

Avaliação dos parâmetros cinéticos na captura de vapores de diclorometano sobre carvão ativado preparado a partir da planta invasora *Eichornnia Crassipes*

Rodrigo S. G. Menezes¹, José L. C. Cordeiro^{1,2}, Mauricio B. dos Santos^{1,2}, Fernanda T. Cruz^{1,2}, Artur J. S. Mascarenhas^{1,2}, Heloysa M. C. Andrade^{1,2}, Rildo A. Fiuza-Junior^{1,2*}

¹Laboratório de Catálise e Materiais (LABCAT/ @labcat.ufba), Programa de Pós-Graduação em Química (PGQUIM), Instituto de Química, Departamento de Química Geral e Inorgânica, Universidade Federal da Bahia, R. Barão de Jeremoabo, s/n, Campus de Ondina, 40170-280, Salvador, Bahia, Brazil.

² Programa de Pós-graduação em Energia e Ambiente (PGENAM), Centro Interdisciplinar de Energia e Ambiente (CIENAM), Universidade Federal da Bahia, R. Barão de Jeremoabo, s/n, Campus de Ondina, 40170-280, Salvador, Bahia, Brazil.

Resumo/Abstract

RESUMO – Este trabalho realiza estudos cinéticos da adsorção de vapores de diclorometano por carvão ativado. Os carvões utilizados na captura foram produzidos pela planta aquática que possui uma elevada taxa de reprodução e é prejudicial aos corpos hídricos onde se proliferam. A caracterização inicial da planta mostrou sua potencialidade na produção de carvão ativado (carbono fixo entre 28 e 40%). Os carvões ativados apresentaram área superficial de microporos entre 421 e 1200 m² g⁻¹ e apresentaram capacidade captura de diclorometano entre 124 e 301 mg g⁻¹. Para compreensão da cinética de adsorção de diclorometano, as curvas de adsorção foram ajustadas com os modelos matemáticos de pseudo-primeira ordem, pseudo-segunda ordem e o modelo de Avrami que apresentou melhor ajuste com as curvas ($r^2 = 0.9899 - 0.9955$). Além do bom ajuste com o modelo de Avrami, os valores dos expoentes de Avrami obtidos entre 1 e 2 indicam que o processo adsorptivo é híbrido, ou seja, contribuição da quimissorção e fisissorção simultaneamente. O modelo de difusão intrapartícula indica que a difusão de diclorometano nos poros é a etapa lenta e controladora do processo.

ABSTRACT - This work performs kinetic studies of the adsorption of dichloromethane vapors by activated carbon. The carbons used in the capture were produced by the aquatic plant that has a high reproduction rate and is harmful to the water bodies where it proliferates. The initial characterization of the plant showed its potential in the production of activated carbon (fixed carbon between 28 and 40%). The activated carbons presented a micropore surface area between 421 and 1200 m² g⁻¹ and presented a dichloromethane capture capacity between 124 and 301 mg g⁻¹. To understand the dichloromethane adsorption kinetics, the adsorption curves were adjusted with the pseudo-first-order, pseudo-second-order mathematical models and the Avrami model that presented the best fit with the curves ($r^2 = 0.9899 - 0.9955$). In addition to the good fit with the Avrami model, the values of the Avrami exponents obtained between 1 and 2 indicate that the adsorptive process is hybrid, that is, contribution of chemisorption and physisorption simultaneously. The intraparticle diffusion model indicates that the diffusion of dichloromethane in the pores is the slow and controlling step of the process.

Introdução

O diclorometano (DCM) é um composto orgânico volátil clorado largamente utilizado em indústrias farmacêuticas, eletrônicas e químicas, devido a sua baixa inflamabilidade e alta solubilidade. É uma substância tóxica para a saúde humana com potencial carcinogênico, além de ser prejudicial ao ambiente como uma grave ameaça a camada de ozônio. Apesar desses problemas, ocorre uma alta taxa de emissão do vapor desse composto pelas fontes anteriormente citadas. Estima-se que a produção anual global de DCM ultrapassa as 500.000 toneladas, com aproximadamente 77% liberados para a atmosfera. Diante

desse cenário é de extrema importância o desenvolvimento de técnicas para o abatimento desses vapores dispersos na atmosfera. As técnicas atualmente já estudadas são a incineração térmica, biofiltração, oxidação catalítica, membrana de separação, condensação e adsorção. A adsorção se destaca entre as outras diante da sua facilidade de aplicação e possibilidade de reutilização do diclorometano adsorvido. O carvão ativado é uma excelente opção para o uso como adsorvente em processos adsorptivos devido à alta eficiência, boas propriedades texturais, facilidade na produção, estabilidade química e possibilidade de regeneração do carvão (1).

