



Adsorption kinetics of Remazol Brilliant Blue R dye from liquid effluents by bovine bone charcoal

Cinéticas de adsorção do corante Remazol Brilliant Blue R de efluentes líquidos por carvão de osso bovino

Cinética de adsorción del colorante Remazol Brilliant Blue R de efluentes líquidos por carbón de hueso bovino

Lívia Katia dos Santos Lima

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7624-9978>

Centro Universitário da Fundação Educacional Guaxupé, Guaxupé, Minas Gerais, Brasil

E-mail: liviakdsl@yahoo.com.br

Antônio Vilas Boas Quintiliano Júnior

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4415-5835>

Centro Universitário da Fundação Educacional Guaxupé, Guaxupé, Minas Gerais, Brasil

E-mail: antonio_vilasboasjr@hotmail.com

André Henrique Zeferino

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8484-730X>

Universidade São Francisco, Campinas, São Paulo, Brasil

E-mail: andrezeferino93@gmail.com

Ana Paula Duarte

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3071-5707>

Centro Universitário da Fundação Educacional Guaxupé, Guaxupé, Minas Gerais, Brasil

E-mail: anapauladuarte.seleghim@gmail.com

ABSTRACT

The textile industry stands out for generating effluents with high levels of dyes, which have a high polluting potential. Among these dyes, the Remazol Brilliant Blue R azo dye, is one of the most used for dyeing wool and cotton, being released in excess on these effluents. Intended for the carcinogenic and mutagenic potential of this type of dyes, several researches are developed in search of economical technologies for their removal. An adsorption is a viable technique, since several materials can be used for this purpose. Bovine bone activated carbon, as it is a residue from the livestock industry that is easily obtained, has been studied as an adsorbent material in the removal of dyes. Therefore, the objective of this project was to evaluate the performance of the adsorption kinetics of the Remazol Brilliant Blue R dye from the effluents using bovine bone activated carbon. The experiments were carried out in batches, with solutions concentrations of 20, 50 and 100 ppm, and the mathematical models of pseudo-first order, pseudo-second order and intraparticle diffusion were adjusted to the experimental data. For concentrations of 20 and 50 ppm, the model that best fits was the pseudo-first order, while

Received: 15 DEC 2020 | Reviewed: 20 DEC 2020 | Accept: 25 DEZ 2020 | Published: 30 DEZ 2020

How to cite: Lima, L. K. S., Quintiliano Júnior, A. V. B., Zeferino, A. H., & Duarte, A. P. (2020). Adsorption kinetics of Remazol Brilliant Blue R dye from liquid effluents by bovine bone charcoal. *Journal of Research and Knowledge Spreading*, 1(1), e1111717. <http://dx.doi.org/10.20952/jrks1111717>

*Corresponding author: Lívia Katia dos Santos Lima. E-mail: liviakdsl@yahoo.com.br

for the concentration of 100 ppm the pseudo-second order model obtained the best result with R^2 of 0.992. The intraparticle diffusion model showed that the higher the concentration of the dye in solution, the greater the thickness of the boundary layer and that the intraparticle diffusion does not control the adsorption process in any of the study criteria.

Keywords: Activated carbon; Bone; Bovine; Adsorption; Dye.

RESUMO

A indústria têxtil se caracteriza por gerar efluentes com altos teores de corantes, que possuem um alto potencial poluente. Dentre estes corantes, o azocorante Remazol Brilliant Blue R, é um dos mais utilizados para o tingimento de lã e algodão, sendo liberado em elevadas concentrações nesses efluentes. Devido ao potencial carcinogênico e mutagênico dos azocorantes, diversas pesquisas em buscas de tecnologias econômicas para sua remoção são desenvolvidas. A adsorção surge como uma técnica viável, visto que diversos materiais podem ser utilizados para este fim. O carvão ativado de osso bovino, por ser um resíduo da indústria pecuária de fácil obtenção, vem sendo estudado como material adsorvente na remoção de corantes. Portanto, o objetivo deste projeto foi avaliar o desempenho da cinética de adsorção do corante Remazol Brilliant Blue R dos efluentes utilizando carvão ativado de osso bovino. Os experimentos foram feitos em batelada, com concentrações de 20, 50 e 100 ppm, e os modelos matemáticos de pseudo-primeira ordem, pseudo-segunda ordem e difusão intrapartícula foram ajustados aos dados experimentais. Para as concentrações de 20 e 50 ppm o modelo que melhor se ajustou foi o de pseudo-primeira ordem, enquanto para a concentração de 100 ppm o modelo de pseudo-segunda ordem obteve melhor resultado com R^2 de 0,992. Já o modelo de difusão intrapartícula mostrou que quanto maior a concentração do corante em solução, maior será a espessura da camada limite e que a difusão intrapartícula não controla o processo de adsorção em nenhuma das concentrações de estudo.

Palavras-chave: Carvão ativado; Osso; Bovino; Adsorção; Corante.

