

Remoção de benzeno e tolueno em solução aquosa por adsorção usando carvão ativado produzido a partir do lodo de esgoto

Removal of benzene and toluene from aqueous solution by adsorption using activated carbon produced by sewage sludge

DOI:10.34117/bjdv8n6-179

Recebimento dos originais: 21/04/2022

Aceitação para publicação: 31/05/2022

Jéssyca Kaenny de Andrade Bezerra

Mestre em Engenharia Química

Instituição: Universidade Federal do Rio grande do Norte

Endereço: Campus Universitário Lagoa Nova, CEP: 59078-970, Natal – RN, Brasil

E-mail: jessycakn@hotmail.com

Eduardo Lins de Barros Neto

Pós-doutorado em Engenharia Química

Instituição: Universidade Federal do Rio grande do Norte

Endereço: Campus Universitário Lagoa Nova, CEP: 59078-970, Natal – RN, Brasil

E-mail: eduardolbn@yahoo.com.br

Paula Fabiane Pinheiro do Nascimento

Doutorado em Engenharia Química

Instituição: Universidade Federal do Rio grande do Norte

Endereço: Campus Universitário Lagoa Nova, CEP: 59078-970, Natal – RN, Brasil

E-mail: Paula_fabiane@hotmail.com

Andrea de Oliveira Nunes

Pós-Doutorado em Engenharia Química

Instituição: Universidade Federal do Rio grande do Norte

Endereço: Campus Universitário Lagoa Nova, CEP: 59078-970, Natal – RN, Brasil

E-mail: andreaoliveira_n@hotmail.com

Magna Angélica dos Santos Bezerra Sousa

Doutorado em Engenharia Química

Instituição: Universidade Federal do Rio grande do Norte

Endereço: Campus Universitário Lagoa Nova, CEP: 59078-970, Natal – RN, Brasil

E-mail: magnelica@gmail.com

Marcia Maria Lima Duarte

Pós doutorado em Engenharia Química

Instituição: Universidade Federal do Rio grande do Norte

Endereço: Campus Universitário Lagoa Nova, CEP: 59078-970, Natal – RN, Brasil

E-mail: marciaduarte80@gmail.com

RESUMO

Os compostos monoaromáticos (BTEX) são substâncias tóxicas e cancerígenas que mesmo em pequenas quantidades prejudicam o meio ambiente e a saúde humana. Métodos de remoção desses contaminantes estão sendo estudados como forma de reduzir as altas concentrações presentes nos solos e águas subterrâneas. O objetivo deste trabalho é remover benzeno e tolueno de solução aquosa utilizando carvão ativado (AC) produzido a partir de lodo de esgoto. O AC foi preparado por ativação química com hidróxido de potássio (KOH), submetido ao tratamento térmico de pirólise em fluxo de nitrogênio a 100 mL.min⁻¹, à temperatura de 550°C, tempo de carbonização de 45 min e KOH:AC (peso %) proporção de impregnação de 0,5:1. Os estudos de adsorção foram realizados avaliando os efeitos da massa do adsorvente ($m = 0,08$ g), concentrações de benzeno e tolueno (50-200 ppm) e o tempo de contato entre o adsorvente e o adsorbato (0,25 a 30 min.). O equilíbrio de adsorção foi alcançado em 5 minutos e seguiu a cinética de pseudo-segunda ordem. O modelo de Freundlich foi adequado para o benzeno e o modelo de Langmuir para o tolueno. Em um sistema descontínuo, o AC adsorveu cerca de 75% de benzeno e 83% de tolueno. Já para um sistema contínuo, realizado em um reator de leito fixo, o AC obteve eficiência de remoção de 87% e 91% para os componentes benzeno e tolueno, respectivamente.

Palavras-chave: adsorção, compostos monoaromáticos, lodo doméstico, carvão ativado.

ABSTRACT

Monoaromatic compounds (BTEX) are toxic and carcinogenic substances that even in small dimensions harm the environment and human health. Methods of removal of these contaminants are being studied a way to reduce high concentrations present on soils and groundwater. The aim of this work is removed benzene and toluene from aqueous solution using activated carbon (AC) produced from sewage sludge. The AC was prepared by chemical activation with potassium hydroxide (KOH), submitted to the thermal treatment of pyrolysis in a nitrogen flow at 100 mL.min⁻¹, at a temperature of 550°C, carbonization time of 45 min and KOH:AC (wt%) impregnation ratio of 0.5:1. The adsorption studies were performed by evaluating the effects of the adsorbent mass ($m = 0.08$ g), benzene and toluene concentrations (50-200 ppm) and the contact time between the adsorbent and adsorbate (0.25 at 30 min.). Adsorption equilibrium was reached within 5 min and followed pseudo-second-order kinetics. Freundlich model was suitable for benzene and the Langmuir model for toluene. In a batch system, AC adsorbed about 75% benzene and 83% toluene. In a continuous system, performed in a fixed bed reactor, the AC achieved removal efficiency of 87% and 91% for benzene and toluene components, respectively.

Keywords: adsorption, monoaromatic compounds, sewage sludge, activated carbon.

