seção transversal de 0,29 m^2 , contendo anéis de Raschig de 1/2", é utilizado na recuperação de amônia de uma corrente de ar. A coluna, que opera a 25 °C e 1 atm, recebe uma mistura ar-amônia com uma fração molar 0,005 de amônia a uma vazão de 20 mol/h. O gás estabelece contato com uma corrente de água cuja vazão é de 20 mol/h. Nas condições praticadas, considerando o recheio e o sistema ar-amônia sob pressão atmosférica, a altura de uma unidade de transferência é dada por: $H_G = 0,35 G^{0,1} L^{-0,39}$; na qual H_G é expresso em m e G e L em $\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-1}$. A relação de equilíbrio para a amônia é dada por $p = 1,2 x$, sendo p a pressão parcial da amônia (atm) e x , sua fração molar na fase líquida. Considere L e G constante ao longo da coluna. Supondo o processo controlado pela etapa de transferência de massa no filme gasoso e desejando-se um percentual de recuperação da amônia de 75 %, calcule a altura da coluna para uma operação em contracorrente. Lembre-se de que o número de unidades de transferência (N_G) é calculado pela expressão: $N_G = \int_{y_T}^{y_B} dy / (y - y^*)$ em que y é a fração molar da amônia na fase gasosa e y^* é a fração molar da amônia em equilíbrio com a fase líquida. *Resposta: 1,58 m.*

- 5) (Cussler) Pretende-se empregar uma coluna de 7,4 m de altura para remover 99% de cloreto de metila de uma corrente de ar contendo 114 ppm (em volume). O cloreto será absorvido em um óleo mineral, no qual é extremamente solúvel. A coluna proporciona: $a = 5 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ e $K_G = 8,1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$. Pretende-se usar um fluxo de ar de $1,41 \times 10^{-5} \text{ mol/cm}^2 \text{ s}$. Avalie. *Resposta: 3,9 m.*
- 6) (Cussler) Experimentos indicam que para absorção de NH_3 e CH_4 em água a 2,2 atm em colunas recheadas com selas “Berl” os coeficientes de T.M. são: $k_x a = 530 \text{ lbmol/h ft}^3$, $k_y a = 18 \text{ lbmol/h ft}^3$. Os valores são admitidos iguais pois NH_3 e CH_4 apresentam massa moleculares iguais. No entanto as solubilidades são bastante diferentes: $H_{\text{NH}_3} = 9,6 \text{ atm}$ e $H_{\text{CH}_4} = 41000 \text{ atm}$. Calcule os coeficientes globais volumétricos para ambos os sistemas. *Respostas: 15,7 e 0,028 lbmol/h ft³.*
- 7) Deseja-se absorver 95% de acetona de uma corrente de 1000 lb/h de ar com 2% (molar) de acetona. Alimenta-se água em contracorrente com vazão 20% superior à mínima. Calcule: o diâmetro, a altura da coluna (leito recheado) e a perda de carga no leito. A operação deverá ser com vazão de gás igual a 50% da vazão de afogamento. Recheio: anéis cerâmicos Raschig de 1”. Dados: $P = 1 \text{ atm}$, $T = 80 \text{ °F}$, constante de Henry = 2,53 atm, $D_{\text{ACET/Água}} = 4,81 \cdot 10^{-5} \text{ ft}^2/\text{h}$, $D_{\text{ACET/AR}} = 0,368 \text{ ft}^2/\text{h}$, $\mu_L = 0,86 \text{ cP}$, $\mu_G = 0,018 \text{ cP}$, $\rho_L = 62,3 \text{ lb/ft}^3$ e $\rho_G = 0,0737 \text{ lb/ft}^3$. *Respostas: diâmetro = 1,63 ft, altura = 26,8 ft e perda de carga = 4” CA.*
- 8) Em uma coluna de 2 ft de diâmetro e leito de 20 ft de altura, recheada com selas Berl de 1”, escoar ar a 20 °C e 1 atm em contracorrente com água a 20 °C. Provavelmente a coluna esteja operando próximo do afogamento, com perda de carga de 24” CA. A vazão mássica de líquido é 8,5 vezes a de gás. Determine a nova perda de carga se o recheio da coluna for substituído por anéis Pall de 1½” em polipropileno. De quanto a vazão de líquido pode ser alterada de modo a operar a coluna com perda de carga igual à anterior (24” CA)? *Respostas: 24” CA e 4 vezes.*
- 9) Uma solução 1% (molar) de C é desossorvida com ar em contracorrente a 1 atm e 30 °C. Emprega-se uma coluna com leito de 5 m de altura recheado com selas Berl de 1”. A concentração de C na corrente líquida na saída é de 10 ppm (molar), para $m = 2$ e $(L/G)_{\text{molar}} = 1,4$. Deseja-se aumentar a vazão de líquido, mantendo-se a de gás. A nova vazão de líquido é 1,5 vezes a anterior. Calcule a nova concentração de C na água. Sabe-se que o processo de transferência de massa é praticamente controlado pela fase líquida. *Resposta: 804 ppm.*

