

PQI – 3303 – Fenômenos de Transporte III

Lista 9 – Ex. 1,3 e 4

José Luís de Paiva

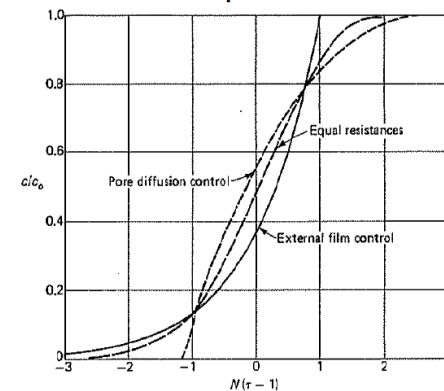
Departamento de Engenharia Química da EPUSP

- 1) (Exemplo 25.2 MSH – 5ª ed.) A adsorção de n-butanol de ar foi estudada em um pequeno leito fixo (10,16 cm de diâmetro) com 300 e 600 g de carbono, correspondendo a leitos de 8 e 16 cm de profundidade. a) A partir dos dados de concentração do efluente, estime a capacidade de saturação do leito e a fração de leito usada para $C/C_0 = 0,05$. b) Estime o tempo de “break-point”, para um leito de 32 cm de profundidade. Dados do n-butanol para o Carbono Columbia JXC 4/6: $u_0 = 58$ cm/s, $C_0 = 365$ ppm, $T = 25^\circ\text{C}$, $P = 737$ mm Hg, $D_p = 0,37$ cm, $S = 1194$ m²/g, $\rho_b = 0,461$ g/cm³, $\varepsilon = 0,457$.

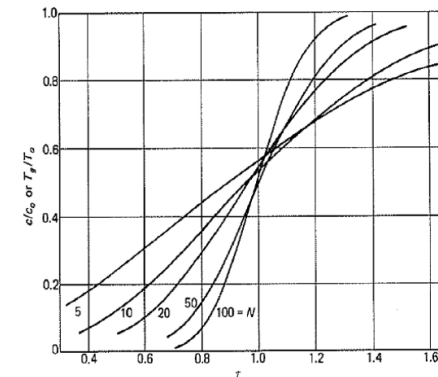
300 g	t (h)	1,0	1,5	2,0	2,4	2,8	3,3	4,0	5,0
	C/C ₀	0,005	0,01	0,027	0,050	0,10	0,20	0,29	0,56
600 g	t (h)	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5
	C/C ₀	0,0019	0,003	0,0079	0,018	0,039	0,077	0,15	0,24

- 2) (25.1 MSH– 5ª ed - adaptado) Considere a adsorção em leito de carvão ativo (6 a 10 mesh, 1,651 a 3,327 mm) de metil etil cetona (MEC) diluída em ar a 25 °C e 1 atm. A vazão de ar é de 11 000 ft³/min, com 0,43 lb MEC/ 1000 ft³ de ar. A velocidade superficial é de 0,5 ft/s. Estime as dimensões do leito para um ciclo de operação de 8 horas. Considere isoterma de adsorção linear. Dados: densidade do leito = 30 lb/ft³, $\varepsilon = 0,4$, $D_{\text{MEC/ar}} = 0,087$ cm²/s, $\nu = 0,147$ cm²/s, saturação de 0,20 g/g de carvão (25 °C) e 0,16 g/g de carvão (40 °C). *Resposta: 22 ft e 2 ft.*
- 3) (12.2.1 – Cussler – 2ª ed – adaptado) Uma solução colorida deve ser clarificada pela adsorção de 99 % do corante em carvão ativo. A massa de solução é 1000 kg e a fração mássica inicial de corante na solução é 0,0096. Sabe-se que a relação de equilíbrio é expressa por: $q = 2,75 \cdot y^{0,60}$, sendo q expresso em kg de corante/kg de sólido e y expresso em kg de corante/100kg de solvente. Determine a quantidade de carvão necessária para a operação de remoção em duas situações: a) operação batelada, b) operação em leito fixo considerando-se curva de ruptura (avanço) na forma de degrau. *Respostas: 56 kg e 3,5 kg.*
- 4) (25.2 MSH- 5ª ed - adaptado) Emprega-se um leito de carvão (10 a 20 mesh, 0,833 a 1,651 mm) para adsorção de fenol presente em água a 20 °C. A velocidade superficial é de 0,5 cm/s. Estime o número de unidades de transferência para um leito de 12 ft de profundidade. Considere adsorção irreversível e difusividade efetiva na partícula igual a 0,2 vezes a difusividade no líquido. Dados: esfericidade das partículas = 0,85, $\varepsilon = 0,4$, $D_{\text{fenol/água}} = 8,52 \cdot 10^{-6}$ cm²/s, $\mu = 1$ cP. *Resposta: 3,5*

