PQI – 3303 – Fenômenos de Transporte III
Exercícios – Listas 7 – partes 1 e 2

José Luís de Paiva

Departamento de Engenharia Química da EPUSP

PQI – 3303 – Fenômenos dos Transportes III – 2018
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 $K_y a$ = 5.10^{-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 x 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 ºC , 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) Soluto 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 ½", é utilizado na recuperação de amônia de uma corrente de ar. A coluna, que opera a 25 ºC 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 presssão 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 kg $m^{-2}\ h^{-1}$. 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: $N_G = \int_{y_T}^{y_B} dy / \left(y - y^*\right)$ 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 cm^2/cm^3 e $K_G = 8{,}1 \times 10^{-4}$ cm/s. Pretende-se usar um fluxo de ar de $1{,}41 \times 10^{-5}$ mol/cm^2 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 : $k_x a = 530$ lbmol/h ft^3 , $k_y a = 18$ 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_{NH3} = 9,6 atm e H_{CH4} = 41000 atm. Calcule os coeficientes globais volumétricos para ambos os sistemas. *Respostas: 15,7 e 0,028 lbmol/h ft^3.*

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 atm, T = 80 ºF, constante de Henry = 2,53 atm , $D_{ACET/Agua} = 4{,}81.10^{-5}$ ft^2/h , $D_{ACET/AR} = 0{,}368$ ft^2/h , $\mu_L = 0{,}86$ cP, $\mu_G = 0{,}018$ cP, $\rho_L = 62{,}3$ lb/ft^3 e $\rho_G = 0{,}0737$ lb/ft^3. *Respostas: diâmetro = 1,63 ft , altura = 26,8 ft e perda de carga = 4" CA.*

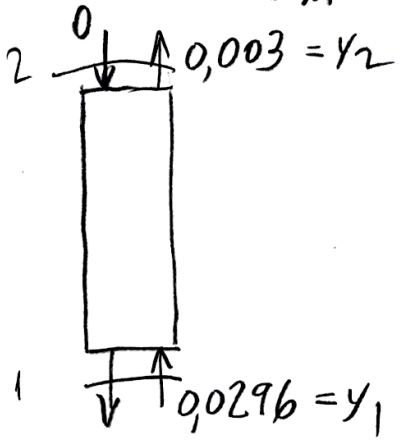
8) Em uma coluna de 2 ft de diâmetro e leito de 20 ft de altura, recheada com selas Berl de 1", escoa ar a 20 ºC e 1 atm em contracorrente com água a 20 ºC. Provavelmente a coluna esteja operando próximo do afogamento, com perda de carga de 24" CA. A vazão mássica de líquido é 8,5 vezes a de gás. Determine 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 dessorvida com ar em contracorrente a 1 atm e 30 ºC. 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 $(L/G)_{molar}$ = 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.*

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.*

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.*

$\bar{L} = 0{,}437 \frac{kmol}{s\,m^2}$; $\bar{G} = 9{,}22.10^{-3} \frac{kmol}{m^2.s}$



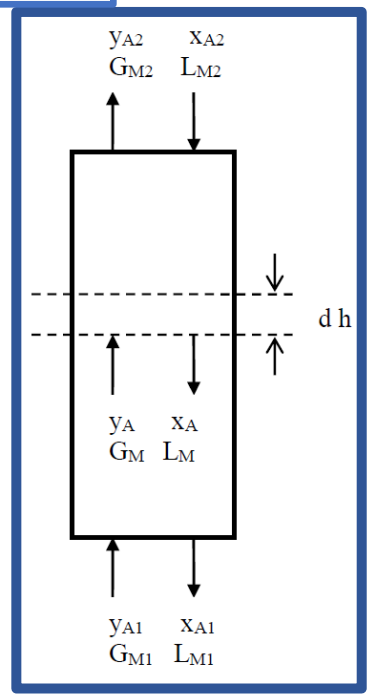
$$\bar{L}(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) = \bar{G}(\bar{y}_1 - \bar{y}_2) \Rightarrow \bar{x}_1 = \frac{\bar{G}}{\bar{L}}(\bar{y}_1 - \bar{y}_2) + \bar{x}_2$$

$$\bar{x}_1 = \frac{9{,}22.10^{-3}}{0{,}437}(0{,}0296 - 0{,}003) + 0 = 5{,}61.10^{-4}$$

$$\bar{y}_1^* = m.\bar{x}_1 = 1{,}661.10^{-2} \qquad y_2^* = m\bar{x}_2 = 0$$

(m = 29,6)

