

Estudo da cinética de adsorção do carvão ativado impregnado com óxido de grafeno

Study of the adsorption kinetics of activated carbon impregnated with graphene oxide

RESUMO

Máira Vieira
Mairavduarte@gmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, Paraná, Brasil

Ana Paula de Oliveira Schmitz
anapoliveira@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, Paraná, Brasil

Camila de Abreu Antonioli
antoniolic@alunos.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, Paraná, Brasil

Wagner da Silveira
wagnersilveira@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, Paraná, Brasil

João Pedro do Prado
joaoprado@alunos.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, Paraná, Brasil

Rosângela Bergamasco
ro.bergamasco@hotmail.com
Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Paraná, Brasil.

Recebido: 19 ago. 2020.

Aprovado: 01 out. 2020.

Direito autorial: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



O objetivo deste trabalho foi a avaliação da cinética de adsorção do corante azul de metileno utilizando carvão ativado impregnado com óxido de grafeno. Realizou-se a síntese do óxido de grafeno pelo método Hummers usando o grafite de pilhas zinco-carbono exauridas e a impregnação do óxido de grafeno no carvão ativado por evaporação/calцинаção. Foram realizados ensaios cinéticos de adsorção em batelada, com pH inicial 5, concentração inicial de corante de 100 mg L^{-1} , agitação constante, temperatura ambiente e amostragem de 5 à 360 min. Pela análise dos dados cinéticos, verificou-se tempo de equilíbrio para o carvão ativado e o carvão ativado impregnado com óxido de grafeno de 240 e 90 min, respectivamente. Reportam-se alterações nas etapas de transferência de massa em decorrência da impregnação do óxido de grafeno destacando-se ausência da difusão intrapartícula nos microporos e indicativo da etapa limitante para este adsorvente ser a difusão intrapartícula na superfície externa. As alterações no adsorvente, apesar de não aumentarem a eficiência global de adsorção do corante, conferiram maior velocidade ao processo. Estes resultados sugerem que o carvão ativado com óxido de grafeno apresenta potencial de emprego na remoção de corantes.

PALAVRAS-CHAVE: Grafite. Pilhas. Adsorvente.

ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate the kinetics adsorption of blue dye methylene using carbon activated impregnated with graphene oxide. Graphene oxide was synthesized from the modified Hummers using the graphite of depleted zinc-carbon batteries depleted and the impregnation of graphene oxide in activated carbon by evaporation/calcination. Kinetic batch adsorption tests were performed with initial pH 5, initial dye concentration of 100 mg L^{-1} , constant agitation, room temperature and sampling from 5 to 360 min. By analyzing the kinetic data, it was verified the equilibrium time for activated carbon and activated carbon impregnated with graphene oxide of 240 and 90 min, respectively. Changes in the mass transfer stages are reported due to the impregnation of graphene oxide, highlighting the absence of intraparticle diffusion in the micropores and indicative of the limiting step for this adsorbent to be the intraparticle diffusion on the external surface. The changes in the adsorbent, despite not increasing the overall efficiency of the dye adsorption, gave the process greater speed. These results suggest that activated carbon with graphene oxide has potential for use in the dyes removal.

KEYWORDS: Graphite. Batteries. Adsorbent .



INTRODUÇÃO

A geração de poluentes orgânicos provenientes de processos industriais representa grande preocupação a preservação ambiental (DEBNATH et al., 2015; ANDRONIC e DUTA, 2014). Muitas empresas possuem efluentes compostos de estruturas orgânicas complexas, como o caso dos corantes, os quais ao serem dispostos no ambiente aquático, podem afetar os processos fundamentais para manutenção de organismos vivos, causando prejuízos ao ecossistema aquático. Ademais, muitos corantes são tóxicos também aos seres humanos e potencialmente carcinogênicos (KORDOULI et al., 2014; SAGGIORO et al., 2015).

