

Estudo da remoção do íon Fe (II) em colunas de leito fixo, utilizando-se a Zeólita NaY

Indianara Conceição Ostroski¹, João Henrique Dantas¹, Rafael Luan Sehn Canavesi², Edson Antonio da Silva², Pedro Augusto Arroyo¹ e Maria Angélica Simões Dornellas de Barros^{1*}

¹Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo, 5790, 87020-900, Maringá, Paraná, Brasil. ²Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil. *Autor para correspondência. E-mail: angélica@deq.uem.br

RESUMO. Neste trabalho foi investigada a remoção do íon ferro em colunas de leito fixo pela zeólita NaY na temperatura de 30°C e pH de 4,5. As curvas de ruptura experimentais foram obtidas com concentrações de alimentação de 0,2 a 2,94 meq L⁻¹ e com vazão de 8 mL min.⁻¹. Por meio das curvas de ruptura foi possível avaliar o comportamento da isoterma, a qual se mostrou favorável à remoção de ferro com uma quantidade máxima de retenção experimental de 2,61 meq g⁻¹. Os dados de equilíbrio foram ajustados, utilizando-se o modelo de Langmuir e Freundlich. Também foi empregado um modelo matemático fenomenológico para representar os dados de ruptura experimental. O modelo foi obtido por meio de balanço de massa na fase fluida e no trocador. O parâmetro coeficiente de transferência de massa foi estimado, utilizando-se os dados experimentais da curva de ruptura. O modelo matemático representou apropriadamente a troca iônica dos íons ferro em coluna de leito fixo.

Palavras-chave: troca iônica, dados de equilíbrio, modelo matemático.

ABSTRACT. Removal of Fe (II) in fixed bed of NaY Zeolite. This work investigated the removal of iron ions in fixed bed columns by NaY zeolite at 30°C and pH= 4.5. The experimental breakthrough curves were obtained for feed concentrations from 0.2 to 2.94 meq L⁻¹ and a flow rate of 8 mL min.⁻¹. Through the breakthrough curves it was possible to evaluate isotherm behavior and to obtain the maximum removal capacity of 2.61 meq g⁻¹. Langmuir and Freundlich isotherm models were used to represent the column equilibrium data. A phenomenological model was used to represent the breakthrough curves. The mathematical model was obtained by means of mass-balance equations applied to an element of the column in the liquid phase and solid phase. The overall mass-transfer coefficient was estimated using the experimental data of the breakthrough curves. The mathematical model properly represented the ion exchange of iron ions in fixed bed column.

Keywords: ion exchange, equilibrium data, mathematical model.

Introdução

A atividade humana tem proporcionado o desequilíbrio ecológico do Planeta, principalmente em relação aos recursos hídricos. A contaminação das águas vem acontecendo à medida que as indústrias despejam seus efluentes de maneira inapropriada em corpos receptores.

Uma classe particularmente perigosa dentre os efluentes industriais é a que contém metais pesados, pois muitos destes estão ligados a alterações degenerativas do sistema nervoso central, uma vez que não são metabolizados pelos organismos, produzindo, assim, o efeito de bioacumulação (BARROS et al., 2004). São vários os processos de

tratamento de efluentes industriais. Os métodos de adsorção/troca iônica estão entre os que trazem bons resultados para o tratamento de águas (KO et al., 2001). E, também, outros processos, geralmente, mostram-se ineficientes ou com custos proibitivos quando aplicados a efluentes líquidos com concentrações muito baixas de metais pesados, isto é, menores do que 100 mg L⁻¹ (VOLESKI, 1990).

Desta forma, buscando alcançar as concentrações de metais exigidas pela legislação para o descarte do efluente líquido industrial, o processo de troca iônica surge como um processo complementar ao tratamento convencional de efluentes. Os metais pesados podem ser removidos pela percolação da solução por um leito fixo de trocador iônico. O

processo oferece como vantagens a minimização do volume de lodos e a alta eficiência em tratamento de efluentes muito diluídos.

Dentre os materiais utilizados como trocadores catiônicos, a zeólita Y destaca-se por apresentar elevada capacidade de troca (em torno de $3,9 \text{ meq g}^{-1}$) e boa estabilidade estrutural (GIANNETTO et al., 2000).

A característica de troca iônica das zeólitas tem sido bastante estudada como uma das etapas de preparação de catalisadores (LUNA; SCHUCHARDT, 2001). No entanto, a utilização desses materiais diretamente na remoção de metais pesados, particularmente o ferro, ainda é pouco investigada e, portanto, de grande interesse. A troca iônica pode ocorrer em batelada ou em sistemas como os leitos fixos. Os leitos fixos são particularmente interessantes pela sua fácil operação e possibilidade de regeneração sem que o leito seja desmontado (VEIT et al., 2009).

