

PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DO RESÍDUO DA CASCA DA ACÁCIA NEGRA PARA ADSORÇÃO DE NIMESULIDA

Natália Britto Azevedo Souza¹, Daniela da Silva Leon Bitencourt², Gabriela Silveira da Rosa³, André Ricardo Felkl de Almeida³

173

1*- Mestranda, Universidade Federal do Pampa - UNIPAMPA, naatybs94@gmail.com
2- Graduanda, Universidade Federal do Pampa - UNIPAMPA, danielabitencourt.aluno@unipampa.edu.br
3 - Dr., Universidade Federal do Pampa - UNIPAMPA, gabrielarosa@unipampa.edu.br; andrealmeira@unipampa.edu.br

PRODUCTION OF ACTIVATED CARBON FROM BLACK ACACIA BARK RESIDUE FOR NIMESULIDE ADSORPTION

Resumo: Os contaminantes emergentes são poluentes encontrados em pequenas quantidades, mas que podem bioacumular e causar grandes estragos no meio ambiente e nos seres vivos, pois seus efeitos a longo prazo ainda são desconhecidos. Dentre esses contaminantes encontram-se os fármacos, que não são removidos em tratamento convencionais. Entre os processos geralmente utilizados nos tratamentos destaca-se a adsorção, uma técnica de baixo custo e fácil operação. A partir disso o presente estudo buscou produzir carvão ativado a partir do resíduo da casca da acácia negra para ser utilizado como adsorvente na remoção do anti-inflamatório nimesulida. O adsorvente foi caracterizado quanto sua massa específica, porosidade, diâmetro de partícula e área superficial específica, além das análises imediatas de teor de cinzas, materiais voláteis, umidade e carbono fixo. A caracterização do carvão ativado produzido apresentou resultados próximo ao carvão comercial, mas com a porosidade e área superficial específica, 62,12 % e 74,13 % menor, respectivamente. Os ensaios de cinética e isoterma mostraram que o carvão produzido apresenta grande potencial de adsorção chegando a uma capacidade máxima de adsorção 36,08% maior que o carvão ativado comercial e se ajustando melhor ao modelo de cinética de pseudo segunda ordem e ao modelo de isoterma de Langmuir, além de alcançar o equilíbrio 115 minutos antes do carvão comercial.

Palavras-chave: Resíduo agrícola; adsorção; contaminantes emergentes.

Abstract: Emerging contaminants are pollutants found in small amounts, but which can bioaccumulate and cause great damage to the environment and living beings, as their long-term effects are still unknown. Among these contaminants are drugs, which are not removed in conventional treatments. Among the processes generally used in treatments, adsorption stands out, a low-cost and easy-to-operate technique. From this, the present study sought to produce activated charcoal from black wattle bark residue to be used as an adsorbent in the removal of the anti-inflammatory nimesulide. The adsorbent was characterized by its specific mass, porosity, particle diameter and specific surface area, in addition to immediate analysis of ash content, volatile materials, moisture and fixed carbon. The characterization of the activated carbon produced showed results close to commercial carbon, but with lower porosity, specific surface area, moisture and fixed carbon content. The kinetic and isotherm tests showed that the carbon produced has a great adsorption potential, reaching a maximum adsorption capacity 36.08% greater than commercial activated carbon and better fitting the pseudo second order kinetics

model and the isotherm model de Langmuir, in addition to reaching equilibrium 115 minutes before commercial coal.

Keywords: *Agricultural waste; adsorption; emerging contaminants.*

INTRODUÇÃO

A contaminação das águas acontece normalmente em função do rápido desenvolvimento e industrialização das cidades sem um planejamento adequado para o armazenamento e tratamento dos resíduos (SHAYESTEH; NODEHI; RAHBAR-KELISHAMI, 2020). Atualmente, o avanço da tecnologia e o desenvolvimento de métodos novos e mais sensíveis de análise alertou sobre a presença de resíduos de medicamentos, produtos de higiene, aditivos alimentares, agrotóxicos, micro plásticos, entre outros contaminantes nas águas (DELGADO et al., 2019; STREIT et al., 2021).