7) Deseja-se absorver 95% de acetona de uma corrente de 1000 lb/h de ar com 2% (molar) de acetona. Alimenta-se água em contracorrente com vazão 20% superior à mínima. Calcule: o diâmetro, a altura da coluna (leito recheado) e a perda de carga no leito. A operação deverá ser com vazão de gás igual a 50% da vazão de afogamento. Recheio: anéis cerâmicos Raschig de 1". Dados: $P = 1 \text{ atm}$, $T = 80^\circ \text{F}$, constante de Henry = 2,53 atm, $D_{ACET/Agua} = 4,81 \cdot 10^{-5} \text{ ft}^2/\text{h}$, $D_{ACET/AR} = 0,368 \text{ ft}^2/\text{h}$, $\mu_L = 0,86 \text{ cP}$, $\mu_G = 0,018 \text{ cP}$, $\rho_L = 62,3 \text{ lb/ft}^3$ e $\rho_G = 0,0737 \text{ lb/ft}^3$. Respostas: diâmetro = 1,63 ft, altura = 26,8 ft e perda de carga = 4" CA.



$$L = 1,2 L_{\text{MIN}}$$

Absorver 95% da acetona

$G \rightarrow 50\%$ Gafogamento

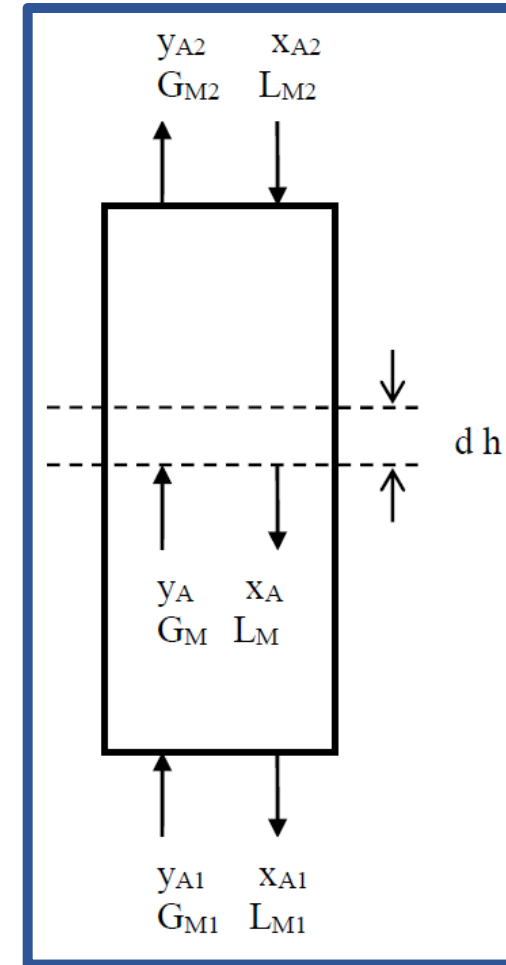
$$P = 1 \text{ atm} \quad T = 80^\circ \text{F}$$