Anexo: Curvas de Ruptura



Isoterma de adsorção irreversível



Isoterma de adsorção linear

- 1) (Exemplo 25.2 MSH – 5ª ed.) A adsorção de n-butanol de ar foi estudada em um pequeno leito fixo (10,16 cm de diâmetro) com 300 e 600 g de carbono, correspondendo a leitos de 8 e 16 cm de profundidade. a) A partir dos dados de concentração do efluente, estime a capacidade de saturação do leito e a fração de leito usada para $C/C_0 = 0,05$. b) Estime o tempo de “break-point”, para um leito de 32 cm de profundidade. Dados do n-butanol para o Carbono Columbia JXC 4/6: $u_0 = 58$ cm/s, $C_0 = 365$ ppm, $T = 25^\circ\text{C}$, $P = 737$ mm Hg, $D_p = 0,37$ cm, $S = 1194$ m²/g, $\rho_b = 0,461$ g/cm³, $\varepsilon = 0,457$.

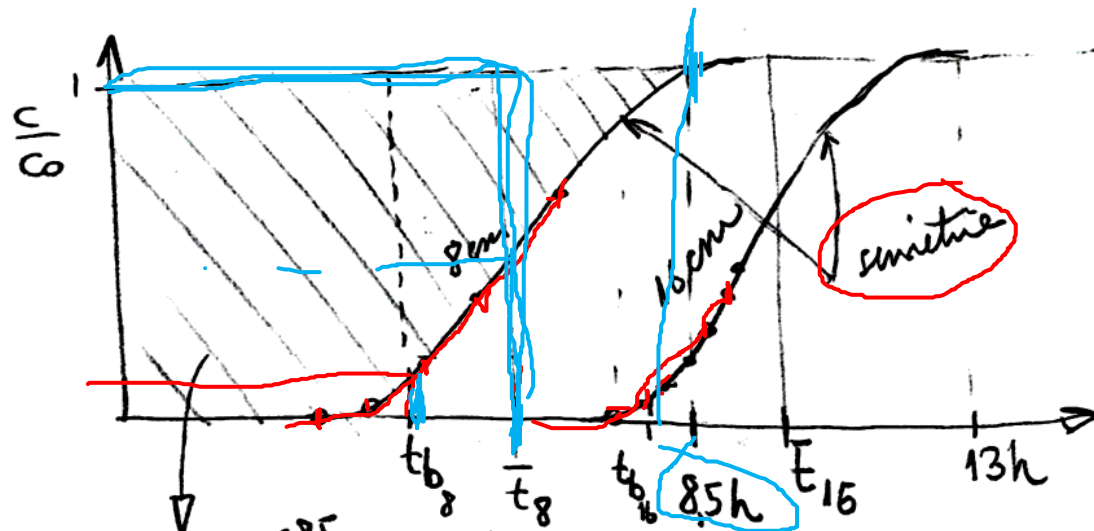
300 g	t (h)	1,0	1,5	2,0	2,4	2,8	3,3	4,0	5,0
	C/C₀	0,005	0,01	0,027	0,050	0,10	0,20	0,29	0,56
600 g	t (h)	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5
	C/C₀	0,0019	0,003	0,0079	0,018	0,039	0,077	0,15	0,24

Exemplo 15.2 - MSH - 5ed.

(a) $\rho = \frac{P}{RT} = 0,04 \frac{\text{mol}}{\text{L}} = 4 \times 10^{-5} \frac{\text{mol}}{\text{cm}^3}$

ppm
mol/mol

$$F_A = u_0 C_0 M = 58 \frac{\text{cm}}{\text{s}} \times 4 \times 10^{-5} \times 365 \times 10^{-6} \frac{\text{mol}}{\text{cm}^3} \times 74,12 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 6,27 \times 10^{-5} \frac{\text{g}}{\text{cm}^2 \text{s}}$$



$$\int_0^t c \cdot u_0 A dt$$

$$\int_0^t C_0 u_0 A dt$$

$t = t_b$

$t = T$

$t = 8,5$

$$\bar{t}_8 = \frac{\int_0^{8,5} (1 - \frac{c}{C_0}) dt}{1 - 0} = 4,79 \text{ h}$$