Em razão dos avanços da medicina humana e animal, além do crescimento e envelhecimento populacional, a produção e o consumo de produtos farmacêuticos está crescendo constantemente por todo o mundo (NAS et al., 2021; VIEIRA et al., 2021b). Esses compostos são planejados e desenvolvidos para terem efeitos biológicos em concentrações muito pequenas e com duração a longo prazo. Essas moléculas, em conjunto com seus produtos resultantes da degradação e metabólitos, possuem uma significativa resistência ambiental e podem bioacumular formando novos compostos (FRÖHLICH; FOLETTO; DOTTO, 2019; YANG et al., 2020).

As estações de tratamento de águas residuais, em geral, não são capazes de remover esses contaminantes devido as suas pequenas concentrações e por serem planejadas para eliminar exclusivamente poluentes orgânicos solúveis, sólidos suspensos, matéria floculada e certos nutrientes para satisfazer aos padrões de qualidade exigidos pelas legislações (NAS et al., 2021; TIWARI et al., 2017). Existem diversos estudos de diferentes tipos de tratamentos para a remoção desses contaminantes das águas residuais antes de serem lançados no meio ambiente, visando sempre técnicas que apresentam um baixo custo econômico (GHEMIT et al., 2019).

Entre essas técnicas encontra-se a adsorção que segundo Geankópolis (1998) é um processo físico-químico de separação onde acontece o contato entre um sólido e um fluido, líquido ou gás, ocasionando uma transferência de massa da fase fluida para a superfície do sólido. A capacidade de adsorção e eficiência do processo está extremamente ligada à qualidade do material adsorvente empregado, que estão sempre sendo investigados e produzidos com base em novas matérias primas (FRÖHLICH; FOLETTTO; DOTTO, 2019; GUPTA; KHATRI, 2019).

Em vista disso, o presente trabalho buscou aproveitar o resíduo da casca da acácia-negra proveniente da extração de taninos como matéria prima para a produção de carvão ativado como uma alternativa de meio adsorvente para a remoção do nimesulida.

METODOLOGIA

A matéria-prima utilizada como adsorvente é o resíduo da casca da acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild) proveniente da extração do tanino da indústria SETA - Sociedade Extrativa Tanino de Acácia Ltda., localizada no município de Estância Velha. Para fins comparativos foi utilizado também como material adsorvente o carvão ativado comercial obtido no mercado local. O efluente foi sintetizado em laboratório a partir do medicamento anti-inflamatório nimesulida com pureza superior a 98 %. Para uma melhor solubilização, foi adicionado etanol à solução com uma razão 20% v/v.

O resíduo foi moído em moinho de facas (Marconi, modelo Croton) para sua uniformização e obtenção de granulometria menor que 1 mm, lavado para remoção de qualquer tipo de coloração e seco na estufa durante 24h à 105°C. O material foi impregnado com ácido fosfórico 40% m/m com razão de H₃PO₄/precursor 1:1 em massa e para a obtenção do carvão ativado o material impregnado foi carbonizado em reator tubular em atmosfera inerte de N₂, neutralizado com água destilada e seco em estufa nas condições de 105°C por 24h (ITANKAR; PATIL, 2021).

A caracterização física e físico-química foi feita quanto a massa específica real através da picnometria gasosa e a massa específica aparente por ensaio de proveta. O diâmetro médio de partícula foi obtido tanto por ensaios de peneiramento (Bertel, modelo 4830) quanto por análises em granulômetro CILAS. A porosidade do leito de partículas foi estimada pela relação entre as massas específica real e aparente (ITANKAR; PATIL, 2021). As análises imediatas foram realizadas de acordo com as normas ASTM-D1762 para a umidade, ASTM-E1755 para as cinzas e ASTM-E872 para análise dos voláteis e carbono fixo. A obtenção da área superficial foi feita através da análise de BET (FILHO *et al.*, 2021).