$$H_{\text{acet}} = 2,53 \text{ atm} \rightarrow m = 2,53$$

$$\text{massico: } G = 1000 \text{ lb/h} = 453,6 \text{ Kg/h} = 0,126 \text{ Kg/s}$$

$$\text{Diluído? } y_1 = 0,02 \checkmark$$

$$\text{molar: } \vec{G} = \frac{0,126}{28,9} = 4,36 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Kmol}}{\text{s}}$$



$$\text{molar: } \tilde{G} = \frac{0,126}{28,9} = 4,36 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Kmol}}{\text{s}}$$

$$\text{acetona residual no gás} = 4,36 \cdot 10^{-3} \times 0,02 \times 0,05 \\ = 4,36 \cdot 10^{-6} \text{ Kmol/s}$$

$$y_2 \approx \frac{4,36 \cdot 10^{-6}}{4,36 \cdot 10^{-3}} = 10^{-3} \quad \text{aproximado}$$

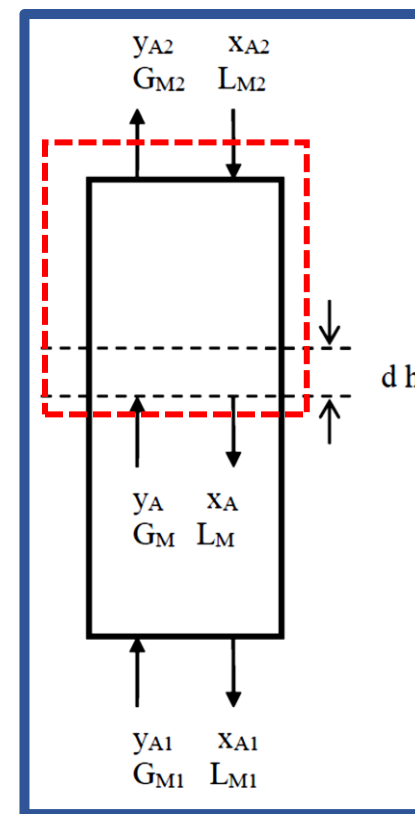
$$\tilde{G} y_1 + \tilde{L} x_2 = \tilde{G} y_2 + \tilde{L} x_1 \quad \text{diluído}$$