Desta maneira, sistemas de tratamento de efluentes devem ser aprimorados com o intuito de eliminar compostos recalcitrantes, cor e compostos orgânicos dissolvidos (KUNZ et al., 2002), não suficientemente removidos por técnicas de tratamento convencionais. Assim, avaliam-se técnicas alternativas, que permitam satisfatória eficiência de remoção de poluentes mesmo em baixas concentrações, facilidade de implementação e que propiciem reduzidos custos de operação, como é o caso da adsorção. Um dos adsorventes amplamente empregados são os carvões ativados (CHAN et al., 2012), os quais com a impregnação em sua estrutura de materiais como o óxido de grafeno podem ter sua eficiência melhorada para remoção de alguns poluentes específicos (ABD-ELHAMID et al., 2019).

Para a produção de óxido de grafeno, utiliza-se como matéria prima principal o grafite. Uma alternativa sustentável de suprimento de grafite para tal finalidade pode ser a partir de pilhas zinco-carbono exauridas. Estas após o fim de sua vida útil, muitas vezes são descartadas inadequadamente em aterros e lixões, tornando-se um grande problema ambiental em função da lixiviação de metais pesados e conseqüente contaminação do meio ambiente (FARZANA et al., 2018).

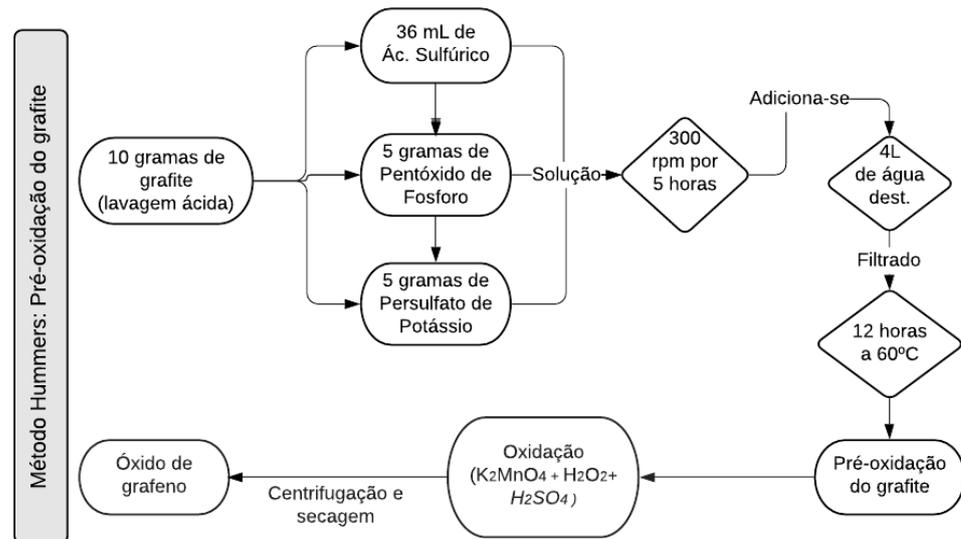
Neste âmbito, o presente trabalho teve como objetivo principal a avaliação da cinética de adsorção do corante azul de metileno em solução aquosa empregando-se como adsorvente o carvão ativado impregnado com óxido de grafeno. De forma geral, buscou-se minimizar o impacto ambiental do descarte de resíduos líquidos contendo corantes, melhorando a eficiência de remoção destes, aliada a possibilidade de expansão da reciclagem de pilhas zinco-carbono exauridas, pelo uso do bastão de grafite para a produção do óxido de grafeno.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizadas pilhas do tipo zinco-carbono da marca Panasonic®, adquiridas em pontos de coleta na cidade de Francisco Beltrão/PR. As pilhas foram desmontadas e extraído somente o bastão de grafite, o qual foi utilizado como matéria prima para a produção do óxido de grafeno.

Os adsorventes avaliados foram o carvão ativado comercial de origem vegetal (casca de coco de dendê) e ainda o carvão ativado modificado a partir da impregnação de óxido de grafeno ao mesmo, produzindo pelo método de Hummers modificado, seguindo metodologia proposta por Hummers e Offeman (1958). Este método é constituído das etapas apresentadas na Figura 1 para a preparação de óxido de grafeno (lavagem ácida, pré-oxidação e oxidação). Ao final do processo, o conteúdo foi transferido para placas de Petri, para que ocorresse a formação do filme, permanecendo em estufa a 70°C por 12h.

Figura 1 - Método para obtenção do óxido de grafeno pelo método Hummers modificado



Fonte: Autoria própria (2020).