A adsorção foi realizada em batelada para os dois adsorventes, onde uma solução de 50 mL de nimesulida foi colocado em contato com 0,5 g/L de adsorvente produzido e com 0,5 g/L de carvão ativado comercial. A solução foi mantida em pH neutro, ajustando com NaOH. Para agitar as misturas utilizou-se um shaker (NOVA ÉTICA, 109-1, Brasil) e para separar o carvão ativado da solução uma centrifuga (QUÍMIS, Q222TM216, Brasil). As concentrações de nimesulida foram medidas através do espectrofotômetro UV-VIS (Kazuaki, II-226, China) em um comprimento de onda de 392 nm. As Equações 1 e 2 foram utilizadas para determinar a capacidade de adsorção (q_e , mg g⁻¹) e a eficiência de remoção (E , %), respectivamente.

$$q_e = \frac{(C_0 - C_f)V}{m_{ad}} \quad (1)$$

$$E = \frac{C_0 - C_f}{C_0} \cdot 100 \quad (2)$$

onde, C_0 é a concentração inicial do adsorvato (mg L⁻¹); o C_f a concentração do adsorvato no final do processo (mg L⁻¹); m_{ad} a massa de adsorvente (g); e V volume da solução (L).

A cinética de adsorção foi feita com uma concentração de 35 ppm de nimesulida e variando o tempo de 0 a 240 min. Para ajustar os dados foram utilizados os modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem (LAGERGREN, 1898) e pseudo-segunda ordem (HO E MCKAY, 1998), como mostram as Equações 3 e 4, respectivamente.

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

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

onde, k_1 é a constante da velocidade da adsorção de pseudo-primeira ordem (min^{-1}), k_2 é a constante da velocidade da adsorção de pseudo-segunda ordem ($\text{g mg}^{-1}\text{min}^{-1}$) e q_e e q_t são as quantidades adsorvidas (mg g^{-1}) no equilíbrio e no tempo t (min), respectivamente.

Já as isotermas de adsorção foram desenvolvidas variando a concentração da solução de 5 a 400 (mg L^{-1}) no tempo de equilíbrio encontrado a partir da cinética. Os modelos empregados para o estudo do equilíbrio termodinâmico estão expostos na Equação 5 (modelo de Langmuir) (LANGMUIR, 1918), na Equação 6 (modelo Freundlich) e na Equação 7 (modelo de Sips).

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

$$q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n_F}} \quad (6)$$

$$q_e = \frac{q_{m\acute{a}x} \cdot K_S \cdot C_e^{1/n_S}}{1 + K_S \cdot C_e^{1/n_S}} \quad (7)$$

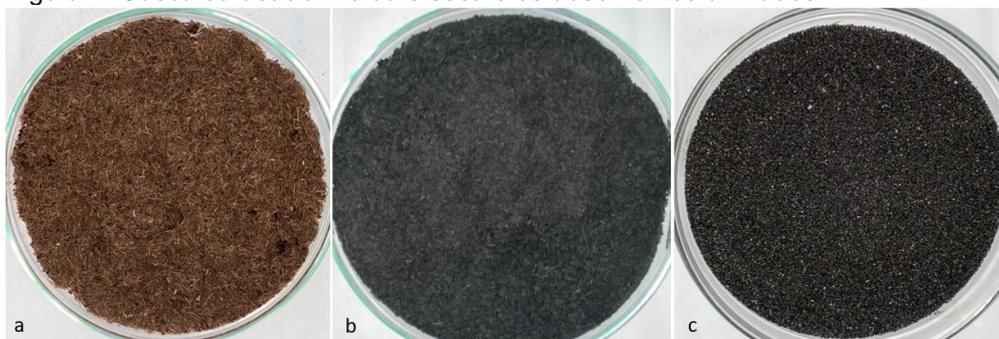
onde, $q_{m\acute{a}x}$ é a capacidade máxima de adsorção do material (mg g^{-1}), K_L é a constante de equilíbrio de adsorção de Langmuir (L mg^{-1}), n (adimensional) está relacionada com a intensidade de adsorção, indicando se o processo é ou não favorável, K_F é a constante de capacidade de adsorção de Freundlich [mg g^{-1}]

