



ADSORÇÃO DO NEODÍMIO EM RESINA DE TROCA IÔNICA: ASPECTOS CINÉTICOS E DE EQUILÍBRIO

MORAIS, R.A.P.de¹, LADEIRA, A.C.Q.², LEÃO, V.A.³,

¹Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Rede Temática em Engenharia de Materiais (REDEMAT), Laboratório de Bio&Hidrometalurgia. e-mail: rafaela.apmorais@yahoo.com.br

²Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), Setor de Tecnologia Mineral (SETEM).

³Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Laboratório de Bio&Hidrometalurgia. e-mail: versiane@ufop.edu.br

RESUMO

Os Elementos de Terras Raras (ETR) compreendem os quinze elementos da série de lantanídeos, bem como o ítrio. Devido a demanda cada vez maior de ETR de alta pureza e de seus compostos, a purificação destes elementos tem ganhado cada vez mais atenção ao longo dos anos. Um dos métodos mais promissores para separar, purificar e pré-concentrar os ETR é a adsorção. Foram realizados ensaios para avaliar a influência do tempo de contato e concentração inicial de neodímio no processo de adsorção pela resina IR120Na. Observou-se que após 90 minutos de ensaio o carregamento se manteve constante. Os dados ajustaram melhor ao modelo cinético de pseudo-primeira ordem e ao modelo da isoterma de Langmuir. Os coeficientes angular e linear do gráfico $\ln k_L$ versus $1/T$ foram usados para estimar os valores de ΔH^0 , $-527,5\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$, e ΔS^0 , $1,9\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$. Assim, os valores de ΔG^0 para as temperaturas de 28°C , 40°C e 52°C foram obtidos, sendo respectivamente iguais a $-1092,6\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$, $-1115,1\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$ e $-1137,6\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$. Os valores negativos de ΔG^0 e ΔH^0 confirmaram que a adsorção do íon neodímio na resina IR120Na trata-se de um processo espontâneo e exotérmico.

PALAVRAS-CHAVE: Adsorção, Neodímio, Resina de troca iônica, Cinética, Isoterma.

ABSTRACT

The rare earth elements (REE) comprise the fifteen elements of the lanthanide series along with yttrium. Due to the increasing demand for high purity REE and their compounds, the purification of these elements has received increasing attention over the years. One of the most promising methods to separate, purify and preconcentrate REE is adsorption. It was observed that after 90 minutes of testing, the loading remained constant. The data were better described by the pseudo first order kinetic model and the Langmuir isotherm. The angular and linear coefficients of the plot $\ln k_L$ versus $1/T$ were used to estimate the values of ΔH^0 , $-527.5\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$, and ΔS^0 , $1.9\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$. Subsequently, the values of ΔG^0 for the temperatures of 28°C , 40°C and 52°C were determined as $-1092.6\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$, $-1115.1\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$ and $-1137.6\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$. The negative values of ΔG^0 and ΔH^0 suggested that the adsorption of the neodymium ion on the IR120Na resin is a spontaneous and exothermic process.

KEYWORDS: Adsorption, Neodymium, Ion exchange resin, Kinetics, Isotherm.

1. INTRODUÇÃO

Os elementos de terras raras (ETR) compreendem os quinze elementos da série de lantanídeos, bem como ítrio e escândio, e podem ser encontrados em mais de 250 minerais (JORDENS; CHENG; WATERS, 2013). As propriedades únicas destes metais, além de diversificar suas aplicações, fornecem a funcionalidade requerida a muitos componentes de alta tecnologia, tecnologias verdes e indústrias de materiais supercondutores de alta temperatura, baterias recarregáveis, carros híbridos, entre outros (GOLEV et al., 2014).

Devido a demanda cada vez maior dos ETR de alta pureza e de seus compostos, a purificação destes elementos tem ganhado cada vez mais atenção ao longo dos anos. Um dos métodos mais promissores para separar, purificar e pré-concentrar os ETR é a adsorção, pois trata-se de uma técnica simples de alta eficiência e ampla aplicação (ANASTOPOULOS; BHATNAGAR; LIMA, 2016).

