



Curso de Engenharia Química  
Operações Unitárias II – 2016/2

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 isosteres 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, 2013, 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  $1 \text{ m}^3$  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 isosteres 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: (a)  $T = 70^\circ\text{C}$ :  $q = 1,591(0,137 \cdot 10^3 p)/(1 + 0,137 \cdot 10^3 p)$  e  $q = 17,74p^{1/1,578}$ ;  $T = 110^\circ\text{C}$ :  $q = 0,861(0,052 \cdot 10^3 p)/(1 + 0,052 \cdot 10^3 p)$  e  $q = 8,893p^{1/1,307}$ . (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, Exemplo 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 <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /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.

### Formulário

Balço 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):

$$q = K \cdot p \quad (2)$$

- Isoterma de Freundlich:

$$q = K \cdot p^{1/n} \quad (3)$$

- Isoterma de Langmuir:

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

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

- Equação de Clausius-Clapeyron:

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