$$u = \frac{L}{\bar{t}_8} = \frac{8}{4,79} = 1,67 \frac{\text{cm}}{\text{h}}$$

$$\left. \begin{aligned} m_{\text{Adsorvida}} &= A F_A \bar{t}_8 \\ m_{\text{carvão}} &= \rho_{\text{leito}} \times A \times L \end{aligned} \right\} W_{\text{SAT}} = \frac{F_A \bar{t}_8}{\rho_{\text{leito}} L} = \frac{6,27 \times 10^{-5} \times 3600 \times 4,79}{8 \times 0,461} = 0,29 \frac{\text{g soluto}}{\text{g C}}$$

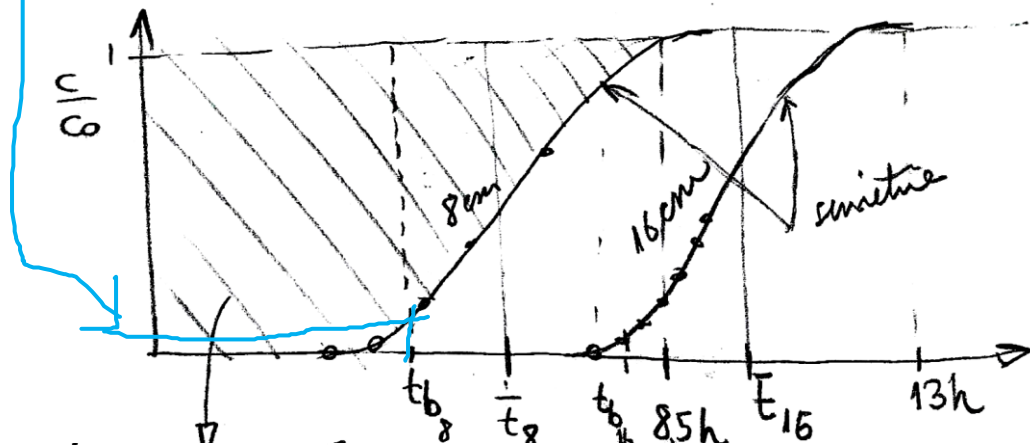
Adsorvido até "break-point", $t_b = 2,4 \text{ h}$, onde $c/c_0 = 0,05$

$$\bar{t}_{b_8} = \frac{\int_0^{2,4} (1 - c/c_0) dt}{1 - 0} = 2,37 \text{ h}$$

$$W_b = \frac{F_A \bar{t}_{b_8}}{\text{leito L}} = \frac{6,24 \times 10^5 \times 3600 \times 2,37}{8 \times 0,461} = 0,149 \frac{\text{g soluto}}{\text{g C}}$$

$$\frac{W_b}{W_{SAT}} = \frac{0,149}{0,29} = 0,495 \Rightarrow \underline{50\% \text{ do leito não empregado}}$$

$[L_{UB} = 4 \text{ cm}]$ de leito não empregado



leito de 16cm $\rightarrow$ curva c mesmo perfil

$$\bar{t}_{16} = \int_0^{13} \left(1 - \frac{c}{c_0}\right) dt = 9,59 \text{ h}$$

$$u = \frac{L}{\bar{t}_{16}} = \frac{16}{9,59} = 1,67 \frac{\text{cm}}{\text{h}}$$

$$W_{\text{TOT}} = \frac{F_A \bar{t}_{16}}{L \times \rho_{\text{leito}}} = \frac{6,27 \times 10^{-5} \times 3600 \times 9,59}{16 \times 0,461} = 0,29 \frac{\text{g soluto}}{\text{g C}}$$

conferir com o leito de 8 cm.

Até o "break-point", $t_{b,16} = 7,1 \text{ h}$, onde $c/c_0 = 0,05$.

