

Adsorção do corante alaranjado de metila em carvão ativado obtido da casca do cupuaçu

Adsorption of methyl orange dye onto activated carbon prepared from cupuaçu shell

Adsorción de colorante de naranja de metilo sobre carbón activado preparado a partir de cáscara de cupuaçu

Recebido: 28/11/2023 | Revisado: 09/12/2023 | Aceitado: 10/12/2023 | Publicado: 17/12/2023

Mayra Paula de Souza e Sousa

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7621-1212>

Universidade Federal do Amazonas, Brasil

E-mail: mayrasousa912@gmail.com

Cristiane Daliassi Ramos de Souza

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3857-9719>

Universidade Federal do Amazonas, Brasil

E-mail: cdaliassi@ufam.edu.br

Lucas Orleam Nunes do Nascimento

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4794-9229>

Universidade Federal do Amazonas, Brasil

E-mail: orleamlucas@gmail.com

Mikelle Silva de Oliveira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2806-3324>

Universidade Federal do Amazonas, Brasil

E-mail: mikelle@ufam.edu.br

Resumo

A contaminação dos corpos hídricos por substâncias químicas sintéticas, como os corantes têxteis, representa um grave problema ambiental, pois muitos desses compostos são tóxicos e podem causar danos ao meio ambiente e à saúde humana. Este trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência do carvão ativado obtido da casca do cupuaçu no processo de adsorção do corante alaranjado de metila. O adsorvente foi preparado por ativação química utilizando ácido fosfórico 85% seguido de carbonização à 500 °C por 60 minutos. Os ensaios de adsorção foram realizados em batelada utilizando diferentes massas do carvão diluídas em solução do corante a 10 mg/L. Os resultados dos testes cinéticos mostraram que o equilíbrio foi alcançado após 10 minutos, com remoção de quase 100%, capacidade máxima de adsorção de 9,50 mg/g ($m_{ads} = 50$ mg) e 19,70 mg/g ($m_{ads} = 25$ mg). Os dados experimentais foram ajustados aos modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem, pseudo-segunda ordem e difusão intrapartícula, sendo o de pseudo-segunda ordem o que melhor descreveu o processo, resultando em valores mais aproximados entre a capacidade máxima adsorvida no equilíbrio, experimental e calculado. Desta forma, o carvão ativado da casca do cupuaçu mostrou excelente potencial nos estudos de adsorção do alaranjado de metila tornando-se uma alternativa promissora na remediação de poluentes orgânicos.

Palavras-chave: Biomassa residual; Adsorvente; Corante têxtil; Modelos cinéticos.

Abstract

The contamination of water resources by synthetic chemical substances, such as textile dyes, represents a serious environmental problem, as many of these compounds are toxic and can cause damage to the environment and human health. This work aimed to evaluate the efficiency of activated carbon obtained from cupuaçu shell in the adsorption process of methyl orange dye. The adsorbent was prepared by chemical activation using 85% phosphoric acid followed by carbonization at 500 °C for 60 minutes. The batch adsorption tests were performed using activated carbon with different dosage diluted in a dye solution at 10 mg/L. The kinetic tests results showed that equilibrium was achieved after 10 minutes, with almost 100% removal, maximum adsorption capacity of 9.50 mg/g ($m_{ads} = 50$ mg) and 19.70 mg/g ($m_{ads} = 25$ mg). The experimental data were fitted to pseudo-first-order, pseudo-second-order and intraparticle diffusion kinetic models, with the pseudo-second-order being the one that best described the process, resulting in values closer to the maximum adsorbed capacity at equilibrium, experimental and calculated. In this way, activated carbon from cupuaçu shell showed excellent potential in methyl orange adsorption studies, becoming a promising alternative in the remediation of organic pollutants.

Keywords: Residual biomass; Adsorbent; Textile dye; Kinetic models.

Resumen

La contaminación de cuerpos de agua por sustancias químicas sintéticas, como tintes textiles, representa un grave problema ambiental, ya que muchos de estos compuestos son tóxicos y pueden causar daños al medio ambiente y a la salud humana. Este trabajo tuvo como objetivo evaluar la eficiencia del carbón activado obtenido de la corteza de cupuaçu en el proceso de adsorción del colorante naranja de metilo. El adsorbente se preparó mediante activación química utilizando ácido fosfórico al 85% seguido de carbonización a 500 °C durante 60 minutos. Las pruebas de adsorción se realizaron por lotes utilizando diferentes masas de carbón activado diluidas en una solución colorante a 10 mg/L. Los resultados de las pruebas cinéticas mostraron que el equilibrio se alcanzó después de 10 minutos, con casi el 100% de eliminación, capacidad máxima de adsorción de 9,50 mg/g ($m_{ads} = 50$ mg) y 19,70 mg/g ($m_{ads} = 25$ mg). Los datos experimentales se ajustaron a modelos cinéticos de pseudo-primer orden, pseudo-segundo orden y difusión intrapartícula, siendo el pseudo-segundo orden el que mejor describió el proceso, resultando en valores más cercanos al máximo adsorbido capacidad en equilibrio, experimental y calculada. De esta manera, el carbón activado de cáscara de cupuaçu mostró un excelente potencial en estudios de adsorción de naranja de metilo, convirtiéndose en una alternativa prometedora en la remediación de contaminantes orgánicos.

Palabras clave: Biomasa residual; Adsorbente; Tinte textil; Modelos cinéticos.

1. Introdução

A utilização dos corantes orgânicos vem crescendo bastante nas últimas décadas pelas indústrias, entretanto, o setor têxtil ainda é o responsável pela maior produção, uso e descarte de efluentes contendo essas substâncias. Devido às baixas taxas de fixação ao longo do processamento, uma grande parcela destes corantes é descartada nos efluentes industriais (Yaseen & Scholz, 2019). Anualmente, metade dos 800 milhões de toneladas de corantes sintéticos produzidos são do tipo “azo”, os quais podem apresentar traços carcinogênicos. O corante alaranjado de metila pertence ao grupo “azo”, com uma ligação -N=N- em sua estrutura. Seu uso extensivo pode causar contaminação do ambiente aquático, conferindo cor às águas residuais dos processos (Wu *et al.*, 2021).