A impregnação do óxido de grafeno foi então realizada em carvão ativado de casca de coco de dendê, conforme metodologia descrita por Marin (2017), pela técnica de impregnação por evaporação. Assim, fez-se a mistura de água destilada (40 mL), óxido de grafeno (0,4 g) e carvão ativado (12 g), mantendo-se a mistura sob agitação à temperatura de 80 °C até a completa evaporação da fase líquida. Em seguida, fez-se a calcinação em forno mufla (300°C por 3 h, com rampa de aquecimento de 10°C min⁻¹) em um reator batelada de aço inox fechado.

O adsorbato empregado foi o corante azul de metileno, preparado a partir da dissolução do corante em água destilada na proporção de 100 mg de corante para 1 litro de solução, perfazendo a concentração de 100 mg L⁻¹. A solução teve ainda o pH ajustado para o valor definido em cada ensaio utilizando-se HCl e/ou NaOH (1 mol L⁻¹). Para avaliação da concentração de corante presente nas amostras, foi construída uma curva de calibração (Conc = 5,6088*Abs; R²=0,9986), sendo analisadas as absorbâncias de soluções com diferentes concentrações e feita a correlação linear. As leituras foram realizadas em espectrofotômetro UV-Vis, no comprimento de onda de maior absorção do corante (665 nm).

Os ensaios de adsorção em batelada foram realizados com a mistura de determinada massa de adsorvente (m) e volume de solução de corante (V) em Erlenmeyer e estes dispostos em mesa agitadora orbital à temperatura ambiente, por tempo de contato definido em cada ensaio. Após cada ensaio, foram coletadas alíquotas da mistura sendo realizada a separação do adsorbato e o adsorvente por centrifugação (3500 rpm por 5 min), realizando-se em seguida a leitura em espectrofotômetro UV-Vis (665 nm) para determinação da concentração residual de corante (C_f) e correlação com a concentração inicial (C_i). A determinação da capacidade de adsorção do corante (q) foi realizada conforme Equação (1).

$$q \text{ (mg g}^{-1}\text{)} = \frac{(C_i - C_f) * V}{m} \quad (1)$$

A influência do pH inicial da solução de corante na capacidade de adsorção do corante azul de metileno pelo carvão ativado e carvão ativado impregnado com óxido de grafeno foi avaliada para valores de pH 3, 4, 5, 6 e 7. Para tanto, foram realizados ensaios de adsorção em batelada, com a mistura de 0,25 g de adsorvente e 50 mL de solução de corante (100 mg L^{-1}) (ESPINOZA-QUIÑONES et al., 2010) com o pH ajustado para os valores citados. Os recipientes contendo a mistura foram mantidos sob agitação constante (150 rpm), em temperatura ambiente (aproximadamente 25°C), por 360 min.

O estudo cinético foi realizado por meio de ensaios de adsorção em batelada, nos quais foram homogeneizados 2,5 g de adsorvente e 500 mL de solução do corante azul de metileno, em pH inicial 5,0 e com concentração inicial de 100 mg L^{-1} . A mistura foi mantida sob agitação constante à 150 rpm em temperatura ambiente por 6 horas, sendo realizadas amostragens de 5 mL entre 5 min e 360 min, em intervalos de tempo predefinidos. Ao final de cada ensaio, as amostras coletadas foram submetidas à centrifugação (3000 rpm por 5 min) e determinada a concentração do corante residual por análise em espectrofotômetro UV-Vis (665 nm). Os dados cinéticos foram avaliados utilizando-se os modelos cinéticos de pseudoprimeira ordem (LAGERGREN, 1898), pseudosegunda ordem (HO e MCKAY, 1998), Elovich (TURNER, 1975) e difusão intrapartícula (WEBER e MORRIS, 1963).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para determinação do pH adequado para o processo, avaliou-se a capacidade de adsorção para pH inicial da solução de corante na faixa de pH 3 a 7, conforme resultados apresentados na Tabela 1. Para os ensaios realizados com pH inicial inferior a 5 não houve variação na capacidade de adsorção, entretanto, observando-se ligeira redução para valores de pH 6 e 7. Assim, foi selecionado o pH inicial 5 como condição de trabalho para os demais ensaios.