$$\bar{t}_{b,16} = \int_0^{7,1} \left(1 - \frac{c}{c_0}\right) dt = 7,07 \text{ h}$$

$$W_b = \frac{F_A t_{b,16}}{L \times \rho_{\text{leito}}} = 0,215 \frac{\text{g soluto}}{\text{g C}}$$

$$\frac{W_b}{W_{\text{TOT}}} = \frac{0,215}{0,291} = 0,739 \Rightarrow \underline{26\% \text{ do leito não empregado}}$$

$$\boxed{L_{\text{UB}} = 16 \times 0,26 = 4,2 \text{ cm}} \quad \text{OK}$$

⑥ leito de 32 cm

$$L_{VB} = \frac{4,2 + 4,0}{2} = \underline{4,1 \text{ cm}}$$

$$L_S = L - L_{VB} = 32 - 4,1 = 27,9 \text{ cm}$$

$$\frac{w_b}{w_{\text{sat}}} = \frac{27,9}{32} = 0,872 \quad \underline{\underline{13\% \text{ de leito no emprego}}}$$

$$w_b = 0,872 \times 0,29 = 0,253 \frac{\text{g soluto}}{\text{g C}}$$

$$\text{Para } u' = 1,67 \frac{\text{cm}}{\text{h}} \Rightarrow t^* = \frac{L}{u'} = \frac{32}{1,67} = 19,2 \text{ h}$$

$$t_b = t^* \left(1 - \frac{L_{VB}}{L}\right) = 19,2 \left(1 - \frac{4,1}{32}\right) = 16,7 \text{ h}$$

$$\text{ou } w_b = \frac{F_A t_b}{L \times \rho_{\text{leito}}} = 0,253 \Rightarrow t_b = 16,7 \text{ h}$$

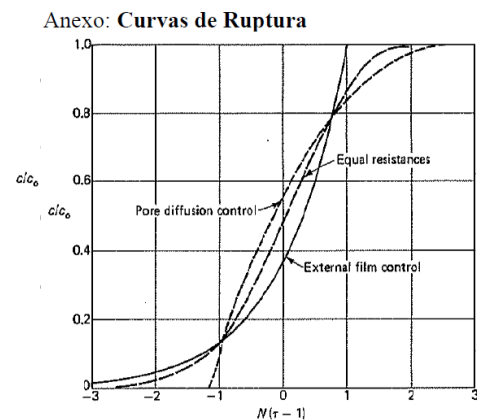
L	8	16	32
t_b	2,4	7,1	16,7
w_b/w_{sat}	0,5	0,74	0,87

- 1) (Exemplo 25.2 MSH – 5ª ed.) A adsorção de n-butanol de ar foi estudada em um pequeno leito fixo (10,16 cm de diâmetro) com 300 e 600 g de carbono, correspondendo a leitos de 8 e 16 cm de profundidade. a) A partir dos dados de concentração do efluente, estime a capacidade de saturação do leito e a fração de leito usada para $C/C_0 = 0,05$. b) Estime o tempo de “break-point”, para um leito de 32 cm de profundidade. Dados do n-butanol para o Carvão Columbia JXC 4/6: $u_0 = 58$ cm/s, $C_0 = 365$ ppm, $T = 25^\circ\text{C}$, $P = 737$ mm Hg, $D_p = 0,37$ cm, $S = 1194$ m²/g, $\rho_b = 0,461$ g/cm³, $\varepsilon = 0,457$.

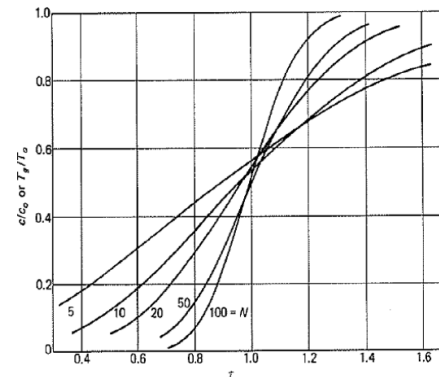
300 g	t (h)	1,0	1,5	2,0	2,4	2,8	3,3	4,0	5,0
	C/C ₀	0,005	0,01	0,027	0,050	0,10	0,20	0,29	0,56
600 g	t (h)	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5
	C/C ₀	0,0019	0,003	0,0079	0,018	0,039	0,077	0,15	0,24