RESUMEN

La industria textil se caracteriza por generar efluentes con altos niveles de colorantes, que tienen un alto potencial contaminante. Entre estos tintes, el azocolorante Remazol Brilliant Blue R, es uno de los más utilizados para teñir lana y algodón, siendo liberado en altas concentraciones en estos efluentes. Debido al potencial carcinogénico y mutagénico de estos colorantes, se desarrollan varias investigaciones en busca de tecnologías económicas para su eliminación. La adsorción surge como una técnica viable, ya que varios materiales se pueden utilizar para este propósito. El carbón activado del hueso bovino, debido a que es un residuo de la industria ganadera de fácil obtención, se ha estudiado como material adsorbente en la eliminación de tintes. Por lo tanto, el objetivo de este proyecto era evaluar el rendimiento de la cinética de adsorción del tinte Remazol Brilliant Blue R de efluentes utilizando carbón activado a partir del hueso bovino. Los experimentos se llevaron a cabo por lotes, con concentraciones de 20, 50 y 100 ppm, y los modelos matemáticos de pseudo-primerdo, orden pseudo-segundo y difusión de intrapartículas se ajustaron a los datos experimentales. Para las concentraciones de 20 y 50 ppm el modelo que mejor ajustado fue el pseudoprimer orden, mientras que para la concentración de 100 ppm el modelo de orden pseudosegundo orden obtuvo el mejor resultado con R^2 de 0.992. El modelo de difusión intrapartícula mostró que cuanto mayor sea la concentración del tinte en solución, mayor será el grosor de la capa límite y que la difusión intrapartícula no controla el proceso de adsorción en ninguna de las concentraciones del estudio.

Palabras clave: Carbón activado; Hueso; Bovino; Adsorción; Colorante.

INTRODUÇÃO

Corantes e pigmentos são utilizados em diversos setores industriais, dentre eles, o setor têxtil. Das 20 toneladas de corante consumidas todos os anos no Brasil, cerca de 20% são descartados por conta da fixação incompleta dos corantes à fibra (Zanoni & Carneiro, 2001). O elevado volume de efluentes gerados pela indústria têxtil, quando liberados sem o devido tratamento nos ecossistemas aquáticos são responsáveis pela degradação do meio, e no caso dos azocorantes e seus subprodutos apresentam ainda potencial carcinogênico e/ou mutagênico (Kunz & Peralta-Zamora, 2002).

Devido as características dos azocorantes e seus subprodutos, que podem interferir na vida aquática ou causar danos à sociedade, além de terem difícil remoção, é necessário o estudo de técnicas específicas para sua remoção dos efluentes industriais.

Atualmente, pesquisas envolvendo técnicas como a fotocatalise, ozonização e adsorção são amplamente relatadas na literatura para degradação e remoção de corantes em efluentes (Desa et al., 2019; Trevizani et al., 2018; Pereira et al., 2018). Técnicas como a troca iônica, floculação, coagulação, oxidação avançada H_2O_2/UV , ozonização, e irradiação são os tratamentos mais comuns utilizados para remoção de corantes (Dallago et al., 2005; Aksu & Tezer, 2005; Vasques et al., 2011). Entretanto, o custo pode inviabilizar alguns processos de tratamento industrial, principalmente quando comparados aos tratamentos biológicos (baixo custo), que não são eficientes quanto a biodegradabilidade dos compostos e, também, não soluciona o problema. Além disso, a utilização desses métodos torna-se inviável pelo fato dessas substâncias apresentarem baixa biodegradabilidade. Observa-se na literatura que na maioria das vezes os tratamentos físico-químicos são mais eficientes em degradar os corantes, mas, geralmente, se tornam onerosos e ainda geram resíduos que não podem ser reaproveitados. Sendo assim, o processo de adsorção se apresenta como uma boa alternativa por ser de baixo custo, fácil operação e eficiente em degradação e remoção dos corantes e, portanto, a adsorção surge como um tratamento alternativo, com o potencial de recuperação do corante e reaproveitamento do material adsorvente (Kimura et al., 1999; Desa et al., 2019; Trevizani et al., 2018; Pereira et al., 2018).

A adsorção é a acumulação e concentração de adsorvatos de soluções fluidas em materiais específicos, envolvendo mecanismos físicos ou químicos específicos em relação ao poluente. Ela é a técnica mais vantajosa dentre outros métodos físico-químicos destinados para este fim. Isso se dá por conta do baixo custo, aliado à simplicidade e facilidade de operação, além de boa eficiência na remoção de corantes.

O adsorvente mais utilizado é o carvão ativado, que possui uma elevada área superficial, o que eleva sua capacidade de adsorção. Com o objetivo de diminuir os custos do processo, são avaliadas alternativas para a obtenção de carvão ativado a partir de descartes industriais, como a serragem, casca de arroz, fibra de coco e osso bovino (Sun & Yang, 2003; Malik, 2003; Gupta & Suhas, 2009; Sharma & Upaghyay, 2009; Silva et al., 2016).

Dentre estes materiais, o carvão ativado feito de osso bovino destaca-se por ser obtido por meio de reaproveitamento de material descartado e por apresentar elevado potencial na remoção de corantes (Monarin, 2012; Ostroski et al., 2015; Silva et al., 2016).

