Avaliação da viabilidade de regeneração de colunas de zeólita NaY na troca iônica dinâmica de Cr^{3+}

Juliana Belincanta[1], Onélia Aparecida Andreo dos Santos[1], Eduardo Falabella Sousa-Aguiar[2], Pedro Augusto Arroyo[1] e Maria Angélica Simões Dornellas de Barros[1]*

*[1]Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo, 5790, 87020-900, Maringá, Paraná, Brasil. [2]Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Processos Orgânicos/Escola de Química-Cenpes/Petrobras, Ilha do Fundão, Quadra 7 - Cidade Universitária, CEP 21941-900, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. *Autor para correspondência. e-mail: angelica@deq.uem.br*

RESUMO. Neste trabalho foi investigada a viabilidade de regeneração da zeólita NaY em colunas de leito fixo previamente trocadas com Cr^{3+}. As trocas diretas foram realizadas com solução de cromo 15 ppm e as trocas reversas com três concentrações de solução de NaCl: 0,1 mol/L; 1,0 mol/L e 2,0 mol/L. Todos os ensaios, tanto de troca quanto de regeneração, foram realizados a uma vazão de 9 mL/min e um diâmetro de partícula médio de 0,180 mm, totalizando, para cada concentração da solução de NaCl, 5 ciclos troca/regeneração. Observou-se que a zeólita NaY tem uma grande afinidade com os íons trivalentes, o que dificulta o processo de regeneração da coluna e promove um acúmulo progressivo de cromo no leito. Somente para a concentração de 2,0 mol/L de NaCl é que ocorreu a completa remoção do cromo em tempos muitos curtos de operação, indicando que tal condição de regeneração prolonga a vida útil da coluna.

Palavras-chave: troca iônica dinâmica, regeneração, cromo, zeólita NaY, tratamento de efluentes.

ABSTRACT. The regeneration viability evaluation of NaY zeolite columns. This paper investigated the regeneration viability of NaY Zeolite columns previously exchanged with trivalent chromium ions. The direct exchanges were carried out with 15 ppm solution and the reverse ones were carried out with 3 distinct NaCl solutions: 0.1 mol/L; 1.0 mol/L and 2.0 mol/L. All the runs were done in a flow rate of 9 mL/min with an average particle size of 0.180 mm. Five exchange/regeneration cycles were studied to reach the aim of this research. It was observed that NaY zeolite had a close affinity for trivalent ions which makes the regeneration process difficult and promotes a progressive accumulation of chromium in the fixed bed. Only at 2.0 mol/L all chromium ions retained were released in short operation time, which indicated that the concentration extended the lifetime of the columns.

Key words: dynamic ion exchange, regeneration, chromium, NaY zeolite, effluent treatment.

Introdução

O estudo do tratamento de efluentes industriais contendo metais é particularmente importante, uma vez que esses não se decompõem como acontece com a matéria orgânica. Dessa forma, ocorre o acúmulo de metais pesados através dos níveis tróficos (Patterson, 1977).

As indústrias de curtimento são um exemplo de agentes altamente poluidores criados pelo homem. A poluição e a conseqüente contaminação por cromo dos ecossistemas, tanto aquáticos como terrestres, ocorrem de maneira lenta e, por esse motivo, muitas vezes não são prontamente percebidas, acarretando graves conseqüências à natureza. Nesse sentido, há uma grande preocupação em como solucionar tal problema e, principalmente, um grande interesse em estudar materiais que possam reter cátions de metais pesados como, por exemplo, os cátions cromo.

Dentre esses materiais destacam-se as zeólitas, sólidos cristalinos microporosos que contêm cavidades e canais de dimensões moleculares, cuja estrutura é formada por tetraedros SiO_4 e AlO_4^-. A carga negativa na rede zeolítica, relativa aos tetraedros AlO_4^-, é neutralizada por cátions de compensação, que podem ser trocados. Essa característica faz com que as zeólitas sejam largamente utilizadas como trocadores catiônicos (Breck, 1974).