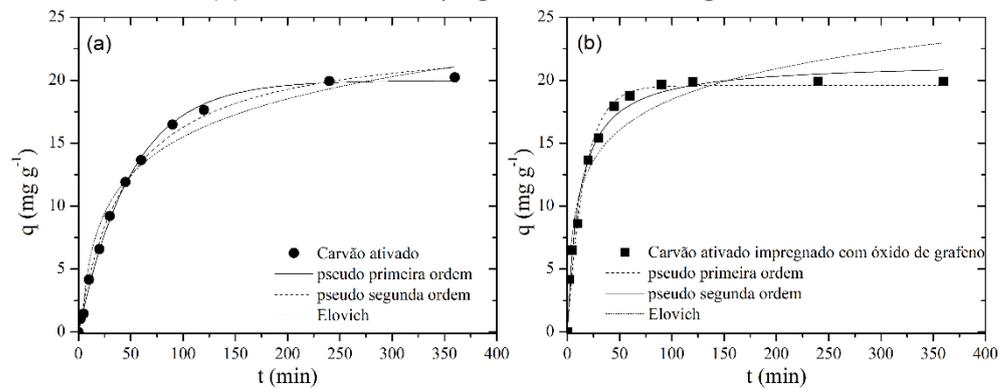
Tabela 1 – Avaliação da influência do pH inicial da solução na capacidade de adsorção do corante pelo carvão ativado e carvão ativado impregnado com óxido de grafeno

pH inicial	Conc. inicial (mg L^{-1})	Carvão ativado			Carvão ativado impregnado com óxido de grafeno		
		pH final	Conc. final (mg L^{-1})	q (mg g^{-1})	pH final	Conc. final (mg L^{-1})	q (mg g^{-1})
3	110,66	4,09	0,14	22,02	7,01	0,04	22,04
4	110,72	6,8	0,25	22,02	6,62	0,14	22,09
5	110,66	6,83	0,29	22,08	6,93	0,07	22,11
6	101,01	6,91	0,70	19,98	6,95	0,06	20,11
7	101,80	6,85	0,07	20,26	7,01	0,14	20,27

Fonte: Autoria própria (2020).

No estudo da cinética de adsorção, buscou-se identificar o tempo requerido para que o equilíbrio fosse estabelecido. Os dados cinéticos obtidos para ambos adsorventes (Figura 2) evidenciam o comportamento distinto da capacidade de adsorção em função do tempo nos tempos inferiores a 100 min.

Figura 2 - Dados cinéticos de adsorção do corante azul de metileno: (a) carvão ativado e (b) carvão ativado impregnado com óxido de grafeno



Fonte: Autoria própria (2020)

Conforme Figura 2, a remoção do corante foi relativamente rápida nos estágios iniciais do processo, até o equilíbrio. Com base nesses dados, observa-se que o tempo necessário para o estabelecimento do equilíbrio, utilizando o carvão ativado como adsorvente foi de aproximadamente 240 min. Para o carvão ativado impregnado com óxido de grafeno, o equilíbrio foi estabelecido com cerca de 90 minutos de operação. Dessa forma, observou-se que a impregnação do óxido de grafeno propiciou a execução do processo de adsorção em um menor intervalo de tempo, o que indica potencialidade de redução de custos operacionais. Os dados experimentais foram examinados usando modelos matemáticos, conforme indicado na Figura 2, sendo que a partir dos ajustes dos modelos cinéticos foram obtidos os valores dos parâmetros de cada modelo (Tabela 2).

Tabela 2 - Valores dos parâmetros ajustados dos modelos cinéticos de adsorção do corante azul de metileno