Estudos cinéticos e de equilíbrio do Neodímio foram realizados utilizando diferentes adsorventes, como por exemplo: (i) microcápsulas de alginato magnético contendo o extratante P507, sendo que os dados se ajustaram bem ao modelo cinético de pseudo-segunda ordem e à isoterma de adsorção de Langmuir (ZHANG et al., 2011); (ii) compósitos de óxido de grafeno funcionalizado com calixareno - os melhores ajustes foram aos modelos de pseudo-segunda ordem e ao modelo de Freundlich (ZHANG et al., 2016) e (iii) um adsorvente com grupos funcionais organofosforados - os resultados foram modelados com sucesso usando o modelo de difusão nos poros (PARK; TAVLARIDES, 2010). Como exemplo de estudos de adsorção do íon Nd(III) em resina de troca iônica, pode-se citar Dave et al. (2010) e Kaur e Agrawal (2005) que utilizaram a resina Amberlite XAD-4, quimicamente modificada para adsorção e separação de La, Nd e Sm. Xiong et al. (2011) estudaram a adsorção e dessorção de Nd(III) na resina D113-III e observaram que os dados ajustaram-se bem ao modelo cinético de pseudo-segunda ordem e à isoterma de Langmuir. Baseado nos parâmetros termodinâmicos, os autores concluíram que o processo de adsorção foi espontâneo e endotérmico.

A partir destes estudos, o presente trabalho, teve como objetivo: (i) avaliar a influência do tempo de contato e da concentração inicial do íon Nd(III) no processo de adsorção na resina IR120Na e (ii) ajustar os dados obtidos aos modelos cinéticos de pseudo-primeira e pseudo-segunda ordem e aos modelos isotérmicos de Langmuir e Freundlich.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados empregando-se a resina de matriz poliestireno, fortemente ácida, Amberlite IR120Na. Essa resina tem uma forma esférica com uma matriz de copolímero de estireno-divinilbenzeno, tendo como grupo funcional o ácido sulfônico. A capacidade de troca é $\geq 2\text{eq.L}^{-1}$ e o tamanho médio de partícula está compreendido entre $600\mu\text{m}$ e $800\mu\text{m}$. Antes dos experimentos, a resina foi seca em uma estufa à 50°C por 24 horas e, posteriormente, armazenada em um dessecador. A fonte de neodímio foi o Nd_2O_3 , que foi solubilizado sob agitação utilizando ácido clorídrico concentrado (HCl) à 80°C até sua total dissolução.

2.1 Efeito do tempo de contato na adsorção do neodímio pela resina IR120Na

Os experimentos foram realizados em batelada. Verteu-se 0,1g da resina e 100mL da solução de íon Nd(III) ($240\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ e $\text{pH}_{\text{inicial}} 4\pm 0,1$) em um *erlenmeyer* de 250mL, posteriormente, transferindo para um *shaker* termostatizado (New Brunswick Scientific, modelo INNOVA 44) sob agitação de 130min^{-1} e mantido à temperatura de 28°C por períodos de tempo iguais a 15min, 30min, 45min, 60min, 90min, 120min, 180min, 300min, 480min e 1440min. Os ensaios foram realizados em duplicata e ao final de cada ensaio, a solução remanescente foi filtrada e encaminhada à análise química em um Espectrômetro de Emissão Óptica com fonte de Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES) (Varian®, modelo 725/ES).

As concentrações iniciais e finais de neodímio foram usadas no cálculo do carregamento da resina, de acordo com a equação 1:

$$q_t = (C_0 - C_t) \frac{V}{m_{\text{resina}}} \quad (1)$$

Em que, q_t é a carga de resina (mg/g) no tempo t ; C_0 e C_t são as concentrações (mg/L) em $t = 0$ e $t = t$, respectivamente; V é o volume da solução (L) e m_{resina} , a massa da resina (g).