As zeólitas Y possuem uma estrutura composta por três cavidades distintas: uma pequena, e em

muitos casos inacessível, denominada de prisma hexagonal; e duas outras maiores denominadas de cavidade sodalita e supercavidade que são atingidas após a difusão através da uma larga abertura de 7,4 Å (Giannetto *et al*., 2000). Devido à sua geometria, a troca dos cátions de compensação da zeólita Y por íons de alta carga, como é o caso dos íons trivalentes, é favorecida. Esses cátions possuem uma grande energia de hidratação (Cotton e Wilkensen, 1988) e, conseqüentemente, tendem a continuar nesse estado, mesmo dentro das supercavidades (Weckhuysen *et al*., 1994). No entanto, a troca nas cavidades sodalita e nos prismas hexagonais é dificultada, uma vez que devido as suas aberturas, 4,2 Å e 2,2 Å, respectivamente, o cátion deve perder águas de hidratação (Keane, 1996). Dessa forma, é comum observar que a troca de cátions trivalentes, e dentre eles o Cr^{3+}, não atinge os prismas hexagonais nas zeólitas Y, pelo menos à temperatura ambiente (Tagami *et al.,* 2001). Mesmo com a troca incompleta de seus cátions, as zeólitas NaY removem, de maneira mais eficiente, cátions de metais pesados do que as zeólitas naturais (Tagami *et al*., 2001; Barros *et al*., 1997; Pansini *et al*., 1991), o que nos encoraja a estudar a troca dinâmica de colunas de NaY para fins ambientais.

A troca iônica em leito fixo é uma técnica de separação muito seletiva que pode remover até traços de componentes iônicos de grandes volumes de soluções diluídas. Uma completa compreensão dos efeitos de transferência de massa e da dinâmica desses processos é de fundamental importância, principalmente em aplicações em grande escala, quando é necessário obter produtos com alto grau de pureza ou, ainda, quando é necessário manter níveis muito baixos de metais altamente poluidores em efluentes industriais.

A primeira etapa de um projeto, de uma coluna de troca iônica, é a verificação das condições ótimas de trabalho, ou seja, aquelas que minimizam as resistências difusionais, tanto no filme quanto no interior da partícula zeolítica. Nessas condições otimizadas, os cátions podem atingir a maioria dos sítios acessíveis para a troca, ou seja, aqueles localizados nas supercavidades e cavidades sodalita. Para uma coluna de 0,9 cm de diâmetro interno, estudos prévios para a remoção de cromo em NaY demonstraram que a vazão de 9 mL/min e diâmetro médio de partícula de 0,180 mm são as condições que minimizam essas resistências sem uma significativa perda de carga no leito (Barros *et al*., 2001). Sob essas condições, a curva de ruptura apresenta-se mais próxima possível de um degrau perfeito (McCabe *et al*., 2001).

Um outro aspecto que deve ser considerado, sobre a remoção de um determinado cátion de um efluente, é a regeneração da coluna. Quando se observa na saída do leito uma concentração limite, é necessário que o fluxo seja desviado para outra coluna enquanto essa seja regenerada (Eckenfelder Jr., 2000). Genericamente, pode-se afirmar que o aumento da concentração da solução de regeneração melhora a retirada do cátion dos sítios de troca em um tempo mais curto de corrida (Koon e Kaufman, 1975). Porém, soluções mais concentradas podem implicar custos de operação mais elevados e, portanto, deve-se avaliar a condição ótima de trabalho que considere tanto a rápida regeneração da coluna quanto os custos de uma solução regeneradora concentrada. A regeneração de zeólitas Y, previamente trocadas com cromo, não é um processo fácil, uma vez que o cromo, para sair do sítio de troca, principalmente nas cavidades sodalita e eventuais prismas hexagonais, deve recompor sua esfera de hidratação, tornando-se bastante grande e dificultando o processo de difusão para o meio aquoso (Tagami *et al*., 2001). De fato, estudos preliminares sobre a regeneração do cromo em leito fixo mostraram que o processo não é simples (Custódio *et al*., 1998). Além do efeito estérico, as zeólitas Y preferem o íon Cr^{3+} ao íon Na^{+} (Tagami *et al*., 2001). Assim, em trocas dinâmicas, soluções muito concentradas devem ser utilizadas para favorecer a troca reversa de apenas um íon Cr^{3+} por 3 íons Na^{+}.