O carvão ativado pode ter origem mineral, ou ser produzido a partir da carbonização de diversos materiais. A ativação é realizada quando o material é exposto à vapor de água ou CO_2 em altas temperaturas, ou a partir de uma ativação química utilizando soluções ácidas ou básicas. Ele é constantemente utilizado por ser eficiente na remoção, além de poder ser fabricado com uma série de matérias diferentes, como o carvão de osso bovino, que apresenta cerca de 12% de carbono, tendo mais capacidade de adsorção quando comparado a outros carvões ativados.

Desta forma, este trabalho tem como objetivo avaliar o potencial de remoção do carvão ativado de osso bovino por adsorção do corante Remazol Brilliant Blue R presente em um

efluente líquido sintético a partir do estudo de curvas cinéticas de adsorção, aumentando a eficiência na desintoxicação de efluentes e reduzindo custos operacionais de processos. Os dados cinéticos foram avaliados a partir de modelos cinéticos de adsorção de pseudo-primeira ordem, pseudo-segunda ordem e difusão intrapartícula com o intuito de identificar os mecanismos envolvidos no processo.

Modelagem matemática

Para analisar a velocidade e os mecanismos com que as moléculas são adsorvidas pelo adsorvente são utilizados os modelos cinéticos, equações de taxa cinética, que por sua vez são mecanismos dependentes das características físico-químicas do adsorvente (natureza, estrutura dos poros), do adsorvato (natureza, massa molar, solubilidade) e da solução (pH, temperatura, concentração, força iônica), da velocidade de agitação e do transporte de massa (Fideles, 2017; Mesquita, 2016).

Essas equações de taxa cinética são funções matemáticas que permitem compreender e propor mecanismos que controlem o processo de adsorção. Os principais modelos matemáticos utilizados em processos adsorptivos são os modelos de pseudo-primeira ordem, pseudo-segunda ordem e o modelo de difusão intrapartícula, sendo que este último envolve algumas etapas que vão além da dependência da porosidade (Sotiles, 2017).

Pode-se dividir o processo de adsorção em quatro etapas:

1 - Difusão das moléculas do contaminante presente no líquido para a superfície do adsorvente (camada limite).

2 - Adsorção das moléculas do contaminante para a superfície externa do adsorvente por interações moleculares.

3 - Difusão das moléculas do contaminante para o interior do adsorvente (difusão efetiva).

4 - Adsorção no interior do adsorvente.

De acordo com Mesquita (2016), a agitação e a concentração podem afetar a difusão na primeira etapa, assim, se a concentração do adsorvato for elevada promoverá a difusão do contaminante para superfície do adsorvente. Já a segunda etapa vai depender da natureza das moléculas do adsorvato e por fim, a terceira etapa vai ser restritiva, sobretudo para os adsorventes microporosos.

O modelo de pseudo-primeira Ordem nos mostra a velocidade do processo em relação à capacidade de adsorção, considerando que a força motriz de adsorção (proporcional à velocidade de adsorção global) corresponde à diferença entre a concentração do adsorvato (em qualquer tempo) e a concentração do adsorvato na superfície do adsorvente (no equilíbrio) (Lima, 2015; Fideles, 2017).

Para um sistema sólido/líquido a taxa de adsorção em superfícies sólidas é dada pela Equação 1 (Langergren, 1898):

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (1)$$

Sendo:

dq_t/dt : taxa de adsorvato retido por tempo [$\text{mg.g}^{-1}.\text{min}^{-1}$].

k_1 : constante de velocidade de pseudo-primeira ordem [min^{-1}].

q_e : quantidade de adsorvato retido no sólido no equilíbrio [mg.g^{-1}].

q_t : quantidade de adsorvato retido no tempo t [mg.g^{-1}].

Já o modelo de pseudo-segunda Ordem assume que a adsorção acontece através do compartilhamento de elétrons da última camada de valência (quimissorção) e que cada molécula de soluto (adsorvato) pode ser adsorvida por mais de um sítio ativo do adsorvente.

Desta forma o modelo de pseudo-segunda ordem, está apoiado na ideia de adsorção no momento de equilíbrio. Pela Equação 2 (Ho & Mckay, 1999), temos:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (2)$$

Sendo:

dq_t/dt : taxa de adsorvato retido por tempo [mg.g⁻¹.min⁻¹].

k_2 : constante de velocidade de pseudo-segunda ordem [g.mg⁻¹.min⁻¹].

q_e : quantidade de adsorvato retido no sólido no equilíbrio [mg.g⁻¹].

q_t : quantidade de adsorvato retido no tempo t [mg.g⁻¹].

O modelo de difusão intrapartícula é utilizado para identificar o mecanismo de adsorção a partir do transporte do soluto (adsorvato), a partir de sua superfície, por difusão no interior da partícula do adsorvente. Assim, sabendo que a difusão é o fator determinante da velocidade, a remoção do soluto varia com a raiz quadrada do tempo, sendo que a partir da linearização da curva, consegue-se a velocidade de difusão no interior da partícula (Mesquita, 2016).

$$q_t = f(t^{1/2}) \quad (3)$$

Sendo:

q_t : quantidade de adsorvato retido no tempo t [mg.g⁻¹].

t : tempo de adsorção [min].

Linearizando a Equação 3 obtém-se a Equação 4 que é utilizada para a modelagem matemática.

$$q_t = k_{in}t^{1/2} + C \quad (4)$$

Sendo:

q_t : quantidade de adsorvato retido no tempo t [mg.g⁻¹].

k_{in} : coeficiente de transferência de massa que engloba difusão efetiva, dimensões e características físicas da partícula [mg.g⁻¹].