(mg L^{-1})^{-1/n}], K_s é a constante de equilíbrio de adsorção de Sips (mg L^{-1})^{-1/n} e n_s é o expoente de Sips.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

São apresentados na Figura 1 a casca da acácia moída e seca (a), o carvão produzido a partir da casca da acácia moída, seca e impregnada com H_3PO_4 (b) e o carvão comercial (c) utilizado para fins comparativos.

Figura 1. Casca da acácia moída e seca e os adsorventes utilizados.



Fonte: Autores (2021). Legenda: casca moída e seca (a) carvão produzido (b) e carvão comercial (c)

Pode-se observar visualmente que as características do material produzido mudaram ao comparar com a casca moída e seca.

A tabela 1 mostra os resultados obtidos para a caracterização do carvão ativado produzido a partir da casca da acácia negra impregnada com H_3PO_4 (CAP) e do carvão ativado comercial (CAC).

Tabela 1: Resultados da caracterização do carvão ativado produzido (CAP) e do carvão ativado comercial (CAC).

Amostra	ρ_{real} (g/cm^3)	ρ_{parente} (g/cm^3)	ϵ	D_p (μm)	S_{BET} (m^2/g)
CAP	1,7412	0,2218	0,13	149,28	153,4
CAC	1,7105	0,5871	0,3432	159,4	592,8

Fonte: Autores (2021).

De acordo com os resultados obtidos, pode-se notar na Tabela 1 que o carvão ativado produzido possui um diâmetro de partículas e massa específica real muito próximo ao do carvão ativado comercial. No entanto, o valor obtido para a porosidade do leito fixo do carvão produzido foi relativamente baixo quando comparado com os valores encontrados na literatura para resíduos agrícolas, como para Silva *et al.* (2020) que encontrou em torno de 0,90 para o carvão produzido a partir da palha de Azevém e Sousa (2018) que obteve 0,54 para o carvão ativado produzido utilizando o endocarpo do coco babaçu.

A Tabela 2 apresenta os resultados encontrados para as análises imediatas do carvão ativado produzido (CAP) e do carvão ativado comercial (CAC).

Tabela 2: Resultados das análises imediatas do carvão ativado produzido (CAP) e do carvão ativado comercial (CAC).

Amostra	U (%)	C _z (%)	M _v (%)	C _f (%)
CAP	2,10	56,20	29,30	12,94
CAC	15,88	5,32	32,11	49,79

Fonte: Autores (2021).

Observa-se na Tabela 2 que a quantidade de material volátil é bem próxima para os carvões. Porém, a umidade para o carvão ativado produzido é 86,77% menor que a umidade do carvão comercial, o que significa um resultado positivo visto que, quanto menor a umidade do material mais poros estão disponíveis para que aconteça a adsorção (SILVA, 2009).

Já o valor encontrado de teor de cinzas para o carvão ativado produzido é em torno de 90% maior que a quantidade de cinzas do carvão comercial. De acordo com Moreno-Castilla (2004), alto teor de cinzas é um resultado negativo para a adsorção, pois pode acabar prejudicando o processo ao bloquear a porosidade da matriz carbônica e adsorver especialmente água.

A Tabela 3 apresenta os valores obtidos para os ajustes dos dados experimentais dos ensaios de cinética com o carvão ativado produzido (CAP) e com o carvão comercial (CAC), respectivamente.

Tabela 3: Valores obtidos para os ajustes dos modelos cinéticos.