1 INTRODUÇÃO

Os hidrocarbonetos monoaromáticos, tais como Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno, Xileno (BTEX), são frequentemente usados como solventes e encontrados em petróleo e gasolina. Estes componentes estão presentes em efluentes petroquímicos de forma que se introduzem no meio ambiente. No entanto, BTEX são substâncias tóxicas e cancerígenas

que em grandes quantidades apresentam impactos desfavoráveis ao meio ambiente e a saúde humana (Su et al. 2010; Nourmoradi et al. 2012)

O desenvolvimento de vários tratamentos e remediação dos solos e de águas subterrâneas contaminados pelo petróleo tem atingido um crescimento considerável nos últimos 25 anos. Apesar destes avanços, novas tecnologias e estudos ainda estão tentando lidar com os compostos BTEX localizados nas formações mais difíceis, como os aquíferos (Kambhu et al. 2012). Métodos de remoção destes contaminantes estão sendo estudados por condições anaeróbias, utilizando zeólita modificada e por adsorção em uma variedade de adsorventes e também por degradação bioeletroquímica (Daifullah and Girgis 2003; Costa et al. 2012; Vidal et al. 2012; Aleghafouri et al. 2015; Yang et al. 2020)

O carvão ativado (CA) é um dos adsorventes que predominam as aplicações, sendo o mais utilizado nas indústrias devido a sua grande afinidade com substâncias de caráter orgânico (Smith et al. 2009; Cabrini and Nardi 2020). O CA pode ser produzido de diversas maneiras, dependendo da matéria prima utilizada e da forma de ativação. As matérias primas podem ser: madeiras, endocarpo de coco, pó de arroz, bagaço de cana de açúcar, pó de café, lodo de ETE, etc (Aivalioti et al. 2012; Gu et al. 2013; Aleghafouri et al. 2015; Barros et al. 2020). A capacidade de adsorção do carvão pode ser mensurada através de modelos de isotermas de adsorção. Assim, utilizando-se de considerações e simplificações matemáticas, a isoterma de adsorção é uma relação entre a razão da quantidade de adsorvato por unidade de adsorvente e a concentração de equilíbrio do adsorvato na solução, à temperatura constante

A necessidade de tratar o esgoto urbano é fator importante para se manter a qualidade dos recursos hídricos e a saúde humana. O processo de tratamento do esgoto ocorre nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) e, como subproduto, gera-se um resíduo sólido conhecido como lodo. O gerenciamento do lodo é um problema contemporâneo de preocupação mundial, devido às grandes quantidades geradas de matéria por dia (Cao et al. 2013). Dispor o esgoto sem o adequado tratamento compromete a qualidade da água nas áreas urbanas, causando impacto na saúde da população, além de dificultar o atendimento de usos a jusante, como abastecimento humano, balneabilidade, irrigação, dentre outros. Atualmente no Brasil, 9,1 mil toneladas de esgoto são geradas por dia, desta quantidade, 1,7 mil toneladas são coletadas, porém não é destinado a nenhum tipo de tratamento e 2,4 mil toneladas são despejadas a céu

aberto, correspondendo, assim, a 45% da população sem qualquer tipo de tratamento adequado (Esgotos et al. 2017).

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a eficiência de remoção do benzeno e do tolueno em solução aquosa por adsorção, utilizando como adsorvente o carvão proveniente do lodo de uma Estação de Tratamento de Efluentes local (ETE)

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 CARVÃO ATIVADO – ADSORVENTE

O carvão utilizado como adsorvente foi obtido a partir do lodo da ETE da UFRN. Para o preparo do carvão, primeiramente foi impregnado com KOH (pó) com pureza de 85 % na proporção de 0,5 (relação KOH/Lodo). A mistura foi alimentada em um forno mufla a 550°C na vazão de 100 ml.min⁻¹ durante 45 minutos. O carvão produzido foi ativado com HCl 6M na temperatura de 75°C sob agitação por cerca de 2 horas. Em seguida, foi filtrado e lavado com água quente a 90°C para retirada do excesso de acidez. O carvão produzido foi seco em estufa, a 110°C por 24 horas para finalizar o processo de ativação, metodologia proposta por (Bezerra et al. 2019).

2.2 CINÉTICA DE ADSORÇÃO

Os ensaios cinéticos foram realizados em erlenmeyers contendo 80 mg do material adsorvente (CA) e 50 mL da solução de benzeno e tolueno a 150 mg.L⁻¹ agitados no *Shaker* Tecnal modelo TE-420 à 150 rpm, a uma temperatura de 27 °C e sem ajuste de pH. Alíquotas de 10 mL foram coletadas nos tempos de: 0,25; 0,5; 0,75; 1; 2; 5; 10; 20; 30 e 40 min, e imediatamente analisadas pelo espectrofotômetro de absorção atômica. Os experimentos foram realizados em duplicata.

O cálculo da remoção de ambos os compostos foi efetuado pelo rendimento do processo a partir da Equação (1):

$$\% \text{ remoção} = \frac{C_o - C_{eq}}{C_o} \times 100 \quad (1)$$

Em que, C_o é a concentração inicial (mg.L⁻¹) e C_{eq} é a concentração no equilíbrio (mg.L⁻¹).

Os dados experimentais obtidos a partir do estudo cinético foram ajustados aos modelos pseudo-primeira-ordem a partir da equação de Lagergren (Equação 2) e a equação pseudo-segunda-ordem linearizada, proposta por Ho e McKay (1999) (Equação 3).

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 t \quad (2)$$

sendo k_1 a constante de velocidade do modelo pseudo primeira ordem em min^{-1} , q_e a concentração de adsorvato no adsorvente no equilíbrio em mg.g^{-1} e q_t a concentração de adsorvato no adsorvente no tempo t em mg.g^{-1} .

$$\frac{t}{q_t} = \frac{t}{q_e} + \frac{1}{k_2 q_e^2} \quad (3)$$

em que k_2 é a constante de velocidade do modelo pseudo segunda ordem, em $\text{g.mg}^{-1}\text{min}^{-1}$.

