



PARÂMETROS CINÉTICOS E DE EQUILÍBRIO DA ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO POR CARVÃO ATIVADO DE BORRA DE CAFÉ

Caio N. Santana^{1,2}, Emily K. da Hora¹, Alana C. da C. França¹, André R. Martins³, Doris Ruiz⁴, Cesário F. das Virgens⁵, Luciene S. Carvalho¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia - Campus Camaçari, Av. Jorge Amado, s/n - Jardim Limoeiro, 42808-590, Camaçari-BA

²Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Rua Prof. Aristides Novis, nº 02, Federação, 40210-630 Salvador-BA

³Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia - Campus Salvador, Rua Emídio dos Santos, s/n, Barbalho, 40301-015, Salvador-BA

⁴Universidad de Concepción, Edmundo Larenas 4030000 Region de Biobio, Concepcion, Chile

⁵Universidade do Estado da Bahia, Rua Silveira Martins, 2555, Cabula, 41.150-000, Salvador-BA

Palavras-Chave: biocarvão, resíduos de café, tratamento de efluentes.

Introdução

No Brasil, a principal forma de destinação final dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) são os aterros sanitários e lixões, sendo que grande parte da sua composição é orgânica (mais de 50%), e proveniente de uma cultura de desperdício de alimentos (Gewandsznajder; Pires, 2020). Um desses resíduos descartados é a borra de café, muito abundante no Brasil, já que, além de ser o maior produtor do grão, é também o segundo maior consumidor da bebida no mundo (USDA, 2020). Como consequência do alto consumo per capita de café no país, que equivale a 6,4 kg de café cru e 5,12 kg de café torrado e moído (ABIC, 2023), a borra de café se torna um dos principais resíduos orgânicos gerados em quantidades alarmantes, o que corresponde, segundo Gewandsznajder & Pires (2020), a mais de 1 milhão de toneladas por ano. Essa alta produção de lixo orgânico se torna prejudicial ao meio ambiente, uma vez que, ao serem despejados nos lixões ou aterros sanitários, podem sofrer decomposição anaeróbia, liberando metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) e dióxido de carbono (CO₂), gases intensificadores de efeito estufa (EMBRAPA, 2010).

Em busca de alternativas para reaproveitar resíduos de café, Gewandsznajder e Pires (2020) avaliaram algumas possibilidades de reuso da mesma, como a compostagem, a produção de fertilizantes, biocombustíveis, produtos alimentares, cosméticos, adsorventes, entre outros. Dentre estas alternativas, a produção de adsorventes foi uma das melhores opções de reutilização da borra, ficando atrás apenas da compostagem e produção de fertilizantes. Porém, a utilização da borra como adubo só pode ser feita em baixas quantidades, devido à presença de substâncias que podem afetar o crescimento das plantas, como a cafeína. Além de ser uma matéria-prima abundante, de baixo custo e sustentável para obter adsorventes do tipo carvão ativado, a borra de café apresenta a vantagem de possuir um elevado teor de carbono (Werlang et al., 2013), uma superfície com diversas cavidades e poros, e estruturas de lignina, celulose e hemicelulose, que têm grupos funcionais abundantes (C=O, -COOH, -OH, -COO-) (Anastopoulos et al., 2017), fatores essenciais para a adsorção, um processo físico-químico em que as moléculas, átomos ou íons de um fluido (adsorbato) ficam retidos na superfície de uma substância sólida (adsorbente) de moléculas em fase líquida ou gasosa. Essas características inerentes da borra de café podem ser melhoradas ainda mais pelo uso de ativantes químicos, como ZnCl₂, NaOH, H₂SO₄ ou H₃PO₄ (Han et al., 2020). Mengesha et al. (2022), por exemplo, usaram biocarvão de borra de café para remover cafeína de água contaminada.

Por outro lado, nota-se que o país também enfrenta impactos ambientais causados pelos efluentes industriais, que contêm elevadas concentrações de compostos poluentes, orgânicos ou inorgânicos, que por consequência, podem acarretar diversos impactos negativos ao meio



ambiente, aos ecossistemas aquáticos e à saúde humana, caso sejam descartados nos corpos d'água, sem o devido tratamento adequado (Santoso et al., 2020). Nesse contexto, destaca-se a indústria têxtil, setor de alta relevância socioeconômica no país, já que o Brasil é um dos cinco maiores produtores mundiais de têxteis (ABIT, 2023). Porém, esse é um dos setores industriais que mais consomem água, principalmente, nas etapas de tinturaria e acabamento, gerando em torno de 50 a 100 L de efluente por quilo de tecido produzido (Arskan-Alaton et al., 2008), e ainda utilizam corantes capazes de sofrer processos de degradação, responsáveis por produzir aminas cancerígenas e altamente tóxicas. Um desses corantes é o azul de metileno, usado na indústria de papel para colorir algodão, seda, lã e tintura de cabelo. Para proteger os seres vivos da ação nociva dessas substâncias é essencial eliminar sua presença nas águas residuais, antes do despejo em fontes hídricas. Dentre as diferentes técnicas de tratamento de efluentes baseadas em tratamentos físico-químicos, a adsorção é preferível já que tem menor custo e não forma intermediários tóxicos (Srvanthi et al., 2018).