Modelos	CAP		CAC	
	Pseudo 1ª ordem	Pseudo 2ª ordem	Pseudo 1ª ordem	Pseudo 2ª ordem
Parâmetros	$q_e = 68,58$	$q_e = 68,83$	$q_e = 29,11$	$q_e = 31,94$
	$k_1 = 0,827$	$k_2 = 0,141$	$k_1 = 0,0504$	$k_2 = 0,0023$
R^2	0,9998	0,9999	0,9911	0,985
χ^2	0,067	0,029	0,85	1,42
EMR (%)	0,195	0,159	3,43	3,97

Fonte: Autores (2021).

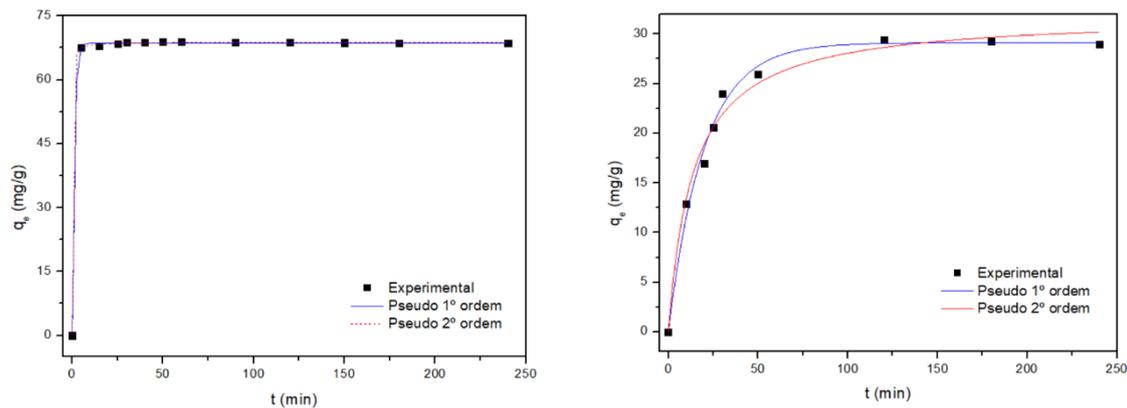
Analisando os valores obtidos com os ajustes cinéticos expostos na Tabela 3, observa-se que para o carvão ativado produzido os dois modelos apresentaram bons coeficientes de correlação (R^2). O carvão ativado produzido teve os valores mais altos de capacidade de adsorção, em torno de 68 mg/g, em comparação com o carvão comercial que teve em média 30 mg/g.

Para o carvão comercial nota-se que o modelo pseudo primeira ordem apresentou o melhor coeficiente de correlação, ou seja, 99,11% da variação total em torno da média pode ser explicada pela regressão. No entanto, não é suficiente avaliar o melhor ajuste somente pelo coeficiente de correlação e, observando os valores do erro médio relativo (EMR) e do qui-quadrado (χ^2), pode-se dizer que o modelo que melhor se ajustou para CAP foi o pseudo segunda ordem e para o CAC o pseudo primeira ordem, visto que segundo Craesmeyer (2013), quanto menor os valores de χ^2 e EMR melhor o dado experimental se ajusta ao valor encontrado pelo modelo.

O modelo pseudo segunda ordem que melhor descreveu a velocidade de remoção do nimesulida no carvão ativado produzido, aponta que a velocidade da reação depende da quantidade de soluto adsorvido na superfície do adsorvente e de quanto foi adsorvido no equilíbrio. Este modelo diz que o processo de adsorção é de meio químico, com a ação de forças de valência ou troca de elétrons entre o adsorvente e adsorvato (HO e MCKAY, 1998b; HO e MCKAY, 1999b).

Na Figura 2 é apresentado os ajustes dos modelos cinéticos dos dados experimentais para o carvão ativado produzido (CAP) e para o carvão ativado comercial (CAC).