- 2) (25.1 MSH– 5ª ed - adaptado) Considere a adsorção em leito de carvão ativo (6 a 10 mesh, 1,651 a 3,327 mm) de metil etil cetona (MEC) diluída em ar a 25 °C e 1 atm. A vazão de ar é de 11 000 ft³/min, com 0,43 lb MEC/ 1000 ft³ de ar. A velocidade superficial é de 0,5 ft/s. Estime as dimensões do leito para um ciclo de operação de 8 horas. Considere isoterma de adsorção linear. Dados: densidade do leito = 30 lb/ft³, $\varepsilon = 0,4$, $D_{\text{MEC/ar}} = 0,087$ cm²/s, $\nu = 0,147$ cm²/s, saturação de 0,20 g/g de carvão (25 °C) e 0,16 g/g de carvão (40 °C). *Resposta: 22 ft e 2 ft.*
- 3) (12.2.1 – Cussler – 2ª ed – adaptado) Uma solução colorida deve ser clarificada pela adsorção de 99 % do corante em carvão ativo. A massa de solução é 1000 kg e a fração mássica inicial de corante na solução é 0,0096. Sabe-se que a relação de equilíbrio é expressa por: $q = 2,75 \cdot y^{0,60}$, sendo q expresso em kg de corante/kg de sólido e y expresso em kg de corante/100kg de solvente. Determine a quantidade de carvão necessária para a operação de remoção em duas situações: a) operação batelada, b) operação em leito fixo considerando-se curva de ruptura (avanço) na forma de degrau. *Respostas: 56 kg e 3,5 kg.*
- 4) (25.2 MSH- 5ª ed - adaptado) Emprega-se um leito de carvão (10 a 20 mesh, 0,833 a 1,651 mm) para adsorção de fenol presente em água a 20 °C. A velocidade superficial é de 0,5 cm/s. Estime o número de unidades de transferência para um leito de 12 ft de profundidade. Considere adsorção irreversível e difusividade efetiva na partícula igual a 0,2 vezes a difusividade no líquido. Dados: esfericidade das partículas = 0,85, $\varepsilon = 0,4$, $D_{\text{fenol/água}} = 8,52 \cdot 10^{-6}$ cm²/s, $\mu = 1$ cP. *Resposta: 3,5*

Anexo: Curvas de Ruptura



Isoterma de adsorção irreversível



Isoterma de adsorção linear

- 2) (25.1 MSH- 5ª ed - adaptado) Considere a adsorção em leito de carvão ativo (6 a 10 mesh, 1,651 a 3,327 mm) de metil etil cetona (MEC) diluída em ar a 25 °C e 1 atm. A vazão de ar é de 11 000 ft³/min, com 0,43 lb MEC/ 1000 ft³ de ar. A velocidade superficial é de 0,5 ft/s. Estime as dimensões do leito para um ciclo de operação de 8 horas. Considere isoterma de adsorção linear. Dados: densidade do leito = 30 lb/ft³, $\epsilon = 0,4$, $D_{\text{MEC/ar}} = 0,087 \text{ cm}^2/\text{s}$, $\nu = 0,147 \text{ cm}^2/\text{s}$, saturação de 0,20 g/g de carvão (25 °C) e 0,16 g/g de carvão (40 °C). Resposta: 22 ft e 2 ft.

$$\textcircled{2} \quad 11000 \text{ ft}^3/\text{min}, \quad \frac{0,43 \text{ lb MEC}}{1000 \text{ ft}^3 \text{ ar}}, \quad 25^\circ\text{C} \text{ e } 1 \text{ atm}$$

$$u_0 = 0,5 \text{ ft/s}$$

$$\text{Ciclo de 8 horas.} \quad \rho_{\text{leito}} = \frac{30 \text{ lb}}{\text{ft}^3}, \quad \epsilon = 0,4, \quad D_{\text{MEC/ar}} = 0,087 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$\nu = 0,147 \text{ cm}^2/\text{s}, \quad W_{\text{sat}} = \frac{0,2 \text{ g}}{\text{g carvão}}$$

$$A = \frac{11000}{60 \times 0,5} = 366,7 \text{ ft}^2$$

$$\pi D^2/4 = 366,7 \Rightarrow \boxed{D = 21,6 \text{ ft}}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ lb} &= 0,4536 \text{ kg} \\ 1 \text{ kg} &= 2,205 \text{ lb} \end{aligned}$$

- 2) (25.1 MSH- 5ª ed - adaptado) Considere a adsorção em leito de carvão ativo (6 a 10 mesh, 1,651 a 3,327 mm) de metil etil cetona (MEC) diluída em ar a 25 °C e 1 atm. A vazão de ar é de 11 000 ft³/min, com 0,43 lb MEC/ 1000 ft³ de ar. A velocidade superficial é de 0,5 ft/s. Estime as dimensões do leito para um ciclo de operação de 8 horas. Considere isoterma de adsorção linear. Dados: densidade do leito = 30 lb/ft³, $\epsilon = 0,4$, $D_{\text{MEC/ar}} = 0,087 \text{ cm}^2/\text{s}$, $\nu = 0,147 \text{ cm}^2/\text{s}$, saturação de 0,20 g/g de carvão (25 °C) e 0,16 g/g de carvão (40 °C). Resposta: 22 ft e 2 ft.