Dessa forma, o estudo dos ciclos troca/regeneração permite determinar o comportamento do sistema de troca iônica, uma vez que a concentração da solução de regeneração do leito pode alterar a eficiência da troca reversa e, assim, diminuir a vida útil do trocador. Portanto, o objetivo do presente trabalho foi o de estudar a influência da concentração da solução de regeneração na troca iônica dinâmica de cátions cromo em zeólitas NaY em leito fixo.

Material e métodos

Material

A composição química da cela unitária, em base seca, da zeólita NaY é $Na_{51}(AlO_2)_{51}(SiO_2)_{141}$. Essa zeólita apresenta uma capacidade de troca catiônica teórica (*CTC*) de 3,9 meq/g. A fim se de obter a forma homoiônica sódica, a zeólita de partida foi posta em contato com uma solução 1 mol/L de NaCl a 60ºC por quatro vezes, intercaladas com filtração, lavagem com 2 L de água deionizada quente e secagem em estufa. As amostras foram, então, peletizadas, moídas e peneiradas no diâmetro

médio de 0,180 mm e, finalmente, fluidizadas a fim de retirar os finos remanescentes (Barros *et al*., 2002).

A solução sintética de cromo foi preparada a partir de $Cr(NO_3)_3.9H_2O$ (P.A.). A concentração de 15 ppm de cromo foi baseada no teor encontrado no efluente de curtume após o tratamento de precipitação do despejo do fulão (Barros, 1996).

Para as soluções regenerantes foi utilizado o sal NaCl (P.A.) em concentrações de 0,1; 1,0 e 2,0 mol/L.

Unidade de troca iônica

Um esquema representativo da unidade de troca iônica é mostrado na Figura 1. A unidade de troca iônica era composta de uma coluna de vidro (0,9 cm x 30 cm), a qual suportava o leito fixo de zeólita intercalado por leitos de esferas de vidro. Antes de se iniciarem os ensaios, as amostras de zeólita foram novamente lavadas com água deionizada em fluxo ascendente até se verificar a ausência de bolhas de ar na coluna. O leito então se acomodava, e a coluna era completada com esferas de vidro. Para a obtenção das curvas de ruptura, uma corrida preliminar com 3 g de *pellets* de zeólita NaY, o que correspondeu a uma altura média de 10,4 cm, foi realizada a fim de se analisar os tempos de rutpura (t_b) e saturação da coluna. A partir daí, foi estimada a massa relativa a um tempo de operação até t_b de 3 horas, conforme o método descrito na seção "Projeto de colunas de troca iônica". A troca iônica com cromo foi seguida por 30min de lavagem com água deionizada e 3 horas de regeneração, completando-se, assim, um ciclo de troca/regeneração. Tanto nas etapas de troca, lavagem e regeneração foram utilizadas a vazão de 9 mL/min, como sugerido em Barros *et al.* (2001). Para cada concentração de solução regeneradora foram realizados 5 ciclos.

Amostras na saída da coluna foram tomadas em intervalos regulares de tempo e as concentrações de cromo determinadas por espectroscopia de absorção atômica, utilizando o equipamento Varian SpetrcAA-10 Plus. Todas as curvas de ruptura foram obtidas a partir da razão concentração final/concentração inicial pelo tempo de ensaio (C/C_o x t).