As isotermas de equilíbrio podem ser obtidas tanto em batelada como em sistemas contínuos. Em sistemas batelada, o equilíbrio é obtido em seu tempo infinito de contato, que, muitas vezes, não consegue representar os dados dinâmicos das colunas (SILVA et al., 2002). Por outro lado, entendem-se como dados de equilíbrio dinâmicos aqueles que consideram a saturação do leito. Os dados de equilíbrio dinâmicos têm sido utilizados com sucesso em modelos matemáticos (BORBA et al., 2006; SILVA et al., 2002; OSTROSKI et al., 2009).

Aliás, os modelos matemáticos são de fundamental importância nos processos de separação que envolvem leitos fixos, pois os mesmos reduzem os custos de tais operações e, por meio destes, é possível fazer uma otimização do processo em escala industrial. A validação dos modelos pode ser realizada por meio de levantamento de dados experimentais em escala laboratorial nas mesmas condições em que a coluna é operada.

Dentro deste contexto, o presente trabalho teve por objetivo avaliar a troca iônica do íon ferro (II), empregando-se a zeólita NaY como trocador em coluna de leito fixo. Visando a este objetivo central, o estudo foi desenvolvido nas seguintes etapas: obtenção das curvas de ruptura, construção da isoterma, modelagem matemática e simulação da dinâmica de troca iônica do íon ferro (II).

Material e métodos

A zeólita utilizada no presente trabalho foi a NaY, cuja composição química é $\text{Na}_{51}(\text{AlO}_2)_{51}(\text{SiO}_2)_{141}$. A amostra foi obtida na forma de pó, sem ligantes, sendo imediatamente submetida

a um pré-tratamento, a fim de se eliminar impurezas provenientes da síntese e qualquer cátion de compensação que não fosse o sódio. Conforme recomendado por Keane (1998), o pré-tratamento constituiu-se em colocar 100 g de amostra de zeólita em 1 L de solução de NaCl (reagente PA, marca Nuclear) 1 mol L^{-1} , a 60°C , durante um tempo de 24h, em agitação constante de 150 rpm. Em seguida, as amostras foram filtradas e lavadas com 2 L de água deionizada à mesma temperatura e secas a 100°C por um tempo de 24h. Este procedimento foi repetido por quatro vezes. As amostras pré-tratadas foram peletizadas, moídas, peneiradas e os finos removidos pela passagem de água em fluxo ascendente pela coluna. Em seguida, as amostras foram secas em temperatura de 100°C .

A solução sintética de ferro foi preparada a partir do reagente $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (cloreto de ferro tetra hidratado) (P.A.) para se obter as concentrações de alimentação na faixa de $0,20$ a $2,94 \text{ meq L}^{-1}$ e o pH da solução foi fixado em 4,5, com ácido clorídrico (HCl). A análise de concentração dos cátions na saída da coluna, bem como das concentrações iniciais, foram realizadas por Espectrometria de Absorção Atômica, utilizando-se um espectrofotômetro Varian 50 B.

Unidade de troca iônica

Nos estudos em operação contínua, utilizou-se uma coluna de vidro, encamisada, com 0,9 cm de diâmetro interno e 30 cm de altura, acoplada a uma bomba peristáltica (Cole Parmer 75536-70, 6-600 rpm) e a um banho termostático (Marconi). A unidade de troca iônica também era composta de um reservatório para a solução de alimentação e outro para água deionizada, usada na lavagem do leito, conforme ilustrado na Figura 1.

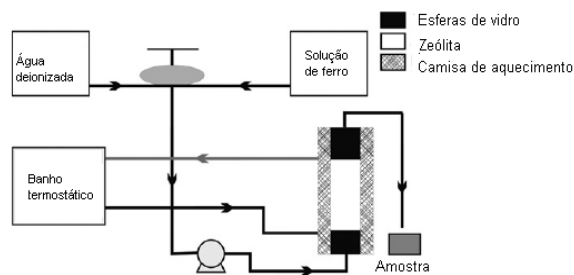


Figura 1. Unidade de troca iônica.

A montagem do leito para a realização dos ensaios era iniciada com o preenchimento de $\frac{1}{4}$ da coluna com esferas de vidro e, em seguida, adicionavam-se 0,80 g de zeólita (base seca). O leito era cuidadosamente fluidizado com água destilada

para que as bolhas saíssem e o leito reacomodado com uma altura de 3,0 cm. A partir daí, uma nova camada de esferas de vidro era introduzida, completando-se a montagem da coluna. A temperatura da solução da alimentação era de 30°C. Depois de a vazão (8 mL min⁻¹) e temperatura serem ajustadas, dava-se início aos ensaios de troca.

