



Curso de Engenharia Química
Operações Unitárias II – 2017/2

Prof. Rodolfo Rodrigues

Lista 11: Adsorção

Exercício 1*

(Dutta, 2007, Exemplo 12.1)

Um estudo apresenta os dados da **Tab. 1** para a adsorção de propano em carvão ativado a diferentes temperaturas e pressões.

Tabela 1: Dados de equilíbrio para propano em carvão ativado.

$T = 311 \text{ K}$		$T = 338,7 \text{ K}$	
$p \text{ (kPa)}$	$q \text{ (mmol/g)}$	$p \text{ (kPa)}$	$q \text{ (mmol/g)}$
2,266	1,044	6,0	1,069
15,6	2,819	27,2	2,469
31,74	3,48	53,2	3,078
59,6	3,968	92,67	3,512
89,74	4,207	99,97	3,635
99,97	4,342	244,8	4,188
293	4,94	424	4,475

$T = 394 \text{ K}$		$T = 422 \text{ K}$	
$p \text{ (kPa)}$	$q \text{ (mmol/g)}$	$p \text{ (kPa)}$	$q \text{ (mmol/g)}$
7,067	0,7099	13,07	0,6798
38,67	1,677	41,73	1,264
83,21	2,238	71,07	1,611
98,54	2,37	96,27	1,831
99,97	2,4	99,97	1,894
303,4	3,251	313,7	2,785
482,6	3,599	493	3,144

- Grafique as isotermas de adsorção (q versus p) para as quatro temperaturas e as isósteras de adsorção ($\ln p$ versus $1/T$) a cargas de soluto constantes de $q = 2, 2,5, 3$ e $3,5$ mmol/g de carvão ativado.
- Verifique a aplicabilidade das isotermas de Langmuir e Freundlich para os dados fornecidos no problema.
- Determine o calor isostérico de adsorção.

Respostas: (b) Isoterma de Langmuir. (c) $\Delta H = -7300 \text{ cal/gmol}$.

Exercício 2*

(Geankoplis, 2003, Exemplos 12.1-1 e 12.2-1, Problema 12.2-1)

Alguns testes em batelada foram realizados em um laboratório utilizando soluções de fenol em água e partículas de carvão ativado granular. Os dados de equilíbrio a temperatura ambiente são mostrados na **Tab. 2**.

Tabela 2: Dados de equilíbrio para fenol em carvão ativado.

$c, \text{ kg fenol/m}^3 \text{ solução}$	$q, \text{ kg fenol/kg carvão}$
0,322	0,150
0,117	0,122
0,039	0,094
0,0061	0,059
0,0011	0,045

Considere que os dados são melhores descritos por uma isoterma de Freundlich dada pela expressão:

$$q = K \cdot c^n$$

onde K e n são parâmetros ajustados pelos dados.

Usando a expressão de Freundlich anterior, determine para cada caso abaixo os valores finais de equilíbrio e o percentual de fenol extraído:

- Uma solução de efluente de tratamento de água com volume de 1 m^3 contém $0,21 \text{ kg de fenol/m}^3$ de solução. Um total de $1,4 \text{ kg de carvão ativado granular fresco}$ é adicionado na solução e então misturado até atingir o equilíbrio.
- Uma solução de efluente de tratamento de água com volume de $2,5 \text{ m}^3$ contém $0,25 \text{ kg de fenol/m}^3$ de solução. Um total de $3,0 \text{ kg de carvão ativado granular fresco}$ é adicionado na solução e então misturado até atingir o equilíbrio.

Respostas: (a) $q = 0,106 \text{ kg/kg}$, $c = 0,062 \text{ kg/m}^3$, 70,5% de fenol extraído.

Exercício 3

(Dutta, 2007, Problema 12.3)

Dados de equilíbrio para a adsorção de vapor de benzeno em sílica-gel a diferentes temperaturas são dados na **Tab. 3**:

Tabela 3: Dados de equilíbrio para benzeno em sílica-gel.

$p \times 10^3$, atm	$q \times 10^2$, mmol/g			
	70°C	90°C	110°C	130°C
0,5	14,0	6,7	2,6	1,13
1,0	22,0	11,2	4,5	2,0
2,0	34,0	18,0	7,8	3,9
5,0	68,0	33,0	17,0	8,6
10,0	88,0	51,0	27,0	16,0
20,0	—	78,0	42,0	26,0

- Ajuste os dados a isotermas de Langmuir e Freundlich e obtenha as equações das isotermas para 70 °C e 110 °C. Qual é a isoterma com o melhor ajuste?
- Grafique as isósteras de adsorção e calcule o calor de adsorção (prepare gráficos de $\ln p$ vs $1/T$ para $q = 0,15$ e $0,25$ mmol/g).

Respostas: (b) $\Delta H = -12,13$ kcal/gmol para $q = 0,15$ e $\Delta H = -11,3$ kcal/gmol para $q = 0,25$.