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



$$N_{OG} = \frac{0{,}0296 - 0{,}003}{\frac{(0{,}0296 - 0{,}01661) - (0{,}003 - 0)}{\ln\left(\frac{0{,}0296 - 0{,}01661}{0{,}003 - 0}\right)}} = \frac{0{,}0266}{0{,}00682} = 3{,}9$$

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.*

$$\frac{1}{K_y a} = \frac{1}{k_y a} + \frac{m}{k_x a} = \frac{1}{0{,}0496} + \frac{29{,}6}{0{,}943}$$

$$K_y a = 1{,}94 \cdot 10^{-2} \text{ kmol/s m}^2$$

$$H_{OG} = \frac{G}{K_y a} = \frac{9{,}22 \cdot 10^{-3}}{1{,}94 \cdot 10^{-2}} = 0{,}476 \text{ m}$$

$$h = N_{OG} \cdot H_{OG} = 1{,}85 \text{ m}$$

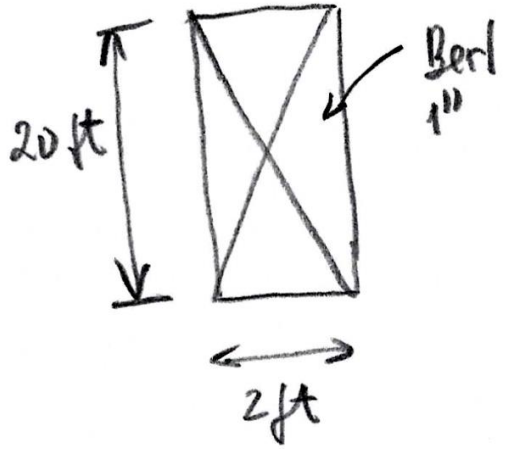
$$H_{OG} = H_G \frac{y_{B,LN}}{y^*_{B,LN}} + \left(\frac{G_M m}{L_M}\right) H_L \frac{x_{B,LN}}{y^*_{B,LN}}$$

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

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

8) Em uma coluna de 2 ft de diâmetro e leito de 20 ft de altura, recheada com selas Berl de 1", escoa 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.

8) Em uma coluna de 2 ft de diâmetro e leito de 20 ft de altura, recheada com selas Berl de 1", escoa 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.



$\Delta P = 24"$ CA

$L = 8,5\ G$

Substituir por Pall 1 1/2" P.P.

Apenas hidrodinâmica!

$\rho_G \cong 1,2\ kg/m^3$, $\rho_L \cong 1000\ kg/m^3$

$$\frac{L}{G}\sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}} = 8,5\sqrt{\frac{1,2}{1000}} = 0,294$$