A planta *Eichornia Crassipes*, popularmente conhecida como baronesa, é uma planta aquática encontrada em todo o globo, considerada uma praga por causa da sua elevada taxa de reprodução e causa diversos problemas nos corpos hídricos onde estão dispersas. A remediação mais utilizada frente a sua proliferação é a remoção física e descarte sem aplicação alguma (2). Devido a sua grande disponibilidade, pode ser utilizada como biomassa precursora para a produção de carvão ativado e aplicado na captura de vapores de diclorometano.

Nos estudos adsorptivos, a avaliação dos parâmetros cinéticos é crucial para a investigação dos mecanismos envolvidos na adsorção e etapas controladoras do processo que podem ser a transferência de massa, dispersão, difusão e, se for o caso, reações químicas. Além disso, essa etapa do estudo é fundamental para determinar condições ótimas para aplicações futuras e em larga escala. É importante salientar que os valores obtidos com os ajustes aos modelos cinéticos, na maioria das vezes, não permitem a elucidação do mecanismo de adsorção com muita acurácia, mas são resultados de grande valor prático e tecnológico. Neste trabalho o estudo foi realizado utilizando modelo de pseudo-primeira ordem (PPO) (3), modelo de pseudo-segunda ordem (PSO) (4), modelo de Avrami (5) e difusão intrapartícula (7).

Na literatura, é possível encontrar a expressão geral (equação 1) para a taxa de adsorção:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_N(q_e - q_t)^N \quad \text{eq.1}$$

Na equação 1 se N é igual a 1, tem-se a forma diferencial da equação de PPO, proposto pela primeira vez, empiricamente, por Lagergren (3) (equação 2). A integração da equação 2 resulta na equação 3 não linearizada.

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad \text{eq.2}$$

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

Os processos de adsorção que se ajustam de forma satisfatória ao modelo PPO apresentam características similares, são elas: a fase inicial da adsorção apresenta um maior ajuste com o modelo, elevada concentração do adsorvato no meio e os adsorventes utilizados nesses processos apresentam poucos sítios ativos. Diante dessas duas últimas características, afirma-se que os processos que são melhor descritos pelo modelo PPO ocorrem por fisissorção (5) e o que controla esses processos é a difusão externa e interna das partículas do adsorvato. Na equação 1, se N for igual 2 obtém-se à forma diferencial do modelo PSO (equação 4) reportado pela primeira vez por Ho e Wase

em 1996, em um estudo que avaliava a remoção de íons metálicos em turfa (4). A integração da equação 4, resulta na equação 5 não linearizada.

$$\frac{dq_t}{dt} = k^2(q_e - q_t)^2 \quad \text{eq.4}$$

$$q_t = \frac{q_e^2 t k_2}{1 + q_e t k_2} \quad \text{eq.5}$$

Esse modelo é útil para descrever processos com características opostas aos que são melhores descritos pelo modelo PPO, são elas: melhor ajuste com os processos no final da adsorção, baixas concentrações do adsorvato e a presença de muitos sítios ativos na superfície do carvão, devido a isso, diz que o modelo PSO descreve melhor processos de quimissorção (5). O modelo cinético de Avrami foi proposto originalmente para avaliar a nucleação de partículas e crescimento de cristais, por Melvin Avrami (6), representado pela equação 6. Em estudos recentes, tem se mostrado eficiente para avaliar a adsorção gasosa na superfície de sólidos (8).

$$q_t = q_e [1 - e^{-(k_a t)^n}] \quad \text{eq.6}$$

A teoria da difusão intrapartícula é derivada da Lei de Fick, a qual afirma que a difusão do adsorvato nos poros do material é a etapa mais lenta e controla o processo de adsorção (9, 10). Weber e Morris deduziram o modelo para descrever a difusão intrapartícula, descrito pela equação 7.

$$q_t = k_i t^{1/2} + C \quad \text{eq.7}$$

Neste trabalho, a captura de diclorometano sobre carvão ativado produzido por uma erva daninha foi avaliada a partir de parâmetros cinéticos de adsorção.