Muitos estudos estão sendo desenvolvidos com o intuito de tratar estes efluentes contaminados usando diversos métodos como adsorção, precipitação, coagulação/floculação, troca iônica e tratamento biológico. A adsorção devido à sua importância científica e tecnológica, vem sendo uma alternativa eficiente para remoção de corantes e tratamento de efluentes (Cheah *et al.*, 2013; Barakat *et al.*, 2020). Para melhorar a capacidade de adsorção de poluentes em adsorventes, vários materiais têm sido avaliados, e o carvão ativado é o que se destaca por apresentar estrutura microporosa bem definida, área específica elevada e grande volume de poros (Gómez *et al.*, 2007).

O cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) é um fruto amazônico muito apreciado na região em preparos culinários, assim como na produção de sucos, doces, sorvetes e outros. A casca do cupuaçu é um resíduo que corresponde em torno de 43% do peso do fruto, entretanto, não possui uma aplicação comercial, sendo muitas vezes descartado de forma irregular (Gondim *et al.*, 2001). Diante desta fonte de matéria-prima lignocelulósica, a casca de cupuaçu, este trabalho propôs o estudo do processo da cinética de adsorção do corante alaranjado de metila utilizando o carvão ativado produzido deste resíduo.

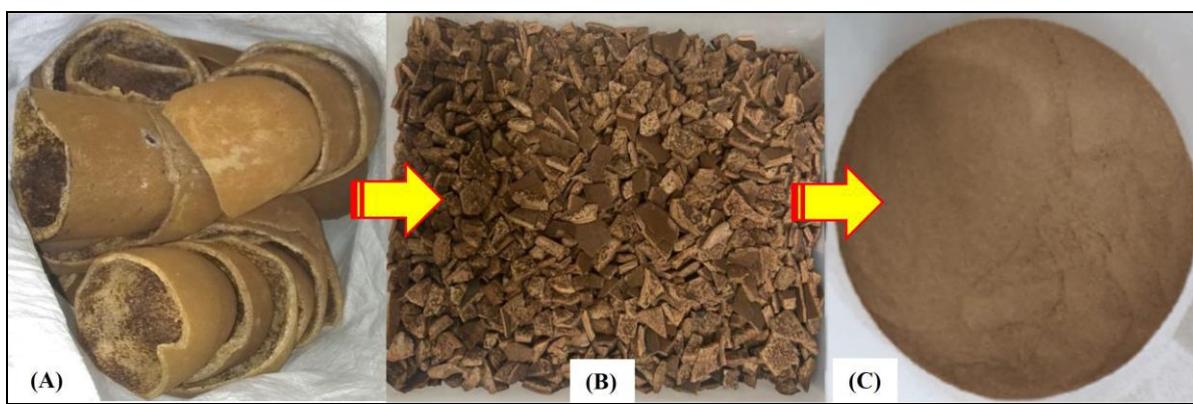
2. Metodologia

2.1 Preparação e Caracterização do Carvão Ativado

As cascas do cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) (Figura 1A) foram adquiridas com produtores rurais na cidade de Rio Preto da Eva, Amazonas e encaminhadas para o Laboratório de Processos do DEQ/UFAM. A metodologia adotada seguiu os trabalhos de Hung *et al.* (2023) e Liu *et al.* (2020). Inicialmente, as cascas foram quebradas de forma manual utilizando um martelo (Figura 1B), sendo submetidas a lavagem e secagem em estufa com circulação forçada de ar (Fanem 315SE) a 103 °C ± 2 °C para a determinação da umidade de acordo com a ASTM E871-82 (2006). Em seguida, as cascas foram trituradas (moinhos de facas e bolas) e classificadas quanto a granulometria em agitador eletromagnético vibratório (SPLabor 1100), utilizando peneiras padronizadas (20 a 400 mesh) por 10 minutos, para redução do tamanho das partículas (Figura 1C).

A Figura 1 apresenta toda a sequencia das etapas de pre-tratamentos com a biomassa residual. No processo de ativação química foi utilizado o H_3PO_4 (85%; Nuclear), com proporção 1:2 ($m_{biom}:m_{ativ}$) por 3 horas, numa mesa shaker (Newlab NL34302) a 155 rpm e 25 °C, e por fim, secagem a 105 °C/36 h). Assim, as amostras seguiram para carbonização na mufla (Fanem 413) a 500 °C por 1 hora. O carvão ativado produzido, denominado CCP, foi finalizado com lavagem até pH neutro, utilizando água destilada, seguido de secagem na estufa por 24 horas. O CCP foi caracterizado por FTIR-ATR em um equipamento Termo Fisher (Nicolet iS10) na faixa de 4000 a 500 cm^{-1} . Realizou-se também TGA em uma termobalança (TA Instrument SDT Q600), com cadinhos de alumina e massa de 10 mg, no intervalo de 20 e 1000 °C, com razão de 10 °C/min e atmosfera de N_2 .

Figura 1 - Pré-tratamentos com a casca do cupuaçu: (A) casca in natura, (B) casca seca em pedaços, (C) casca triturada e peneirada.



Fonte: Autores (2023).