$\Delta P = 24"/20\ ft = 1,2"/ft$

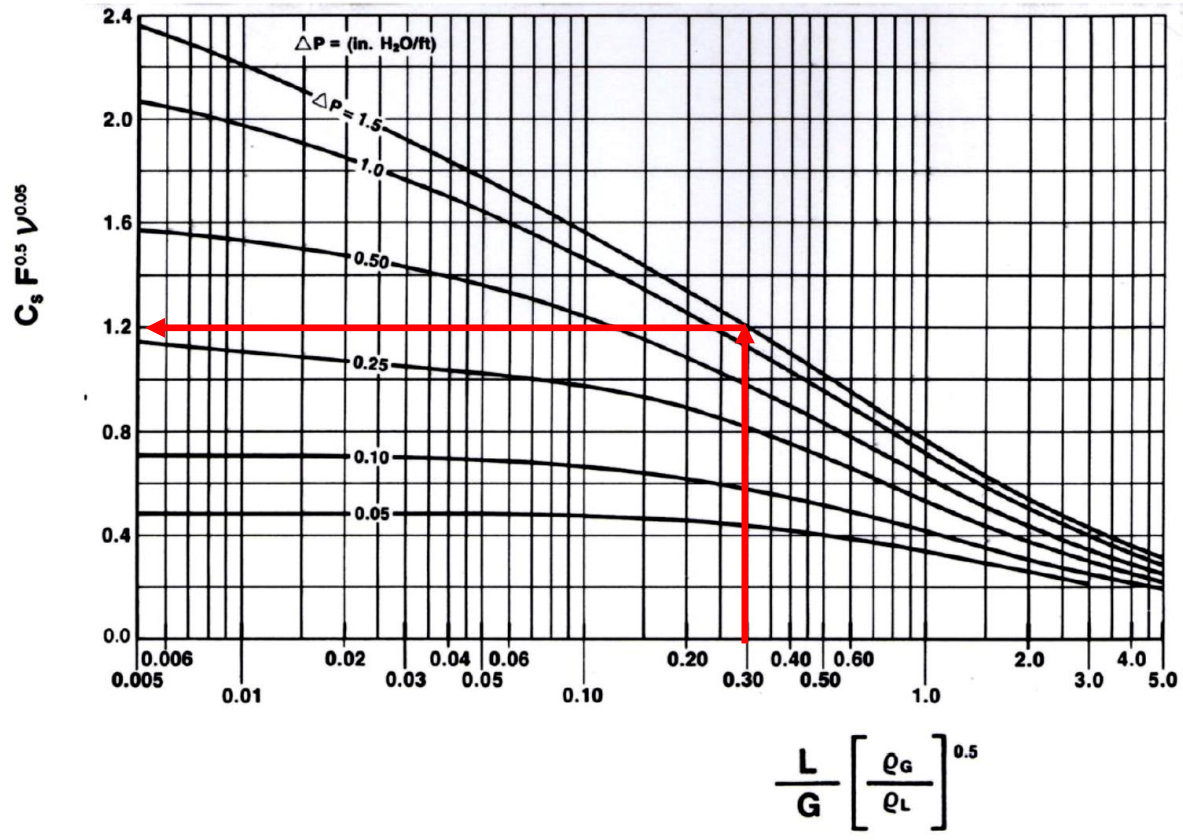


TABLE 14-13 Characteristics of Random Packings

Name	Size, mm, or no. (#)	Bed density,* kg/m³	Area, m²/m³	% voids	Packing factor, m⁻¹ Normal F_p†	Packing factor, m⁻¹ Dry F_{pd}‡	Vendor
			Metals				
Pall rings (also Flexi-rings, Ballast rings, P-rings)	16	510	360	92	256	262	Various
	25	325	205	94	183	174	
	38	208	130	95	131	91	
	50	198	105	96	89	79	
	90	135	66	97	59	46	
Metal Intalox (IMTP) [also I-rings, AHPP, RSMR, MSR]¶	25	224	207	97	134	141	Koch-Glitsch [Sulzer, Amistco, Rauschert, Montz]¶
	40	153	151	97	79	85	
	50	166	98	98	59	56	
	70	141	60	98	39	—	
Nutter rings	#0.7	177	226	98	—	128	Sulzer
	#1	179	168	98	98	89	
	#1.5	181	124	98	79	66	
	#2	144	96	98	59	56	
	#2.5	121	83	98	52	49	
	#3.0	133	66	98	43	36	
Raschig Super-ring	#0.5	275	250	98	—	—	Raschig
	#0.7	185	175	98	—	—	
	#1	220	160	98	82	—	
	#1.5	170	115	98	59	—	
	#2	155	98	99	49	—	
	#3	150	80	98	36	—	
Cascade mini-rings (CMR)	#1	389	250	96	131	102	Koch-Glitsch
	#1.5	285	190	96	95	—	
	#2	234	151	97	72	79	
	#2.5	195	121	97	62	—	
	#3	160	103	98	46	43	
	#4	125	71	98	33	32	
	#5	108	50	98	26¶	—	
Fleximax	#300	—	141	98	85	—	Koch-Glitsch
	#400	—	85	98	56	—	
Jaeger Tripacks (Top-Pak)	#1	223	118	96	85	—	Raschig
	#2	170	75	98	46	—	
VSP	25	352	206	98	105¶	—	Raschig
	50	296	112	96	69	—	
Ralu-rings	25	310	215	98	157¶	—	Raschig
	38	260	135	97	92¶	—	
	50	200	105	98	66¶	—	
Hiflow	25	298	203	96	—	—	Rauschert
	50	175	92	98	52	—	
Hy-Pak, K-Pak, AIPR	#1	262	174	97	148	—	Koch-Glitsch, Amistco
	#1.5	180	118	98	95	—	
	#2	161	92	98	85	—	
	#3	181	69	98	52	—	
Raschig rings (1/16 in wall)	19	1500	245	89	722	—	Various
	25	1140	187	86	472	492	
	50	590	95	92	187	223	
	75	400	66	95	105	—	
			Ceramics				
Berl saddles	6	900	900	60	—	2950	Various
	13	865	465	62	790	900	
	25	720	250	68	360	308	
	38	640	150	71	215	154	
	50	625	105	72	150	102	
Intalox, Flexi-saddles, Torus-saddles, Novalox	6	864	984	65	—	2720	Various
	13	736	623	71	660	613	
	25	672	256	73	302	308	
	50	608	118	76	131	121	
	75	576	92	79	72	66	
Raschig rings	6	960	710	62	—	5250	Various
	13	880	370	64	1900	1705	
	25	670	190	74	587	492	
	50	660	92	74	213	230	
	75	590	62	75	121	—	
Pall ring	25	620	220	75	350	—	Raschig
	38	540	164	78	180	—	
	50	550	121	78	142	—	
	80	520	82	78	85¶	—	