Com base nos resultados, foi possível construir a curva de carregamento da resina em função do tempo de contato e ajustá-la aos modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem.

2.2 Efeito da concentração inicial do neodímio na adsorção pela resina IR120Na

O efeito da concentração inicial do íon Nd(III) na adsorção pela resina IR120Na foi estudado variando-se a concentração inicial do elemento em diferentes temperaturas a fim de obter as isotermas de adsorção. Os ensaios foram realizados vertendo-se 0,1g de resina em *erlenmeyers* e adicionando 100mL de solução de Nd_2O_3 com $\text{pH}_{\text{inicial}}$ igual a $4,0\pm 0,1$ em concentrações distintas. As concentrações iniciais foram equivalentes à $180\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $200\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $220\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $240\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ e $260\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ e as temperaturas estudadas foram 28°C , 40°C e 52°C . Todos os ensaios foram realizados em *shaker* termostatizado (New Brunswick Scientific, modelo INNOVA 44), sob agitação de 130min^{-1} e em temperatura constante, por 24 horas.

Os ensaios foram realizados em duplicatas, filtrados e as soluções remanescentes encaminhadas para análise química em um Espectrômetro de Emissão Óptica com fonte de Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES) (Varian®, modelo 725/ES). As concentrações iniciais e finais de neodímio foram usadas para determinar o carregamento da resina, utilizando a equação 1.

Os resultados obtidos permitiram a construção das isotermas e os respectivos ajustes aos modelos de Langmuir e Freundlich, bem como calcular os parâmetros termodinâmicos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Cinética de adsorção

Diversos modelos que descrevem a cinética de adsorção são descritos na literatura; por exemplo, nos trabalhos de Qiu et al. (2009) e Tran et al. (2017). A cinética de adsorção de neodímio por resinas fortemente ácidas pode ser descrita pela equação geral:

$$\frac{dq_t}{dt} = k(q_t - q_\infty)^a \quad (2)$$

A cinética de pseudo-primeira ordem é observada para $a = 1$, produzindo a equação 3 após a integração para as condições de contorno $t = 0$ até $t = t$ e $q_t = 0$ até $q_t = q_t$. O termo q_∞ é um parâmetro ajustável e k_1 é a constante de velocidade.

$$q_t = q_\infty(1 - e^{-k_1 t}) \quad (3)$$

Quando $a = 2$, a cinética de pseudo-segunda ordem é obtida, e após a integração para as condições de contorno $t = 0$ para $t = t$ e $q_t = 0$ para $q_t = q_t$ a equação 4 pode ser escrita, em que k_2 é a constante de velocidade.

$$q_t = \frac{k_2 q_\infty^2 t}{1 + k_2 q_\infty t} \quad (4)$$

A regressão não linear foi usada para ajustar as equações 3 e 4 aos dados experimentais (q_t), usando o *software* OriginPro 2018 para que os valores de k_1 , k_2 e q_∞ fossem determinados.

Os resultados, indicaram que o carregamento do íon pela resina aumentou com o decorrer do tempo e com menos de 30 minutos de ensaio, a concentração de neodímio no sistema foi reduzida em 50% do seus valores iniciais, indicando a disponibilidade imediata da superfície do adsorvente para a adsorção do íon (PARK; TAVLARIDES, 2010). Além disso, de acordo com os dados experimentais apresentados na Figura 1, foi possível observar também, que após 90 minutos de ensaio as concentrações em solução permaneceram inalteradas e o carregamento ($q_t = 185,6 \text{mg.g}^{-1}$), constante.