$$\text{Em 8 horas: } 11000 \times \frac{0,43}{1000} \times 60 \times 8 = 2,27 \times 10^3 \text{ lb MEC}$$

$$\frac{2,27 \times 10^3}{0,2} = 11,35 \times 10^3 \text{ lb de C} = 30 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \cdot V_{\text{leito}}$$

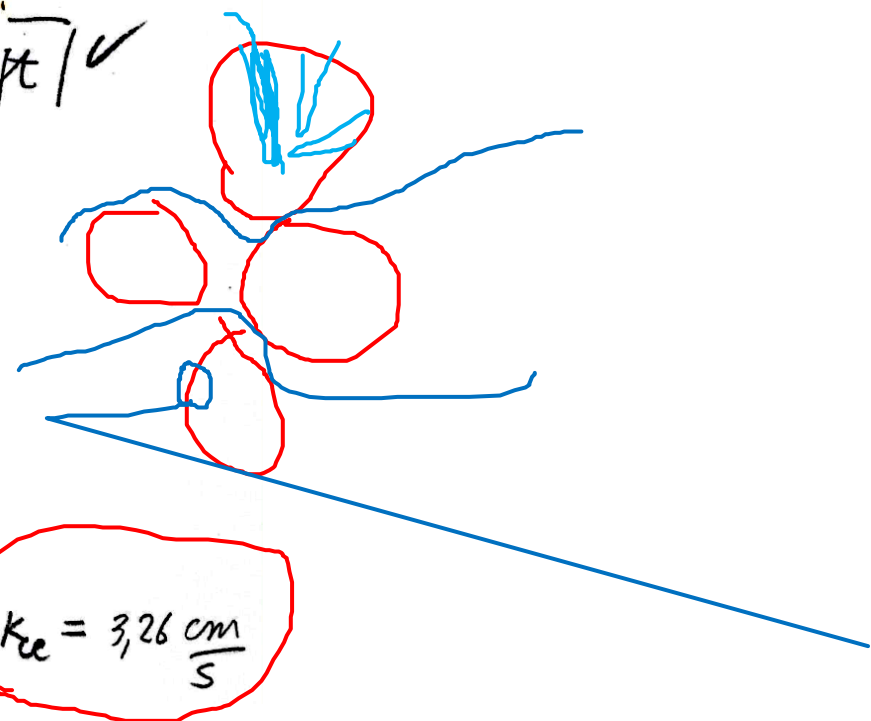
$$V_{\text{leito}} = 378 \text{ ft}^3 \Rightarrow L_{\text{min}} = 378 / 366,7 = 1,03 \text{ ft} \checkmark$$

$$\bar{D}_p = \frac{3,327 + 1,651}{2} = 2,49 \text{ mm}$$

$$Re = \frac{u_0 \bar{D}_p}{\nu} = \frac{0,5 \times 30,48 \times 0,249}{0,147} = 25,81$$

$$Sc = \frac{\nu}{D_{\text{MEC}}} = \frac{0,147}{0,087} = 1,69$$

$$Sh = 1,17 \times (25,81)^{0,585} (1,69)^{1/3} = 9,33 = \frac{k_{ce} \cdot 0,249}{0,087} \Rightarrow k_{ce} = 3,26 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$



- 2) (25.1 MSH- 5ª ed - adaptado) Considere a adsorção em leito de carvão ativo (6 a 10 mesh, 1,651 a 3,327 mm) de metil etil cetona (MEC) diluída em ar a 25 °C e 1 atm. A vazão de ar é de 11 000 ft³/min, com 0,43 lb MEC/ 1000 ft³ de ar. A velocidade superficial é de 0,5 ft/s. Estime as dimensões do leito para um ciclo de operação de 8 horas. Considere isoterma de adsorção linear. Dados: densidade do leito = 30 lb/ft³, $\epsilon = 0,4$, $D_{\text{MEC/ar}} = 0,087 \text{ cm}^2/\text{s}$, $\nu = 0,147 \text{ cm}^2/\text{s}$, saturação de 0,20 g/g de carvão (25 °C) e 0,16 g/g de carvão (40 °C). Resposta: 22 ft e 2 ft.