TABLE 14-13 Characteristics of Random Packings

Name	Size, mm, or no. (#)	Bed density,* kg/m³	Area, m²/m³	% voids	Packing factor, m⁻¹ Normal F_p†	Packing factor, m⁻¹ Dry F_{pd}‡
Berl saddles	6	900	900	60	—	2950
	13	865	465	62	790	900
	25	720	250	68	360	308
	38	640	150	71	215	154
	50	625	105	72	150	102
			Plastics			
Pall rings	15	95	350	87	320	348
	25	71	206	90	180	180
	40	70	131	91	131	131
	50	60	102	92	85	82
	90	43	85	95	56	39

8) Em uma coluna de 2 ft de diâmetro e leito de 20 ft de altura, recheada com selas Berl de 1", escoa 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.

$\Delta P = 24"/20\,ft = 1{,}2"/ft$

$C_S F^{0,5} \nu^{0,05} \simeq 1{,}2 \rightarrow F_p = 360\,m^{-1} \simeq 110\,ft^{-1}$

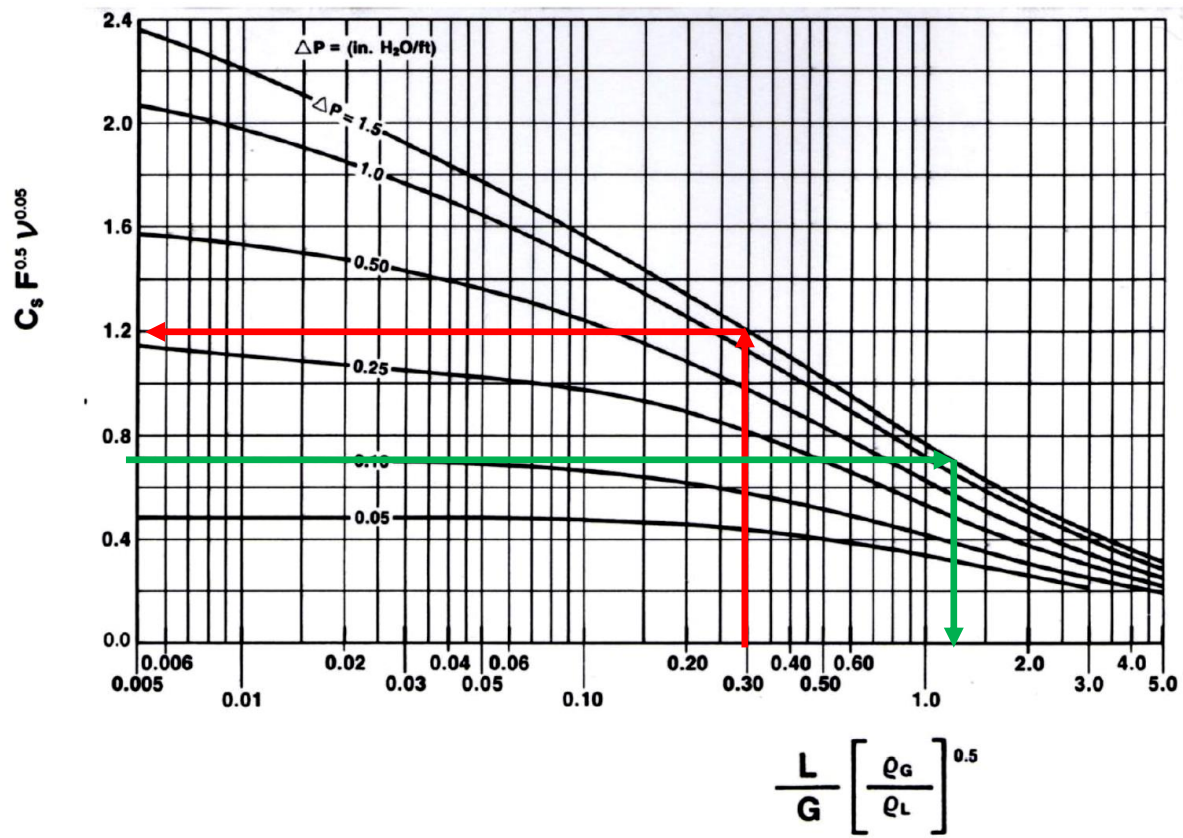
Pall 1½" p. $\rightarrow F_p = 190\,m^{-1}(2") \text{ e } 85\,m^{-1}(1")$