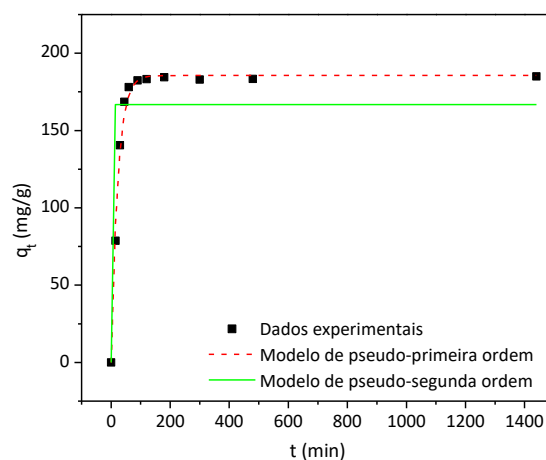


Figura 1: Influência do tempo de contato do íon Nd(III) no processo de adsorção ($m_{\text{res}} = 0,1\text{g}$; agitação = 130min^{-1} ; $V_{\text{sol}} = 100\text{mL}$; $T = 28^\circ\text{C}$; $\text{pH}_{\text{inicial}} = 4$; $[\text{Nd}]_{\text{inicial}} = 240\text{mg/L}$).

Além disso, como pode ser observado na Fig.1, os dados cinéticos experimentais foram ajustados por regressão não-linear aos modelos de pseudo-primeira e pseudo-segunda ordem, equações 3 e 4, respectivamente. Sendo possível obter as respectivas constantes de velocidade, na temperatura estudada, bem como os valores teóricos de carregamento (q_t) para cada modelo e comparar com o valor experimental, calculados através da Equação 1. Esses valores estão apresentados na Tabela 2.

Pode-se observar uma boa conformidade dos resultados obtidos com a equação do modelo de pseudo-primeira ordem. O valor do carregamento da equação desse modelo teve uma melhor aproximação ao valor experimental e o coeficiente de correlação foi maior do

que ao obtido para o modelo de pseudo-segunda ordem, sugerindo que a cinética é melhor representada por esse modelo. Já os dados obtidos por Xiong et al. (2011) que estudaram a adsorção do íon Nd(III) na resina D113-III (fracamente ácida) se ajustaram melhor ao modelo cinético de pseudo-segunda ordem. Essa mesma resina foi utilizada no estudo de Xiong et al. (2009) e os dados foram melhor ajustados ao modelo de pseudo-primeira ordem, consistentes com o presente trabalho. Outros autores também estudaram a adsorção do neodímio em diferentes adsorventes e os dados também se ajustaram melhor ao modelo de pseudo-segunda ordem. São exemplos Zhang et al. (2011), que estudaram a adsorção do Nd(III) em microcápsulas de alginato magnético contendo o extratante P507 e ZHANG et al. (2016), que realizaram o estudo em compósitos de óxido de grafeno funcionalizado com calixareno. Já Park e Tavlarides (2010), ao testar um adsorvente com grupos funcionais organofosforados, modelaram os dados experimentais à equação que descreve a difusão nos poros.

Tabela 1. Parâmetros cinéticos para o processo de adsorção do íon Nd(III) na resina IR120Na, obtidos na temperatura de 28°C, agitação 1300min⁻¹ e solução 240mg.L⁻¹.

$q_{e(\text{exp.})}$ (mg.g ⁻¹)	Modelo pseudo-primeira ordem			Modelo pseudo-segunda ordem		
	$q_{e(\text{calc.})}$ (mg.g ⁻¹)	k_1 (min ⁻¹)	R^2	$q_{e(\text{calc.})}$ (mg.g ⁻¹)	k_2 (g.mg ⁻¹ .min ⁻¹)	R^2
183	185,6	0,04474	0,992	166,7	-2,04453x10 ⁴⁴	0,679

4.2 Isotermas de adsorção

Foo e Hameed (2010) e Tran et al. (2017) citaram uma variedade de modelos de isotermas de equilíbrio que foram estudados ao longo dos anos. O presente trabalho ateu-se aos ajustes dos dados experimentais às equações de Langmuir e Freundlich por serem as mais comumente utilizadas. As formas não lineares dos modelos de Langmuir e Freundlich são descritas pelas equações 5 e 6, respectivamente:

$$q_e = \frac{q_{\max}K_L C_e}{1+K_L C_e} \quad (5)$$

Em que, q_{\max} (mg.g⁻¹) é a capacidade máxima de adsorção; C_e (mg.L⁻¹) é a concentração do soluto em equilíbrio; q_e (mg/g) é a quantidade do soluto adsorvido por grama de adsorvente no equilíbrio, e K_L (L.mg⁻¹) é uma constante relacionada à afinidade entre um adsorvente e o adsorvato.

$$q_e = K_F C_e^n \quad (6)$$

Em que, K_F (mg^{1-(1/n)}.g⁻¹.L^{1/n}) constante de capacidade de adsorção de Freundlich e n (adimensional) é o parâmetro de intensidade de Freundlich.