C : constante que dá ideia da espessura da camada limite.

METODOLOGIA

O material adsorvente foi utilizado nos experimentos foi o carvão ativado granulado (mesh 20x50), fabricado a partir de osso bovino, doado pela empresa Bonechar Carvão Ativado, empresa produtora de carvão, localizada em Maringá-Paraná. Foram preparadas soluções sintéticas de corante a partir da dissolução do corante em concentrações de 20, 50 e 100 ppm. O estudo do pH da solução foi realizado em ampla faixa para avaliar se a eficiência de remoção aumenta quando está em meio ácido ou básico.

Os ensaios de adsorção foram realizados em sistema de banho finito em frascos erlenmeyers de 125 mL, contendo 100 mL de solução sintética de corante e 0,3 g de carvão sob agitação constante. Em intervalos específicos, alíquotas de solução foram retiradas e centrifugadas. O sobrenadante foi analisado para a determinação da concentração de corante não adsorvido utilizando o UV-Visível.

Foram calculadas a capacidade de adsorção e a porcentagem de remoção através de suas respectivas equações.

Em seguida os resultados obtidos foram incluídos e plotados em um gráfico para se observar de maneira mais clara qual o momento que o carvão ativado de osso teve capacidade de adsorção constante.

Adsorção

O material adsorvente que foi utilizado nos experimentos foi o carvão ativado granulado (mesh 20x50), fabricado a partir de osso bovino, doado pela empresa Bonechar Carvão Ativado, empresa produtora de carvão, localizada em Maringá-Paraná.

Soluções sintéticas de corante

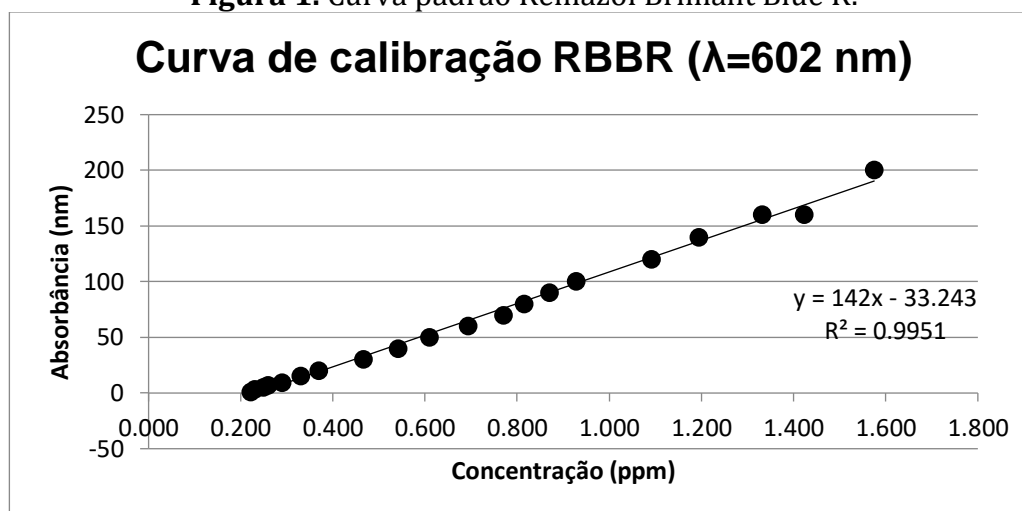
A partir da dissolução do corante preparou-se soluções sintéticas com concentrações de 20, 50 e 100 ppm em pH neutro avaliando a eficiência de remoção pelo carvão ativado de osso bovino.

Cinética de adsorção

Realizou-se os ensaios de adsorção em banho finito utilizando-se erlenmeyers de 125 mL, contendo 100mL de solução sintética de corante e 0,3 g de carvão, sob agitação constante, utilizando-se da Incubadora com Agitação Orbital refrigerada a 25°C da marca Nova Ética, modelo 420/RDBP. Em seguida, retiraram-se e filtraram-se em intervalos específicos alíquotas de solução, determinando-se a concentração do corante não adsorvido utilizando-se o Espectrofotômetro UV-Vis da marca FEMTO, modelo 700 plus, operando no comprimento de onda de 602 nm.

Através da equação da curva analítica padrão calculou-se as concentrações de corante não adsorvida, como mostra a figura 1.

Figura 1. Curva padrão Remazol Brilliant Blue R.



Fonte: Os autores (2020).

Calculou-se a capacidade de adsorção utilizando-se os resultados das concentrações obtidas, por meio da equação 5:

$$q = \frac{(c_0 - c_f)}{m} V \quad (5)$$

Sendo:

q = capacidade de adsorção [mg.g⁻¹].

C₀ = concentração inicial da solução de corante [mg.L⁻¹].

C_f = concentração final da solução de corante após adsorção [mg.L⁻¹].

V = Volume da solução [L].
 m = massa de adsorvente [g].

Utilizou-se dos modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem, pseudo-segunda ordem e difusão intrapartícula com o intuito de identificar os mecanismos envolvidos no processo de adsorção.