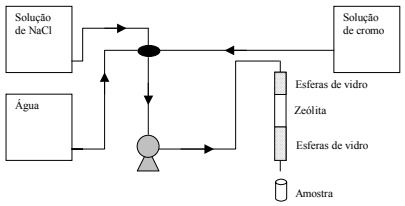


Figura 1. Unidade de troca iônica

Projeto de colunas de troca iônica

Para o levantamento do comportamento do leito, frente aos testes de troca/regeneração, foi necessário projetar a altura total do leito para um determinado tempo de operação (ponto de ruptura). Tal projeto baseia-se no comprimento da zona de transferência de massa (*ZTM*). O comprimento da *ZTM* é um parâmetro importante para o projeto da coluna, pois é um indicativo da porção do leito que não é utilizada efetivamente para a troca. Em casos extremos, a *ZTM* consegue ser maior do que a própria altura da coluna, inviabilizando o projeto. Conseqüentemente, observa-se a saída do cátion a ser removido logo no início da operação.

Geankoplis (1993) propôs um método simplificado para o cálculo do comprimento da *ZTM*. A capacidade total da coluna, se todo o leito atingisse a concentração C_o, pode ser apresentada como proporcional à área abaixo da curva ($1-C/C_o$). Em contrapartida, a capacidade utilizável da coluna refere-se à área abaixo da curva até o ponto de ruptura, que corresponde ao tempo de operação (t_b) da coluna em que a concentração na saída alcança um valor limite C_b. Dessa forma:

$$t_t = \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{C}{C_o}\right) dt \qquad (1)$$

sendo t_t o tempo relativo à capacidade total ou estequiométrica da coluna.

Para efeitos práticos, o limite superior da integral de t_t corresponde ao tempo para o qual o valor da razão C/C_o é superior a 0,975, chamado tempo de saturação (t_s). Analogamente a t_t , o tempo utilizável da coluna (t_u) refere-se ao tempo em que a concentração de saída atinge o ponto de ruptura. Então:

$$t_u = \int_0^{t_b} \left(1 - \frac{C}{C_o}\right) dt \qquad (2)$$

sendo t_b o tempo relativo ao ponto de ruptura.

A razão t_u/t_t é a fração da capacidade útil do leito. Dessa forma, o comprimento útil do leito (H_u) é dado por:

$$H_u = \frac{t_u}{t_t} H_t \qquad (3)$$

sendo H_t a altura total do leito.

Finalmente, a largura da *ZTM* pode ser calculada como:

$$ZTM = H_t - H_u \qquad (4)$$

Admitindo que a *ZTM* não se altera com a altura da coluna, ou seja, com a quantidade de trocador, é

possível projetar uma nova coluna a partir dos dados experimentais de uma curva de ruptura prévia. Portanto:

$$H_u^{novo} = \frac{t_u^{novo}}{t_u^{prévio}} H_u^{prévio} \quad (5)$$

e:

$$H_t^{novo} = H_u^{novo} + ZTM \quad (6)$$

Assim, pode-se obter a massa do trocador para a nova coluna pois:

$$m_{coluna}^{novo} = m_{coluna}^{prévio} \frac{H_t^{novo}}{H_t^{prévio}} \quad (7)$$

E, já que para as mesmas condições operacionais a *ZTM* não se altera, pode-se, finalmente, estimar o novo tempo de saturação da coluna como:

$$t_s^{novo} = \left(t_s^{prévio} - t_u^{prévio}\right) + t_u^{novo} \quad (8)$$

Resultados e discussão

Os resultados experimentais obtidos da curva de ruptura de cromo utilizando a massa de 3 g de zeólita NaY são apresentados na Figura 2.