O efeito da concentração inicial do íon Nd(III) no processo de adsorção na resina IR120Na, em condições de equilíbrio, foi estudado variando-se a concentração inicial do elemento em diferentes temperaturas. Os resultados obtidos permitiram a construção das isotermas de equilíbrio, para as temperaturas estudadas, Figura 2, que foram ajustadas aos modelos de Langmuir e Freundlich, equações 5 e 6, utilizando a usando o *software* OriginPro 2018 cujo parâmetrossão apresentados na Tabela 2.

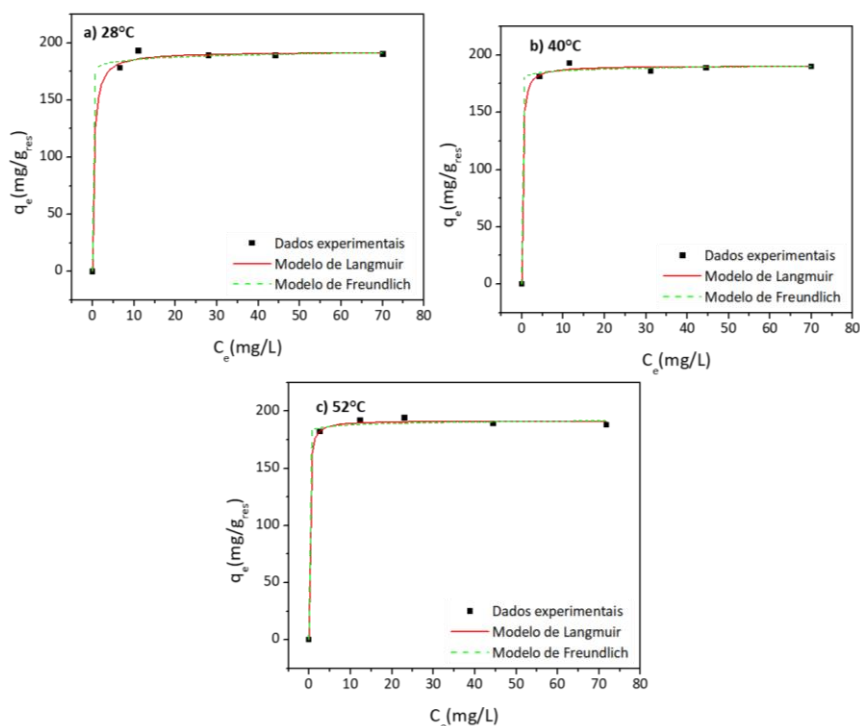


Figura 2. Isotermas de adsorção ($m_{res} = 0,1g$; agitação = $130min^{-1}$; $V_{sol} = 100mL$; $pH_{inicial} = 4$).

Foi constatado que ao aumentar a temperatura, não ocorreu alteração significativa na capacidade máxima de adsorção, que foi próximo à $189mg.g^{-1}$, como pode ser observado na Tab. 2. Observando os valores de R^2 e os valores de capacidade de adsorção, notou-se que a adsorção do íon se ajustou melhor ao modelo da isoterma de Langmuir do que ao modelo isotérmico de Freundlich. Comportamento similar foi reportado nos estudos de Zhang et al. (2011) e Xiong et al. (2011). Já no estudo de Zhang et al. (2016), os dados ajustaram-se melhor ao modelo de Freundlich. Segundo Xiong et al. (2011) o modelo de Langmuir assume que não há interação entre as moléculas do adsorvato e que a adsorção ocorre em uma monocamada.