2.2 Estudo Cinético

A remoção do corante alaranjado de metila ($C_{14}H_{14}N_3SO_3Na$) em solução aquosa pelo carvão ativado produzido da casca do cupuaçu (CCP) foi realizada em batelada. Cerca de 50 mL da solução do corante à 10 mg/L foram colocadas em erlenmeyers com diferentes massas do adsorvente (25 mg e 50 mg). As amostras ficaram sob agitação constante (200 rpm) e alíquotas foram retiradas em intervalos predeterminados (1, 2, 5, 10, 15, 30 e 60 minutos). Após o término do processo os sobrenadantes foram separados por centrifugação (5 minutos a 3000 rpm). A concentração do corante foi determinada por espectrofotometria UV/Visível no comprimento de onda de 465 nm, conforme Wu *et al.* (2021). Todos os ensaios foram realizados a 25 °C \pm 2 °C, pH 5,2 \pm 0,1 e em triplicata. A quantidade adsorvida do corante pelo adsorvente (q_t em mg/g) foi calculada pela Equação 1 e a eficiência de remoção pela Equação 2.

$$q_t = \frac{(C_i - C_f) \cdot V}{m} \quad (1)$$

onde V é o volume da solução (L), C_i é a concentração inicial do corante (mg/L), C_f é a concentração final do corante (mg/L) obtida após um tempo “ t ” e “ m ” é a massa do carvão (g).

$$R = \frac{(C_i - C_f)}{C_i} \cdot 100 \quad (2)$$

onde R é a eficiência de remoção do corante (%); C_i é a concentração inicial do corante (mg/L); C_f é a concentração final do corante no tempo “t” (mg/L).

Os modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem, pseudo-segunda ordem e difusão intrapartícula foram utilizados no ajuste dos dados experimentais, conforme as Equações 3, 4 e 5 já linearizadas (Ho & Mckay, 1998; Ho *et al.*, 1996) utilizando o software *Microsoft Office Excel*.

$$\log(q_e - q_t) = \log(q_e) - \frac{k_1}{2,303} \cdot t \quad (3)$$

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

$$q_t = k_{id} \cdot t^{1/2} + C \quad (5)$$

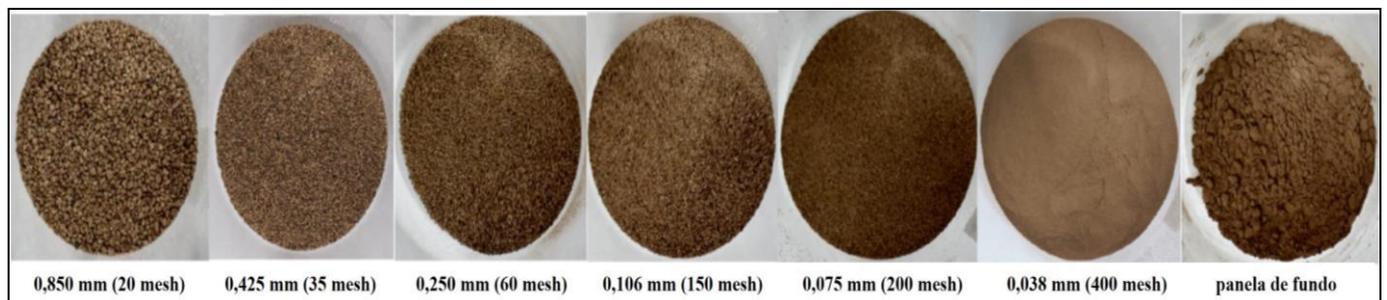
onde, k_1 é a constante de velocidade de pseudo-primeira ordem (min^{-1}), k_2 é a constante de velocidade de pseudo-segunda ordem ($\text{g/mg} \cdot \text{min}$), “t” é o tempo de reação (min), k_{id} é a constante de adsorção de difusão intrapartícula ($\text{mg/g} \cdot \text{min}^{1/2}$), q_e é a capacidade de adsorção no equilíbrio (mg/g) e q_t é a capacidade de adsorção em um tempo “t” (mg/g).

3. Resultados e Discussão

3.1 Caracterização do Adsorvente

Os resultados do perfil de massa retida em cada peneira referente à classificação granulométrica da casca do cupuaçu são mostrados Figura 2.

Figura 2 - Perfil granulométrico do peneiramento para a casca do cupuaçu.



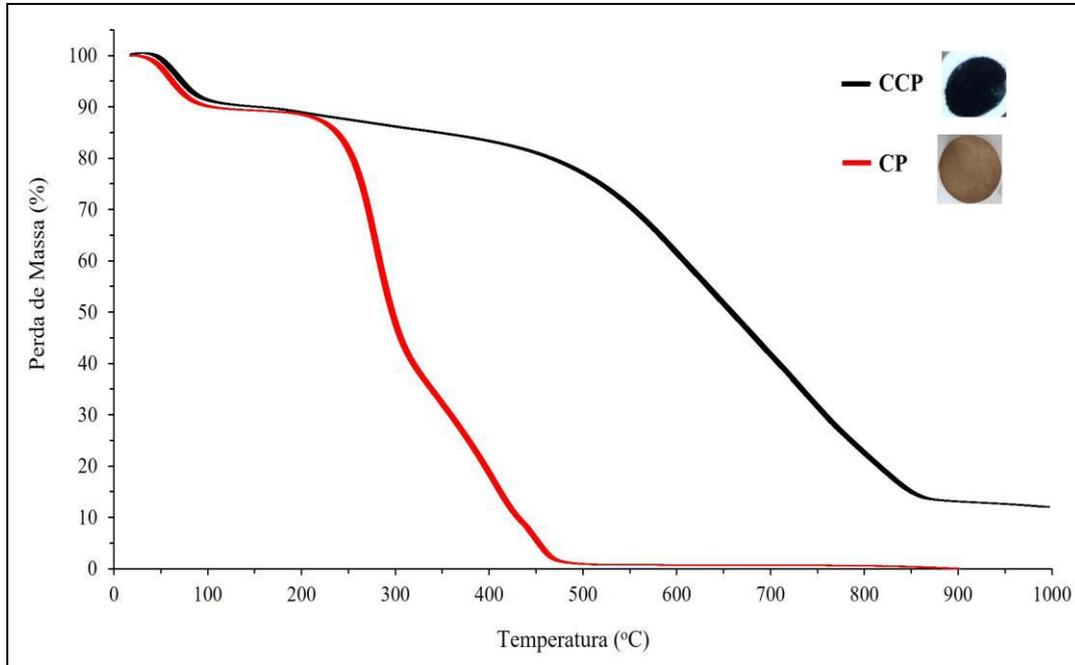
Fonte: Autores (2023).