2.3 ISOTERMA DE ADSORÇÃO

Nos estudos para a isoterma de adsorção foram usados soluções de benzeno e tolueno nas concentrações iniciais de 50-200 mg.L^{-1} . O procedimento experimental foi realizado no *Shaker* Tecnal modelo TE-420 a 27 °C com agitação a 150 rpm, em erlenmeyers contendo 80 mg de carvão e 50 mL de solução, sendo retiradas alíquotas de 10 mL após 20 min, de forma a garantir o equilíbrio, e imediatamente analisadas pelo espectrofotômetro de absorção atômica a um comprimento de onda de 222,6 nm. Os experimentos foram realizados em duplicata.

A isoterma de adsorção é uma relação entre a razão da quantidade de adsorvato por unidade de adsorvente e a concentração de equilíbrio do adsorvato na solução, à temperatura constante. A quantidade adsorvida do sólido foi calculada pelo balanço de massa expresso pela Equação (4).

$$q = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad (4)$$

Em que q é a quantidade adsorvida (mg.g^{-1}), C_0 é a concentração inicial do cobre na solução (mg.L^{-1}), C_e é a concentração do cobre na solução no equilíbrio (mg.L^{-1}), V é o volume da solução (L) e m é a massa do adsorvente (g).

Os dois modelos de isotermas testados nesse estudo para verificar qual deles melhor descreve o equilíbrio de adsorção são: as equações de Langmuir (1918) e Freundlich (1906) que são tipicamente representadas pelo grupo de isotermas de dois parâmetros.

A isoterma de Langmuir é representada pela Equação (5):

$$q = \frac{q_m K_L c}{1 + b c} \quad (5)$$

Em que q é a concentração da fase adsorvida, q_m é o limite de saturação, ou seja, a capacidade máxima que pode ser adsorvida, K_L é um parâmetro de afinidade adsorvente-adsorbato

Os parâmetros de Langmuir podem ser expressos em termos de um fator de separação adimensional (R_L), avaliando a forma da isoterma, sendo definido pela Equação (6):

$$R_L = \frac{1}{(1 + K_L C_0)} \quad (6)$$

O valor o fator de separação (R_L) indica a forma da isoterma, se $R_L > 1$: Isoterma Desfavorável, $R_L = 1$: Isoterma Linear, $0 < R_L < 1$: Isoterma Favorável, $R_L = 0$: Isoterma Irreversível.

O modelo de Freundlich é bastante geral, pois admite que o calor de adsorção varie exponencialmente com a fração de cobertura superficial. A isoterma é dada pela Equação (7):

$$q = K_F \cdot c^{1/n} \quad (7)$$

Em que, K_F e n são os parâmetros isotérmicos, respectivamente, indicadores da capacidade de adsorção e da intensidade de energia de adsorção.

2.4 ADSORÇÃO EM COLUNA

Os dados experimentais em coluna de leito fixo são representados por curvas de ruptura. O procedimento experimental para determinação da curva de “Breakthrough” foi realizado em uma coluna de vidro de comprimento de 30 cm e diâmetro de 1,37 cm preenchida com a amostra de carvão ativado em uma altura de leito fixo de 1 cm com uma massa correspondente a 0,3g. O fluxo descendente de efluente foi de 8 mL.min⁻¹, controlada por uma válvula mecânica. Os efluentes contendo os contaminantes (benzeno e tolueno) foram preparados nas concentrações de 100 mg.L⁻¹. Em seguida, foi realizado o escoamento do efluente no sistema, coletando amostras a cada 20 mL que foram imediatamente analisadas no espectrofotômetro UV/VIS. A remoção de benzeno e tolueno foi calculada de acordo com Eq.(2).

Os modelos empíricos, como: modelo de Thomas e o modelo de Yoon-Nelson, foram analisados. O modelo de Thomas é o mais utilizado. Não assume dispersão axial e é baseado na cinética de adsorção-dessorção de Langmuir. A forma não linear da equação é expressa pela Eq. (8).

$$\frac{C_t}{C_0} = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{K_{TH}qX}{Q} - K_{TH}C_0t\right)} \quad (8)$$

Em que C_t é a concentração do adsorvato na saída do leito (mg mL⁻¹), C_0 é a concentração inicial do adsorvato (mg mL⁻¹), q é a capacidade máxima de adsorção coluna (mg.g⁻¹), Q é a vazão do fluido (ml.min⁻¹) e X é a massa do adsorvente (g), t é o tempo (min) e K_{TH} é o coeficiente cinético do modelo de Thomas (L. min⁻¹. mg⁻¹).

O modelo de Yoon-Nelson prediz a adsorção e neutralização do adsorbato utilizando carvão ativado. É baseado na suposição de que a taxa de adsorção do adsorbato é proporcional à concentração de adsorbato no tempo de ruptura. O modelo linearizado é expresso pela Eq. (9).

$$\ln\left(\frac{C_t}{C_0 - C_t}\right) = K_{YN} \cdot (t - \tau) \quad (9)$$

Em que, τ é o tempo onde $C/C_0 \cong 0,5$ e K_{YN} é o coeficiente cinético do modelo (min⁻¹).