Cálculo da capacidade de troca iônica da coluna

O cálculo da capacidade de troca iônica em colunas de leito fixo pode ser obtido, fazendo-se um balanço de massa na coluna e monitorando-se a concentração na saída da coluna em função do tempo. Para efetuar este cálculo é necessário garantir que a coluna esteja saturada, isto é, a concentração na saída da coluna deve ser igual à concentração de alimentação. A capacidade de troca da coluna pode ser representada por:

$$q_{eq} = \frac{C_0 Q}{1000 m_s} \int_0^t (1 - C_{out}/C_0) dt \quad (1)$$

em que:

q_{eq} é a concentração de equilíbrio dos íons ferro na zeólita (meq g⁻¹), m_s é a massa seca de zeólita (g), Q é a vazão volumétrica da solução em mL min⁻¹, t o tempo em minutos, C_{out} é a concentração do cátion na saída da coluna (meq L⁻¹) e C_0 é a concentração de alimentação do cátion na coluna (meq L⁻¹).

A partir do cálculo da capacidade de troca iônica em colunas até a saturação do leito é possível obter a isoterma dinâmica. Os dados de equilíbrio, neste caso, são considerados como a concentração de alimentação (C_0) e a capacidade de troca (q_{eq}).

Para se representar o equilíbrio de troca iônica, as isotermas de adsorção podem ser utilizadas. Neste caso, o processo é descrito como equilíbrio de fases. A concentração de equilíbrio de ferro retido no trocador em meq g⁻¹, foi calculada pelos modelos de isotermas de Freundlich e Langmuir, descritos pelas seguintes equações, respectivamente:

$$q_{eq} = a(C_{eq})^{1/n} \quad (2)$$

em que:

C_{eq} é a concentração de equilíbrio na fase fluida, a e n são as constantes de Freundlich.

$$q_{eq} = \frac{q_m b C_{eq}}{1 + b C_{eq}} \quad (3)$$

em que:

b e q_m são as constantes de Langmuir, b é a constante relacionada à energia livre de adsorção (L meq⁻¹) e q_m é a capacidade do adsorvente em (meq g⁻¹).

Modelo matemático

Na modelagem matemática foi empregado o modelo de dupla resistência, em que os fenômenos de transferência de massa de dispersão axial, difusão intrapartícula e difusão no filme externo foram considerados. O balanço de massa em um elemento de volume no interior do leito resulta na seguinte equação:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_0 \frac{\partial C}{\partial z} + \rho_{bed} \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial q}{\partial t} - D_L \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} = 0 \quad (4)$$

em que:

C é a concentração do íon ferro na fase fluida (meq L⁻¹), q é a concentração do cátion no trocador (meq g⁻¹), ε corresponde à porosidade do leito, u_0 representa a velocidade intersticial (cm min⁻¹), ρ_{bed} representa a densidade do leito (g L⁻¹) e D_L é o coeficiente de dispersão axial (cm² min⁻¹).

Com a seguinte condição inicial:

$$C(0, z) = 0 \quad (5)$$

E as condições de contorno, conforme:

$$D_L \frac{\partial C}{\partial z} = u_0 (C(t, 0) - C_0) \text{ em } z = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial C}{\partial z} = 0 \text{ em que } z = L \quad (7)$$

Para se representar o mecanismo de transferência de massa do íon ferro na zeólita NaY, utilizou-se a aproximação da segunda lei de Fick, representada por:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -K_s (q - q_{eq}(C_{eq})) \quad (8)$$

em que:

K_s é o coeficiente global de transferência de massa (min⁻¹). Neste caso, as condições de contorno e inicial, respectivamente, foram as seguintes:

$$q(0, z) = 0 \text{ e } q(t, 0) = 0 \quad (9)$$

Na utilização do modelo foi considerado que a interface sólido/fluido estava em equilíbrio, o que tornou possível correlacionar as concentrações do íon ferro por meio de isotermas de adsorção. Uma

equação que considera a igualdade no seio da fase fluida e no trocador também foi incluída e é representada por:

$$-K_S(q - q_{eq}(C_{eq})) = \frac{K_F \varepsilon}{\rho_s} (C - C_{eq}) \quad (10)$$

Na simulação, o coeficiente global de transferência de massa (K_S) foi ajustado a partir dos dados experimentais, o coeficiente de dispersão axial (D_L) foi estimado, empregando-se a correlação proposta por Otero et al. (2005), representada pela Equação 11. O coeficiente de transferência de massa no filme líquido externo (K_F), em colunas de leito fixo, foi obtido pela Equação 12.