RESULTADOS

Os dados experimentais obtidos por meio das cinéticas de adsorção em diferentes concentrações, assim como os ajustes matemáticos importante para interpretação dos dados, são apresentados nas figuras 2, 3 e 4 e na tabela 1.

Figura 2. Modelagem da curva cinética de adsorção do corante RBBR ($C_0 = 20$ ppm).

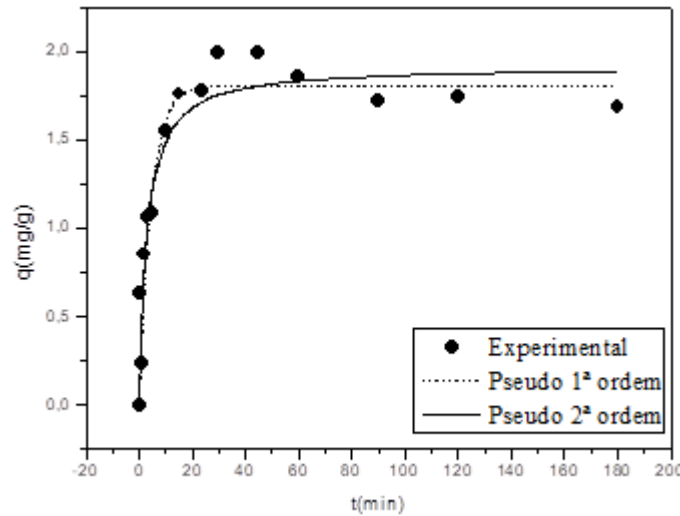


Figura 3. Modelagem da curva cinética de adsorção do corante RBBR ($C_0 = 50$ ppm).

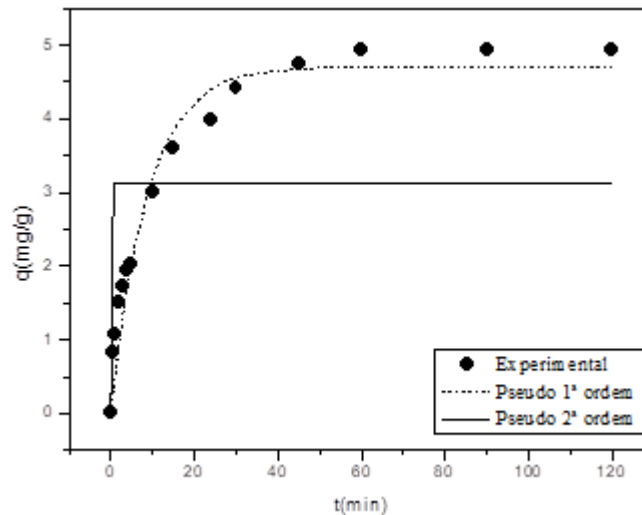


Figura 4. Modelagem da curva cinética de adsorção do corante RBBR ($C_0 = 100$ ppm).

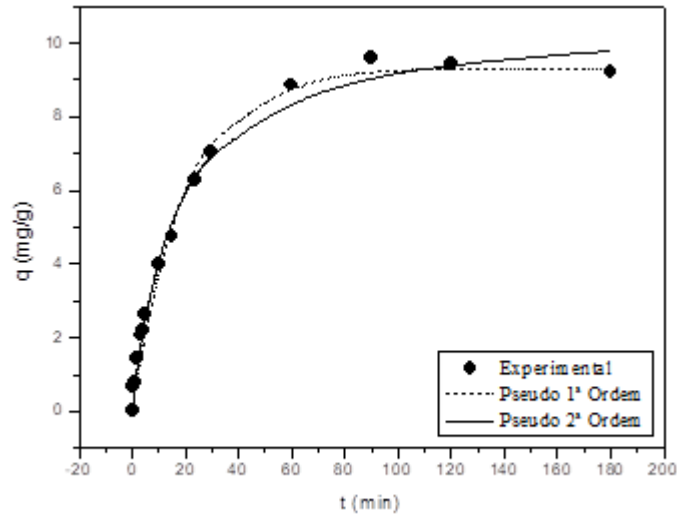


Figura 5. Ajuste do modelo de difusão intrapartícula no processo de adsorção do corante RBBR ($C_0 = 20$ ppm).

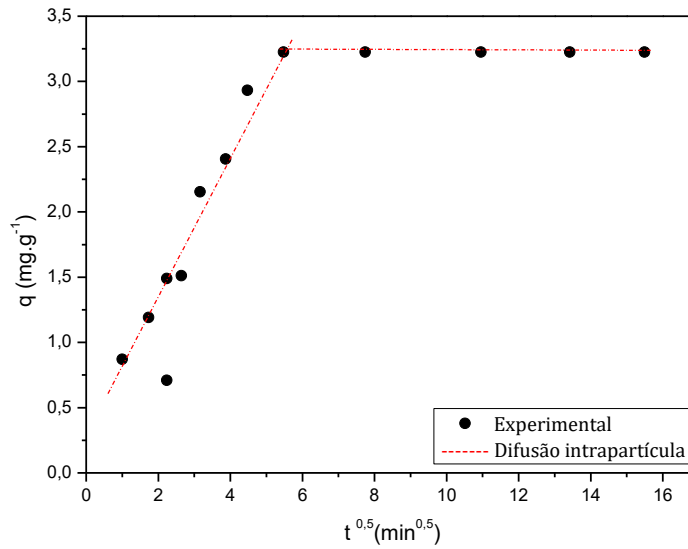


Figura 6. Ajuste do modelo de difusão intrapartícula no processo de adsorção do corante RBBR ($C_0 = 50$ ppm).