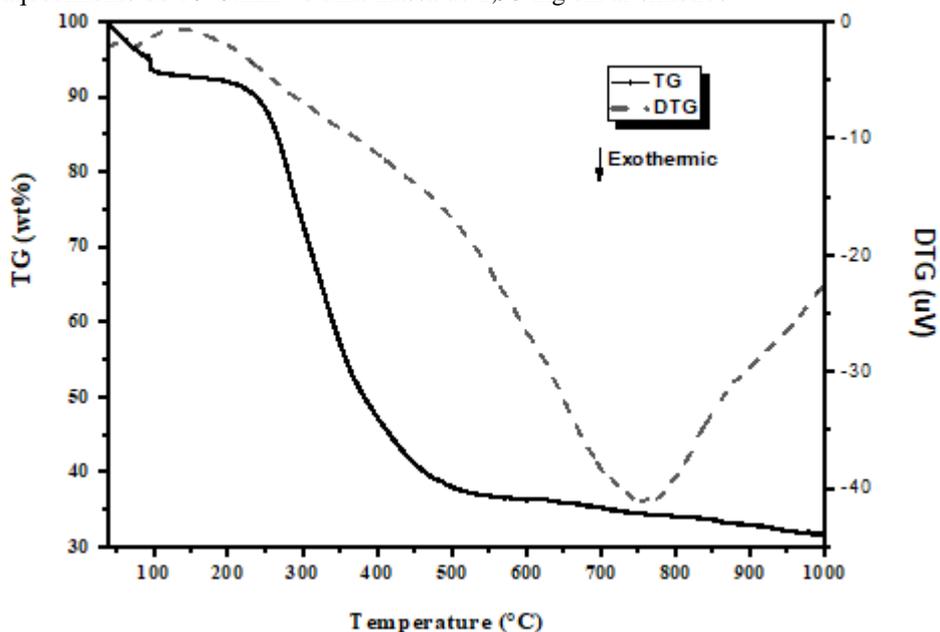
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 PRODUÇÃO CARVÃO ATIVADO

A Figura 1 mostra a análise térmica (TG/DTG) do lodo. Segundo Bezerra et al., (2019) foi observado que o primeiro evento aconteceu em torno de 39 °C e 100 °C, ocorrendo em função da evaporação da água presente no lodo, evento este apresentando um pico endotérmico como visto na curva DTG. A segunda perda de massa está associada ao evento ocorrido entre 100-250 °C, ocorrendo em função da degradação dos materiais orgânicos presentes na estrutura, como os compostos semivoláteis (Cao et al., 2013; Zuo et al., 2014). O terceiro evento em 250-500 °C apresenta uma maior variação na perda de massa e esta fase pode ser atribuída à decomposição dos polímeros orgânicos presentes na amostra. A última etapa (500-1000 °C) acompanhada de um pico exotérmico corresponde à fração de materiais não degradáveis, como celulose ou similares, que se decompõem a temperaturas elevadas, assim como a maioria das impurezas e cinzas (Magdziard & Werle, 2014).

A amostra de lodo resultou em uma perda de massa de aproximadamente 65%. Esta perda de massa pode ser explicada pela metodologia usada, no qual durante o processo de calcinação ocorreu a eliminação dos reagentes orgânicos (Tian et al., 2013).

Figura 1– Análise termogravimétrica (TG) e análise térmica diferencial (DTG) do material precursor (lodo). Taxa de aquecimento de 10°C.min⁻¹ e uma massa de 2,93 g em ar sintético.



3.2 CINÉTICA DE ADSORÇÃO

A Figura 3 mostra os resultados obtidos no estudo da cinética de adsorção. Foi observado uma rápida remoção dos contaminantes provocada pela difusão na camada limite. A velocidade de remoção diminuiu pela influência da difusão interna, ocasionada pela difusão das partículas do soluto nos poros e capilares da estrutura do CA. Em 5 minutos o sistema atingiu o equilíbrio, com saturação máxima do adsorvente apresentando um percentual de remoção de aproximadamente 74% para o benzeno e 82% para o tolueno. A capacidade de adsorção foi $64,25 \text{ mg.g}^{-1}$ para o benzeno e $75,34 \text{ mg.g}^{-1}$ para o tolueno como mostra a Tabela 2. A massa molecular dos compostos monoaromáticos influenciam no processo de adsorção. O tolueno apresentou maior quantidade adsorvida do que o benzeno devido a diferença de massa molecular entre eles, comportamento observado por Su et al (2010) e Simantiraki et al. (2013). As constantes de velocidade (K_1 e K_2) descritas na Tabela 2 foram determinadas pelo coeficiente angular na Equação (3) e (4), respectivamente.

Figura 2 – Cinética de adsorção em termos de % de remoção do benzeno e tolueno *versus* tempo de adsorção (T=27 °C, 150 rpm e m=0,08 g de CA)

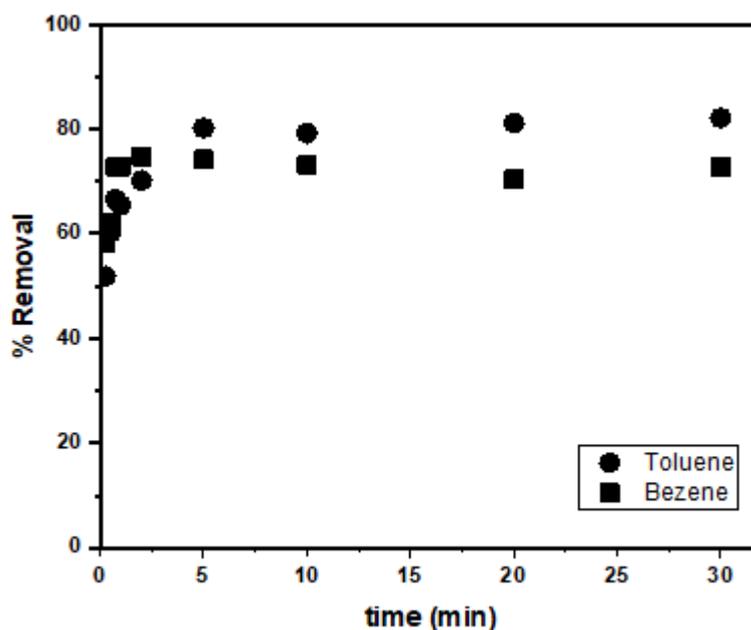


Tabela 1 – Parâmetros cinéticos dos modelos pseudo primeira ordem e pseudo segunda ordem para a remoção de benzeno e tolueno