$$D_L = \frac{u_0 dp}{(0,2 + 0,011 * Re^{0,48})} \quad (11)$$

$$K_F = 6 \left(\frac{Sh \cdot D_m}{dp} \right) \cdot (1 - \varepsilon) \quad (12)$$

em que:

Re é o número de Reynolds, dp , o diâmetro equivalente da partícula (cm), D_m é a difusividade molecular do íon metálico ($\text{cm}^2 \text{min}^{-1}$) e Sh é o número de Sherwood, representado pela seguinte correlação:

$$Sh = \frac{1,09}{\varepsilon} \cdot Re^{0,33} Sc^{0,33} \quad (13)$$

Os números de Reynolds e de Schmidt foram calculados pelas seguintes equações, respectivamente:

$$Re = \frac{u_0 \rho \varepsilon d_p}{\mu} \quad (14)$$

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D_m} \quad (15)$$

em que:

ρ representa a densidade da fase fluida (g cm^{-3}) e μ , a viscosidade da fase fluida ($\text{g cm}^{-1} \text{min}^{-1}$).

Para a resolução do modelo matemático, o método das linhas foi empregado. Na aplicação deste método, as derivadas espaciais são aproximadas por diferenças finitas. Esse procedimento transforma o problema original de se resolver um sistema de equações diferenciais parciais em um sistema de equações diferenciais ordinárias, que foi resolvido,

empregando-se a subrotina DASSL (PETZOLD, 1982).

O parâmetro ajustado pelo modelo, (K_S), foi determinado, minimizando-se a função objetivo da Equação 16. O método empregado foi o de *golden section search* (EDGAR; HIMMEBLAU, 1989).

$$F = \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} (C_{\text{out}}^{\text{EXP}} - C_{\text{out}}^{\text{MOD}})^2 \quad (16)$$

Resultados e discussão

Os dados experimentais de equilíbrio obtidos nos ensaios em coluna para a troca iônica do íon ferro foram utilizados para se calcular a quantidade de metal removida até a saturação da coluna, empregando-se a Equação 1. Algumas curvas de ruptura obtidas experimentalmente serão apresentadas posteriormente, juntamente com a representação da simulação do modelo matemático. As isotermas ajustadas pelas equações do modelo de Langmuir e Freundlich são apresentadas na Figura 2.

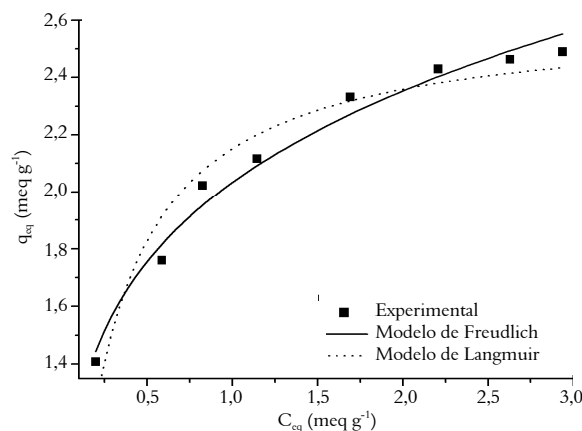


Figura 2. Isoterma dinâmica de troca iônica pela zeólita NaY do íon ferro.

Na Figura 2, pode-se verificar que o modelo de isoterma de Langmuir e o modelo de Freundlich, para o sistema Fe-NaY, representaram adequadamente os dados de troca iônica de equilíbrio. A curva do modelo de Langmuir para o sistema contínuo mostrou comportamento de isoterma do tipo favorável, em que grandes quantidades de espécies metálicas podem ser trocadas em baixas concentrações de soluto.

Os dados de equilíbrio foram utilizados para se calcular os valores das constantes das isotermas de Freundlich (a e n) e de Langmuir (q_m e b), em que se obtiveram os seguintes parâmetros, respectivamente: $a = 2,032 \pm 0,02 \text{ meq g}^{-1}$ e $n = 0,21 \pm 0,01$ com coeficiente de determinação de 0,981 e $q_m = 2,61 \pm 0,08 \text{ meq g}^{-1}$ e $b = 4,68 \pm 0,78 \text{ L meq}^{-1}$ com coeficiente de determinação de 0,938.

Observa-se que o modelo de Freundlich possui maior coeficiente de determinação se comparado com o modelo de Langmuir, resultando, assim, em uma melhor representação dos dados experimentais. Desta forma, os parâmetros (a e n) obtidos para o modelo de isoterma de Freundlich no sistema Fe-NaY foi incorporado ao modelo matemático utilizado para se simular a remoção do íon em coluna de leito fixo.