Figura 2. Ajuste dos modelos cinéticos aos dados experimentais para o CAP e CAC,



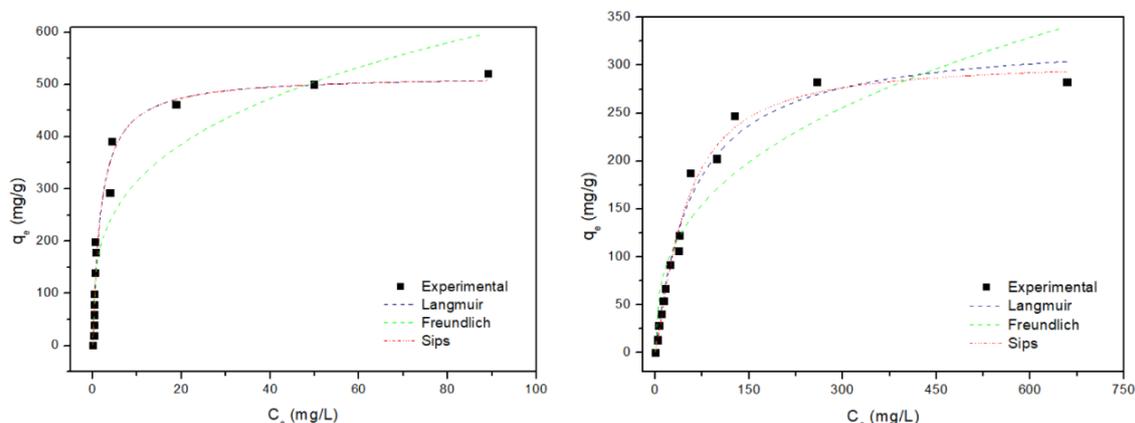
respectivamente.

Fonte: Autores (2021).

A partir da Figura 2 observa-se que o CAP atingiu sua máxima capacidade de remoção e saturou muito rápido, alcançando o equilíbrio em, aproximadamente, 10 minutos. Essa ligeira adsorção e alcance de equilíbrio em um pequeno espaço de tempo indica a eficiência do adsorvente. Já o CAC levou em torno de 125 minutos para atingir sua capacidade máxima de remoção e alcançar o equilíbrio.

A Figura 3 apresenta os ajustes dos modelos de isoterma dos dados experimentais para o carvão ativado produzido (CAP) e para o carvão ativado comercial (CAC).

Figura 3. Ajuste dos modelos de isoterma aos dados experimentais para o CAP e CAC, respectivamente.



Fonte: Autores (2021).

As curvas de isoterma indicam um processo favorável de adsorção de Nimesulida, em ambos os adsorventes, que ocorre quando o aumento da capacidade de adsorção e o aumento da concentração de adsorvato são proporcionais. Os resultados para os ajustes de isoterma de adsorção para o carvão ativado produzido (CAP) e para o carvão ativado comercial (CAC) podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4: Valores obtidos para os ajustes dos modelos de isoterma.

Modelos	CAP			CAC		
	Langmuir	Freundlich	Sips	Langmuir	Freundlich	Sips
$q_{máx.}$	518,20	$n = 3,4$	$q_{máx.} = 29,11$	$q_{máx.} = 331,21$	$n = 2,76$	$q_{máx.} = 304,40$
Parâmetros	$k_L = 0,535$	$k_F = 159,82$	$k_s = 0,5350$ $n_s = 1,001$	$k_L = 0,017$	$k_F = 32,34$	$k_s = 0,0078$ $n_s = 0,7973$
R^2	0,9557	0,8439	0,9557	0,9873	0,8739	0,8413
X^2	1490,01	5248,79	1555,35	205,28	1415,83	2925,82
EMR (%)	41,8	76,72	41,8	10,35	52,14	26,16

Fonte: Autores (2021).