Compostos	q_{exp}	Pseudo 1ª Ordem			Pseudo 2ª Ordem		
		K_1	q_{cal}	R^2	K_2	q_{cal}	R^2
Benzeno	64,83	3,8116	52,32	0,9294	2,1452	62,38	0,9996
Tolueno	75,15	3,5897	34,42	0,9503	0,0864	73,56	0,9896

Os dados experimentais foram ajustados aos modelos de pseudo primeira ordem (Eq.(3)) e pseudo segunda ordem (Eq.(4)). As Figuras 3 e 4 mostram os ajustes aos dados obtidos para o benzeno e tolueno, respectivamente. Em ambos, o pseudo segunda ordem melhor descreveu os dados experimentais. Este modelo é empírico, não apresentando significado físico, contudo, é um modelo adequado para descrever o processo de adsorção proposto (Stahelin, 2015).

As curvas cinéticas relatam o aumento da quantidade das moléculas de benzeno e tolueno aderidos a superfície do carvão ativado, conseqüentemente, diminuindo a concentração dos poluentes na fase líquida. Rápidas cinéticas de adsorção foram obtidas atingindo um tempo de equilíbrio em até 5 minutos de contato entre o adsorvente e o adsorvato.

Figura 3 – Ajustes do modelo cinético pseudo primeira ordem e pseudo segunda ordem para o benzeno

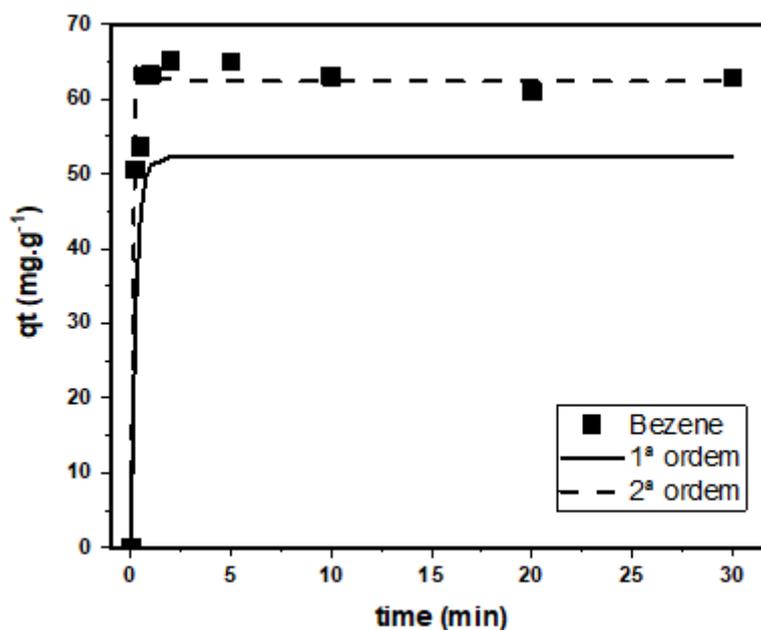
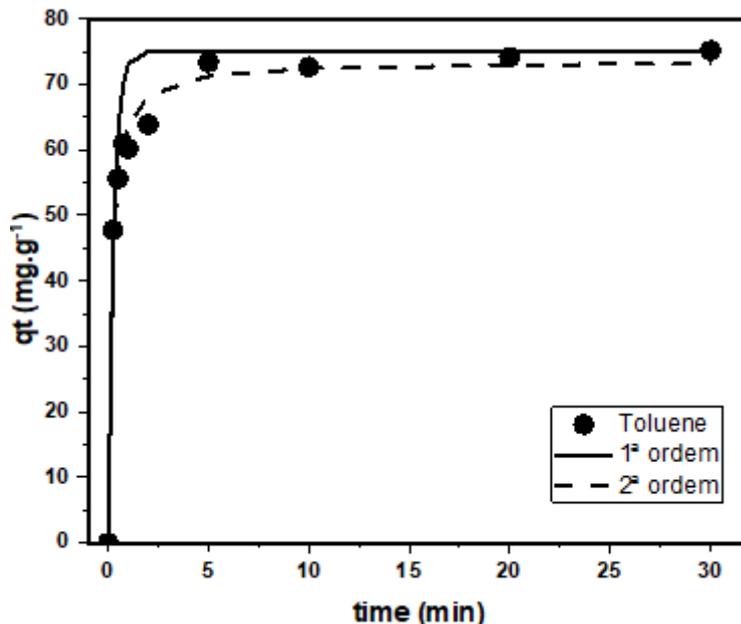


Figura 4 - Ajustes do modelo cinético pseudo primeira ordem e pseudo segunda ordem para o tolueno



3.3 ISOTERMA DE ADSORÇÃO

As isotermas de adsorção permitem analisar as quantidades adsorvidas de benzeno e tolueno na superfície do carvão ativado (q_e) em função da concentração de equilíbrio na fase líquida (C_e). Os dados experimentais do benzeno (Figura 5) e do tolueno (Figura 6) foram ajustados pelo modelo de Langmuir e Freundlich. Os parâmetros determinados estão dispostos na tabela 2.