$$\tilde{G} (y_1 - y_2) = \tilde{L} (x_1 - x_2)$$

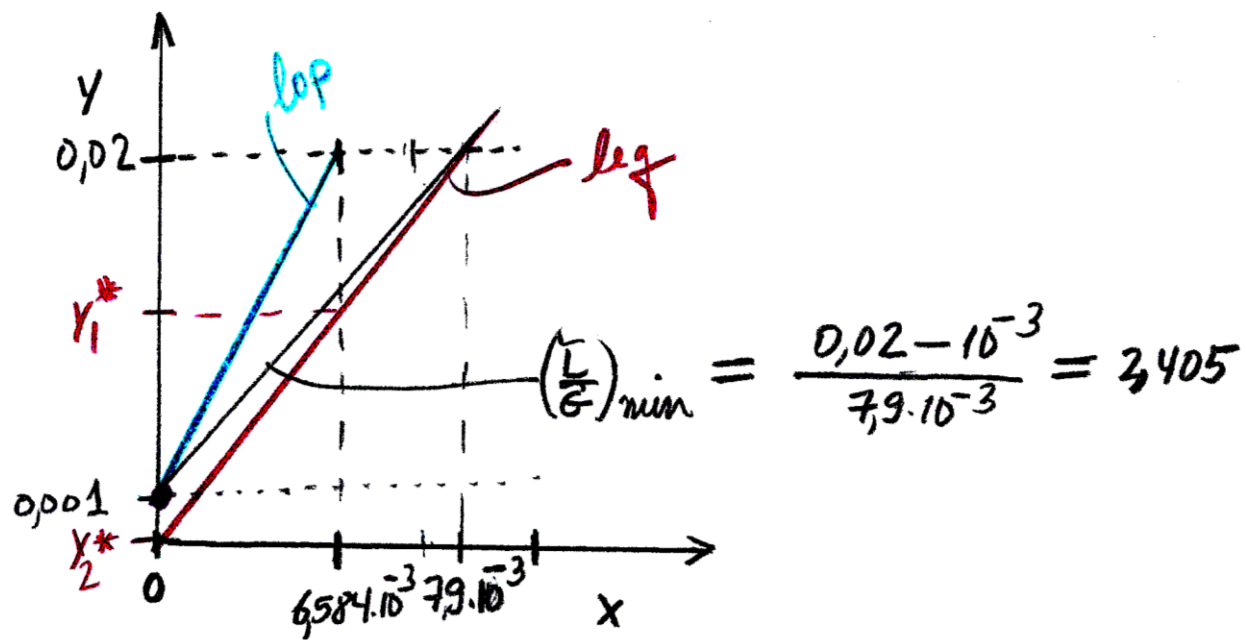
absorvido

$$\tilde{G} (y - y_2) = \tilde{L} (x - x_2)$$

$$y = \frac{\tilde{L}}{\tilde{G}} (x - x_2) + y_2 \quad \text{LOP}$$



$$y_A = \frac{L_M}{G_M} (x_A - x_{A2}) + y_{A2}$$

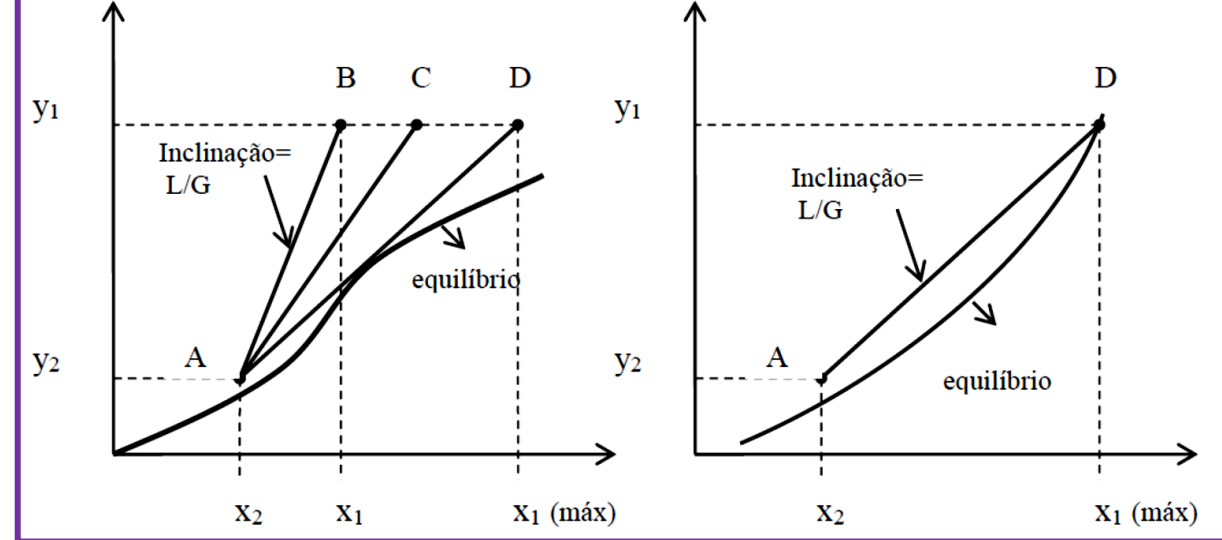


$$\left(\frac{\bar{L}}{\bar{G}}\right) = 1,2 \left(\frac{\bar{L}}{\bar{G}}\right)_{\min} = 2,886$$