De acordo com Müller et al. (2019), para entender o processo de adsorção é importante obter informações sobre cinética, termodinâmica e relações de equilíbrio que ocorrem durante as interações adsorvente-adsorvato. Modelos empíricos ou teóricos podem ser usados no estudo do comportamento de adsorção monocomponente, podendo ser cinéticos, que determinam a velocidade da adsorção, ou de equilíbrio, que fornecem informações do processo global de adsorção, a partir de isotermas.

Com base no exposto, este trabalho propõe uma solução para ambos os problemas, de acúmulo de lixo nos aterros e de contaminação dos corpos d'água, por meio da utilização de resíduos de café para produzir carvão ativado, capaz de remover corantes de efluentes têxteis. Desse modo, o objetivo deste trabalho foi avaliar os parâmetros cinéticos e de equilíbrio de adsorção de carvões ativados produzidos de borra de cápsulas de café.

Material e Métodos

Preparação do adsorvente. A borra de café (BC) foi coletada de cápsulas, seca (120°C, 24h), resfriada, triturada, peneirada e ativada com ácido fosfórico (razão mássica $H_3PO_4/BC = 1:1$). A amostra foi pirolisada (500°C, 1h), lavada com água (pH neutro), seca e peneirada (80-120mesh), obtendo-se o carvão ativado (CABC-P).

Caracterização das amostras. Determinou-se as propriedades físico-químicas das amostras por microscopia eletrônica de varredura, espectroscopia de energia dispersiva de raios-X, difração de raios-X, medida de área específica e porosidade.

Avaliação da capacidade de adsorção do carvão ativado. A atividade de adsorção de azul de metileno pelo carvão ativado de borra de café foi avaliada por seu contato com soluções de 25 a 500mg L⁻¹ do corante, a 25°C, em intervalos de 5 a 120min. As soluções finais, após a adsorção, foram analisadas em espectrofotômetro ajustado a 660nm. Calculou-se a massa do corante adsorvida (mg por g de carvão), obtendo-se a capacidade de adsorção de equilíbrio, em função do tempo, em cada concentração estudada.

Determinação dos parâmetros cinéticos. Os valores da constante de velocidade e da ordem da interação adsorbato-adsorvente foram obtidos plotando-se curvas a partir das equações linearizadas dos modelos de pseudo-primeira (Eq. 1) e pseudo-segunda ordem (Eq. 2) e dos dados experimentais (Nascimento et al., 2014). Encontrou-se, assim, os valores de equilíbrio teóricos e as constantes de velocidade de adsorção para ambos os modelos cinéticos.

$$\ln(q_e - qt) = \ln q_e - k_1 t \quad (1)$$

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

Em 1 e 2, q_e e q_t são as quantidades adsorvidas de corante (mg g^{-1} de carvão), no equilíbrio e no tempo t , respectivamente; K_1 é a constante cinética de adsorção de pseudo-primeira ordem (min^{-1}); K_2 é a constante cinética de adsorção de pseudo-segunda ordem ($\text{g mg}^{-1} \text{min}^{-1}$); e t é o tempo (min).

Determinação dos parâmetros de equilíbrio. Foram escolhidos os modelos de Langmuir e Freundlich para ajustar os dados experimentais, usando versões não lineares das equações das respectivas isotermas de adsorção (Eq. 3 e 4). O valor do fator de separação, R_L , que ajuda a compreender melhor o processo de adsorção, foi calculado pela Eq. 5 (Nascimento et al., 2014).

$$q_e = \frac{q_{\text{máx}} \cdot K_L \cdot C_e}{1 + K_L \cdot C_e} \quad (3)$$

$$q_e = K_F \cdot C_e^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L \cdot C_0} \quad (5)$$