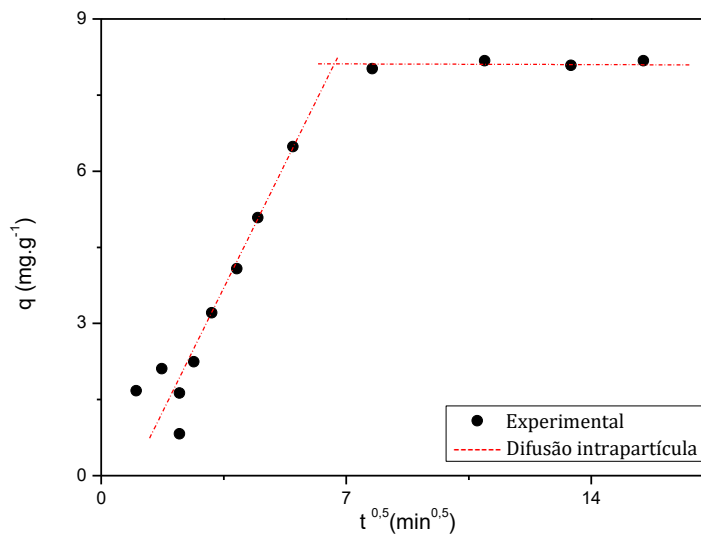


Figura 7. Ajuste do modelo de difusão intrapartícula no processo de adsorção do corante RBBR (C0 = 100 ppm).

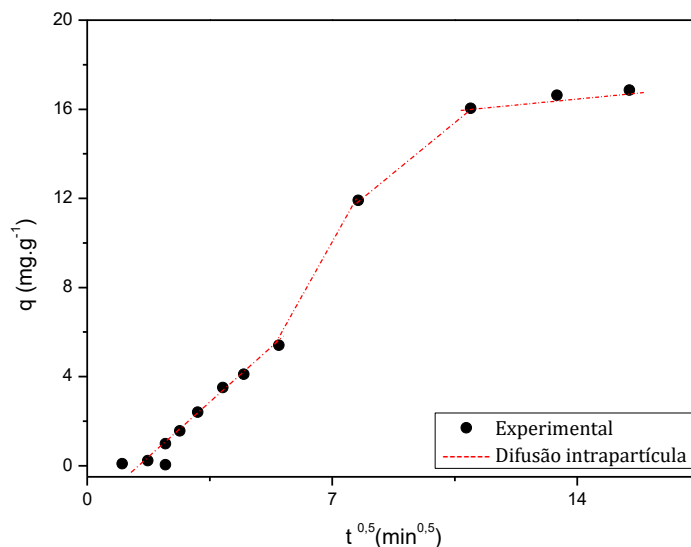


Tabela 1. Parâmetros cinéticos de adsorção referente aos modelos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem.

Modelo	Parâmetro	Concentração (ppm)		
		20	50	100
Pseudo-primeira ordem	qe (mg.g ⁻¹)	1,809	4,716	9,32
	Erro Padrão	0,059	0,153	0,214
	k ₁ (min ⁻¹)	0,243	0,119	0,053
	Erro Padrão	0,033	0,014	0,004
	R ²	0,934	0,962	0,988
Pseudo-segunda ordem	qe (mg.g ⁻¹)	1,917	3,000	10,65
	Erro Padrão	0,075	0,418	0,259
	k ₂ (min ⁻¹)	0,194	-28301*	0,006
	Erro Padrão	0,043	0,000	0,0006
	R ²	0,930	0,222	0,992
Difusão intrapartícula	k _{in} (mg.g ⁻¹ .min ^{-0,5})	0,580	1,188	1,391
	Erro Padrão	0,059	0,100	0,039
	C (mg.g ⁻¹)	0,172	0,634	2,092
	R ²	0,949	0,959	0,995

*Dado não ajustado pelo modelo.

DISCUSSÃO

A partir dos resultados obtidos dos experimentos cinéticos foi possível construir gráficos que relacionam a capacidade de adsorção (q) em relação ao tempo (t) como mostram as figuras 2 a 4. Como esperado, observou-se que a capacidade de adsorção do corante aumenta com o aumento da concentração de corante na solução. E que o equilíbrio de adsorção foi atingido em aproximadamente 60 min para as três concentrações de estudo.

Os modelos de pseudo-primeira e pseudo-segunda ordem foram utilizados para ajuste aos dados experimentais da cinética, como apresentado nas figuras 2 a 4, assim como o modelo de difusão intrapartícula que são apresentados nas figuras 5 a 7. Os parâmetros dos modelos são apresentados na tabela 1.