O fator de separação adimensional (R_L), calculado pela Eq. (6) determina uma isoterma favorável para o mecanismo de adsorção do benzeno e tolueno utilizando o carvão ativado produzido pelo lodo, observado pela alta capacidade máxima adsorvida obtida pelo modelo Langmuir-Freundlich de $149,25 \text{ mg.g}^{-1}$ e $109,89 \text{ mg.g}^{-1}$ para o benzeno e tolueno, respectivamente, indicando uma elevada afinidade dos componentes com o CA.

Analisando os fatores de correlação (R^2) para o benzeno e tolueno aos modelos aplicados foi observado que o modelo de Freundlich melhor se ajustou aos dados experimentais do benzeno e o modelo de Langmuir melhor se ajustou aos dados experimentais do tolueno. Os resultados dos ajustes do equilíbrio indicam a existência de sítios ativos diferenciados na superfície do CA analisado. Para o benzeno pode-se concluir que a superfície do adsorvente é heterogênea, por apresentar melhor ajuste ao modelo de Freundlich. Os dados experimentais obtidos no mecanismo de adsorção do tolueno, caracteriza-se uma interação considerando a superfície da fase sólida homogênea, a

energia de adsorção constante e a não existência de interação entre moléculas adsorvidas nos sítios vizinhos. Em consequência, foi observado concentrações no equilíbrio mais baixas do que no benzeno (Vidal et al., 2012).

Aleghafouri et al. (2015) nos seus estudos de remoção de BTEX em soluções aquosas de dietalonamina usando carvão ativado comercial apresentou para o benzeno um melhor ajuste ao modelo de Freundlich. Nourmoradi et al. (2012) também apresentou um melhor ajuste dos dados experimentais ao modelo de Freundlich em seus estudos de remoção de BTEX em solução aquosa por Montmorillonite modificada com surfactante não iônico.

Figura 5 – Isotermas de adsorção para o benzeno ajustadas aos modelos de Langmuir e Freundlich (T = 27 °C, 150 rpm e m = 0,08 g)

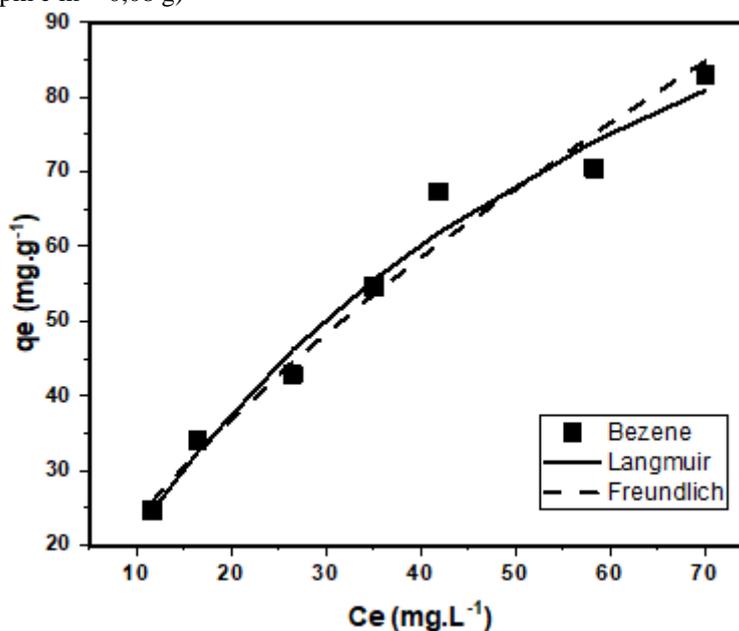


Figura 6 – Isotermas de adsorção para o tolueno ajustadas aos modelos de Langmuir e Freundlich (T = 27 °C, 150 rpm e m = 0,08 g)

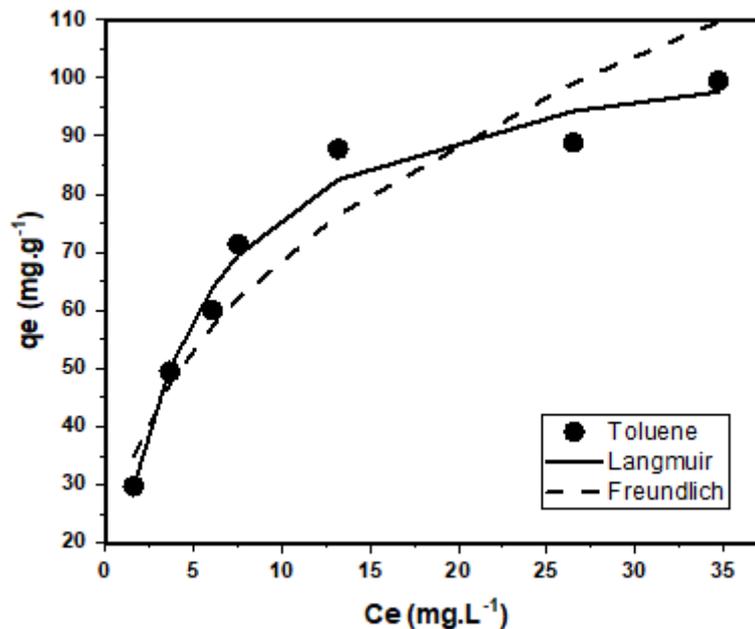


Table 2 - Adjustments of the parameters obtained from the Langmuir and freundlich models for benzene and toluene.