Modelo Cinético	Parâmetros ajustados	Adsorventes	
		Carvão ativado	Carvão ativado impregnado com óxido de grafeno
Pseudoprimeira Ordem $q = q_e (1 - e^{-k_1 t})$	q_e (mg g^{-1})	$19,97 \pm 0,22$	$19,59 \pm 0,38$
	k_1 (h^{-1})	$0,0198 \pm 0,0006$	$0,061 \pm 0,005$
	R^2	0,9981	0,9856
Pseudosegunda Ordem $q = q_e \frac{k_2 t}{q_e k_2 t + 1}$	q_e (mg g^{-1})	$23,66 \pm 0,55$	$21,5 \pm 0,5$
	k_2 ($\text{g mg}^{-1} \text{h}^{-1}$)	$0,00093 \pm 0,00008$	$0,0041 \pm 0,0005$
	R^2	0,9952	0,9886
Elovich $q = b \ln(a b) + b \ln t$	a ($\text{mg g}^{-1} \text{h}^{-1}$)	$0,08 \pm 0,02$	$0,56 \pm 0,31$
	b (g mg^{-1})	$4,35 \pm 0,27$	$3,51 \pm 0,36$
	R^2	0,9661	0,9361

Fonte: Autoria própria (2020).

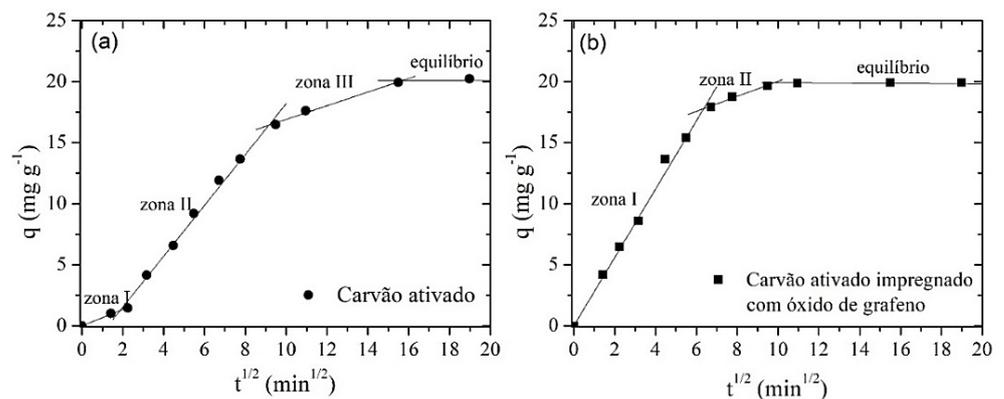
Como pode ser observado na Tabela 2, ambos os modelos de pseudoprimeira e pseudosegunda ordem apresentaram bom ajustes aos dados cinéticos dos dois adsorventes avaliados. De forma geral, evidencia-se que os valores da constante de velocidade de adsorção do modelo de pseudoprimeira ordem (k_1) e do modelo de pseudosegunda ordem (k_2) com o carvão ativado foram menores que os valores

desses parâmetros para a cinética com o carvão ativado impregnado com óxido de grafeno (Tabela 2). Assim, indica-se que o processo em que havia a presença do óxido de grafeno no adsorvente foi mais rápido, pois quanto maior o valor das constantes k_1 e/ou k_2 , mais rapidamente ocorre a adsorção (FREITAS, 2018).

Os modelos cinéticos os quais os ajustes são apresentados na Tabela 2, por vezes podem não descrever todo o processo de adsorção, pois não elucidam os mecanismos de transferência de massa. A análise dos dados pelo modelo de difusão intrapartícula proposto por Weber e Morris (1963) (Equação 2), pode colaborar para identificação dos processos de transferência de massa e da etapa limitante do processo em estudo (MÓDENES et al., 2017). Os dados cinéticos avaliados a partir do modelo de difusão intrapartícula são apresentados na Figura 3 e os valores dos parâmetros ajustados para o modelo são expostos na Tabela 3.

$$q = k_d(t)^{1/2} + C \quad (2)$$

Figura 3 - Avaliação das zonas de transferência de massa pelo modelo de difusão intrapartícula: (a) carvão ativado; (b) carvão ativado impregnado com óxido de grafeno



Fonte: Autoria própria (2020).

Para o carvão ativado, a etapa que demorou mais tempo para ocorrer, conforme observado na Figura 3(a), foi a transferência de massa na camada externa correspondente a adsorção nos meso e macroporos (zona II). Entretanto, para o carvão ativado impregnado com óxido de grafeno (Figura 3(b)), a etapa predominante do processo apresentou-se como sendo a adsorção no filme líquido externo da partícula de adsorvente (zona I) ocorrendo de 0 a 6 $\text{min}^{1/2}$.