Como as diferenças nos valores de coeficiente de determinação são pequenas entre os dois modelos analisados, cabe, desta forma, a análise dos parâmetros do modelo de Langmuir. Observa-se, também, que o mesmo apresenta capacidade máxima de remoção para o íon ferro de $2,61 \pm 0,08$ meq g^{-1} , indicando que o valor alcançou 67% da capacidade teórica de troca (CTC) da zeólita, que é de 3,90 meq g^{-1} . Isso significa que o ferro (II) prefere ficar retido nas grandes cavidades, sendo estas responsáveis por 68% da CTC (GIANNETTO et al., 2000), indicando que os íons Fe(II) não conseguem se difundir pelos prismas hexagonais da zeólita Y. De acordo com Ruthven (1984), os íons Fe(II) possuem estrutura octaédrica em meio aquoso e, segundo Ceranic e Lukic (1989), quanto maior o volume do íon, mais fraco será seu campo elétrico na solução e, conseqüentemente, menor o grau de hidratação. Desta forma, o tamanho propriamente dito e o volume ocupado pelo íon ferro na forma octaédrica podem ser uma das explicações para a não-ocupação dos sítios nos prismas hexagonais da zeólita NaY.

É interessante notar que, utilizando-se as mesmas condições experimentais (exceto o valor do pH), a zeólita NaY foi capaz de trocar maior quantidade de íons ferro (III), apresentando valor de $q_m = 2,93 \pm 0,13$ meq g^{-1} (OSTROSKI et al., 2009). Quanto maior a carga, mais os sítios da zeólita atraem o cátion (BRECK, 1974). Assim sendo, por ter uma atração eletrostática maior, é possível que o íon Fe(III) consiga ser mais trocado do que o íon Fe(II). Desta forma, possivelmente a troca com formação multicamada do Fe(II) se deve ao fato de o íon ser atraído com força eletrostática menor. As diferenças no mecanismo de troca podem ser explicadas por meio da especiação dos íons. Como já mencionado, os experimentos realizados para o Fe(II) foram, em pH, de 4,5, em que 100% dos íons são Fe^{2+} . Enquanto que os experimentos realizados por Ostroski et al. (2009) para o Fe(III) foram, em pH, de 3,5; neste pH apenas 20% dos íons são Fe^{3+} , 40% são $FeOH^{2+}$ e 40% são $FeOH_2^+$ (KATSOYIANNIS; ZOUBOULIS, 2002). Neste caso, os 20% dos íons com carga +3 é que fazem a

diferença na retenção do íon Fe(III), entrando nos prismas hexagonais da zeólita.

Os resultados das curvas experimentais e simuladas para as concentrações estudadas são apresentadas nas Figuras 3 a 10.

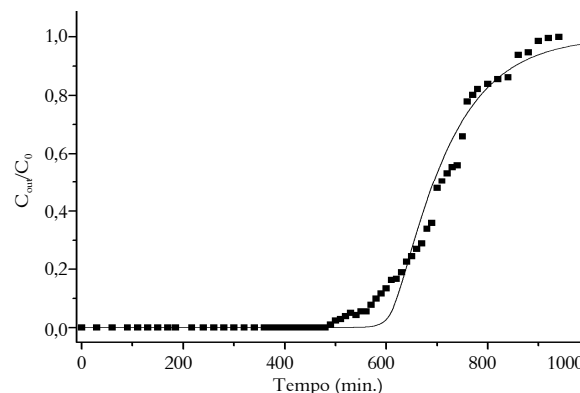


Figura 3. Curvas de ruptura experimental (■) e simulada (-) para $C_0 = 0,198$ meq L^{-1} .

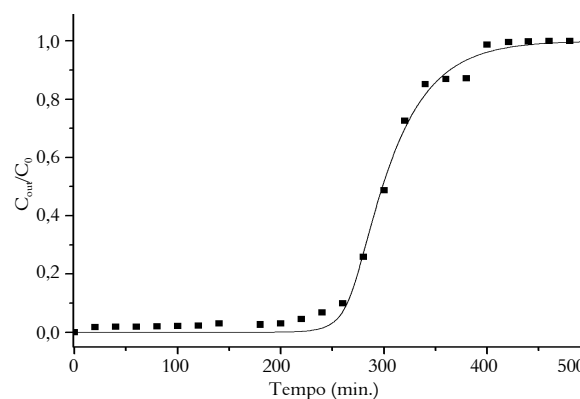


Figura 4. Curvas de ruptura experimental (■) e simulada (-) para $C_0 = 0,586$ meq L^{-1} .