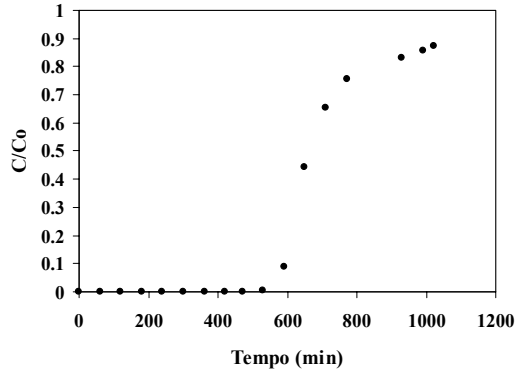


Figura 2. Curva de ruptura obtida a uma vazão de 9 mL/min para a troca iônica de cromo em leito fixo de 3 g de *pellets* de zeólita NaY de 0,180 mm de diâmetro

A partir desses resultados foi possível determinar o tempo de ruptura, que neste caso, corresponde ao tempo necessário para que a razão C/C_o = 0,05 seja alcançada na saída da coluna. Assim, o tempo de ruptura (t_b) para essa coluna foi de 575 min. O tempo para a saturação da coluna (t_s) foi de 1025 min. Com esses dados experimentais, foi possível calcular a altura útil do leito pela Equação 3 e a Zona de Transferência de Massa pela Equação 4. Os resultados obtidos foram os seguintes: H_u = 8,5 cm e *ZTM* = 1,6 cm. Esses resultados foram empregados para o projeto de colunas com um tempo de operação de três horas, empregadas para o estudo dos ciclos troca/regeneração (Figuras 3, 4 e 5). A massa de zeólita de 1,4 g, obtida para este tempo de operação, foi calculada pela Equação 7.

A Figura 3 apresenta os resultados de troca iônica dinâmica de cromo e as curvas de ruptura para a solução de regeneração 0,1 mol/L de NaCl.

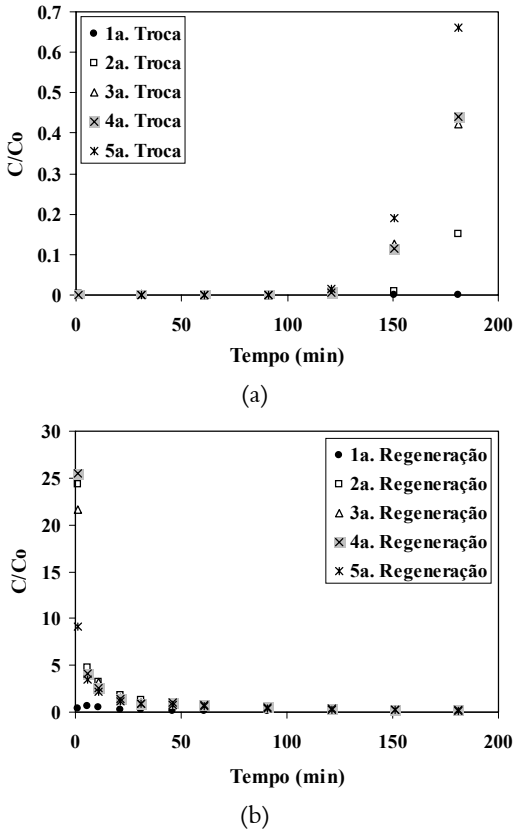
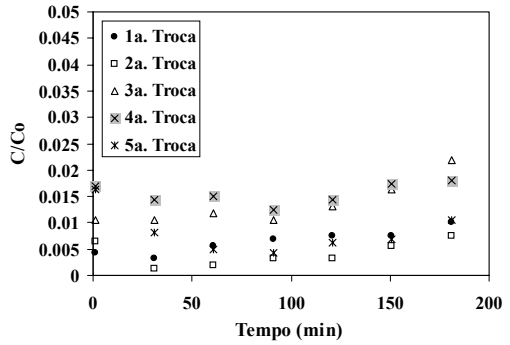


Figura 3. a) Curva de ruptura da zeólita NaY regenerada com 0,1 mol/L de NaCl. b) Regeneração da zeólita com 0,1 mol/L de NaCl.