$$y = \frac{\bar{L}}{\bar{G}} (x - x_2) + y_2 = 2,886 (x - 0) + y_2$$

$$p/y = y_1 = 0,02 \Rightarrow x_1 = \frac{0,02 - 0,001}{2,886} = 6,584 \cdot 10^{-3}$$

$$x_1 = 6,584 \cdot 10^{-3} ; x_2 = 0 ; y_1 = 0,02 ; y_2 = 10^{-3} ;$$



$$x_1 = 6,584 \cdot 10^{-3} ; x_2 = 0 ; y_1 = 0,02 ; y_2 = 10^{-3} ;$$

$$y_1^* = m x_1 = 1,67 \cdot 10^{-2} ; y_2^* = m x_2 = 0$$

$$\left. \begin{array}{l} (y_1 - y_1^*) = 3,34 \cdot 10^{-3} \\ (y_2 - y_2^*) = 10^{-3} \end{array} \right\} (y - y^*)_{\ln} = \frac{3,34 \cdot 10^{-3} - 10^{-3}}{\ln\left(\frac{3,34 \cdot 10^{-3}}{10^{-3}}\right)} = 1,94 \cdot 10^{-3}$$

$$N_{OG} = \frac{y_1 - y_2}{(y - y^*)_{\ln}} = \frac{0,02 - 10^{-3}}{1,94 \cdot 10^{-3}} = 9,8$$

VAZÃO DE GÁS $\rightarrow \phi$ coluna

$$N_{OG} = \frac{y_{A1} - y_{A2}}{\frac{(y_A - y_A^*)_1 - (y_A - y_A^*)_2}{\ln\left[(y_A - y_A^*)_1 / (y_A - y_A^*)_2\right]}}$$

VAZÃO DE GÁS $\rightarrow \phi$ coluna

$$\rho_G = \frac{PM}{RT} = \frac{1 \times 29}{0,08206 \times 300} = 1,18 \text{ Kg/m}^3$$