$$Sh = 1,17 \times (25,81)^{0,585} (1,69)^{1/3} = 9,33 = \frac{k_{ce} \cdot 0,249}{0,087} \Rightarrow k_{ce} = 3,26 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

$$K_{c,i} = \frac{D_{ef}}{\bar{D}_p/10} = \frac{0,087/10}{0,249/10} = 0,349 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

$$K_c = 1/(1/K_{c,i} + 1/K_{c,e}) = 0,315 \text{ cm/s}$$

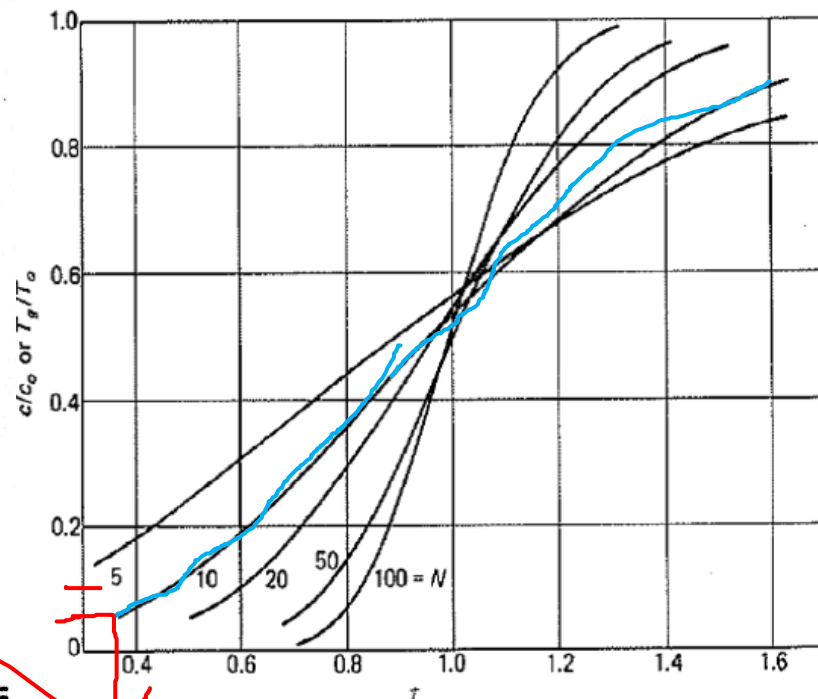
$$a = \frac{6}{\bar{D}_p} (1-\epsilon) = \frac{6 \times 0,6}{0,249} = 14,46 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$$

$$K_c a = 0,315 \times 14,46 = 4,56 \text{ s}^{-1}$$

Para $L = 1,1 \text{ ft} \Rightarrow N = \frac{K_c a L}{u_0} = 10 \Rightarrow Z \approx 0,3$

$$t_b = 0,3 t^* = 8 \text{ h} \Rightarrow t^* = 26,6 \text{ h} = \frac{w_{\text{sat}} \cdot \rho_{\text{leito}} \cdot L}{u_0 c_0} \Rightarrow L = 3,67 \text{ ft}$$

Para $L = 2,2 \text{ ft} \Rightarrow N = 20 \Rightarrow Z \approx 0,5 \Rightarrow t_b = 8 \text{ h} \Rightarrow t^* = 16 \text{ h} \Rightarrow L =$
 res. bleve $\Rightarrow \sqrt{1 = 3 \text{ ft}}$



Isoterma de adsorção linear

- 4) (25.2 MSH- 5ª ed - adaptado) Emprega-se um leito de carvão (10 a 20 mesh, 0,833 a 1,651 mm) para adsorção de fenol presente em água a 20 °C. A velocidade superficial é de 0,5 cm/s. Estime o número de unidades de transferência para um leito de 12 ft de profundidade. Considere adsorção irreversível e difusividade efetiva na partícula igual a 0,2 vezes a difusividade no líquido. Dados: esfericidade das partículas = 0,85 , $\epsilon = 0,4$, $D_{\text{fenol/água}} = 8,52 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$, $\mu = 1 \text{ cP}$. Resposta: 3,5