Experimental

Preparação e caracterização da *Eichornia Crassipes*

A planta foi coletada nas margens do Rio Paraguaçu, distrito de Geolândia, na cidade Cabaceiras do Paraguaçu – Bahia – Brazil. Todo o material coletado foi lavado com água deionizada, cortado em pequenos pedaços, seco em estufa de circulação e renovação de ar a 105°C por 24h. Logo após o material foi triturado num moinho de facas tipo wiley e peneirado numa faixa de 80 – 200 mesh. Para verificar o potencial na produção de carvão, o teor de cinzas, carbono fixo e voláteis foram determinados pela metodologia padronizada “American Society for Testing and Materials” (ASTM- E1131-20).

Produção dos carvões ativados

A biomassa foi pirolisada utilizando um reator cilíndrico com diâmetro interno igual a 4 cm e 50 cm de comprimento, disposto na vertical, sob um fluxo de N_2 de 100 mL/min, a 700 °C por 2 h (B7). Logo após, o sólido obtido foi saturado com água, imerso em nitrogênio líquido por 30 min e descongelado rapidamente em mufla a 200 °C até ficar seco, esse processo foi repetido por três vezes. Esse procedimento especial favorece a expansão forçada dos poros pelo acréscimo de volume do solvente ao passar do estado líquido para o estado sólido, devido a diferente organização cristalina (11). Após o preparo da amostra B7C, foi realizada a ativação química utilizando hidróxido de potássio nas seguintes proporções, biochar: KOH; 1:1, 1:2,5 e 1:4 (BA1-7, BA2-7 e BA4-7) e pirólise seca a 700 °C.

Propriedades texturais dos carvões ativados

As propriedades texturais foram obtidas por adsorção de nitrogênio (ASAP 2020, Micromeritics), numa faixa de pressão de $P/P_0 = 10^{-6} - 1,0$. Antes das análises, a superfície da amostra foi degaseificada durante 10h a 4 μ mHg. Obtendo os seguintes parâmetros: área superficial pelo método BET; área superficial pelo método NLDFT; área superficial de microporos utilizando as equações de Dubinin-Astakhov (DA) e distribuição de tamanho de poro utilizando o método LNDFT, para o modelo de poros em fenda.

Captura de vapores de diclorometano

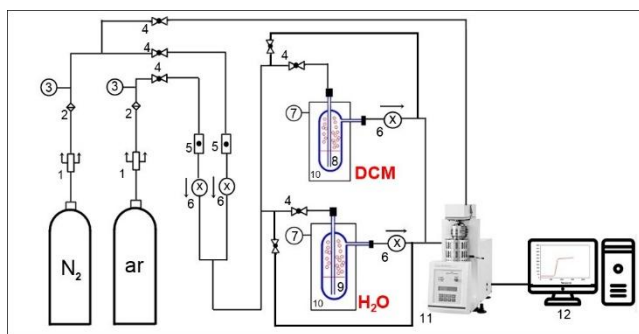
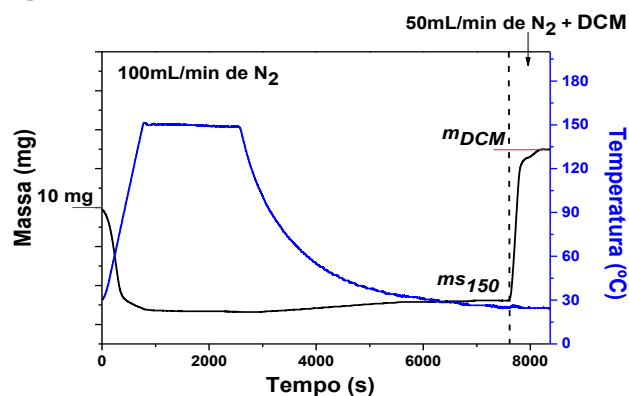