Observou-se que a maior parte do resíduo ficou retida nas peneiras de abertura 0,850, 0,425 e 0,106 mm, cujos percentuais retidos foram de 48,73, 11,76 e 17,24%, respectivamente. Para o estudo de adsorção foi utilizada a fração da casca com granulometria inferior a 0,038 mm (400 mesh), considerando que quanto menor o tamanho das partículas maior a área superficial disponível do sólido, pois o processo de adsorção é um fenômeno de superfície, e a utilização de uma granulometria inferior a 0,038 mm aumenta a área externa superficial disponível e proporciona uma maior capacidade de adsorção do corante pelo adsorvente (Foo & Hameed, 2010).

A Figura 3 apresenta os termogramas obtidos na TGA para o material precursor, casca do cupuaçu (CP), e para o carvão ativado produzido (CCP). Para CP observa-se três perdas de massa características de materiais lignocelulósicos. O primeiro ocorre até 125 °C, associado a perda de umidade (10,5%), o segundo e terceiro ocorrem simultâneos, entre 200 e 490 °C, associados à decomposição da matéria orgânica, hemicelulose, celulose e parte da lignina (48,6%), e a degradação final da lignina (40%), respectivamente. Acima de 490 °C praticamente toda biomassa foi pirolisada, sendo encontrado cerca de 0,9%

de resíduo (cinzas). Os resultados da termogravimetria foram similares aos encontrados por Alves *et al.* (2022) que investigou o potencial bioenergético da casca do cupuaçu pela técnica de TG/FTIR.

Figura 3 - Curvas termogravimétricas para CP e para o CCP.



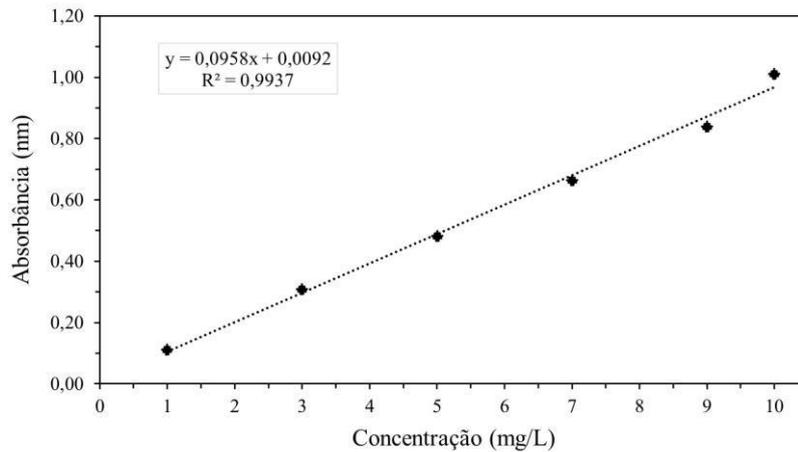
Fonte: Autores (2023).

Para a curva do CCP observa-se apenas duas perdas de massa. A primeira ocorre similar ao CP, em torno de 125 °C, e está relacionada a perda de água adsorvida (10%). O segundo evento é mais prolongado, de 400 °C a 890 °C, associado à decomposição da estrutura de carbono do carvão ativado (78,5%) sob fluxo de nitrogênio. Comparando as curvas termogravimétricas do CP e CCP observa-se que o processo de carbonização melhora a estabilidade térmica do carvão ativado. É possível observar que o CCP apresenta maior estabilidade térmica em relação ao CP, passando de 490 °C para 850 °C. O mesmo comportamento foi observado por Santos *et al.* (2016) ao estudar o biocarvão obtido a partir da pirólise de pellets de pinho em atmosfera de nitrogênio.

3.2 Cinética de Adsorção

No início dos testes foram preparadas soluções do corante alaranjado de metila (AM) em diferentes concentrações (1 a 10 mg/L) para obtenção da curva de calibração no comprimento de onda 465 nm. Obteve-se um coeficiente de correlação (R^2) de 0,9937, considerado um excelente ajuste da equação linear aos dados obtidos e adequada para a determinação da concentração da solução, conforme mostra a Figura 4.

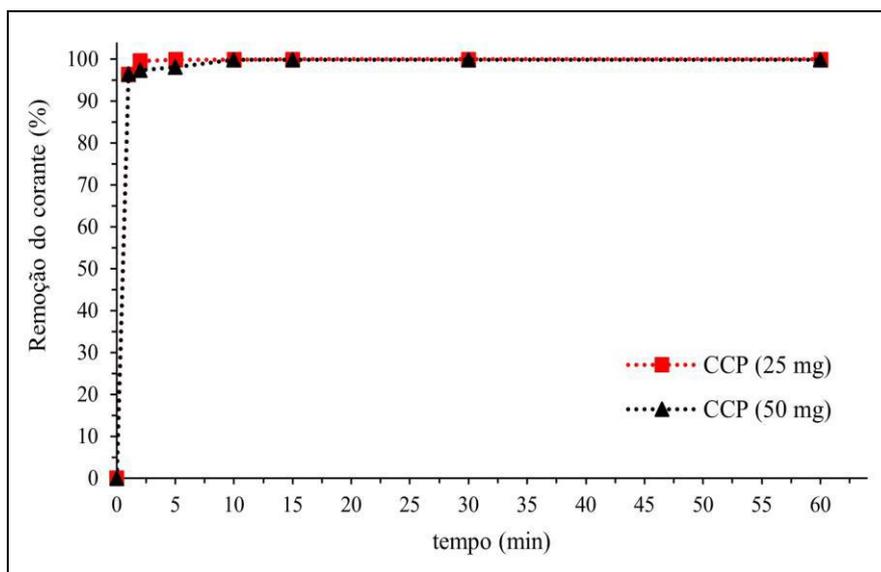
Figura 4 - Curva de calibração do corante alaranjado de metila.