Pode-se observar que o modelo de pseudo-primeira ordem se ajustou melhor às curvas cinéticas de 20 e 50 ppm como mostram as figuras 3 e 4 e os dados da tabela 1, com coeficientes

de determinação (R^2) de 0,934 e 0,962, respectivamente. É possível observar também que o modelo de pseudo-segunda ordem não ajusta aos dados da cinética de concentração de 50 ppm, fornecendo valores da constante cinética k_2 negativa e um valor baixo de R^2 de 0,222.

Já considerando a curva de concentração de 100 ppm o modelo de pseudo-segunda ordem foi o que melhor se ajustou, como mostra a figura 5 e os dados da tabela 1, com R^2 de 0,992 e uma capacidade de adsorção de cerca de 10 mg.g^{-1} .

Um melhor ajuste do modelo de pseudo-primeira ordem às curvas experimentais representa uma adsorção rápida e governada pela transferência de massa no filme líquido. Enquanto a melhor concordância com o modelo de pseudo-segunda ordem pode significar que existe uma etapa limitante que pode ser decorrente de uma quimissorção.

Para ajustar o modelo de difusão intrapartícula aos dados experimentais traçou-se um gráfico da capacidade de adsorção (q) versus raiz tempo ($t^{0,5}$). Para todas as concentrações de estudo observou-se o surgimento de múltiplas regiões lineares como apresentado nas figuras 5 a 7. Estas regiões representam as etapas do processo de adsorção. Os parâmetros são obtidos por meio da linearização do modelo com os dados da segunda etapa.

Na primeira etapa, quando a reta referente à porção externa passa pela origem diz-se que o processo é controlado pela difusão instantânea. Porém, a partir dos dados experimentais, não é possível afirmar que a difusão intrapartícula governa o processo de adsorção do corante pelo carvão ativado de osso bovino, pois, em nenhum dos casos de estudo a reta referente a primeira etapa passou pela origem. Isto sugere que outros mecanismos de remoção estão participando do processo.

Na segunda etapa, houve uma multilinearidade, sendo que a adsorção ocorre de forma gradual. Neste caso a energia vai depender do processo de ligação que pode ser física ou química (Lima, 2011). É possível que para os casos da adsorção com concentração mais baixas (20 e 50 ppm) esteja ocorrendo um processo de adsorção física, enquanto para a concentração mais alta que 100 ppm o processo seja químico.

A constante de C do modelo de difusão intrapartícula indica uma aproximação da espessura da camada limite. Ou seja, quanto maior for o valor de c, maior o efeito na camada limite (Kannan & Sundaram, 2001). Para os dados experimentais, o efeito da camada limite é maior para a concentração de 100 ppm.

Na Terceira etapa ou de equilíbrio, a taxa de remoção corante começa a diminuir devido à saturação do carvão ativado. Ou seja, a quantidade máxima de corante é aderida a superfície do adsorvente. Em todos os casos, o ajuste do modelo forneceu elevados valores de R^2 indicando que a velocidade de adsorção do corante no adsorvente de osso bovino é influenciado pela difusão no meio.

CONCLUSÃO

Os dados cinéticos mostraram que o equilíbrio é de aproximadamente 60 min para todas as concentrações de estudo. O Modelo mais adequado foi o de pseudo-primeira ordem para as concentrações de 20 ppm e 50 ppm com R^2 de 0,934 e 0,962, respectivamente. Já para a concentração de de 100 ppm o melhor modelo foi o de pseudo-segunda ordem com R^2 de 0,992.

A difusão intrapartícula não controla o processo de adsorção em nenhuma das concentrações de estudo, como mostra o modelo. De forma geral, houve elevada capacidade de remoção do corante Remazol Brilliant Blue. O maior o efeito na camada limite foi para a concentração de 100 ppm, pois obteve maior valor da constante $C = 2,092 \text{ mg.g}^{-1}$.

AGRADECIMENTOS

Não aplicável.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Lívia Katia dos Santos Lima: concepção e desenho, aquisição de dados, análise e interpretação dos dados, redação do artigo, revisão crítica de conteúdo intelectual importante. Antônio Vilas Boas Quintiliano Júnior: concepção e desenho, aquisição de dados, análise e interpretação dos dados, redação do artigo, revisão crítica de conteúdo intelectual importante. André Henrique Zeferino: concepção e desenho, aquisição de dados, análise e interpretação dos dados, redação do artigo, revisão crítica de conteúdo intelectual importante. Ana Paula Duarte: concepção e desenho, aquisição de dados, análise e interpretação dos dados, redação do artigo, revisão crítica de conteúdo intelectual importante. Todos os autores leram e aprovaram a versão final do manuscrito.

CONFLITOS DE INTERESSE

Os autores declaram que não há conflitos de interesse.

REFERÊNCIAS

Aksu, Z., & Tezer, S. (2005). Biosorption of reactive dyes on the green alga *Chlorella vulgaris*. *Process Biochemistry*, 40, 1347-1361. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.06.007>

Dallago, R. M., Smaniotto, A., & Oliveira, L. C. A. (2005). Resíduos sólidos de curtumes como adsorventes para a remoção de corantes em meio aquoso. *Química Nova*, 3(28), 433-437. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422005000300013>

Desa, A. L., Hairom, N. H. H., Ng, L. Y., Ng, C. Y., Ahmad, M. K., & Mohammad, A. W. (2019). Industrial textile wastewater treatment via membrane photocatalytic reactor (MPR) in the presence of ZnO-PEG nanoparticles and tight ultrafiltration. *Journal of Water Process Engineering*, 31, e100872. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100872>

Fideles, R. A. (2017). Adsorção dos corantes Auramina-O e Safranina-T em bagaço de cana carboxilado: estudos em sistemas mono e bicomponente em batelada. Ouro Preto. Dissertação. Ouro Preto, MG: UFOP.