Nota-se na Tabela 4 que o modelo de isoterma que melhor se ajustou aos dados experimentais tanto para o CAP quanto para o CAC foi o modelo de Langmuir, com maior coeficiente de correlação, bem como os menores resultados para os parâmetros x^2 e *EMR*. Segundo o modelo de Langmuir o CAP teve sua capacidade de adsorção máxima de nimesulida de 518,20 mg/g, 36,08% maior que o do CAC.

O modelo de Langmuir compreende que o equilíbrio da adsorção é de acordo com o princípio cinético, dado que, no equilíbrio, a velocidade da adsorção seria igual à dessorção (LANGMUIR, 1918). Atribui-se que a adsorção acontece em determinados sítios e cada um é capaz de acomodar somente um íon ou molécula, onde não há interação entre essas espécies químicas, acarretando na formação de monocamadas (Do, 1998).

CONCLUSÃO

Os resultados para a caracterização do adsorvente produzido encontram-se satisfatórios e de acordo com a literatura. O diâmetro médio de partículas e a massa específica real foram próximas para ambos os adsorventes, no entanto o carvão comercial apresentou uma porosidade superior, em torno de 62% maior que a porosidade do carvão produzido. Além da área superficial específica do carvão comercial que foi em média 74% maior que a do carvão ativado produzido. Analisando os resultados das análises imediatas o carvão ativado produzido possui um teor de umidade de 86,77% menor que o carvão comercial e um teor de materiais voláteis bem próximo ao carvão comercial.

Para os ensaios de cinética de adsorção o modelo que melhor se ajustou para o adsorvente produzido foi o pseudo segunda ordem com o valor de capacidade de adsorção em torno de 68,83 mg/g atingindo o equilíbrio em 10 minutos. Já para o carvão comercial o modelo que melhor se ajustou foi o pseudo primeira ordem com uma capacidade de adsorção 57,71% menor que a do

carvão ativado produzido, alcançando o equilíbrio somente depois dos 125 minutos.

Os resultados dos ajustes das isotermas mostraram que o modelo que melhor se ajustou para os adsorventes foi modelo de Langmuir com a capacidade máxima de adsorção de 518,20 mg/g para o CAP e 331,21 mg/g para o carvão comercial. Em relação aos valores de eficiência de remoção, o carvão ativado produzido a partir da casca da acácia negra impregnada com H_3PO_4 atingiu em torno de 98% de eficiência enquanto o carvão comercial chegou apenas em aproximadamente 42%.

Desta forma, pode-se dizer que o carvão ativado produzido possui grande potencial de adsorção apresentando resultados melhor que o carvão comercial e deve ser melhor explorado.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem a Universidade Federal do Pampa por toda a infraestrutura, a CEPES pela concessão de bolsa de mestrado da CAPES, a FAPERGS pela bolsa de iniciação científica e a indústria SETA - Sociedade Extrativa Tanino de Acácia Ltda. por toda a matéria prima disponibilizada.

REFERÊNCIAS

CRAESMEYER, G. R. **Tratamento de efluente contendo urânio com zeólita magnética**. 2013. Dissertação, Mestrado em Ciências - Instituto de Pesquisas Energéticas e nucleares, São Paulo. 2013.

DELGADO, N. et al. Pharmaceutical emerging pollutants removal from water using powdered activated carbon: Study of kinetics and adsorption equilibrium. **Journal of Environmental Management**, v. 236, p. 301–308, 2019.

Do, D. D. **Fundamentals of Diffusion and Adsorption in Porous Media**. 1. ed.1998.

FILHO, Alaor Valério *et al.* Optimization of cationic dye removal using a high surface area-activated carbon from water treatment sludge. **Bulletin of Materials Science**, v. 44, n. 1, 2021.

FRÖHLICH, A. C.; FOLETTO, E. L.; DOTTO, G. L. Preparation and characterization of NiFe₂O₄/activated carbon composite as potential magnetic adsorbent for removal of ibuprofen and ketoprofen pharmaceuticals from aqueous solutions. **Journal of Cleaner Production**, v. 229, p. 828–837, 2019.