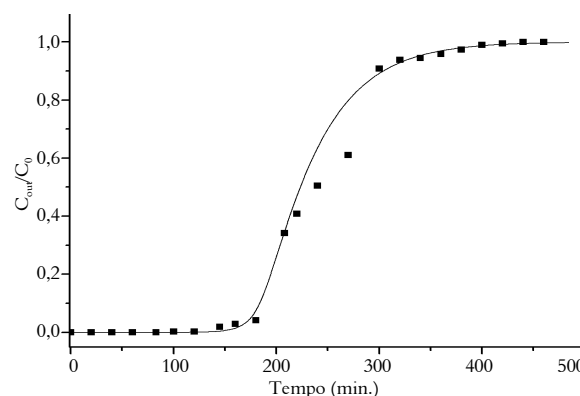


Figura 5. Curvas de ruptura experimental (■) e simulada (-) para $C_0 = 0,825$ meq L^{-1} .

Observa-se a concordância dos resultados obtidos entre as curvas de ruptura experimentais e simuladas. Os resultados apresentados indicam, pelos perfis das curvas de ruptura experimentais, que

a zeólita foi saturada mais rapidamente em elevadas concentrações iniciais de solução metálica. Entretanto, o tempo de ruptura diminuiu com o aumento da concentração inicial de ferro (II). Logo, a variação da concentração inicial de metal teve efeito significativo na forma da curva de ruptura. De acordo com Silva et al. (2002), a forma e a inclinação da curva dependem das relações entre as fases de equilíbrio e dos mecanismos de transferência de massa.

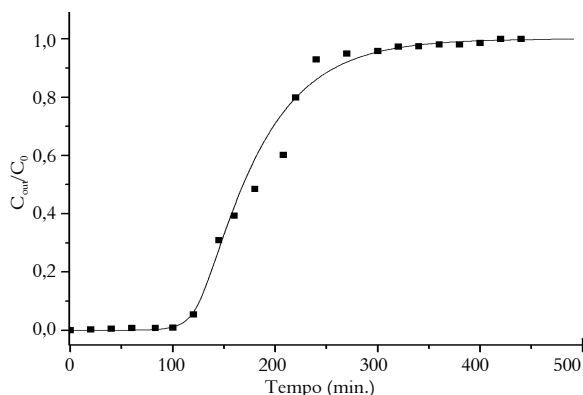


Figura 6. Curvas de ruptura experimental (■) e simulada (-) para $C_0 = 1,114 \text{ meq L}^{-1}$.

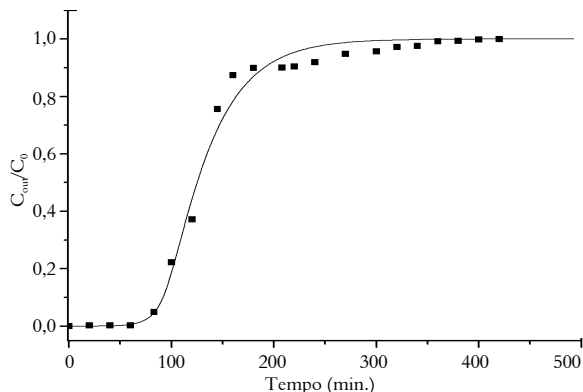


Figura 7. Curvas de ruptura experimental (■) e simulada (-) para $C_0 = 1,691 \text{ meq L}^{-1}$.

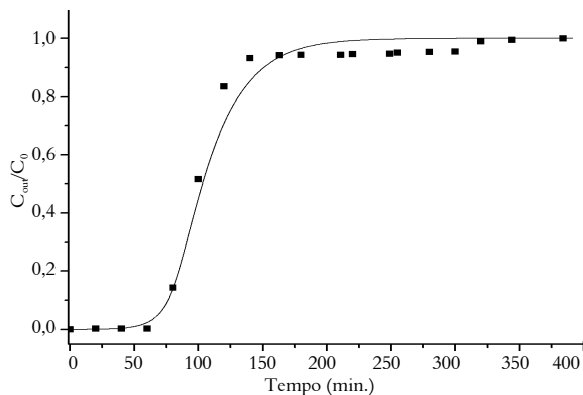


Figura 8. Curvas de ruptura experimental (■) e simulada (-) para $C_0 = 2,206 \text{ meq L}^{-1}$.

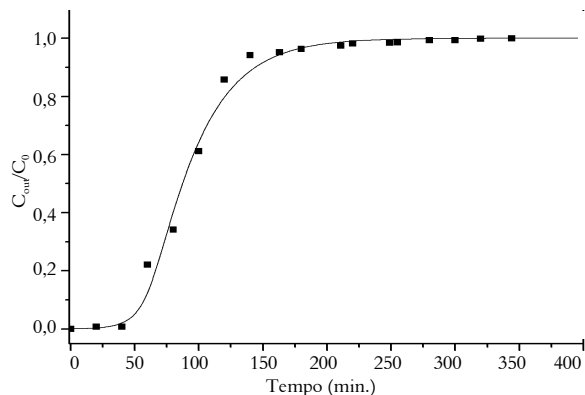


Figura 9. Curvas de ruptura experimental (■) e simulada (-) para $C_0 = 2,629 \text{ meq L}^{-1}$.