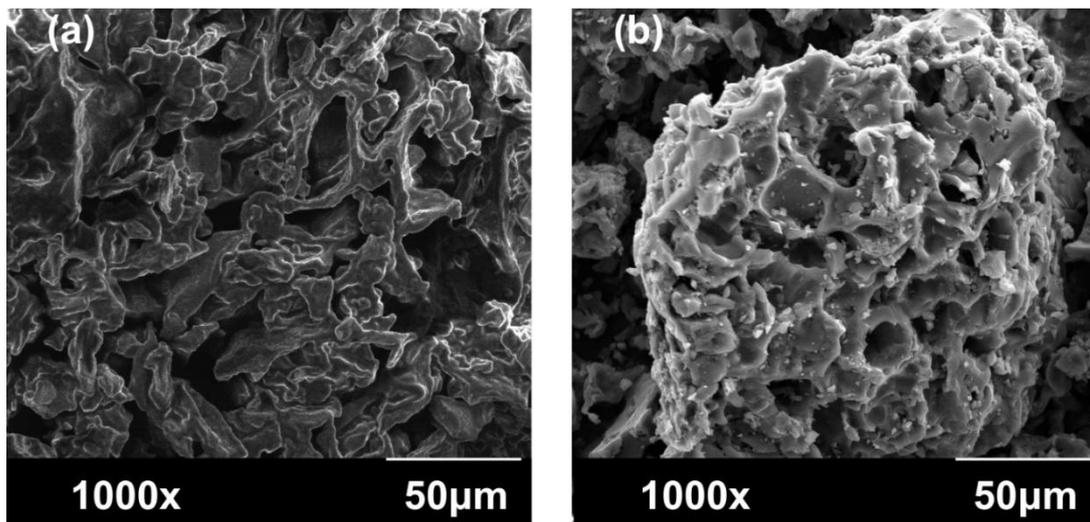
Nas Eq. 3-5, q_e é a quantidade adsorvida no equilíbrio (mg g^{-1}); C_e é a concentração do adsorvato no equilíbrio (mg L^{-1}); $q_{\text{máx}}$ é capacidade máxima de adsorção (mg g^{-1}); K_L é a constante de Langmuir (L mg^{-1}); K_F é a constante de capacidade de adsorção de Freundlich ($\text{mg}^{1-(1/n)} (\text{g}^{-1}) \text{L}^{1/n}$); $1/n$ é uma constante relacionada à heterogeneidade da superfície; R_L é o fator de separação; e C_0 é a concentração inicial (mg L^{-1}).

Resultados e Discussão

Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A borra de café, BC, (Fig. 1a) apresentou uma superfície com aspecto rugoso e algumas cavidades. Após os processos de pirólise e ativação com ácido fosfórico (Fig. 1b), é possível notar uma superfície mais organizada, que mantém o aspecto rugoso, mas com diversos poros e cavidades de aspecto esférico na amostra CABCP-P. Essas características de superfície são vantajosas para o processo de adsorção.

Fig. 1. Imagens de microscopia eletrônica de varredura: BC (a) e CABCP-P (b).



Espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS)

Os resultados do EDS são mostrados na Tabela 1. De modo geral, foi possível notar a presença, principalmente, de carbono, oxigênio e nitrogênio em todas as amostras, e que os teores de carbono da borra de café (BC) e do carvão ativado da borra de café ativado com ácido fosfórico (CABC-P) foram, respectivamente, 78,9% e 73,5%, e menores do que o do carvão ativado comercial – CAC (91,8%). Além disso, observou-se que, após a etapa de impregnação e pirólise, houve um aumento do teor de nitrogênio, fósforo e silício. Isso pode estar associado à presença de contaminantes oriundos do processo de ativação química, que permaneceram no sólido após a lavagem. Apesar do menor teor de carbono da CABC-P, comparada à BC, a quantidade ainda é elevada e favorável à adsorção de contaminantes (Paixão, et al., 2014).

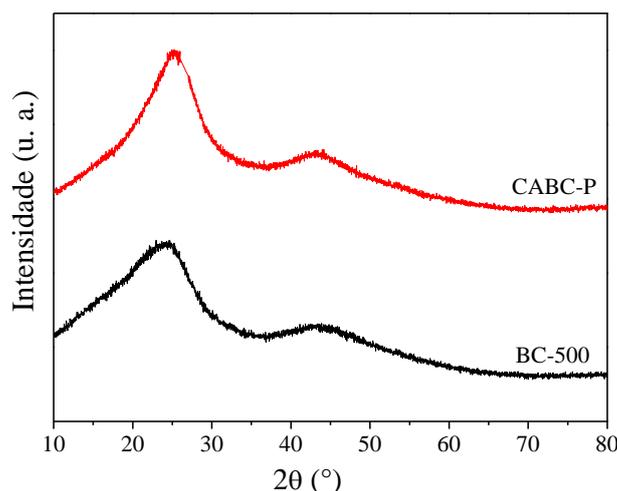
Tabela 1. Composição elementar das amostras, determinada por EDS.