Tabela 2. Parâmetros calculados para a isoterma de Langmuir e Freundlich.

Temperatura (°C)	$q_{e(exp.)}$ (mg/g)	Modelo de Langmuir			Modelo de Freundlich			
		q_{max} (mg/g)	K_L (L/mg)	R^2	K_F ($mg/mg^{1/n}.g.L^{1/n}$)	$1/n$	n	R^2
28	190	192,1	2,70	0,997	178,3	0,01654	60,46	0,996
40	189	190,4	5,41	0,998	181,5	0,01101	90,83	0,997
52	189	191,5	7,89	0,999	183,7	0,00963	103,84	0,997

4.3 Parâmetros termodinâmicos

Os parâmetros termodinâmicos, como energia livre de Gibbs (ΔG^0), entalpia (ΔH^0) e entropia (ΔS^0) associados ao processo de adsorção foram determinados pelas seguintes equações:

$$\ln k_L = \frac{\Delta S^0}{R} + \frac{\Delta H^0}{RT} \quad (7)$$

Onde R é a constante dos gases ($8,314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) e T é a temperatura (K).

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0 \quad (8)$$

Utilizando os parâmetros encontrados ao ajustar os dados ao modelo de Langmuir, foi possível traçar o gráfico $\ln k_L$ versus $1/T$, obtendo coeficiente de correlação de 0,95659 e os coeficientes angular e linear que foram usados para estimar os valores de ΔH^0 , $-527,5 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}$; e ΔS^0 , $1,9 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$, apresentados na Tabela 3. Os valores de ΔG^0 para as temperaturas de 28°C , 40°C e 52°C foram obtidos através da equação 8, sendo respectivamente iguais a $-1092,6 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}$, $-1115,1 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}$ e $-1137,6 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}$. Os valores negativos de ΔG^0 confirmam a espontaneidade do processo de adsorção com o aumento da temperatura. O valor também negativo de ΔH^0 sugere que a adsorção do íon neodímio na resina IR120Na é um processo exotérmico. Zhang et al. (2016), nos seus estudos termodinâmicos, utilizando compósitos de óxido de grafeno funcionalizado com calixareno, encontraram valores de ΔG^0 compreendidos entre $-7,31 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ e $-0,14 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ e de ΔH^0 , entre $+18,3 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ e $+30,82 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$. No trabalho desenvolvido por Xiong et al. (2011), empregando a resina D113-III, os valores de ΔG^0 variaram entre $-20,35 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ e $-17,55 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ e ΔH^0 foi igual a $+25,53 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$. Ambos estudos, apontaram que o processo de adsorção foi espontâneo e endotérmico.

Os resultados do presente trabalho estão condizentes com a literatura, visto que, geralmente, o processo de adsorção é um fenômeno exotérmico, com um decréscimo na entropia (BANSAL; GOYAL, 2005 apud ANASTOPOULOS; BHATNAGAR; LIMA, 2016).

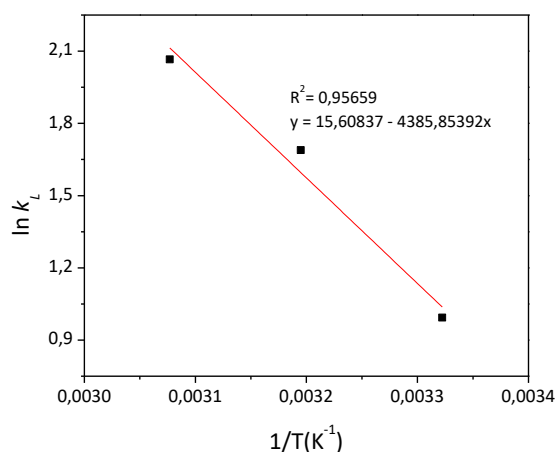


Figura 3. Gráfico $\ln k_L$ versus $1/T$

Tabela 3. Dados termodinâmicos calculados para adsorção do neodímio na resina IR120Na.