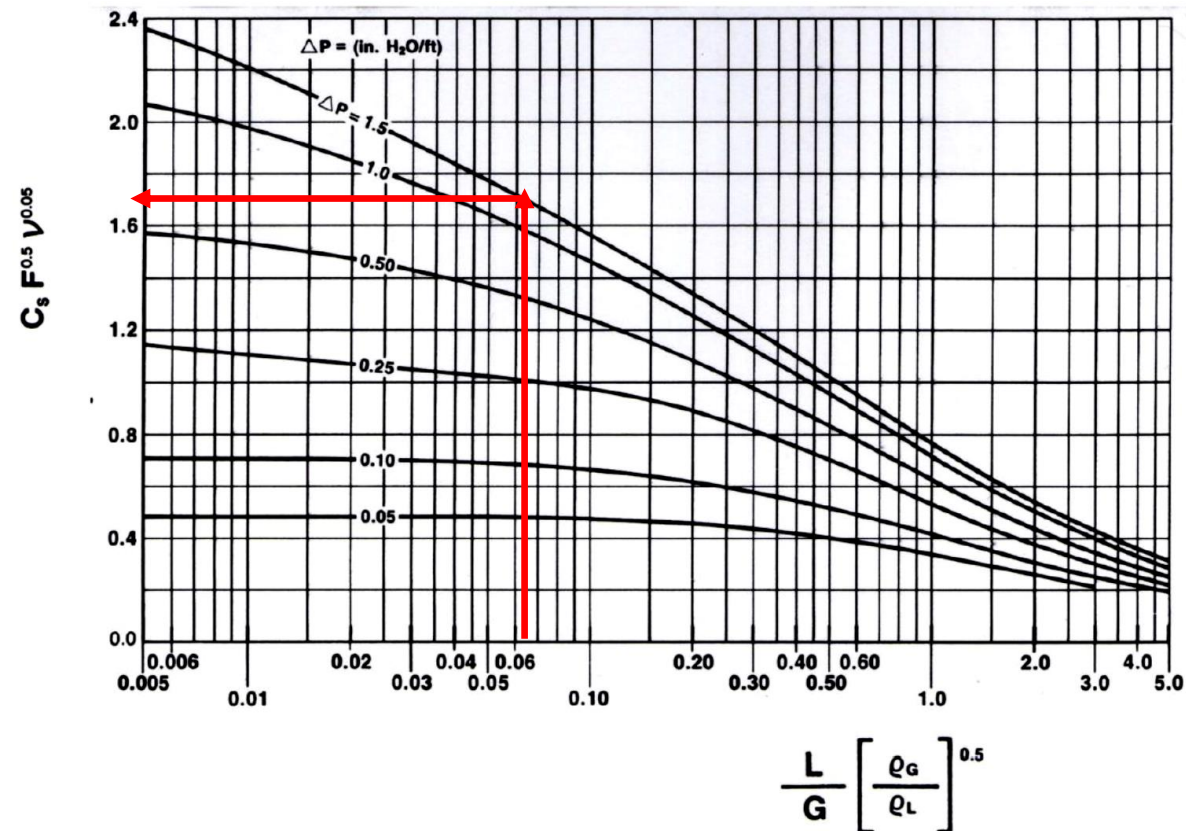
$$\rho_L = 1000 \text{ Kg/m}^3$$

$$\tilde{L} = 2,886 \tilde{G} = 2,886 \times \frac{0,126}{29} = 1,25 \cdot 10^{-2} \frac{\text{kmol}}{\text{s}}$$

$$L = \tilde{L} \times 18 = 0,226 \text{ Kg/s}$$

$$\frac{L}{G} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}} = \frac{0,226}{0,126} \sqrt{\frac{1,18}{1000}} = 0,0616$$

Gráfico $\rightarrow$ apontamento $\rightarrow C_s F^{0,5} V^{0,05} = 1,7$



$$\frac{L}{G} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}} = \frac{0,226}{0,126} \sqrt{\frac{1,18}{1000}} = 0,0616$$

Gráfico $\rightarrow$ apogamento $\rightarrow C_S F^{0,5} \nu^{0,05} = 1,7$

$$\mu = 0,85 \text{ cP} \text{ e } \rho = 1 \text{ g/cm}^3 \rightarrow \nu = 0,85 \text{ cS}$$

$$\nu^{0,05} = 0,99 \quad ; \quad F = 587 \text{ m}^{-1} = 179 \text{ ft}^{-1}$$

$$C_S \cdot 179^{0,5} \cdot 0,99 = 1,7 \Rightarrow C_S = 0,128$$

$$0,128 = U_t \left(\frac{\rho_G}{\rho_L - \rho_G} \right)^{1/2} = 0,0343 U_t \Rightarrow U_t = 3,74 \frac{\text{ft}}{\text{s}}$$

apogamento

$$U_t = 0,5 U_{t_{\text{AFDG}}} = 1,87 \frac{\text{ft}}{\text{s}}$$

$$C_S F^{0,5} \nu^{0,05} = 0,85 \rightarrow \Delta P = 0,15 \frac{\text{in CA}}{\text{m}}$$

$$A = \frac{G}{U_t} = \frac{0,126}{1,87 \times 0,3048 \times 1,18} = 0,19 \text{ m}^2 \rightarrow D = \sqrt{\frac{4 \times 0,19}{\pi}} = 0,49 \text{ m}$$

$$H_G = \left(\frac{0,226}{f_p} \right) \left(\frac{Sc_c}{0,66} \right)^{2/3} \left(\frac{G_x}{6,782} \right)^{-0,5} \left(\frac{G_y}{0,678} \right)^{0,35}$$