Amostra	Composição (% m/m)					
	C	O	N	P	Si	Outros
BC	78,9	17,3	3,6	-	-	0,1
CABC-P	73,5	15,6	6,7	2,7	1,5	-
CAC	91,8	6,5	-	-	0,9	0,8

Difração de raios-X (DRX)

Os perfis de DRX (Fig. 2) indicaram que ambas as amostras CABC-P e BC-500 (borra de café sem ativação química) apresentaram caráter amorfo, típico de carvão ativado, apresentando dois halos, que podem ser atribuídos à presença de carbono elementar ($2\theta = 25^\circ$) e carbono grafite ($2\theta = 43^\circ$), respectivamente (Sureshi et al. 2011).

Fig. 2. Perfis de DRX do carvão ativado CABC-P e do BC-500.



Medida de área específica e diâmetro de poros

Os resultados de medida de área específica e diâmetro de poros, obtidos por adsorção de nitrogênio, mostraram um valor elevado de área específica para o carvão ativado produzido com borra de café (CABC-P), igual a $789 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$, maior que aquele medido para o carvão comercial ($632 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$). Essa propriedade é fundamental, pois quanto maior for a área específica, maior será a capacidade de adsorção do carvão. Além disso, o diâmetro de poro do carvão CABC-P foi de 2,81 nm, que está na faixa de mesoporos. Esse tipo de poro é ideal à adsorção de corantes, como o azul de metileno (Boligon, 2015).

Avaliação da atividade de adsorção

A capacidade de adsorção e a eficiência de remoção foram avaliadas por meio de testes de adsorção. Pela Fig. 3 é possível notar que os valores de capacidade de adsorção (q_e) permaneceram constantes, em todas as concentrações, após 15min de contato adsorvente-adsorvato. Isso indica que o carvão adsorveu completamente o corante, até a concentração máxima avaliada neste trabalho, que foi de 500mg L^{-1} , em curto período. Essa informação pode ser confirmada na Fig. 4, que mostra que a eficiência de remoção de azul de metileno foi de 100%, logo após cerca de 5min de contato, para soluções com 25 e 100mg L^{-1} do corante, enquanto o processo se tornou mais lento, para soluções mais concentradas ($200\text{--}500\text{mg L}^{-1}$), ocorrendo a adsorção completa do corante somente após 15min de contato. Segundo Stoppe et al. (2019), as soluções menos concentradas tendem a atingir o equilíbrio em menor tempo, pois a transferência de massa é mais fácil, devido ao menor número de partículas na solução. Em contrapartida, em soluções mais concentradas, o equilíbrio é alcançado mais lentamente, por causa da maior quantidade de moléculas de corante, que disputam pelos sítios livres.

Fig. 3. Capacidade de adsorção do carvão CABP, em função do tempo, para soluções contendo 25, 100, 200 e 500mg L^{-1} de azul de metileno.