Figura 1. Esquema montado, em conjunto com o analisador térmico para captura de DCM. 1- União de anteparo, 2- Filtros, 3- Manômetro, 4- Válvulas, 5- Controladores de fluxo, 6- Válvulas de não retorno, 7- Controladores de temperatura, 8- Gerador de vapor de VOC, 9- Gerador de umidade, 10- Banho termostaticado, 11- TGA-50H (SHIMADZU), 12 – Computador

A figura 1 mostra o sistema montado para a captura dos vapores de diclorometano sobre os carvões ativados, utilizando um analisador termogravimétrico (TG), onde o adsorvente é disposto semelhante a um leito fixo, com temperatura controlada. Os vapores de DCM são gerados em um saturador (em 8 na fig.1) e inseridos no forno do TG. O ganho de massa observado é associado ao DCM

adsorvido. A figura 2 apresenta a programação de temperatura e tempo utilizado para a obtenção dos resultados durante os experimentos de captura de DCM.

Figura 2. Perfil da programação de temperatura e tempo utilizados no analisador termogravimétrico para o cálculo da capacidade de adsorção dos VOCs.



Na primeira etapa, foi pesado ≈ 10 mg do carvão ativado, aquecido a $\beta = 10^\circ\text{Cmin}^{-1}$ até 150°C sob vazão volumétrica de nitrogênio (100 mLmin⁻¹), mantendo por 30 min. Essa etapa é utilizada para a limpeza da superfície do carvão, apenas com as válvulas 4.b, 4.a e 4.d abertas (fluxo de N_2), de acordo com a Figura 4, sendo observado a perda de massa referente a remoção da umidade e outras espécies que estejam adsorvidas, obtendo no final a massa seca do carvão. Na segunda etapa, o carvão é resfriado dentro do forno até a isoterma de adsorção adequada para os estudos de captura do DCM ($ms_{150}^\circ\text{C}$). Na terceira etapa, já com o forno na isoterma selecionada, 50% da vazão volumétrica inicial do nitrogênio (50 mL min⁻¹) é direcionada para o saturador, fechando a válvula 4.d (anteriormente aberta) e abrindo a válvula 4.c, onde ocorrerá o arraste do vapor do VOC para o sistema de análise, mantendo a vazão volumétrica total do gás de arraste em 100 mL min⁻¹. O banho termostaticado mantém a temperatura do saturador ($\pm 2^\circ\text{C}$). Nesse momento é observado um ganho de massa até uma estabilidade no ganho de massa, que representa a saturação do adsorvente, indicando a quantidade nominal adsorvida de VOC pelo carvão (m_{DCM}). O cálculo da capacidade de captura (CC) é realizado utilizando a Equação 8.

$$CC = \frac{m_{DCM} - m_{150}}{(m_{150} / 1000)} \quad \text{eq.8}$$

Estudos cinéticos da captura de vapores de diclorometano sobre carvão ativado

As curvas de adsorção obtidas na etapa anterior foram ajustadas com os modelos de pseudo-primeira ordem, pseudo-segunda ordem e o modelo de Avrami, com as

equações 3, 5 e 6, nas suas formas não linearizadas, pois as formas linearizadas podem acarretar erros nas estimativas dos parâmetros cinéticos. A qualidade do ajuste dos modelos cinéticos foi determinada usando o coeficiente de regressão linear ($0 < R^2 < 1$), que determina o quão bem os pontos de dados se ajustam ao modelo. Um valor de R^2 próximo de 1 indica que o modelo é capaz de descrever com sucesso a cinética do processo de adsorção de diclorometano. Os ajustes foram realizados utilizando o software OriginPro 8.5.

Resultados e Discussão

Caracterização da *Eichhornia Crassipes*

A análise inicial ASTM mostrou que a biomassa possui teor de voláteis de 60,13%, 15,33% de cinzas e 39,87% de carbono fixo. Teor carbono fixo compatível com o de outras biomassas estudadas na literatura utilizadas na produção de carvão ativado (12).