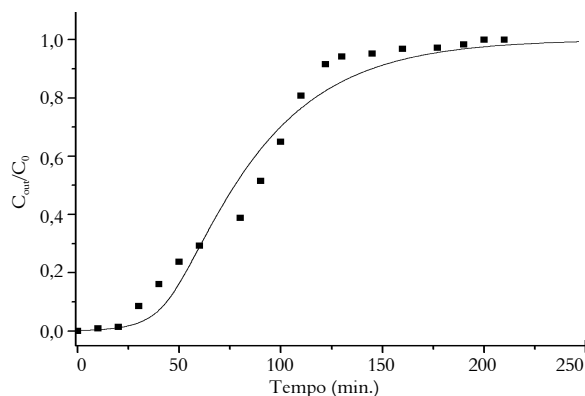


Figura 10. Curvas de ruptura experimental (■) e simulada (-) para $C_0 = 2,937 \text{ meq L}^{-1}$.

Na Tabela 1, são apresentados os valores dos coeficientes de transferência de massa (K_S), estimados a partir do modelo matemático proposto para diferentes concentrações de alimentação do ferro (II).

Tabela 1. Parâmetro estimado com o modelo matemático para os dados de equilíbrio obtidos em sistema contínuo.

Íon	C_0 (meq L^{-1})	K_S (min. $^{-1}$)	Função objetivo
Fe(II)	0,198	0,0141	1,57E-01
	0,586	0,0371	1,98E-02
	0,825	0,0288	5,78E-02
	1,144	0,0254	3,99E-02
	1,691	0,0357	3,08E-02
	2,206	0,0518	4,12E-02
	2,629	0,0413	2,11E-02
	2,937	0,0331	7,37E-02

Na Tabela 1, observa-se que os valores do coeficiente de transferência de massa variam com a concentração inicial de metal na solução. Isso sugere que os coeficientes de transferência de massa na zeólita para o íon ferro, em leito fixo, são dependentes da concentração, pois a taxa de remoção e capacidade de troca iônica foram afetadas pela mudança de concentração. Observa-se, ainda, que para o sistema Fe-NaY, o coeficiente de

transferência de massa tem tendência a aumentar com o aumento da concentração. Tal fenômeno já havia sido observado por alguns pesquisadores (BARROS et al., 2004; GAZOLA et al., 2006; SILVA et al., 2002; OSTROSKI et al., 2009). Pode-se correlacionar K_S com a difusividade efetiva do íon, uma vez que esta propriedade é função da concentração de alimentação, como observado por Zufadhly et al. (2001). Provavelmente, a força motriz para o processo de troca iônica seja o fato de que cátions de soluções mais concentradas conseguem reter mais facilmente a esfera de hidratação liberada pelos contraíons já retidos na fase zeolítica.

Na Tabela 1, também se observa que os valores da função objetivo são pequenos, demonstrando boa simulação dos dados experimentais, o que também pode ser observado nas Figuras 3 a 7.

Vale lembrar ainda que, como somente uma pequena faixa de concentração foi investigada, a relação direta de proporcionalidade entre K_S e a concentração de alimentação não deve ser extrapolada. Em concentrações elevadas da alimentação, o pH torna-se muito ácido, o que pode alterar de maneira significativa a especiação do ferro (KATSOYIANNIS; ZOUBOULIS, 2002).

Conclusão

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir que os modelos de isoterma de Langmuir e Freundlich representaram apropriadamente os dados de equilíbrio de troca iônica do íon ferro (II) pela zeólita NaY, obtidos em colunas de leito fixo à temperatura de 30°C.

Na simulação das curvas de ruptura do sistema, os parâmetros do modelo de Freundlich foram utilizados. Verificou-se boa concordância dos resultados obtidos entre as curvas de ruptura experimentais e simuladas. Observou-se que a transferência de massa no sólido foi influenciada pela concentração inicial de metal nas condições estudadas.

Desta forma, o modelo matemático fenomenológico, baseado nas resistências à transferência de massa intrapartícula e no filme externo, representou de forma satisfatória o comportamento da dinâmica de remoção de ferro (II) pela zeólita NaY. Esses resultados indicam que o modelo matemático pode ser aplicado no projeto e otimização do processo de troca iônica/adsorção em colunas de leito fixo para tratamento de efluentes que contêm ferro (II) em escala industrial.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Capes e MCT/CNPq, pelo suporte financeiro da pesquisa.