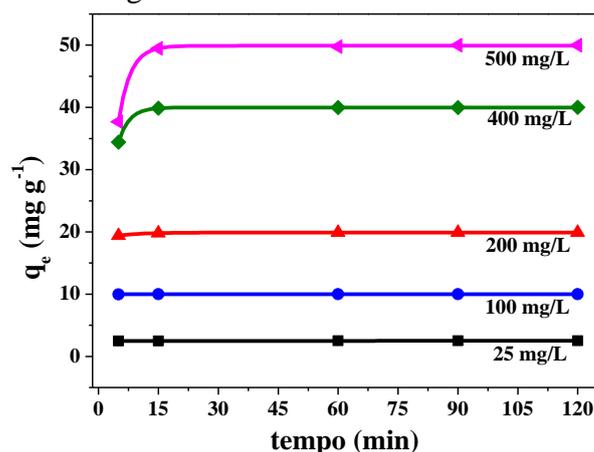
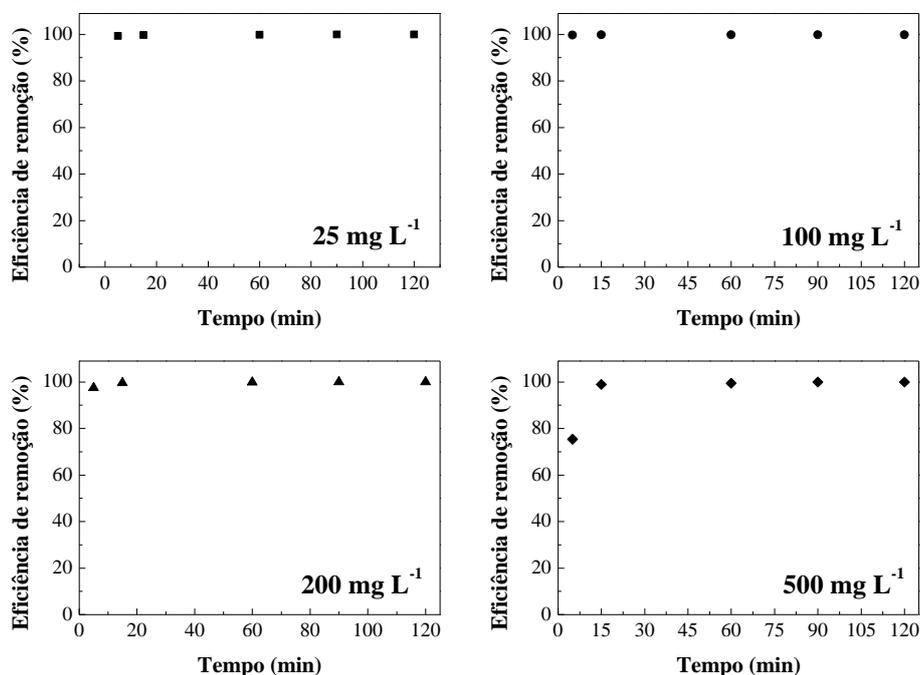


Fig. 4. Eficiência de remoção do CABP, em função do tempo, para soluções contendo 25, 100, 200 e 500mg L^{-1} de azul de metileno.





Determinação dos parâmetros cinéticos

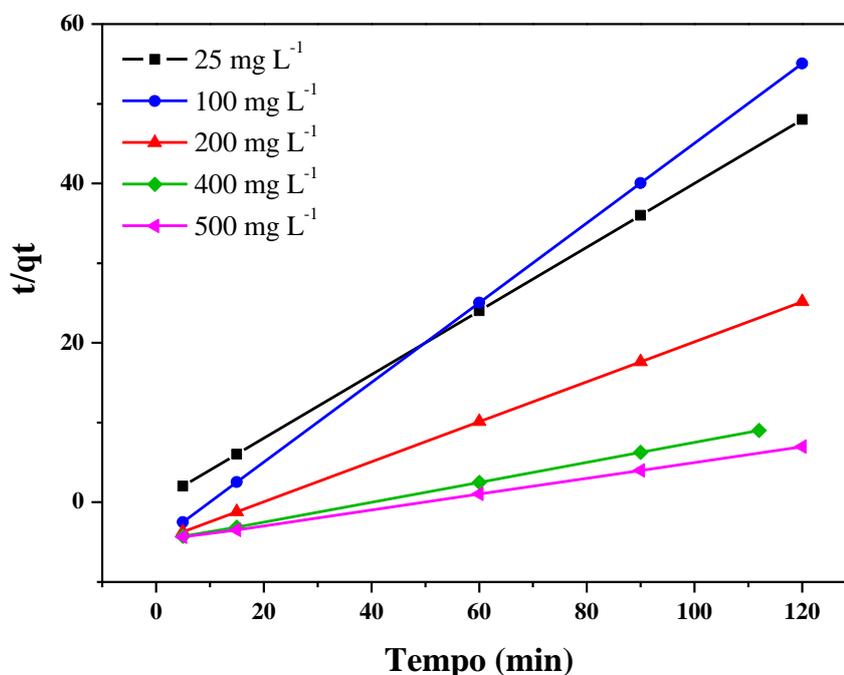
A Tabela 2 mostra os valores obtidos para os parâmetros cinéticos. É possível notar que o modelo cinético que melhor se ajustou ao processo foi o de pseudo-segunda ordem (PSO), devido aos valores de coeficiente de correlação linear serem mais próximos de 1, independente da concentração de corante utilizada. Este fato é evidenciado pela curva mostrada na Fig. 5, construída a partir dos dados experimentais aplicados à Eq. 2, do modelo de pseudo-segunda ordem (PSO). Também se observou, pelos dados da Tabela 2, que os valores teóricos da capacidade de adsorção no equilíbrio (q_e) do modelo de PSO se assemelham mais aos valores encontrados experimentalmente, do que no caso dos respectivos valores para o modelo de PPO.