Fonte: Autores (2023).

O tempo de contato é um parâmetro não desprezível para o processo de adsorção, que pode avaliar a eficiência do tratamento, assim como fornecer a rota mais econômica (Luo *et al.*, 2019). A Figura 5 apresenta a variação do percentual de remoção do corante AM pelo CCP em função do tempo de contato. Pode-se observar, através da inclinação das curvas cinéticas, que a quantidade do corante AM adsorvido por unidade de massa de CCP (q_t) e a eficiência de remoção (R%) do corante AM são elevados, tornando a velocidade do processo mais rápida nos primeiros 5 minutos, atingindo o equilíbrio com 10 minutos. Apesar dos adsorventes apresentarem comportamentos semelhantes no início dos experimentos, o CCP com massa menor (25 mg) obteve uma remoção levemente superior ao CCP com massa maior (50 mg), com eficiências máximas de 99,90% e 99,79%, respectivamente. Os resultados da remoção do AM pelo CCP foram superiores aos encontrados por Alyasi *et al.* (2023) que no processo de adsorção do AM utilizando quitosana obteve um percentual de remoção de 98,9%, e Hasan *et al.* (2019) que alcançou uma eficiência de 70%/2h na adsorção de AM em um compósito de polianilina/carvão ativado.

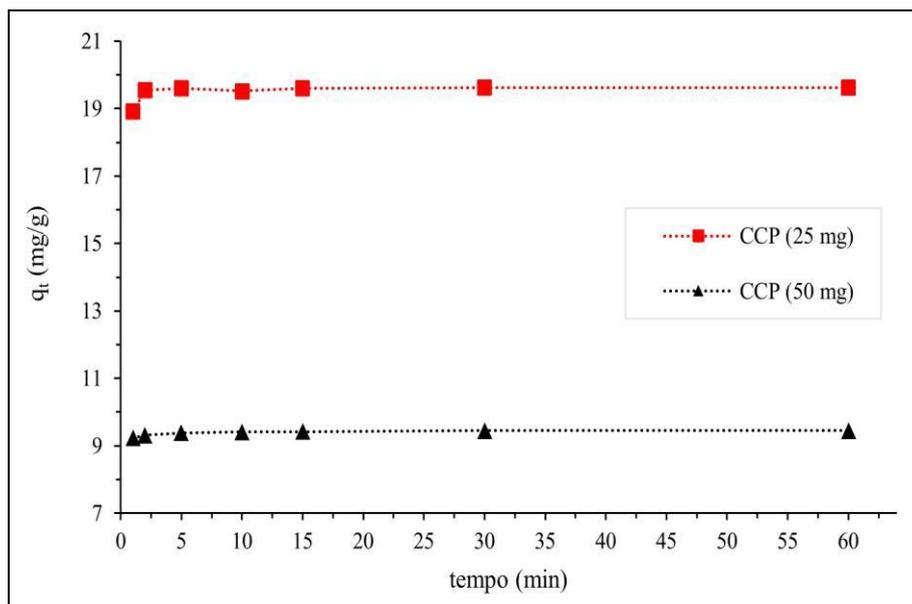
Figura 5 - Eficiência da remoção do corante AM pelo CCP.



Fonte: Autores (2023).

A Figura 6 mostra a quantidade adsorvida (q_t) com o tempo de reação. Verificou-se que o aumento da taxa de adsorção ocorreu nos primeiros 5 minutos, para os dois testes do CCP. No processo de adsorção esse comportamento é considerado normal, pois o número de sítios ativos disponíveis nos tempos iniciais é maior. No decorrer do tempo, a quantidade de sítios ativos disponíveis para a adsorção das moléculas do corante diminui até atingir o equilíbrio (Djilani *et al.*, 2015). Outra característica observada pela Figura 6 foi que a capacidade máxima de adsorção no equilíbrio do CCP com massa de 25 mg foi superior ao CCP com 50 mg.

Figura 6 - Quantidade adsorvida do corante alaranjado de metila pelo CCP.