Propriedades texturais dos carvões ativados

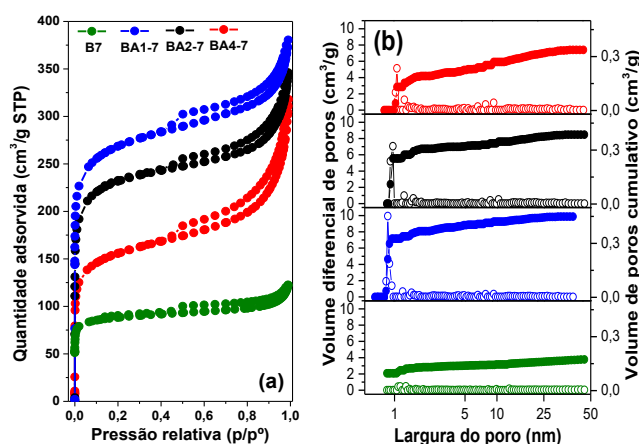


Figura 3. (a) Isotermas de adsorção e dessorção de nitrogênio dos carvões ativados. (b) Volume de poros diferencial e volume de poros cumulativo em função da largura dos poros dos materiais

Tabela 1. Propriedades texturais obtidas pela fisissorção de N₂

Biochar	AS _{DA} ^a (m ² .g ⁻¹)	AS _{BET} ^b (m ² .g ⁻¹)	V _{mic} ^c (<2nm)	V _{meso} ^c (2-50 nm)
B7	389	312	0,1302	0,04267
BA1-7	1200	950	0,3322	0,08108
BA2-7	970	821	0,3073	0,07835
BA4-7	662	551	0,0732	0,145713

^a AS_{DA}, área superficial de microporos calculada pelo método DA.

^b AS_{BET}, área superficial calculada pela equação de B.E.T. na pressão P/P₀ = 0,05-0,2.

^c Distribuição de volume de poros calculada pelo método NLDFT utilizando o modelo de poros em fenda.

A figura 3(a) indica que a isoterma do material B7 é do tipo I em transição para o tipo II para os outros materiais, com

looping de histerese do tipo H4, de acordo com a IUPAC (13). A distribuição de largura dos poros na figura 3(b) mostra que os carvões produzidos nesse trabalho são majoritariamente microporosos e isso pode ser observado na tabela 1, onde os carvões apresentam maiores volumes em regiões de microporos (<2nm). Na mesma tabela, também é possível observar que os carvões ativados em menores proporções de agente ativante apresentaram maiores valores de área superficial BET (950 m².g⁻¹) e área calculada pelo método DA (1200 m².g⁻¹). Esse efeito tem sido observado em estudos recentes na literatura (14).

Captura de vapores de diclorometano

A Figura 5 apresenta o perfil da capacidade de adsorção para o diclorometano obtido por termogravimetria sobre os diferentes carvões. O biochar apresentou menor capacidade de captura, seguindo pelos carvões, BA4-7 e BA2-7, com destaque para o material ativado com uma menor concentração de agente ativante (BA1-7).

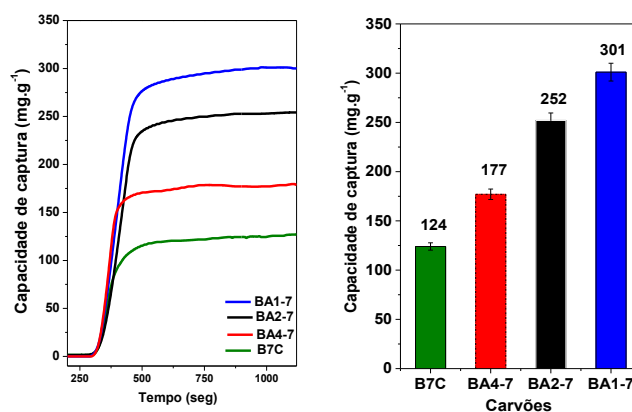
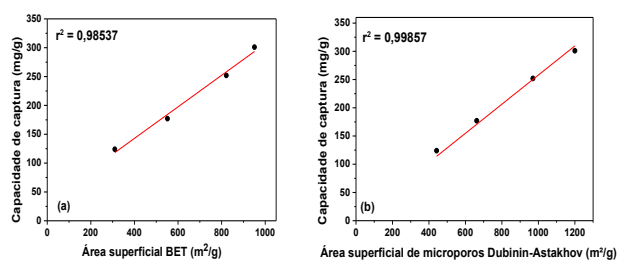