Temperatura ($^\circ\text{C}$)	ΔG^0 (J/mol)	ΔH^0 (J/mol)	ΔS^0 (J/mol)
28	-1092,6		
40	-1115,1	-527,5	+1,9
52	-1137,6		

4. CONCLUSÕES

Condições de equilíbrio da adsorção neodímio pela resina IR120Na à 28°C , foram alcançados após 90 minutos de ensaio. A cinética de adsorção foi melhor descrita pelo modelo

de pseudo-primeira ordem. As isotermas de adsorção se ajustaram ao modelo da isoterma de Langmuir. O aumento da temperatura não implicou em alteração significativa na capacidade de adsorção. Os coeficientes angular e linear do gráfico $\ln k_L$ versus $1/T$ foram usados para estimar os valores de ΔH^0 e ΔS^0 , e por fim foram encontrados os valores de ΔG para as temperaturas de 28°C, 40°C e 52°C. Tais resultados confirmam a espontaneidade do processo de adsorção com o aumento da temperatura e também sugeriram que a adsorção do íon neodímio na resina IR120Na é um processo exotérmico.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio financeiro das agências de fomento FINEP, FAPEMIG, CNPq e CAPES e à CAPES pela concessão da bolsa de mestrado.

6. REFERÊNCIAS

- ANASTOPOULOS, I.; BHATNAGAR, A.; LIMA, E. C. Adsorption of rare earth metals: A review of recent literature. **Journal of Molecular Liquids**, v. 221, p. 954–962, 2016.
- BANSAL, R. CHAND; GOYAL, M. **Activated Carbon Adsorption**. FL, USA: CRC press, Taylor & Francis, Boca Raton, 2005.
- DAVE, S. R.; KAUR, H.; MENON, S. K. Selective solid-phase extraction of rare earth elements by the chemically modified Amberlite XAD-4 resin with azacrown ether. **Reactive and Functional Polymers**, v. 70, n. 9, p. 692–698, 2010.
- FOO, K. Y.; HAMEED, B. H. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. **Chemical Engineering Journal**, v. 156, n. 1, p. 2–10, 1 jan. 2010.
- GOLEV, A. et al. Rare earths supply chains: Current status, constraints and opportunities. **Resources Policy**, v. 41, p. 52–59, 2014.
- JORDENS, A.; CHENG, Y. P.; WATERS, K. E. A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals. **Minerals Engineering**, v. 41, p. 97–114, 2013.
- PARK, H. J.; TAVLARIDES, L. L. Adsorption of neodymium(III) from aqueous solutions using a phosphorus functionalized adsorbent. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 49, n. 24, p. 12567–12575, 2010.
- QIU, H. et al. Critical review in adsorption kinetic models. **Journal of Zhejiang University-SCIENCE A**, v. 10, n. 5, p. 716–724, 2009.
- TRAN, H. N. et al. Mistakes and inconsistencies regarding adsorption of contaminants from aqueous solutions: A critical review. **Water Research**, v. 120, p. 88–116, 2017.
- XIONG, C. et al. Adsorption of erbium(III) on D113-III resin from aqueous solutions: batch and column studies. **Journal of Rare Earths**, v. 27, n. 6, p. 923–931, 2009.
- XIONG, C.; CHEN, X.; YAO, C. Enhanced adsorption behavior of Nd(III) onto D113-III resin from aqueous solution. **Journal of Rare Earths**, v. 29, n. 10, p. 979–985, 2011.
- ZHANG, L. et al. Adsorption and selective separation of neodymium with magnetic alginate microcapsules containing the extractant 2-ethylhexyl phosphonic acid mono-2-ethylhexyl ester. **Journal of Chemical and Engineering Data**, v. 56, n. 5, p. 2280–2289, 2011.
- ZHANG, P. et al. Calixarene-functionalized graphene oxide composites for adsorption of neodymium ions from the aqueous phase. **RSC Adv.**, v. 6, n. 36, p. 30384–30394, 2016.