Estes resultados indicam a possibilidade de ocorrência de uma adsorção química, com possível formação de complexos ou grupos superficiais, devido ao mecanismo de pareamento iônico (Ho e McKay, 1999). Segundo Bugiereck et al. (2013), esse mecanismo pode comprometer a reversibilidade da adsorção do corante na superfície do carvão, dificultando sua reutilização. Ademais, notou-se que o valor de K, em geral, diminuiu com o aumento da concentração da solução do azul de metileno, para o modelo de PSO. Segundo Maria et al. (2022), essa constante corresponde à velocidade com que o sistema atinge o equilíbrio; logo, para valores mais altos de K, o equilíbrio será atingido em menor tempo.

Tabela 2. Parâmetros de ajuste aos modelos de pseudo-primeira e pseudo-segunda ordem.

Concentração (mg L ⁻¹)	Modelo Cinético	q _e experimental (mg g ⁻¹)	Parâmetros		
			K	q _e teórico (mg g ⁻¹)	R ²
25	PPO	2,49	0,030	0,014	0,8609
	PSO		8,22	2,50	1
100	PPO	9,98	0,023	0,015	0,9145
	PSO		8,64	9,99	1
200	PPO	19,8	0,060	0,414	0,8924
	PSO		0,436	19,9	1
400	PPO	39,9	0,068	1,97	0,8266
	PSO		0,054	40,2	0,9999
500	PPO	49,7	0,058	4,62	0,7978
	PSO		0,020	50,5	0,9998

Fig. 5. Curvas obtidas a partir das equações linearizadas do modelo de PSO, para soluções com 25, 100, 200, 400 e 500 mg L⁻¹ de azul de metileno.



Parâmetros de equilíbrio

Uma comparação entre as isotermas de adsorção plotadas com o uso das equações não lineares dos modelos de Langmuir e de Freundlich, e aquela obtida com os dados experimentais, pode ser vista na Fig. 6, que mostra a capacidade de adsorção do carvão no equilíbrio (q_e), em função da concentração de azul de metileno no equilíbrio (C_e). Pelas curvas, pôde-se perceber que a quantidade de corante adsorvida no equilíbrio aumentou proporcionalmente com sua concentração inicial na solução.

A análise das isotermas da Fig. 6, em conjunto com os dados dos parâmetros de adsorção da Tabela 3, permitiu inferir que o modelo que melhor se ajustou, por uma pequena diferença, foi o de Freundlich, pois o coeficiente de correlação R^2 foi o mais próximo de 1. O ajuste a esse modelo informa que o sólido é heterogêneo, admite a adsorção em multicamadas e não há limite para a saturação (Nascimento et al., 2014).

Os parâmetros K_F e n , que são constantes de Freundlich, foram calculados e apresentados na Tabela 3. O valor de K_F , que está relacionada à capacidade de adsorção do material, foi cerca de 26,9, indicando que o material possui uma alta capacidade de adsorção; quanto maior for o valor da constante de Freundlich, maior será essa capacidade (Silva, 2005). Por outro lado, o valor de n , entre 0 e 10, informa que a adsorção pelo carvão ativado é espontânea (Nascimento et al., 2014), enquanto um valor da constante $1/n$ entre 0 e 1 indica que a superfície é heterogênea (Silva, 2005).

Os dados da Tabela 3 também mostram que, apesar de não apresentar o melhor ajuste, pelo modelo de Langmuir determinou-se uma capacidade máxima de adsorção do sólido ($q_{máx}$) de 107,6 mg g⁻¹. Ademais, os valores de R_L para as diferentes concentrações, situados entre 0 e 1, conforme a Tabela 4, são indicativos de processo de adsorção favorável, em concordância com o que foi determinado pelo modelo de isoterma de Freundlich.

Fig. 6. Comparação dos modelos teóricos das isotermas de Langmuir e de Freundlich com os dados experimentais de adsorção de azul de metileno com o carvão CABP-P.