Compostos	Modelos	Parâmetros	Fator de correlação (R ²)
Benzeno	Langmuir	q _{máx} (mg.g ⁻¹)	149,25
		K _L	0,0169
		R _L	0,5311
	Freundlich	n	1,5
		K _F	5,0835
Tolueno	Langmuir	q _{máx} (mg.g ⁻¹)	109,89
		K _L	0,2281
		R _L	0,081
	Freundlich	n	2,68
		K _F	29,2126

3.4 CURVA DE RUPTURA – ADSORÇÃO EM COLUNA

A curva de ruptura é uma expressão gráfica da habilidade do adsorvente em adsorver os contaminantes em um determinado intervalo de tempo. É um estudo realizado em uma coluna de leito fixo. Os dados experimentais foram descritos pelos modelos de Thomas (Eq.(8)) e Yoon-Nelson (Eq.(9)). As Figuras 7 e 8 ilustram o comportamento das curvas de ruptura para o benzeno e o tolueno. Eles mostram a predição do modelo comparado aos dados experimentais. O tempo de ruptura é um dos fatores mais

importantes para determinar condições ótimas de operação em um processo de adsorção, podendo ser determinado utilizando-se das expressões gráficas. Contudo, é possível observar que quando as concentrações são muito baixas, torna-se difícil o uso das curvas experimentais para determinação do tempo de ruptura (Aleghafouri et al.,2015).

O benzeno e o tolueno apresentaram um limite de saturação para um sistema a uma vazão de 8 mL.min⁻¹ de 10 min e 17 min, respectivamente. Evidentemente, conforme mostra as Figuras 8-9 o tolueno apresentou maior remoção em relação ao benzeno, em um percentual de remoção de 86,3% para o benzeno e 91,4% para o tolueno. O comportamento observado ao tolueno é atribuído a diferença de massa molecular entre o benzeno, em que quanto maior a massa molecular maior a afinidade entre os sítios disponíveis no CA, em consequência, o tolueno por apresentar uma maior massa molecular, apresenta um maior percentual de remoção. Mohan et al. (2009) em seu trabalho de adsorção de tolueno usando carvão ativado granulado obteve uma remoção de 90% usando uma vazão de 60 mL.min⁻¹ em 8,5 h com uma altura de leito de 3 cm.

Figura 7 – Curva de ruptura do benzeno ajustadas aos modelos de Thomas e Yoon-Nelson (T=27°C, h=1 cm, m= 0,3 g, Q = 8mL.min⁻¹)

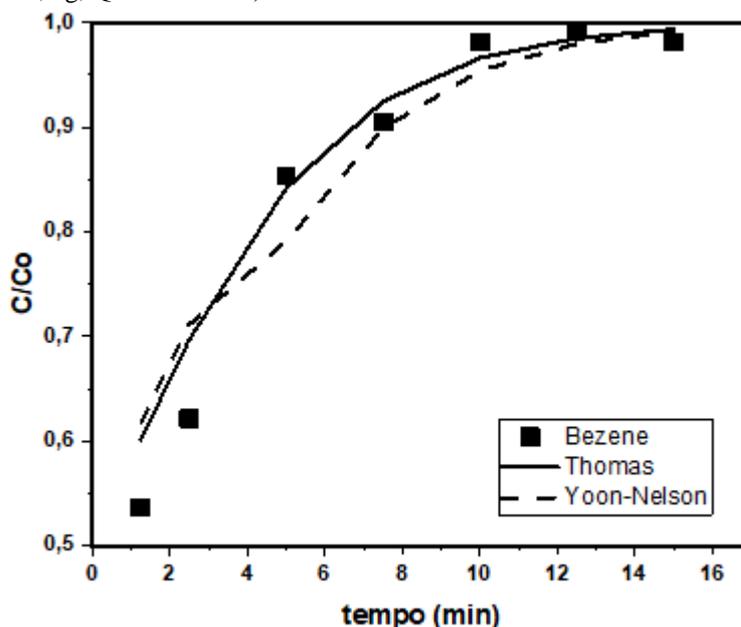
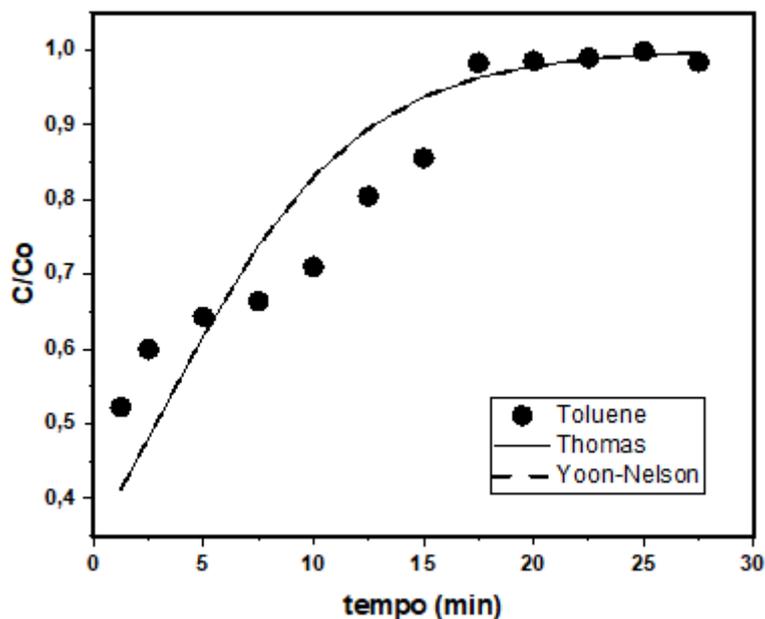


Figura 8 – Curva de ruptura do tolueno ajustadas aos modelos de Thomas e Yoon-Nelson ($T=27^{\circ}\text{C}$, $h=1\text{ cm}$, $m=0,3\text{ g}$, $Q = 8\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$)