Referências

- BARROS, M. A. S. D.; SILVA, E. A.; ARROYO, P. A.; TAVARES, C. R. G.; SCHNEIDER, R. M.; SUSZEK, M.; SOUSA-AGUIAR, E. F. Removal of Cr(III) in the fixed bed column and batch reactors using as adsorbent zeolite NaX. **Chemical Engineering Science**, v. 59, p. 5959-5966, 2004.
- BORBA, C. E.; GUIRARDELLO, R.; SILVA, E. A.; VEIT, M. T.; TAVARES, C. R. G. Removal of nickel (II) ions from aqueous solution by biosorption in a fixed bed column: Experimental and theoretical breakthrough curves. **Biochemical Engineering Journal**, v. 30, n. 2, p. 184-191, 2006.
- BRECK, D. W. **Zeolite molecular sieves**. Malabar: Robert E. Krieger Publishing Company, 1974.
- CERANIC, T. S.; LUKIC, T. M. Maximal exchange levels of Some transition metal ions in sodium clinoptilolite. **Journal of the Serbian Chemical Society**, v. 54, n. 9-10, p. 547-554, 1989.
- EDGAR, T. F.; HIMMELBLAU, D. M. **Optimization of chemical process**. New York: McGraw-Hill, 1989.
- GAZOLA, F. C.; PEREIRA, M. R.; BARROS, M. A. S. D.; SILVA, E. A.; ARROYO, P. A. Removal of Cr in fixed bed using zeolite NaY. **Journal of Chemical Engineering**, v. 117, n. 3, p. 253-261, 2006.
- GIANNETTO, G. P.; MONTES, A.; RODRÍGUEZ, G. **Zeólitas características, propiedades y aplicaciones industriales**. Caracas: Ed. Innovación Tecnológica - Facultad de Ingeniería - UCV, 2000.
- KATSOYIANNIS, I. A.; ZOUBOULIS, A. I. Removal of arsenic from contaminated water sources by sorption onto iron-oxide-coated polymeric materials. **Water Research**, v. 36, n. 20, p. 5141-5155, 2002.
- KEANE, M. A. The removal of copper and nickel from aqueous solution using Y zeolite ion exchangers. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 138, p. 11-20, 1998.
- KO, D. C. K.; PORTER, J. F.; MCKAY, G. Film pore diffusion model for fixed-bed sorption of copper and cadmium ions onto bone char. **Water Research**, v. 35, n. 16, p. 387-3886, 2001.
- LUNA, F. J.; SCHUCHARDT, U. Modificação de zeólitas para uso em catálise. **Química Nova**, v. 24, n. 6, p. 885-892, 2001.
- OSTROSKI, I. C.; BARROS, M. A. S. D.; SILVA, E. A.; DANTAS, J. H.; ARROYO, P. A.; LIMA, O. C. M. A comparative study for the ion exchange of Fe(III) and Zn(II) on zeolite NaY. **Journal of Hazardous Materials**, v. 161, n. 2-3, p. 1404-1412, 2009.
- OTERO, M.; ZABKOVA, M.; RODRIGUES, A. E. Adsorptive purification of phenol wastewaters: Experimental basis and operation of a parametric pumping unit. **Chemical Engineering Journal**, v. 110, p. 101-111, 2005.

PETZOLD, L. A. **A description of DASSL: a differential/algebraic equation system solver.** Livermore: STR, SAND 82-8637, 1982.

RUTHVEN, D. M. **Principles of adsorption and adsorption process.** New York: John Wiley and Sons, 1984.

SILVA, E. A.; COSSICH, E. S.; TAVARES, C. R. G.; FILHO, L. C.; GUIRARDELLO, R. Modeling of copper (II) biosorption by marine alga *Sargassum* sp. in fixed bed. **Process Biochemistry**, v. 38, p. 791-799, 2002.

VEIT, M. T.; SILVA, E. A.; TAVARES, C. R. G.; FAGUNDES-KLEN, M. R.; GONÇALVES, G. C.; SEOLATTO, A. A.; VAZ, L. G. L. Biosorption of nickel (II) ions by using chemically pre-treated *Sargassum filipendula* biomass in a fixed bed column. **World**

Journal of Microbiology and Biotechnology, v. 25, n. 10, p. 1849-1856, 2009.

VOLESKI, B. **Biosorption of heavy metals.** Boston: CRC Press Inc., 1990.

ZULFADHLY, Z.; MASHITAH, M. D.; BHATIA, S. Heavy metals removal in fixed-bed column by the macro fungus *pycnoporus sanguineus*. **Environmental Pollution**, v. 112, p. 463-470, 2001.

Received on October 5, 2009.

Accepted on November 10 2009.

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.