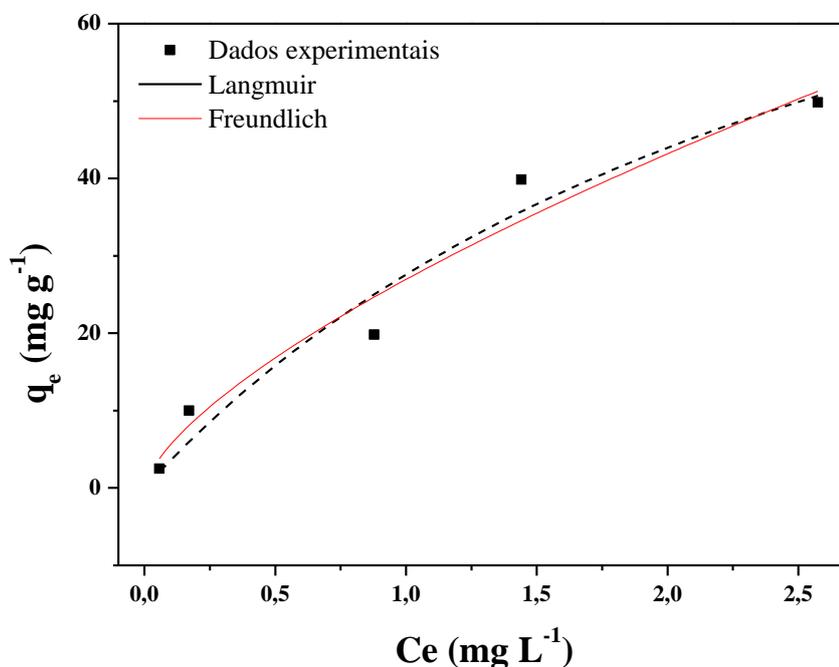


Tabela 3. Parâmetros dos ajustes dos modelos das isotermas de Langmuir e Freundlich.

Modelo	Parâmetros	R ²
Langmuir	$q_{\text{máx}} = 107,6 \text{ mg g}^{-1}$	0,9487
	$K_L = 0,345$	
Freundlich	$K_F = 26,9$	0,9501
	$n = 1,47$	
	$1/n = 0,679$	

Tabela 4. Fator de separação para cada concentração inicial de corante estudada.

Concentração inicial (mg L ⁻¹)	Fator de separação (R _L)
25	0,104
100	0,028
200	0,014
400	0,007
500	0,006

Conclusões

Neste trabalho, foi obtido um carvão ativado de borra de café de cápsulas, usando ácido fosfórico como ativante químico. O material produzido apresentou grande quantidade de cavidades ou poros na superfície e um caráter amorfo, típico de carvão ativado. A elevada área específica, com diâmetro de poros na faixa de mesoporos, e o alto teor de carbono, podem justificar a alta eficiência de remoção do carvão ativado, cuja capacidade de adsorção foi



aumentando com a concentração inicial da solução do corante. O estudo cinético apontou para uma interação carvão-corante compatível com um modelo de pseudo-segunda ordem, e a isoterma de adsorção de Freundlich foi a que melhor se ajustou aos dados experimentais, nas condições empregadas, indicando que a adsorção do azul de metileno, provavelmente, ocorreu, predominantemente, em multicamadas. A partir dos resultados, pode-se concluir que o carvão ativado produzido a partir da borra das cápsulas de café é uma alternativa viável, eficaz e sustentável para tratar águas contaminadas e reduzir danos ao meio ambiente e à saúde humana. Desse modo, apresenta potencial de aplicação industrial na remoção de corantes de efluentes têxteis, e contribui com o alcance dos objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS), já que um resíduo que se acumula em aterros sanitários (borra de café) seria usado para produzir carvão ativado, capaz de remover outro resíduo poluente (corante) da água, ajudando a proteger as fontes hídricas, a vida aquática e a vida terrestre.

Agradecimentos

À PRPGI e ao Campus Camaçari do IFBA pelo apoio financeiro e bolsas concedidas a C. N. S, E. K. H. e A.C.C.F.; à Carina Soares (LCM/IFBA) e a Elias dos Santos (LAMUME/UFBA), pelas análises de MEV/EDS.