$$G_x = \frac{E}{A} = \frac{0,226}{0,19} = 1,19 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}$$

$$G_y = \frac{G}{A} = \frac{0,126}{0,19} = 0,66 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}$$

$$f_p = 1,2 \quad Sc_c = \frac{\nu}{D_{AC/M}} = 1,6$$

$$H_G = \frac{0,226}{1,2} \cdot 1,8 \cdot 2,39 \cdot 0,99 = 0,80 \text{ m}$$

$$H_L = \left(\frac{0,357}{f_p} \right) \left(\frac{Sc_L}{372} \right)^{1/2} \left(\frac{G_x/\mu}{6,782/0,0008937} \right)^{0,3}$$

$$Sc_L = 693 \quad ; \quad \mu_L = 0,00085$$

$$H_L = 0,24 \text{ m}$$

$$H_G = \left(\frac{0.226}{f_p} \right) \left(\frac{N_{Sc}}{0.660} \right)^b \left(\frac{G_x}{6.782} \right)^{-0.5} \left(\frac{G_y}{0.678} \right)^{0.35}$$

$$H_L = \left(\frac{0.357}{f_p} \right) \left(\frac{N_{Sc}}{372} \right)^{0.5} \left(\frac{G_x/\mu}{6.782/0.0008937} \right)^{0.3}$$

Relative transfer coefficients [91], f_p values are in table:

Size, in.	Ceramic Raschig rings	Ceramic Berl saddles	Metal Pall rings	Metal Intalox	Metal Hypac
0.5	1.52	1.58	—	—	—
1.0	1.20	1.36	1.61	1.78	1.51
1.5	1.00	—	1.34	—	—
2.0	0.85	—	1.14	1.27	1.07

Norton Intalox structured: 2T, $f_p = 1.98$; 3T, $f_p = 1.94$.

Comments

E = Empirical, S = Semiempirical, T = Theoretical

[S] H_G based on NH_3 absorption data (5-28B) for which $H_{G, \text{base}} = 0.226 \text{ m}$ with $N_{Sc, \text{base}} = 0.660$ at $G_{x, \text{base}} = 6.782 \text{ kg}/(\text{sm}^2)$ and $G_{y, \text{base}} = 0.678 \text{ kg}/(\text{sm}^2)$ with 1½ in. ceramic Raschig rings. The exponent b on N_{Sc} is reported as either 0.5 or as 2/3.

$$f_p = \frac{H_G \text{ for } \text{NH}_3 \text{ with } 1\frac{1}{2} \text{ Raschig rings}}{H_G \text{ for } \text{NH}_3 \text{ with desired packing}}$$

H_L based on O_2 desorption data (5-24-A).

Base viscosity, $\mu_{\text{base}} = 0.0008937 \text{ kg}/(\text{ms})$.

H_L in m. $G_y < 0.949 \text{ kg}/(\text{sm}^2)$, $0.678 < G_x < 6.782 \text{ kg}/(\text{sm}^2)$.

Best use is for absorption and stripping. Limited use for organic distillation [156].

$$H_{OG} = H_G + \left(\frac{G_M m}{L_M} \right) H_L$$

$$\frac{G_M \cdot m}{L_M} = \frac{1}{2,886} \times 2,53 = 0,88$$

$$H_{OG} = 0,82 + 0,88 \times 0,23 = 1,02 \text{ m}$$

$$h = N_{OG} \cdot H_{OG} = 9,8 \times 1,02 \text{ m} = 10,0 \text{ m}$$

$$H_{OG} = H_G \frac{y_{B,LN}}{y_{B,LN}^*} + \left(\frac{G_M m}{L_M} \right) H_L \frac{x_{B,LN}}{y_{B,LN}^*}$$

$$H_{OG} = H_G + \left(\frac{G_M m}{L_M} \right) H_L$$

$$h = N_{OG} H_{OG}$$