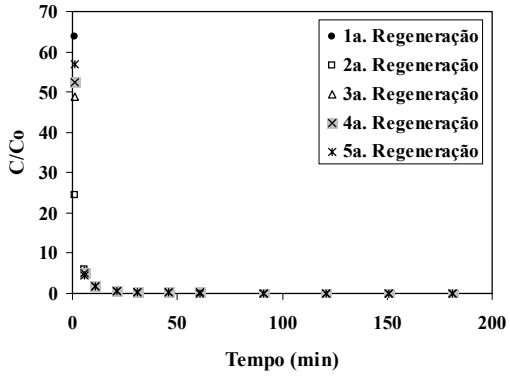
Pode-se verificar na Figura 3-a que o primeiro ciclo de troca apresentou concentrações de cromo na saída da coluna muito baixas, praticamente nulas. Isso está em conformidade com o pretendido a partir do projeto da coluna de troca para o tempo de operação de três horas. A partir desse primeiro ciclo notou-se um aumento progressivo da concentração de cromo na saída da coluna, com o tempo de troca direta. Isso se tornou mais acentuado nos últimos ciclos, mostrando uma rápida tendência à saturação do leito, principalmente depois da terceira troca, tendo, como conseqüência, perda da capacidade de retenção de cromo no leito. De fato, as curvas apresentadas na Figura 3-b, para uma concentração de 0,1 mol/L de NaCl, mostraram que a regeneração do leito foi

pequena ($C/C_{o\ máximo}$= 26) e realizada de maneira relevante nos primeiros 50 minutos de ensaio, indicando que a baixa concentração de sódio, presente na solução de regeneração, não conseguiu remover eficientemente o íon Cr^{3+}. Portanto, a partir do primeiro ciclo, verificou-se uma perda de capacidade de troca. Aparentemente, apenas os íons cromo localizados nas supercavidades da zeólita Y, que apresentam fácil acesso, devido a sua abertura de 7,4 Å, foram facilmente deslocados pelos íons sódio da solução regeneradora. É interessante notar, ainda, que a primeira troca reversa apresentou uma regeneração bastante baixa. Tal fato deve-se à grande dificuldade da remoção de Cr^{3+} por íons Na^{+} (Tagami *et al*., 2001) presentes em baixa concentração, principalmente para um leito que, após três horas de troca direta, não iniciou ainda a sua saturação, como é o caso da primeira troca, mostrada na Figura 3-a.

A Figura 4-a mostra os dados obtidos para as trocas que tiveram como solução de regeneração 1,0 mol/L de NaCl. Pode-se verificar que o aumento na concentração da solução regeneradora levou a ciclos de troca mais eficientes, pois a concentração de cromo na saída da coluna, após a troca direta, foi baixa (C/C_o < 0,05) e manteve-se assim durante todo o período de troca, como desejado.



(a)

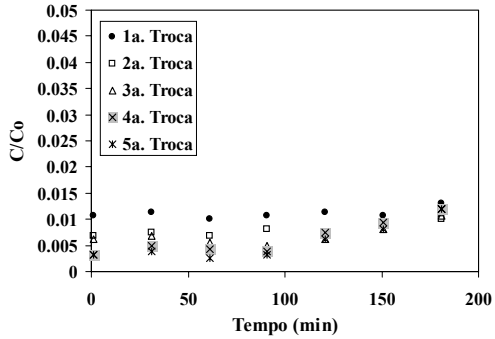


(b)

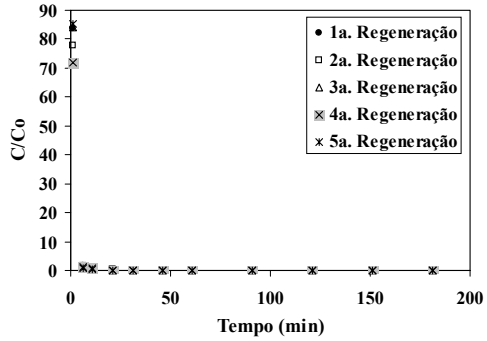
Figura 4. a) Corridas de troca iônica para solução de regeneração 1,0 mol/L de NaCl. b) Corridas de regeneração de 1,0 mol/L