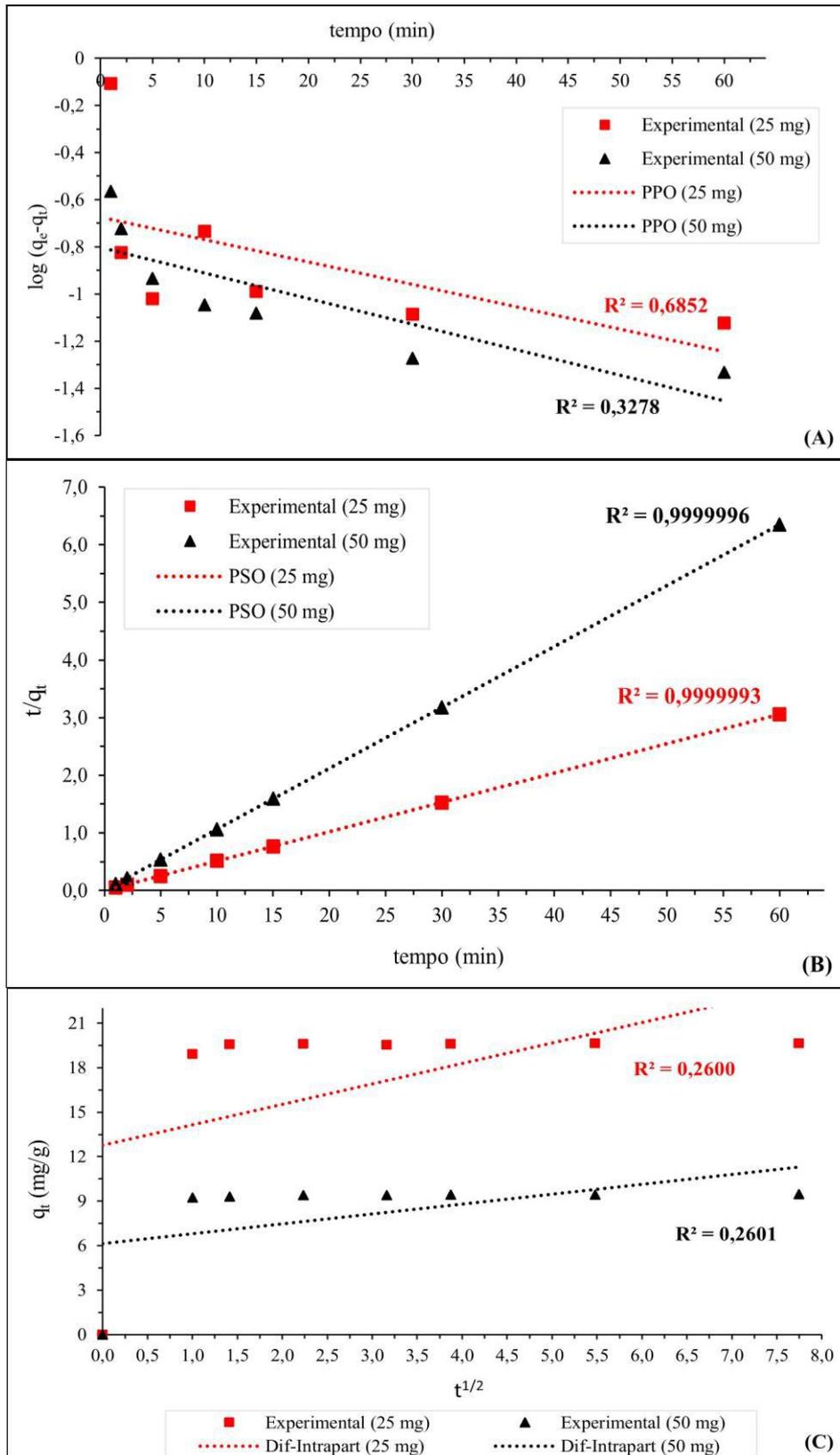


Fonte: Autores (2023).

Desta forma observou-se que o aumento da massa de adsorvente com o percentual de remoção do corante, que normalmente é diretamente proporcional, não foi muito significante, porém o efeito da variação de massa (de 25 mg para 50 mg) na concentração do alaranjado de metila na superfície do CCP foi inversamente proporcional, ocasionando uma diminuição na capacidade máxima de adsorção no equilíbrio (q_e). Esse comportamento foi observado por Uddin *et al.* (2009) que avaliaram a adsorção do corante através de resíduos de chá e constataram que o percentual de remoção e a concentração do adsorvato na superfície do sólido poroso sofreram influência da massa de adsorvente. Serban *et al.* (2023) verificaram o mesmo perfil, confirmando, portanto, a existência do efeito da massa de adsorvente sob as variáveis avaliadas. A explicação para a redução da capacidade máxima de adsorção pode ser atribuída ao fato de que o aumento da massa também pode fazer com que alguns sítios presentes na superfície do material não sejam ocupados por não serem energeticamente favoráveis, diminuindo assim o valor de q_t (Antunes *et al.*, 2018).

Para verificar o comportamento cinético os dados experimentais foram ajustados para os modelos de pseudo-primeira ordem (PPO), pseudo-segunda ordem (PSO) e difusão intrapartícula. De acordo com a Figura 7 é possível confirmar que o melhor modelo para a cinética do processo de adsorção é o de pseudo-segunda ordem, o qual apresentou melhor linearidade (Figura 7B). Os parâmetros cinéticos obtidos para cada modelo, a partir da linearização das Equações 3 a 5, são apresentados na Tabela 1.

Figura 7 - Modelos de pseudo-primeira ordem (A) e pseudo-segunda ordem (B) para a adsorção do corante AM pelo CCP com diferentes massas do adsorvente.



Fonte: Autores (2023).

O coeficiente de correlação (R^2) para o modelo de PSO foi da ordem 1,0, mostrando um bom ajuste com os dados experimentais, entretanto os modelos PPO (Figura 7A) e difusão intrapartícula (Figura 7C) não apresentaram boa correlação, com valores de R^2 variando entre 0,2601 e 0,6852, indicando um baixo ajuste aos dados experimentais. Apesar de representar bem a cinética de adsorção do AM em CCP, o modelo de PSO não identifica os mecanismos de difusão, por isso, o modelo de difusão intrapartícula foi aplicado aos dados experimentais para analisar se a constante “C” (equação 5) é uma variável limitante. A constante “C” avalia a espessura da camada limite, vista como uma resistência viscosa existente entre a superfície do adsorvente e a solução que contém o corante. Valores elevados de “C” indicam maior resistência a difusão, tornando o processo um passo limitante na taxa de adsorção (Wang *et al.*, 2023). No entanto, o valor de “C” encontrado foi diferente de zero para as duas massas de adsorvente, indicando que a reta do gráfico, q_t em função de $t^{1/2}$, não passou pela origem (Figura 7C), confirmando que o mecanismo de difusão intrapartícula não foi a etapa determinante da velocidade e no processo de transferência de massa.

Tabela 1 - Parâmetros calculados dos modelos cinéticos pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem para a concentração do corante de 10 mg/L.

Modelo	Parâmetros	CCP (25 mg)	CCP (50 mg)
Pseudo-primeira ordem	k_1 (min^{-1})	0,0219	0,0250
	$q_e(\text{calc})$ (mg/g)	0,2123	0,1574
	R^2	0,3278	0,6852
Pseudo-segunda ordem	k_2 (g/mg.min)	1,8795	2,5572
	$q_e(\text{calc})$ (mg/g)	19,63	9,46
	R^2	0,9999993	0,9999996
Difusão Intrapartícula	k_{id} (g/mg.min)	1,3797	0,6638
	C	12,7577	6,1393
	R^2	0,2600	0,2601
Experimental	$q_e \text{ exp}$ (mg/g)	19,70	9,50

Fonte: Autores (2023).