GHEMIT, R. *et al.* Adsorptive removal of diclofenac and ibuprofen from aqueous solution by organobentonites: Study in single and binary systems. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 8, p. 520–529, 2019.

GUPTA, K.; KHATRI, O. P. Fast and efficient adsorptive removal of organic dyes and active pharmaceutical ingredient by microporous carbon: Effect of molecular size and charge. **Chemical Engineering Journal**, v. 378, p. 122218, 2019.

HO, Y. S. Citation review of Lagergren kinetic rate equation on adsorption reactions. **Scientometrics**, Vol. 59, No. 1, p. 171-177, 2004.

HO, Y. S.; MCKAY, G. A comparison of chemisorption kinetic models applied to pollutant removal on various sorbents. **Trans IChemE**, v. 76, Part B, p. 332-340, 1998.

HO, Y.; MCKAY, G. Pseudo second order model for sorption processes. **Process Biochemistry**, v. 34, p. 451–465, 1999.

ITANKAR, Nilisha; PATIL, Yogesh. Employing waste to manage waste: Utilizing waste biomaterials for the elimination of hazardous contaminant [Cr(VI)] from aqueous matrices. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 239, p. 103775, 2021.

LANGMUIR, I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. **Journal of American Chemical Society**, v. 40, n. 9, p. 1361-1403, 1918.

MORENO-CASTILLA, C. Adsorption of organic molecules from aqueous solutions on carbon materials. **Carbon**, v. 42, p. 83–94, 2004.

NAS, Bilgehan *et al.* Comparison of advanced biological treatment and nature-based solutions for the treatment of pharmaceutically active compounds (PhACs): A comprehensive study for wastewater and sewage sludge. **Science of the Total Environment**, v. 779, 2021.

SHAYESTEY, Hadi; NODEHI, Reza; RAHBAR-KELISHAMI, Ahmad. Trimethylamine functionalized clay for highly efficient removal of diclofenac from contaminated water: Experiments and theoretical calculations. **Surfaces and Interfaces**, [s. l.], v. 20, n. June, p. 100615, 2020.

186

SILVA, E. O.; SANTOS, V. D.; ARAUJO, E. B.; GUTERRES, F. P.; ZOTTIS, R.; FLORES, W. H.; ALMEIDA, A. R. F. Removal of methylene blue from aqueous solution by ryegrass straw. **International Journal of Environmental Science and Technology**. 2020.

SILVA, J. **Estudo da eficiência e da aplicabilidade de carvão ativado resultante de pirolise de casaca de arroz em barreiras reativas na remoção de contaminantes em solo**. Tese, Doutorado em engenharia - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2009.

SOUSA, M. C. S. **Adsorção de azul de metileno utilizando carvão ativado produzido a partir do endocarpo do coco babaçu (*Attalea speciosa*)**. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Química – Unipampa. Rio Grande do Sul. 2018.

STREIT, A. F.M. et al. Adsorption of ibuprofen, ketoprofen, and paracetamol onto activated carbon prepared from effluent treatment plant sludge of the beverage industry. **Chemosphere**, v. 262, 2021.

TIWARI, B. *et al.* Review on fate and mechanism of removal of pharmaceutical pollutants from wastewater using biological approach. **Bioresource Technology**, v. 224, p. 1–12, 2017.

VIEIRA, Yasmin et al. Microplastics physicochemical properties, specific adsorption modeling and their interaction with pharmaceuticals and other emerging contaminants. **Science of the Total Environment**, v. 753, p. 141981, 2021.

YANG, W. *et al.* Highly efficient and stable FeII/FeIII LDH carbon felt cathode for removal of pharmaceutical ofloxacin at neutral pH. **Journal of Hazardous Materials**, v. 393, p. 122513, 2020.