Assim, ao comparar-se a raiz do tempo ($t^{1/2}$) decorrido para transferência de massa na zona I, entre o carvão ativado e o carvão ativado impregnado com óxido de grafeno, verifica-se aumento significativo na duração desta etapa de 2 para 6 $\text{min}^{1/2}$, respectivamente. Para a zona II (difusão nos meso e macroporos), o carvão ativado indicou resultados com duração de 2 a cerca de 10 $\text{min}^{1/2}$, e a adição do óxido de grafeno ao adsorvente fez com que essa etapa ocorresse em um menor intervalo de tempo (6 a cerca de 10 $\text{min}^{1/2}$). Além disso, para o carvão ativado, foi observada subsequente etapa de difusão intrapartícula nos microporos (zona III), sendo que esta etapa adicional acresceu o tempo para que o equilíbrio fosse atingido. Apesar de não ser observada a zona III para o carvão ativado impregnado com óxido de grafeno, não foram evidenciados impactos negativos na capacidade de adsorção global, sendo atingidos valores similares no equilíbrio (Tabela 3).

As constantes de velocidades das etapas de transferência de massa (k_d) (Tabela 3) corroboram ainda com os resultados discutidos da Figura 3, mostrando que para o carvão ativado a constante k_{d2} (relativa a zona II) apresentou maior valor se comparada as constantes k_{d1} e k_{d3} (zona I e zona III, respectivamente), indicando que estas duas últimas podem ser as etapas limitantes do processo. Em contrapartida, para o carvão ativado impregnado com óxido de grafeno, a etapa indicada como limitante do processo consta na transferência de massa nos meso e macroporos (zona II), por ser a etapa com a menor constante de velocidade ($k_{d,2}$).

Tabela 3 - Parâmetros do modelo de difusão intrapartícula para os dados cinéticos de adsorção do corante azul de metileno

Zonas de difusão	Parâmetro	Adsorventes	
		Carvão ativado	Carvão ativado impregnado com óxido de grafeno
Zona I	$k_{d,1}$ ($\text{mg g}^{-1} \text{h}^{-1/2}$)	$0,67 \pm 0,02$	$2,79 \pm 0,06$
	C_1 (mg g^{-1})	---	---
	R^2	0,996	0,997
Zona II	$k_{d,2}$ ($\text{mg g}^{-1} \text{h}^{-1/2}$)	$2,083 \pm 0,082$	$0,61 \pm 0,07$
	C_2 (mg g^{-1})	$-2,625 \pm 0,503$	$13,88 \pm 0,57$
	R^2	0,991	0,97
Zona III	$k_{d,3}$ ($\text{mg g}^{-1} \text{h}^{-1/2}$)	$0,56 \pm 0,05$	
	C_3 (mg g^{-1})	$11,31 \pm 0,65$	
	R^2	0,982	
Equilíbrio	q_e (mg g^{-1})	20,2	19,9

Fonte: Autoria própria (2020).

O melhor desempenho cinético do adsorvente com o óxido de grafeno pode estar relacionado com alterações na estrutura do carvão ativado mediante impregnação do óxido de grafeno. As modificações estruturais podem ter ocorrido no âmbito de alteração dos grupos funcionais presentes no adsorvente, modificação no tamanho dos poros, maior disponibilização de sítios ativos na superfície externa do adsorvente com a impregnação, entre outros fatores. Sendo o adsorbato uma molécula grande, a predominância de meso (diâmetro de 20 e 500 Å) e macroporos (diâmetro > 500 Å) pode favorecer a adsorção do corante (COLETTI, 2017; RODRÍGUEZ-REINOSO e MOLINA-SABIO, 1998). Assim, caso a impregnação do óxido de grafeno tenha alterado as características de tamanho de poros, este pode ser um dos fatores de contribuição para a difusão facilitada do corante no adsorvente modificado, discorrendo de um processo mais rápido.

CONCLUSÃO

Com a impregnação de óxido de grafeno no carvão ativado, promoveu-se alterações no adsorvente que, apesar de não terem aumentado a eficiência global do processo de adsorção do corante azul de metileno, conferiram maior velocidade ao processo, evidenciada pelos dados cinéticos. Portanto, estes resultados sugerem que o material produzido é um adsorvente de potencial para emprego na remoção de corantes de águas residuais industriais.