A regeneração, com solução 1,0 mol/L de NaCl, apresentada na Figura 4-b, mostrou-se mais eficiente do que a observada para soluções menos concentradas (Figura 3-b), principalmente para o primeiro ciclo, o que reforça a importância da concentração de íons Na^{+} durante a regeneração. Verificou-se, ainda, que houve uma grande saída de íons cromo nos instantes iniciais de troca (C/C_o = 65), mesmo com as sucessivas regenerações. Esse comportamento indicou que concentrações elevadas de sódio foram necessárias para efetuar a troca dos cátions cromo presentes em todas as cavidades zeolíticas. Dessa forma, o leito praticamente readquiriu a sua capacidade de troca catiônica, prolongando a vida útil da zeólita. Além disso, observou-se que o tempo necessário para efetuar a regeneração também decresceu para 21 minutos.

Os resultados obtidos para as trocas iônicas, que utilizaram solução de regeneração ainda mais concentrada, como 2,0 mol/L de NaCl - Figura 5-a, mostraram um comportamento de troca semelhante àquele observado para o uso de solução de regeneração 1,0 mol/L de NaCl (Figura 4-a). Na Figura 5-a observa-se que a concentração de saída do cromo foi ainda mais baixa do que a dos ensaios anteriores, indicando que a coluna reteve mais íons e que a regeneração foi mais eficiente.



(a)



(b)

Figura 5. a) Corridas de troca iônica para solução de regeneração 2,0 mol/L de NaCl. b) Corridas de regeneração de 2,0 mol/L

De fato, as curvas de regeneração, apresentadas na Figura 5-b, mostraram um aumento na quantidade de cromo removida nos instantes iniciais de troca reversa (C/C_o = 85), diminuindo, portanto, o tempo necessário para a regeneração de 21 minutos, para os ensaios com NaCl 1,0 mol/L para 6 minutos, para os ensaios com NaCl 2,0 mol/L. Tal comportamento pode ser atribuído a uma troca mais eficiente, ocorrendo em todos os sítios presentes nas diferentes cavidades zeolíticas (supercavidades e cavidades sodalita), independentemente da dificuldade de acesso imposta pelas diferentes aberturas dos canais.

Portanto, dentre as condições investigadas, verificou-se que a solução de concentração de 2 mol/L de NaCl foi a que melhor regenerou a coluna, pois apresentou o menor tempo de operação, o que resultou na concentração do cromo em pequenos volumes de solução eluente. Além disso, verificou-se que, nessa condição de regeneração, não houve perda significativa da capacidade de remoção do cromo, conforme observado na Figura 5-a.

Na Figura 6 são apresentados os resultados da concentração do cromo na zeólita após cada ciclo de regeneração. O aumento da concentração da solução regeneradora fez diminuir a quantidade acumulada de cromo no leito. Desta forma, os resultados apresentados na Figura 6 ratificam que a condição de regeneração mais apropriada é a de NaCl com concentração de 2,0 mol/L.

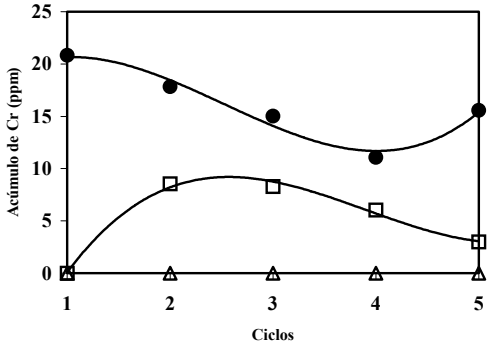


Figura 6. Acúmulo progressivo de cromo na zeólita em função do número de ciclos troca-regeneração, para diferentes concentrações de NaCl.(•) 0,1 mol/L; ( ) 1,0 mol/L; (Δ) 2□ mol/L

Conclusão

Os resultados obtidos mostraram que a concentração da solução de regeneração tem uma forte influência no processo de troca iônica de íons cromo em leito fixo utilizando-se zeólitas.

Verificou-se que foi necessária uma alta concentração de íons sódio para efetuar a troca de cátions cromo presentes em todas as cavidades zeolíticas.