Figura 4. Capacidade de adsorção de diclorometano sobre diferentes adsorventes a 25°C

Os diferentes valores de captura foram correlacionados com as propriedades texturais dispostas na tabela 1. As correlações estão apresentadas na figura 5.



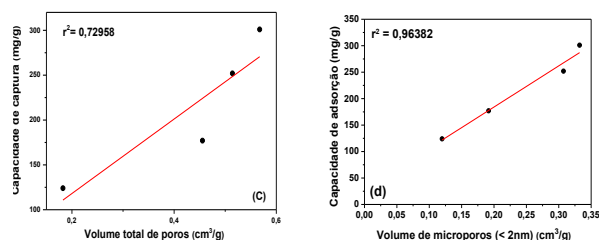


Figura 5. Correlações lineares entre a capacidade de adsorção com as propriedades texturais dos carvões: (a) Área superficial B.E.T; (b) Área superficial D.A; (c) Volume total de poros (c); e (d) Volume total de microporos (< 2 nm)

A figura mostra uma forte relação entre os valores de captura com a área superficial BET ($r^2:0,98537$), área superficial DA ($r^2:0,99857$) e volume de microporos <2nm ($r^2:0,96382$), indicando que são parâmetros que influenciam diretamente na captura de diclorometano, como já foi reportado na literatura (15). A partir dessas correlações, pode-se concluir que os microporos influenciam mais fortemente na captura frente a influência dos mesoporos, como observado na baixa correlação entre a captura e o volume total de poros ($r^2: 0,72958$) (16).

Estudos cinéticos da captura de vapores de diclorometano sobre carvão ativado

A figura 6 mostra os ajustes com os modelos avaliados nas curvas de adsorção de diclorometano obtidas neste trabalho e a tabela 2 mostra os parâmetros obtidos a partir dos ajustes. Analisando os coeficientes (r^2), entre as adsorções feitas nos diferentes materiais produzidos, conclui-se que as correlações com o modelo PPO ($r^2 = 0,9562 - 0,9915$) são maiores que as correlações com o modelo PSO ($r^2 = 0,9039 - 0,9678$), indicando que o processo de fisissorção ocorre de forma mais abrangente.

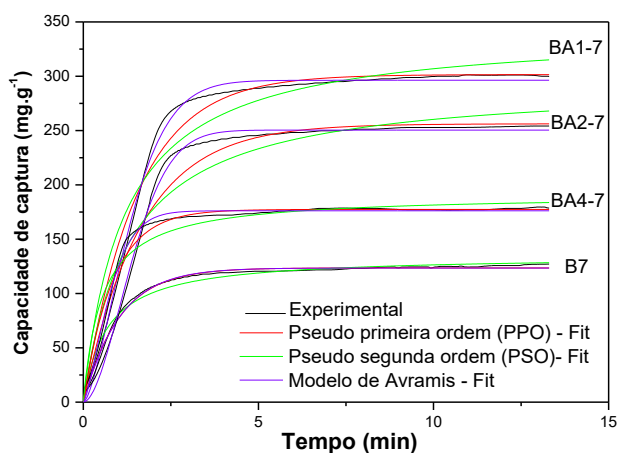


Figura 6. Ajuste não linear das curvas de adsorção sobre os diferentes carvões a 25°C

Tabela 2. Parâmetros obtidos a partir dos ajustes com os modelos não-linearizados utilizados neste trabalho