Comparando a capacidade de adsorção no equilíbrio, teórica ($q_e \text{ calc}$) com a experimental ($q_e \text{ exp}$), percebe-se também que o modelo PSO descreve bem a cinética de adsorção do corante AM pelo CCP. Este efeito foi observado tanto para o CCP (50 mg), que apresentou $q_e \text{ (exp)}$ de 9,50 mg/g e $q_e \text{ (calc)}$ de 9,46 mg/g, como para o CCP (25 mg) com $q_e \text{ (exp)}$ de 19,70 mg/g e $q_e \text{ (calc)}$ de 19,63 mg/g.

O melhor ajuste dos dados experimentais ao modelo cinético de pseudo-segunda ordem mostra que a taxa de adsorção do AM no CCP não depende da concentração do corante na solução, mas da disponibilidade de sítios na superfície. Além disso, observou-se que os valores da constante do modelo de pseudo-segunda ordem, k_2 , aumentaram de 1,8795 para 2,5572 g/mg.min com o aumento da massa do adsorvente de 25 para 50 mg, respectivamente. Este comportamento pode estar relacionado à maior disponibilidade dos sítios adsorventes (Marrakchi *et al.*, 2017). Por fim, sabe-se que a constante cinética k_2 tem a finalidade indicar a velocidade com que o sistema atinge o equilíbrio, logo valores elevados indicam que o equilíbrio será atingido em menor tempo. De acordo com Subbaiah (2016), o modelo cinético de PSO pode estar relacionado ao equilíbrio por meio de reações químicas que envolvem grupos funcionais do material adsorvente e as espécies em solução. Já Ho (2006) comenta que o modelo de pseudo-segunda ordem sugere que o processo é de quimissorção e envolve a doação ou a troca de elétrons no sistema adsorvato-adsorvente.

Resultados semelhantes mostraram que o modelo PSO melhor representa a cinética de adsorção como Wu *et al.* (2019) na adsorção do alaranjado de metila em microesferas, Hasan *et al.* (2019) ao avaliar o processo de adsorção do alaranjado de metila em compósito de polianilina/carvão ativado e Rego Júnior *et al.* (2022) ao verificar a eficiência do bambu

como adsorvente na remoção do azul de metileno. Naushad *et al.* (2019) comenta que, quanto mais próximo o q_e calculado, em relação ao q_e experimental, mais representativo será o modelo cinético dos dados experimentais.

4. Considerações Finais

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que a adsorção do alaranjado de metila pelo carvão ativado da casca do cupuaçu para um sistema em batelada permitiu remoções superiores a 99,7%. Isto mostra que o processo é eficiente e pode ser uma alternativa promissora no tratamento de efluentes. Os estudos cinéticos mostraram que o modelo de pseudo-segunda ordem apresentou melhor ajuste para as massas de adsorvente avaliadas, caracterizando-se por uma adsorção química, porém a capacidade de adsorção máxima no equilíbrio foi ligeiramente superior para o CCP com massa menor (25 mg). O presente estudo demonstrou que materiais adsorventes sintetizado a partir de precursores de baixo custo são muito promissores para o tratamento de efluentes da indústria têxtil, além de contribuir para o aproveitamento dos resíduos agroindustriais, que são bastante elevados. Como sugestões de pesquisas futuras pretende-se utilizar outros corantes para avaliar o potencial do adsorvente produzido frente a diferentes poluentes.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM), pelo apoio financeiro, e ao Laboratório de Ensaio Físico-Químicos da Faculdade de Tecnologia da UFAM, pela realização da análise térmica.

Referências

- Alves, J. L. F., Silva, J. C. G., Mumbach, G. D., Domenico, M. D., Bolzan, A., Machado, R. A. F., & Marangoni, C. (2022). Evaluating the bioenergy potential of cupuassu shell through pyrolysis kinetics, thermodynamic parameters of activation, and evolved gas analysis with TG/FTIR technique. *Thermochimica Acta*, 711, 179187. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2022.179187>
- Alyasi, H., Mackey, H., & Mckay, G. (2023). Adsorption of Methyl Orange from Water Using Chitosan Bead-like Materials. *Molecules*, 28(18), 6561. <https://doi.org/10.3390/molecules28186561>
- Antunes, E. C. E. S., Pereira, J. E. S., Ferreira, R. L. S., Medeiros, M. F. D., & Barros Neto, E. L. (2018). Remoção de corante têxtil utilizando a casca do abacaxi como adsorvente natural. *Holos*, 3, 81-97. <https://doi.org/10.15628/holos.2018.5334>
- Barakat, M. A., Selim, A. Q., Mobarak, M., Kumar, R., Anastopoulos, I., Giannakoudakis, D., Bonilla-Petriciolet, A., Mohamed, E. A., Seliem, M. K., & Komarneni, S. (2020). Experimental and theoretical studies of methyl orange uptake by Mn-rich synthetic mica: insights into manganese role in adsorption and selectivity. *Nanomaterials*, 10(8), 1464. <https://doi.org/10.3390/nano10081464>
- Cheah, W., Hosseini, S., Khan, M. A., Chuah, T. G., & Choong, T. S. Y. (2013). Acid modified carbon coated monolith for methyl orange adsorption. *Chemical Engineering Journal*, 215-216, 747-754. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.07.004>
- Cheung, W. H., Szeto, Y. S., & McKay, G. (2007). Intraparticle diffusion processes during acid dye adsorption onto chitosan. *Bioresource Technology*, 98(15), 2897-2904. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.09.045>
- Djilani, C., Zaghdoudi, R., Djazi, F., Bouchekima, B., Lallam, A., Modarressi, A., & Rogalski, M. (2015). Adsorption of dyes on activated carbon prepared from apricot stones and commercial activated carbon. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 53, 112-121. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2015.02.025>
- Foo, K. Y. & Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 2-10. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.013>
- Gómez, V., Larrechi, M. S., & Callao, M. P. (2007). Kinetic and adsorption study of acid dye removal using activated carbon. *Chemosphere*, 69(7), 1151-1158. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.03.076>
- Gondim, T. M. S., Thomazini, M. J., Cavalcante, M. J. B., & Souza, J. M. L. (2001). *Aspectos da Produção de Cupuaçu*. EMBRAPA: Rio Branco.
- Hasan, M., Rashid, M. M., Hossain, M. M., Al Mesfer, M. K., Arshad, M., Danish, M., Lee, M., Jery, A. E., & Kumar, N. (2019). Fabrication of polyaniline/activated carbon composite and its testing for methyl orange removal: Optimization, equilibrium, isotherm and kinetic study. *Polymer Testing*, 77, 105-909. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.105909>
- Ho, Y-S. (2006). Review of second-order models for adsorption systems. *Journal of Hazardous Materials*, 136(3), 681-689, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.12.043>