Exercício 4

(Henley, Seader e Roper, 2011, Exemplos 15.4)

Dados para a adsorção de metano puro em um carvão ativado à 296 K são dados na **Tab 4**.

Tabela 4: Dados de equilíbrio para metano em carvão ativado.

q , cm ³ CH ₄ /g carvão	$P = p$, psia
45,5	40
91,5	165
113	350
121	545
125	760
126	910
126	970

Ajuste os dados com (a) uma isoterma de Freundlich e (b) uma isoterma de Langmuir. Qual isoterma resulta no melhor ajuste? Os dados poderiam ter um ajuste razoável utilizando uma isoterma linear?

Respostas: Isoterma de Freundlich: $q = 16,34p^{0,3101}$. Isoterma de Langmuir: $q = 1,76p/(1 + 0,01285p)$. Melhor ajuste é o da isoterma de Langmuir. Ajuste ruim com uma isoterma linear.

Exercício 5

(Dutta, 2007, Exemplo 12.4)

Cloreto de vinila é um composto químico utilizado para a produção de policloreto de vinila (PVC). Uma vez que cloreto de vinila é um composto volátil orgânico tóxico e carcinogênico este deve ser removido de quaisquer corrente gasosa residual. Adsorção em leito recheado de carvão ativo é um método prático de remoção deste composto de uma emissão gasosa. Os seguintes dados de ruptura para adsorção de cloreto de vinila em carvão ativado granular a 20°C e pressão atmosférica essencialmente são apresentados na **Tab. 5**.

Tabela 5: Dados de ruptura para cloreto de vinila em carvão ativado.

t (min)	y/y_i	t (min)	y/y_i
141	0	261	0,692
154	0	282	0,807
166,7	0,018	297	0,894
189,7	0,144	318	0,966
205	0,223	338	0,99
225,6	0,411	350	1
246	0,587		

Detalhes dos parâmetros experimentais são: comprimento do leito, $L = 15,2$ cm; diâmetro do leito, $d = 2,3$ cm; vazão de gás = 80 cm³/s a 1 atm e 20°C; porosidade do leito, $\epsilon = 0,36$; velocidade intersticial = $0,535$ m/s; concentração de cloreto de vinila na alimentação = 190 ppm (v/v); y_i = fração molar do soluto no gás alimentado e y , no efluente.

- Calcule o comprimento da zona de adsorção, a velocidade da frente estequiométrica e a capacidade de saturação do leito a concentração de gás influente.
- Uma emissão contendo 190 ppm (v/v) de cloreto de vinila é tratada com carvão ativado a uma vazão de 20 m³/min para reduzir sua concentração em 98%. Utilizando os dados de ruptura, determine o diâmetro do leito, a altura e a queda de pressão se é considerado um período de adsorção de 10 h. Utilize a mesma velocidade superficial do gás conduzida no experimento.

Exercício 6

(Geankoplis, 2003, Exemplo 12.3-1)

Uma corrente residual de vapor de álcool em ar é adsorvida por partículas de carvão ativado em uma coluna recheada com diâmetro de 4 cm e comprimento de 14 cm contendo 79,2 g de carvão. O gás alimentado tem uma concentração c_0 de 600 ppm e uma massa específica de $0,00115 \text{ g/cm}^3$ entrando no leito a uma vazão de $754 \text{ cm}^3/\text{s}$. Os dados da **Tab. 6** fornecem as concentrações da curva de ruptura. A concentração do ponto de ruptura é especificada como $c/c_0 = 0,01$. Faça o que é pedido:

Tabela 6: Concentração de ruptura para álcool em carvão ativado.

t (h)	c/c_0	t (h)	c/c_0
0	0	5,5	0,658
3	0	6	0,903
3,5	0,002	6,2	0,933
4	0,03	6,5	0,975
4,5	0,155	6,8	0,993
5	0,396		

- Determine o tempo de ruptura, a fração da capacidade total usada no ponto de ruptura e o comprimento de leito não-utilizado. Determine também a capacidade de saturação do adsorvente.
- Se o tempo de ruptura requerido para um nova coluna é 6 h, qual é o novo comprimento total requerido da coluna?

Formulário

Balanco material para o processo em batelada:

$$q = \left(-\frac{S}{M}\right)C + \left(q_F + \frac{S}{M}C_F\right) \quad (1)$$

onde M é a massa de adsorvente, S é o volume de solução alimentada e o subíndice F indica a condição inicial.

Expressões para isotermas de adsorção:

- Isoterma linear (lei de Henry):

$$q = Kp \quad (2)$$

- Isoterma de Freundlich:

$$q = Kp^{1/n} \quad (3)$$

- Isoterma de Langmuir:

$$q = q_m \frac{Kp}{1 + Kp} \quad (4)$$

onde K , n e q_m são parâmetros estimados. As expressões também podem ser expressas em termos de C ao invés de p .

- Equação de Clausius-Clayperon:

$$(\Delta H)_{\text{iso}} = R \cdot \frac{d \ln p}{d(1/T)} \quad (5)$$