$F_p \simeq 132\,m^{-1} = 40\,ft^{-1}$

$\left(C_S F^{0,5} \nu^{0,05}\right)_{Pall} = 1{,}2 \times \left(\frac{40}{110}\right)^{0,5} = 0{,}72$

Mantendo-se $\Delta P = 1{,}2"/ft \rightarrow \frac{L'}{G}\sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}} \simeq 1{,}2$

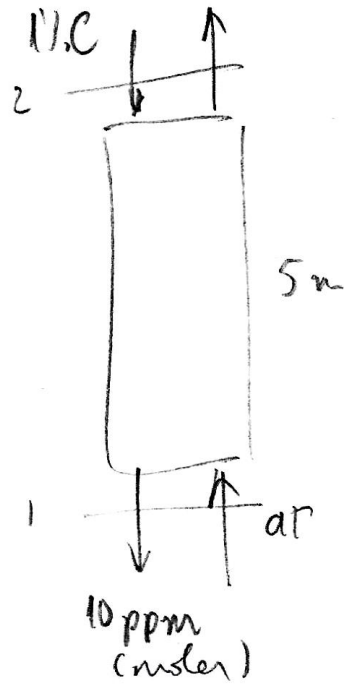
$L'/L = 1{,}2/0{,}294 \simeq 4$



9) Uma solução 1% (molar) de C é dessorvida 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 $(L/G)_{molar}$ = 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.*

9) Uma solução 1% (molar) de C é dessorvida 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 $(L/G)_{molar}$ = 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.*

(9)



Berl 1"

30 °C

1 atm

m = 2

$(L/G)_{molar}$ = 1,4

$h = NOL \cdot HOL$

$x_1 = 10^{-5}$

$x_2 = 10^{-2}$

$y_1 = 0$

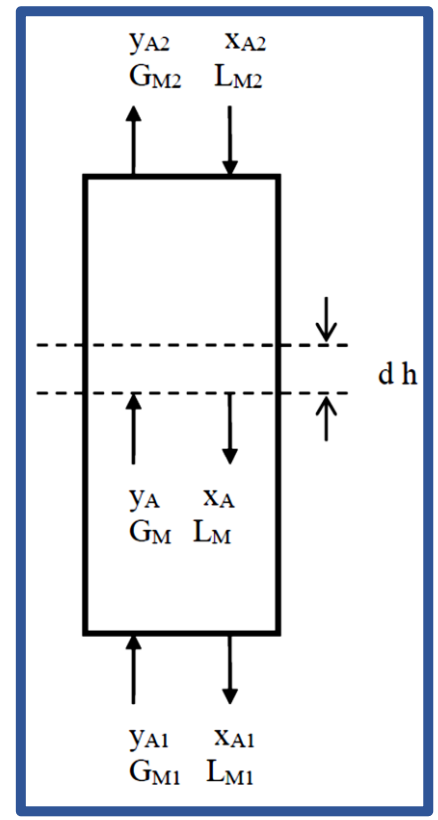
$y_2 - y_1 = \frac{L}{G}(x_2 - x_1)$

$y_2 - 0 = 1,4\,(10^{-2} - 10^{-5})$

$y_2 = 1,4 \cdot 10^{-2}$

$x_2^* = \frac{y_2}{m} = 7 \cdot 10^{-3}$ $\quad x_1^* = 0$

processo controlado pela fase líquida.



9) Uma solução 1% (molar) de C é dessorvida 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 $(L/G)_{molar}$ = 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.*

$$\lambda = \frac{L_M}{m G_M} = \frac{1,4}{2} = 0,7$$

$$N_{OL} = \frac{1}{1-\lambda} \ln\left[(1-\lambda)\left(\frac{x_{A2} - y_{A1}/m}{x_{01} - y_{A1}/m}\right) + \lambda\right] = \frac{1}{0,3} \ln\left[0,3\left(\frac{10^{-2} - 0}{10^{-5} - 0}\right) + 0,7\right]$$

$N_{OL} = 19,02 \Rightarrow H_{OL} = 5/19,2 = 0,263\ m = H_L$

$H_L = a_L \left(\frac{L}{\mu_L}\right)^n Sc^{0,5} \propto L^{0,28}$, L 50% maior $\quad H_L' = H_L (1,5)^{0,28}$

$H_L' = 0,295\ m = H_{OL}'$

$N_{OL}' = h / H_{OL}' = 5/0,295 = 16,97$

$\lambda' = 1,5 \times 0,7 = 1,05 \Rightarrow x_{A2}/x_{A1}' = 12,44 \Rightarrow x_{A1} = 8,04 \cdot 10^{-4} = \overline{804\ ppm}$