Gupta, V. K., & Suhas, M. D. (2009). Application of low-cost adsorbents for dye removal – a review. *Journal of Environmental Management*, 90(8), 2313-2342. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.11.017>

Ho, Y. S., & McKay, G. (1999). Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochemistry*, 34(5), 451-465. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(98\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(98)00112-5)

Kannan, N., & Sundaram, M. M. (2001). Kinetics and mechanism of removal of methylene blue by adsorption on various carbons - a comparative study. *Dyes and Pigments*, 51(1), 25-40. [https://doi.org/10.1016/S0143-7208\(01\)00056-0](https://doi.org/10.1016/S0143-7208(01)00056-0)

Kimura, I. Y., Gonçalves Jr., A. C., Stolberg, J., Laranjeira M. C. M., & Fávere, V. T. (1999). Efeito do pH e do tempo de contato na adsorção de corantes reativos por microesferas de quitosana. *Polímeros*, 9(3), 51-57. <https://doi.org/10.1590/S0104-14281999000300010>

- Kunz, A., Peralta-Zamora, P., Moraes, S. G., & Durán, N. (2002). Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. *Química Nova*, 25(1), 78-82. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422002000100014>
- Lagergren, S. (1898). About the theory of so-called adsorption of soluble substances. *Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens Handlingar*, 24(4), 1-39.
- Lima, L. K. S. (2015) Bioadsorção de íons metálicos em sistemas simples e competitivos preparados a partir de diferentes macrófitas. Campinas. Tese. Campinas, SP: UNICAMP.
- Lima, L. K. S., Kleinubing, S. J., Silva, E. A., & Silva, M. G. C. (2011). Removal of chromium from wastewater using macrophytes *lemna minor* as biosorbent. *Chemical Engineering Transactions*, 25, 303-308. <https://doi.org/10.3303/CET1125051>
- Malik, P. K. (2003). Use of activated carbons prepared from sawdust and rice-husk for adsorption of acid dyes: a case study of acid yellow 36. *Dyes and Pigments*, 56(3), 39-249. [https://doi.org/10.1016/S0143-7208\(02\)00159-6](https://doi.org/10.1016/S0143-7208(02)00159-6)
- Mesquita, P. L. (2016). Uso de carvão ativo de ossos bovinos na remoção de contaminantes orgânicos de eletrodialise e sua contribuição ao reuso de água na indústria de petróleo. Belo Horizonte. Tese. Belo Horizonte, MG: UFMG.
- Sharma, Y. C., & Upadhyay, S. N. (2009). Removal of a cationic dye from wastewaters by adsorption on activated carbon developed from coconut coir. *Energy Fuels*, 23(6), 2983-2988. <https://doi.org/10.1021/ef9001132>
- Pereira, I. C., Carvalho, K. Q., Passig, F. H., Ferreira, R. C., Rizzodomingues, R. C. P., Hoppen, M. I., Macioski, G., Nagalli, A., & Perreto, F. (2018). Thermal and thermal-acid treated sewage sludge for the removal of dye reactive Red 120: characteristics, kinetics, isotherms, thermodynamics and response surface methodology design. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(6), 7233-7246. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.10.060>
- Silva, T. L., Ronix, A., Pezoti, O., Souza, L. S., Leandro, P. K. T., Bedin, K. C., Beltrame, K. K., Cazetta, A. L., & Almeida, V. C. (2016). Mesoporous activated carbon from industrial laundry sewage sludge: adsorption studies of reactive dye Remazol Brilliant Blue R. *Chemical Engineering Journal*, 303(1), 467-476. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.06.009>
- Sotiles, A. R. (2017). Estudo de diferentes tratamentos da caulinita para possível aplicação como adsorvente do corante têxtil C, I, Reactive Blue 203. Pato Branco. Dissertação. Pato Branco, PR; UTFPR.
- Sun, Q., & Yang, L. (2003). The adsorption of basic dyes from aqueous solution on modified peat-resin particle. *Water Research*, 37(7), 1535-1544. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00520-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00520-1)
- Trevizani, J. L. B., Nagalli, A., Passig, F. H., Carvalho, K. Q., Schiavon, G. J., & Model, A. N. L. (2018). Influence of pH and concentration on the decolorization and degradation of BR red azo dye by ozonization. *Acta Scientiarum-Technology*, 40, e35436. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v40i1.35436>

Vasques, A. R., Souza, S. M. A., Guelli, U. W., Souza, L., Valle, A. A. U., & Borges, J. A. M. (2011). Adsorção dos corantes RO16, RR2 e RR141 utilizando lodo residual da indústria têxtil. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 16(3), 245-252. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522011000300007>

Zanoni, M, V, B., & Carneiro, P. A. (2001). O descarte dos corantes têxteis. *Revista Ciência Hoje*, 29(174), 61-64.