④ 25.2 - MSH adaptado

$$D_p = \frac{0,833 + 1,651}{2} = 1,242 \text{ mm} ; \phi_s = 0,85$$

$$a = \frac{6}{D_p} \frac{(1-\epsilon)}{\phi_s} = \frac{6}{0,1242} \frac{(1-0,4)}{0,85} = 34 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$$

$$Re = \frac{\rho V D_p}{\mu} = \frac{1,0 \times 0,5 \times 0,1242}{0,01} = 6,21$$

$$Sh = 1,17 \cdot Re^{0,585} Sc^{1/3} = 1,17 \cdot 6,21^{0,585} \cdot 1174^{1/3} = 35,9$$

$$Sc = \frac{\mu}{D_{mo}} = \frac{0,01/1}{8,52 \cdot 10^{-6}} = 1174$$

- 4) (25.2 MSH- 5ª ed - adaptado) Emprega-se um leito de carvão (10 a 20 mesh, 0,833 a 1,651 mm) para adsorção de fenol presente em água a 20 °C. A velocidade superficial é de 0,5 cm/s. Estime o número de unidades de transferência para um leito de 12 ft de profundidade. Considere adsorção irreversível e difusividade efetiva na partícula igual a 0,2 vezes a difusividade no líquido. Dados: esfericidade das partículas = 0,85 , $\varepsilon = 0,4$, $D_{\text{fenol/água}} = 8,52 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$, $\mu = 1 \text{ cP}$. Resposta: 3,5

$$k_{ce} = \frac{D_{AB} Sh}{D_p} = \frac{8,52 \cdot 10^{-6} \cdot 35,9}{0,1242} = 2,46 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$$

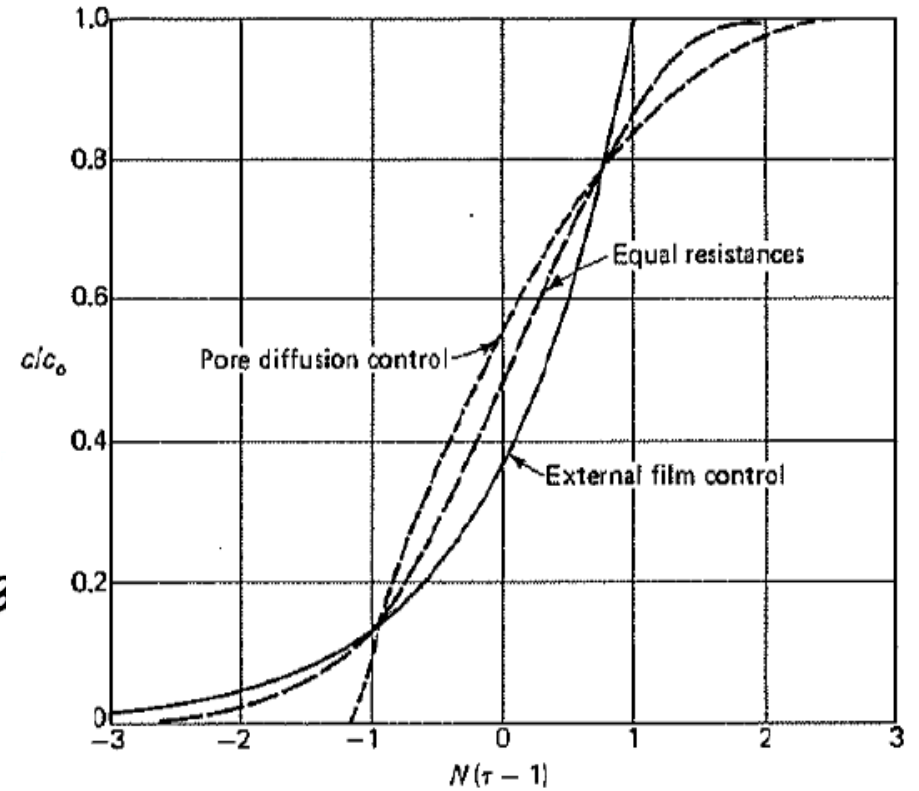
$$D_{eff} = D_{AB} \times 0,2 = 1,7 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$k_{ci} = \frac{10 \cdot D_{eff}}{D_p} = \frac{10 \times 1,7 \cdot 10^{-6}}{0,1242} = 1,37 \cdot 10^{-4} \text{ cm/s}$$

$$\frac{1}{K_c} = \frac{1}{k_{ce}} + \frac{1}{k_{ci}} = \frac{1}{2,46 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{1,37 \cdot 10^{-4}} = 7705 \rightarrow K_c = 1,3$$

$$N = \frac{K_c a L}{u} = \frac{1,3 \cdot 10^{-4} \times 34 \times 12 \times 30,48}{0,5} = 3,23$$

Anexo: Curvas de Ruptura



Isoterma de adsorção irreversível