Materiais				
PPO	B7	BA1-7	BA2-7	BA4-7
r^2	0,9915	0,9716	0,9562	0,9768
k_1	0,9734	0,6550	0,6075	1,1799
q_e	123,55	301,54	256,27	177,41
PSO				
r^2	0,9678	0,9241	0,9039	0,9197
k_2	0,0110	0,0025	0,00259	0,0098
q_e	134,85	342,76	294,46	191,09
Avrami				
r^2	0,9916	0,9945	0,9955	0,9899
k_a	0,9727	0,6520	0,6064	1,1610
n	1,01	1,54	1,81	1,40
q_e	123,48	296	250,45	176,14

Apesar do bom ajuste com o modelo de pseudo-primeira ordem, a correlação com o modelo de Avrami apresentou valores de r^2 maiores (0,9899 – 0,9955). O n no modelo cinético de Avrami, chamado de expoente de Avrami, é outro parâmetro que colabora para a compreensão do mecanismo de adsorção. Neste trabalho, foram obtidos valores de n entre 1,01 e 1,81 e a literatura afirma que valores do expoente de Avrami entre 1 e 2, indica a coexistência da fisissorção e quimissorção em alguma extensão (17-19). As curvas de adsorção apresentam diferentes regiões que podem ser linearizadas pelo modelo de difusão intrapartícula. De acordo com estudos anteriores, é possível ter três regiões linearizadas (Região 1, Região 2 e Região 3), como mostra a Figura 7. Nesse estudo, na região 1 ocorre a adsorção do diclorometano na superfície externa do adsorvente; na região 2 ocorre a difusão das moléculas do diclorometano nas estruturas porosas dos materiais, além de possíveis adsorções externas e na região 3, a etapa de equilíbrio, etapa onde ocorre preenchimento de quase todos os sítios adsorptivos nas estruturas porosas e região externa no adsorvente. (20,21).

Tabela 3. Parâmetros obtidos a partir do ajuste com o modelo de difusão intrapartícula variando os materiais de adsorção, a 25 °C.

		R1	R2	R3
B7	Ki (mg g⁻¹ min⁻¹/²)	143,3	10,49	1,52
	C	7,02	96,63	116,81
	r^2	0,9791	0,8040	0,9339
BA1-7	Ki (mg g⁻¹ min⁻¹/²)	223,03	13,75	2,70
	C	7,40	255,43	285,77
	r^2	0,9993	0,8359	0,9290
BA2-7	Ki (mg g⁻¹ min⁻¹/²)	216,90	16,78	1,60
	C	6,33	208,30	244,39
	r^2	0,9956	0,7656	0,8991
BA4-7	Ki (mg g⁻¹ min⁻¹/²)	265,90	10,44	0,26
	C	10,77	153,49	176,20
	r^2	0,9978	0,7651	0,4480

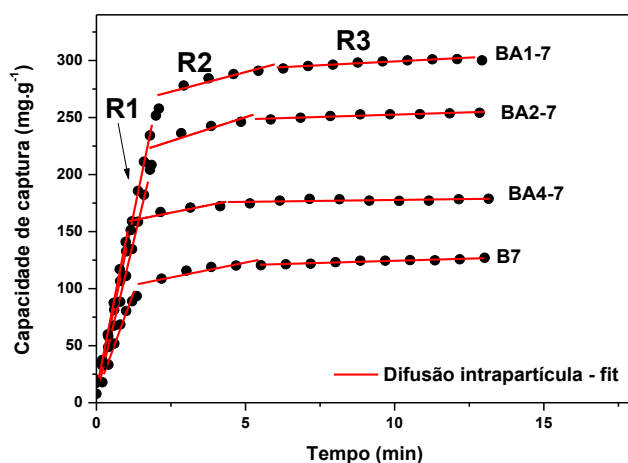


Figura 7. Linearizações de diferentes regiões nas curvas de adsorção com o modelo de difusão intrapartícula

Os resultados obtidos nesse estudo a partir das linearizações feitas (Região 1, Região 2 e Região 3) estão dispostos nas tabelas 3. adsorções em todos os materiais apresentaram decréscimo nos valores de K , respectivamente $K_1 > K_2 > K_3$. Como R3 é uma rápida etapa de equilíbrio de adsorção, não pode ser determinante da taxa global processo de adsorção (22), entre R1 e R2, é observado $K_1 > K_2$, logo R2 é a etapa determinante da taxa global do processo de adsorção. Além disso, as linearizações R1 não passaram pela origem do gráfico (Figura 8), ou seja, $C \neq 0$, indicando que no processo de adsorção existe a influência da adsorção externa, apesar de não ser a etapa determinante.