Referências

- ABIC. Indicadores da Indústria de Café / 2023. Disponível em: <<https://estatisticas.abic.com.br/estatisticas/indicadores-da-industria/indicadores-da-industria-de-cafe-2023/>>. Acesso em: 14 set. 2024.
- ABIT. Perfil do setor - 2023. Disponível em: <https://www.abit.org.br/cont/perfil-do-setor>. Acesso em: 14 set. 2024.
- ANASTOPOULOS, L. et al. A review for coffee adsorbents, *Journal of Molecular Liquids*, v. 229, p. 555–565, 2017.
- ARSLAN-ALATON, I.; GURSOY, B. H.; SCHMIDT, J. E. Advanced oxidation of acid and reactive dyes: Effect of Fenton treatment on aerobic, anoxic and anaerobic processes. *Dyes and Pigments*, v. 78, p. 117-130, 2008.
- BOLIGON, Jacqueline. Produção e caracterização de carvão ativado a partir da borra de café solúvel. 2015. 79f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina.
- BUGIERECK A. M. et al. Avaliação da capacidade adsorptiva de carvão ativado quimicamente a partir de casca de banana. *Revista Acta Ambiental Catarinense*, v. 10, n. 1/2, p. 45–60, 2013.
- EMBRAPA. O papel da compostagem de resíduos orgânicos na mitigação de emissões de metano. 2010. Disponível em: <https://acesse.dev/T0B3t>, Acesso em: 14 set. 2024.
- FERREIRA, Jennifer. Seeking Sustainability in the Coffee Shop: Innovations in the Circular Economy, 2019.
- GEWANDSZNAJDER, M. R.; PIRES, P. F. B. Identificação e avaliação de oportunidades para a valorização da borra de café no município do Rio de Janeiro. 2020. Projeto Final de Curso (Graduação em Engenharia Química), Universidade do Rio de Janeiro, RJ, 2020. 115p.
- HAN, et al. High adsorption of methylene blue by activated carbon prepared from phosphoric acid treated eucalyptus residue. *Powder Technology*, v. 366, p. 239– 248, 2020.
- HO, Y. S.; MCKAY, G. Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochemistry*, v. 34, n. 5, p. 451–465, jul. 1999.
- MARIA, C. P.; SANTOS, D.A. dos; SILVA, Y. P. da; SANTOS, G. H. F dos. Avaliação de modelos cinéticos da adsorção do corante azul de metileno pelo adsorvente zeína. In: Anais do XII Jornada de Iniciação Científica e Tecnológica, 2022. Anais eletrônicos. V. 1, n. 12 (2022): XII JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA - UFFS. Santa Catarina, Chapecó, 2022. Disponível em: <<https://portaleventos.uffs.edu.br/index.php/JORNADA/article/view/16909>>. Acesso em: 18 set. 2024.
- MENGESHA, D. N. et al. Ground coffee waste-derived carbon for adsorptive removal of caffeine: Effect of surface chemistry and porous structure. *Science of the Total Environment*, v. 118, p.151669, 2022.



63º Congresso Brasileiro de Química

05 a 08 de novembro de 2024

Salvador - BA

MÜLLER, L. C.; ALVES, R. I. M.; SENS, M. L. Adsorção do azul de metileno em serragem de *Pinus elliottii* (pinus) e *Drepanostachyum falcatum* (bambu). *Eng. Sanit. Ambient.*, v. 24, n. 4, p. 687-695, 2019.

NASCIMENTO et al. Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014. 256 p.

PAIXÃO, et al. Tratamento de emulsões óleo/água utilizando carvão ativado. *Anais: 58o Congresso Brasileiro de Cerâmica*. Bento Gonçalves, 2014.

SANTOSO, E. et al. Review on recent advances of carbon based adsorbent for methylene blue removal from waste water. *Materials Today Chemistry*, v. 16, 100233, p. 1-21, 2020.

SILVA, A. T. Influência da temperatura na adsorção do corante azul de metileno utilizando serragem de *Pinus elliottii* como um adsorvente alternativo: um modelo para o tratamento de efluentes têxteis. *Ufsc.br*, 2005.

SRAVANTHI, K.; AYODHYA, D.; YADGIRI SWAMY, P. Green synthesis, characterization of biomaterial-supported zero-valent iron nanoparticles for contaminated water treatment. *Journal of Analytical Science and Technology*, v. 9, n. 3, p. 1-11, 2018.

STOPPE, A. C. R et al. Remoção do corante azul de metileno no tratamento de efluentes por adsorção em carvão de coco verde e carvão ativado. In: *Anais do XXXIX Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, 2019, Belém. Anais eletrônicos...* Campinas, Galoá, 2019. Disponível em: <<https://proceedings.science/enemp/enemp-2019/trabalhos/remocao-do-corante-azul-de-metileno-no-tratamento-de-efluentes-por-adsorcao-em-c?lang=pt-br>> Acesso em: 14 set. 2024.

SURESH, S.; SRIVASTAVA, V. C.; MISHRA, I. M. Adsorption of Hydroquinone in Aqueous Solution by Granulated Activated Carbon. *Journal of Environmental Engineering*, v. 137, p. 1145–1157, 2011.

USDA. United States Department of Agriculture. (2020). *Coffee: World Markets and Trade*. 2020. Disponível em: <https://downloads.usda.library.cornell.edu/usda-esmis/files/m900nt40f/6m3129089/r494w654j/coffee.pdf>

WERLANG, E.B. et al. Produção de carvão ativado a partir de resíduos vegetais. *Revista Jovens Pesquisadores*, Santa Cruz do Sul, v. 3, n. 1, 156-167, 2013.