A aplicação da solução de 2 mol/L de NaCl para as regenerações promoveu uma troca eficiente, sem acúmulo de cromo no leito. Além disso, a alta concentração de NaCl propiciou a diminuição do tempo necessário à regeneração da coluna, aumentando, portanto, a vida útil do leito e possivelmente diminuindo os custos de operação, sem causar perda da capacidade de troca da zeólita.

Referências

BARROS, M.A.S.D. *Remoção de Cr^{+3} de efluentes industriais e sintéticos por ação de clinoptilolita de ocorrência natural*. 1996. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 1996.

BARROS, M.A.S.D. *et al*. Ion exchange mechanism of Cr^{3+}on naturally occurring clinoptilolite. *Braz. J. Chem. Eng*., Campinas, v. 14, n.3, p.233-241, 1997.

BARROS, M.A.S.D. *et al*. Estimation of mass transport parameters for fixed-bed NaY. *In*: MERCOSUR CONGRESS ON PROCESS SYSTEMS ENGINEERING, 3., 2001, Santa Fe - Argentina. *Anais*... Santa Fe - Argentina: Conycet, 2001b. v. II, p.1111-1116.

BARROS, M.A.S.D. *et al*. Avaliação de parâmetros difusionais na troca iônica dinâmica de Cromo em zeólitas. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 14., 2002, Natal. *Anais em Cd-Rom*... Natal: UFRN, 2002, p. 1-4.

BRECK, D.W. *Zeolite molecular sieves*. Malabar-EUA: Robert E. Krieger Publishing Company, 1974.

COTTON, F.A.; WILKENSEN, G. *Advanced inorganic chemistry*. 5 ed. New York: John Wiley & Sons, 1988.

CUSTÓDIO, D.C. *et al*. Análise do Comportamento de Troca Catônica de Íons Cr^{+3} em Zeólitas NaY. *In*: ENCUENTRO LATINO AMERICANO DE INGENIERÍA QUÍMICA, 2., 1998, Antofagasta-Chile. *Anais*...Antofagasta-Chile: Universidad Católica del Norte, 1998. p. 294-301.

ECKENFELDER Jr., W.W. *Industrial water pollution control*. 3. ed. New York: McGraw Hill, 2000.

GEANKOPLIS, C.J. *Transport processes and unit operations*. 3. ed. Englewood Cliffs: PTR Prentice Hall, 1993.

GIANNETTO, G.P. *et al*. *Zeolitas características, propiedades y aplicaciones industriales*. Caracas: Ed. Innovación Tecnológica - Facultad de Ingeniería - UCV, 2000.

KEANE, M.A. The role of the alkali metal co-cation in the ion exchange of Y zeolite IV. Cerium ion exchange equilibria. *Microporous Materials*, Amsterdam, v. 7, p.51-59, 1996.

KOON, J.H.; KAUFMAN, W.J. Ammonia removal from municipal wastewaters by ion exchange. *Water Pollution Control Federation*, London, v. 47, n. 3, p.448-465, 1975.

McCABE, W.L. *et al*. *Unit operations of Chemical Engineering.* 6. ed. EUA: McGraw-Hill International Ed., 2001.

PANSINI, M. *et al*. Chromium removal from water by ion exchange using zeolite. *Desalination*, L'Aquila, v. 83, p.145-157, 1991.

PATTERSON, K.E. Traditional vs state-of-the-art methods of treating wastewaters containing heavy metals: a consultant's point of view. *Chemical Wastewater Treatment*, London, v. 73, p.384-389, 1977.

TAGAMI, L. *et al*. NaY and CrY zeolites ion exchange. Thermodynamic. *Acta Scientiarum*, Maringá, v. 23, n. 6, p.1351-1357, 2001.

WECKHUYSEN, B.M. *et al*. Quantitative diffuse reflectance spectroscopy study of Chromium-containing zeolites. *Zeolites,* Amsterdam, v. 14, p.450-457, 1994.

Received on October 09, 2002.
Accepted on November 08, 2002.