- Ho, Y. S. & McKay, G. (1998). Kinetic Models for the Sorption of Dye from Aqueous Solution by Wood. *Process Safety and Environmental Protection*, 76(2), 183-191. <https://doi.org/10.1205/095758298529326>
- Ho, Y. S., Wase, D. A. J., & Forster, C. F. (1996). Kinetic studies of competitive heavy metal adsorption by sphagnum moss peat. *Environmental Technology*, 17(1), 71-77. <https://doi.org/10.1080/09593331708616362>
- Hung, N. V., Nguyet, B. T., Nghi, N. H., Thanh, N. M., Quyen, N. D., Nguyen, V. T., Nhiem, D. N., & Khieu, D. Q. (2023). Highly effective adsorption of organic dyes from aqueous solutions on longan seed-derived activated carbon. *Environmental Engineering Research*, 28(3), 220116. <https://doi.org/10.4491/eer.2022.116>
- Liu, Y., Wang, S., Zhou, H., Li, X., Duan, L., Chen, S., Li, S., Zhang, L., & Zhang, A. (2020). Simultaneous removal of methyl orange and Cr(VI) using polyethyleneimine-modified corn-cob-derived carbon material. *BioResources*, 15(4), 7342-7356. https://bioresources.cnr.ncsu.edu/wp-content/uploads/2020/08/BioRes_15_4_7342_Liu_WZLDCLZZ_Simultan_Removal_Methyl_Orange_CrVI_PEI_modif_Carbon_17766.pdf
- Luo, L., Wu, X., Li, Z., Zhou, Y., Chen, T., Fan, M., & Zhao, W. (2019). Synthesis of activated carbon from biowaste of fir bark for methylene blue removal. *Royal Society Open Science*, 6(9), 190523. <https://doi.org/10.1098/rsos.190523>
- Marrakchi, F., Ahmed, M. J., Khanday, W. A., Asif, M., & Hameed, B. H. (2017). Mesoporous carbonaceous material from fish scales as low-cost adsorbent for reactive orange 16 adsorption. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 71, 47-54. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.12.026>
- Naushad, M., Alqadami, A. A., Alothman, Z. A., Alsohaimi, I. H., Algamdi, M. S., & Aldawsari, A. M. (2019). Adsorption kinetics, isotherm and reusability studies for the removal of cationic dye from aqueous medium using arginine modified activated carbon. *Journal of Molecular Liquids*, 293, 111442. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111442>
- Rêgo Júnior, A. G., Nobrega, G. A. S., Silva, R. C. L., & Gomes, D. A. A. (2022). Estudo da remoção de corante azul de metileno de soluções aquosas usando o bambu *in natura* (*Bambusa Vulgaris*) como adsorvente. *Research, Society and Development*, 11(6), e46711629314. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i6.29314>
- Santos, L. B., Striebeck, M. V., Crespi, M. S., Capela, J. M. V., Ribeiro, C. A., & De Julio, M. (2016). M. Energy evaluation of biochar obtained from the pyrolysis of pine pellets. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 126, 1879. <https://doi.org/10.1007/s10973-016-5683-4>
- Serban, G. V., Iancu, V. I., Dinu, C., Tenea, A., Vasilache, N., Cristea, I., Niculescu, M., Ionescu, I., & Chiriac, F. L. (2023). Removal Efficiency and Adsorption Kinetics of Methyl Orange from Wastewater by Commercial Activated Carbon. *Sustainability*, 15(17), 12939. <https://doi.org/10.3390/su151712939>
- Subbaiah, M. V. & Kim, D. (2016). Adsorption of methyl orange from aqueous solution by aminated pumpkin seed powder: Kinetics, isotherms, and thermodynamic studies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 128, 109-117. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.02.016>
- Uddin, M. T., Islam, M. A., Mahmud, S., & Rukanuzzaman, M. (2009). Adsorptive removal of methylene blue by tea waste. *Journal of Hazardous Materials*, 164(1), 53-60. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.07.131>
- Wang, S., Dou, J., Zhang, T., Li, S., & Chen, X. (2023). Selective Adsorption of Methyl Orange and Methylene Blue by Porous Carbon Material Prepared From Potassium Citrate. *ACS Omega*, 8(38), 35024-35033. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c04124>
- Wu, L., Liu, X., Lv, G., Zhu R., Tian, L., Liu, M., Li, Y., Rao, W., Liu, T., & Liao, L. (2021). Study on the adsorption Properties of methyl orange by natural one-dimensional nano-mineral materials with different structures. *Scientific Reports*, 11(1), 10640. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90235-1>
- Wu, Y., Su, M., Chen, J., Xu, Z., Tang, J., Chang, X., & Chen, D. (2019). Superior adsorption of methyl orange by h-MoS₂ microspheres: Isotherm, kinetics, and thermodynamic studies. *Dyes and Pigment*, 170, 107-591. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2019.107591>
- Yaseen, D. A. & Scholz, M. (2019). Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: a critical review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16, 1193-1226. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-2130-z>