Conclusões

Diante das etapas realizadas neste trabalho, pode-se afirmar que a biomassa residual gerada pela planta aquática *Eichornia Crassipes* pode ser destinada a produção em massa de carvão de ativado. O carvão ativado derivado da baronesa apresenta boa capacidade na captura de um poluente gasoso, o diclorometano, o que mostra a possibilidade do seu uso como adsorvente em colunas de adsorção. Foi possível observar que a capacidade de captura dos carvões é fortemente influenciada pela extensão das suas propriedades texturais, com destaque da microporosidade do material. Entre os ajustes com os modelos cinéticos avaliados, o bom fit com o modelo de Avrami e avaliação do expoente obtidos, pode-se afirmar que a adsorção de diclorometano sobre esses carvões é regida simultaneamente entre a fisissorção e quimissorção, necessitando de avaliações mais aprofundadas para compreender a extensão de cada mecanismo nesse processo. Com base nas multilinearidades ajustadas com o modelo de difusão intrapartícula, foi possível concluir que a etapa de difusão dos vapores de DCM nos poros do carvão é a etapa controladora do processo.

Agradecimentos

Agradecimentos ao PIBIC/UFBA, ao Programa de Pós Graduação em Química – PGQuim/UFBA e ao Conselho Nacional de Pesquisa de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo financiamento da bolsa de mestrado e iniciação científica.

Referências

1. W. Qianyu; Y. Zhang; Z. Guo; EO Fagbohun; Ind. Eng. Chem. Res. 2025.
2. Fito J, Tibebe S, Nkambule TTI. BMC chemistry, v. 17, n. 1, p. 4, 2023.
3. Lagergren, S. K. Sven. Vetenskapsakad. Hand. Handligar, 1-39, 1898.
4. Ho YS, MCKAY
5. G. Process Biochem, 1999;
6. WANG, J.; GUO, X. Journal of Hazardous materials, v. 390, p. 122156, 2020
7. AVRAMI, M. The Journal of chemical physics, v. 7, n. 12, p. 1103-1112, 1939;
8. WEBER, W. J., & MORIS, J. C. Journal of the Sanitary Engineering Division, 31-60, 1963;
9. LIU, Y.; YU, Xi. Applied energy, v. 211, p. 1080-1088, 2018.
10. HO, YS.; MCKAY, G. Process safety and environmental protection, v. 76, n. 4, p. 332-340, 1998.
11. FEBRIANTO, J. et al. Journal of hazardous materials, v. 162, n. 2-3, p. 616-645, 2009.
12. JOB, N. et al. Carbon, v. 43, n. 12, p. 2481-2494, 2005.
13. NOR, N. M. et al. Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 1, n. 4, p. 658-666, 2013.
14. THOMMES, Matthias et al. Pure and applied chemistry, v. 87, n. 9-10, p. 1051-1069, 2015.
15. CORDEIRO, José Luiz Cunha et al. ESPR. v. 31, n. 54, p. 62730-62744, 2024.
16. Zhang, X. et al. Journal of Hazardous Materials, 102-123, 2017
17. LIU, Xianyu et al.. Journal of Hazardous Materials, v. 424, p. 127355, 2022.
18. YIN, F. et al. Journal of Materials Science, v. 54, n. 5, p. 3805-3816, 2019.
19. CHEN, L. et al. Environmental Chemistry Letters, v. 17, n. 1, p. 589-594, 2019.
20. DING, Y. et al. Energy, v. 263, p. 125723, 2023.
21. ŞENGİL, İ. A.; ÖZACAR, M.; TÜRKMENLER, H. Journal of hazardous materials, v. 162, n. 2-3, p. 1046-1052, 2009.
22. DE ANDRADE, R. C. et al. Carbon Letters, v. 31, p. 779-793, 2021.
23. MOHAN, D. et al. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, v. 177, n. 2-3, p. 169-181, 2001