REFERÊNCIAS

ABD-ELHAMID, A.I. et al. Evaluation of graphene oxide-activated carbon as effective composite adsorbent toward the removal of cationic dyes: Composite preparation, characterization and adsorption parameters. **Journal of Molecular Liquids**, Alexandria, v. 279, p. 530-539, 2019.

ANDRONIC, L.; DUTA, A. Photodegradation processes in two-dyes systems – Simultaneous analysis by first-order spectra derivative method. **Chemical Engineering Journal**, v. 198-199, p. 468-475, 2014.

COLETTI, M.; **Adsorção de azul de metileno em solução aquosa em casca de maracujá**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Química) – Departamento Acadêmico de Química e Biologia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017. Disponível em: http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/10057/1/CT_COLQUI_2017_2_10.pdf. Acesso em: 30 ago. 2020.

DEBNATH, S. et al. Optimization and mechanism elucidation of the catalytic photo-degradation of the dyes Eosin Yellow (EY) and Naphthol blue black (NBB) by a polyaniline-coated titanium dioxide nanocomposite. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 163, p. 330-342, 2015.

ESPINOZA-QUIÑONES, F.R. et al. Application of high resolution X-ray emission spectroscopy on the study of Cr ion adsorption by activated carbon. **Applied Radiation and Isotopes**, v.68, n. 12, p. 2208-2213, 2010.

FARZANA, R. et al. Thermal nanosizing: Novel route to synthesize manganese oxide and zinc oxide 40 nanoparticles simultaneously from spent Zn–C battery. **Journal of Cleaner Production**, v. 196, p. 478–488, 2018.

FREITAS, E. D.; **Adsorção competitiva de íons prata e cobre em argila bentonítica**. 2016. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2016. Disponível em: http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/304805/1/Freitas_EmanuelleDantasde_M.pdf. Acesso em: 30 ago. 2020.

HO, Y.S.; MCKAY, G.; Sorption of dye from aqueous solution by peat; **Chemical Engineering Journal**, v. 70, p. 115-124, 1998.

HUMMERS, W. S.; OFFEMAN, R. E. Preparation of Graphitic Oxide. **Journal of the American Chemical Society**, v. 80, n. 6, p. 1339, 1958.

KORDOULI, E.; BOURIKAS, K.; LYCOURGHOTIS, A.; KORDULIS, C. The mechanism of azo-dyes adsorption on the titanium dioxide surface and their photocatalytic degradation over samples with various anatase/rutile ratios. **Catalysis Today**, v. 252, p. 128–135, 2015.

KUNZ, A.; PERALTA-ZAMORA, P.; MORAES, S. G. de; DURAN, N. Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. **Química Nova**, São Paulo, v.25, n.1, 78-82, 2002.

LAGERGREN, S.; About the theory of so-called adsorption of soluble substances, Kungl. **Svenska vetenskapsakademiens handlingar**, v. 24, p. 1 – 39, 1898.

MARIN, P.; **Remoção de flúor utilizando adsorventes comerciais e um novo material sintetizado à base de grafeno**. 2017. 161 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2017. Disponível em: <http://repositorio.uem.br:8080/jspui/handle/1/3674>, Acesso em: 30 ago. 2020.

MÓDENES, A. N. et al. Potential of *Salvinia auriculata* biomass as biosorbent of the Cr(III): directed chemical treatment, modeling and sorption mechanism study; **Environmental Technology**, v. 38, p. 1474-1488, 2017.

SAGGIORO, E. M. et al. Photo-decolorization and ecotoxicological effects of solar compound parabolic collector pilot plant and artificial light photocatalysis of indigo carmine dye; **Dyes and Pigments**, v. 113, p. 571-580, 2015.

TURNER, N. H.; Kinetics of Chemisorption: An Examination of the Elovich Equation; **Journal of catalysis**, v. 36, p. 262-265, 1975.

WEBER, W.J., MORRIS, J.C.; Kinetics of adsorption on carbon from solution; **J. Sanit. Eng. Div.**, v. 89, p. 31-60, 1963.