4 CONCLUSÃO

O carvão ativado produzido a partir do lodo foi avaliado na remoção monocomponente dos compostos monoaromáticos benzeno e tolueno. O estudo da cinética de equilíbrio mostrou resultados satisfatórios em apenas 5 minutos de contato do CA com os contaminantes, removendo 74% de benzeno e 82% de tolueno. Ambos apresentaram um melhor ajuste ao modelo cinético pseudo segunda ordem. Avaliando o estudo das quantidades adsorvidas no processo, o modelo de Freundlich melhor descreveu os dados do benzeno, enquanto o modelo de Langmuir se ajustou aos dados experimentais do tolueno. Na adsorção em coluna, os dados foram ajustados ao modelo de Thomas e Yoon-Nelson e o tolueno, novamente, obteve uma maior remoção em comparação ao benzeno atingindo uma remoção de aproximadamente 86% e 91% para o benzeno e tolueno, respectivamente.

Este trabalho contribui para os estudos que viabilizam a reutilização de resíduos como o lodo de esgoto para promover a minimização da contaminação água pelos compostos monoaromáticos, permitindo novas possibilidades de remoção por adsorção de componentes tóxicos, diante dos grandes prejuízos causados ao meio ambiente e a saúde humana.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Cnpq), pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

Aivalioti M, Pothoulaki D, Papoulias P, Gidarakos E (2012) Removal of BTEX, MTBE and TAME from aqueous solutions by adsorption onto raw and thermally treated lignite. *J Hazard Mater* 207–208:136–146. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.04.084>

Aleghafouri A, Hasanzadeh N, Mahdyarfar M, et al (2015) Experimental and theoretical study on BTEX removal from aqueous solution of diethanolamine using activated carbon adsorption. *J Nat Gas Sci Eng* 22:618–624. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.01.010>

Barros JMHF, Correia LF, Marinho AF, et al (2020) Utilização Da Casca De Amendoim Como Adsorvente Na Remoção Do Corante Azul De Metileno / Use of Peanut Shell As Adsorbent in Removing the Methylene Blue. *Brazilian J Dev* 6:65459–65474. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n9-105>

Bezerra JKA, Lopes RPF, Barros Neto EL, et al (2019) Removal of Cu (II) in aqueous solution by adsorption using activated carbon produced from sewage sludge. *Rev Virtual Quim* 11:1934–1948. <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20190135>

Cabrini MP, Nardi MCC (2020) Produção De Biocarvão De Resíduos De Laranja Aplicado Como Adsorvente No Tratamento De Águas Contaminadas Com O Corante Fucsina Básica/ Production of Orange Waste Bio Carbon Applied As an Adsorbent in the Treatment of Water Contaminated With the Basic Fuchsin Dye. *Brazilian J Dev* 6:101028–101035. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n12-554>

Cao JP, Li LY, Morishita K, et al (2013) Nitrogen transformations during fast pyrolysis of sewage sludge. *Fuel* 104:1–6. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.08.015>

Costa AS, Romão LPC, Araújo BR, et al (2012) Environmental strategies to remove volatile aromatic fractions (BTEX) from petroleum industry wastewater using biomass. *Bioresour Technol* 105:31–39. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.096>

Daifullah AAM, Girgis BS (2003) Impact of surface characteristics of activated carbon on adsorption of BTEX. *Colloids Surfaces A Physicochem Eng Asp* 214:181–193. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(02\)00392-8](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(02)00392-8)

Esgotos A, Hidrogr B, Bioqu D, et al (2017) Atlas Esgotos revela mais de 110 mil km de rios com comprometimento da qualidade da água por carga orgânica

Gu L, Wang Y, Zhu N, et al (2013) Preparation of sewage sludge based activated carbon by using Fenton's reagent and their use in 2-Naphthol adsorption. *Bioresour Technol* 146:779–784. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.07.147>

Ho YS, McKay G (1999) The sorption of lead(II) ions on peat. *Water Res* 33:578–584. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(98\)00207-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(98)00207-3)

Kambhu A, Comfort S, Chokejaroenrat C, Sakulthaew C (2012) Developing slow-release persulfate candles to treat BTEX contaminated groundwater. *Chemosphere* 89:656–664. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.06.004>

Mohan N, Kannan GK, Upendra S, et al (2009) Breakthrough of toluene vapours in

granular activated carbon filled packed bed reactor. *J Hazard Mater* 168:777–781. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.02.079>

Nourmoradi H, Nikaeen M, Khiadani HH (2012) Removal of benzene, toluene, ethylbenzene and xylene (BTEX) from aqueous solutions by montmorillonite modified with nonionic surfactant: Equilibrium, kinetic and thermodynamic study. *Chem Eng J* 191:341–348. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.03.029>

Smith KM, Fowler GD, Pullket S, Graham NJD (2009) Sewage sludge-based adsorbents: A review of their production, properties and use in water treatment applications. *Water Res* 43:2569–2594. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.02.038>

Su F, Lu C, Hu S (2010) Adsorption of benzene, toluene, ethylbenzene and p-xylene by NaOCl-oxidized carbon nanotubes. *Colloids Surfaces A Physicochem Eng Asp* 353:83–91. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2009.10.025>

Vidal CB, Raulino GSC, Barros AL, et al (2012) BTEX removal from aqueous solutions by HDTMA-modified Y zeolite. *J Environ Manage* 112:178–185. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.07.026>

Yang K, Ji M, Liang B, et al (2020) Bioelectrochemical degradation of monoaromatic compounds: Current advances and challenges. *J Hazard Mater* 398:. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122892>