



INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA CINÉTICA DE ADSORÇÃO DE METAIS PESADOS POR MATERIAL ZEOLÍTICO A PARTIR DE REJEITO DE CAULIM AMAZÔNICO

Likary A. O. Caetano¹; Matheus L.S. Costa¹; Igor Y. N. Noronha¹; Welber W.T. Maia Filho¹; Gustavo L.G. Salame¹; Leandro V. Gomes²; Deibson S. Costa¹; Emerson C. Rodrigues¹

¹Universidade Federal do Pará - Faculdade de Engenharia Química, R. Augusto Corrêa, 01 - Guamá, Belém - PA, 66075-110

²Universidade Federal do Pará – Pós-graduação em Engenharia Química, R. Augusto Corrêa, 01 - Guamá, Belém - PA, 66075-110

likary.caetano@itec.ufpa.br

Palavras-Chave: Metais pesados, Zeólitas, Cobre.

Introdução

A contaminação de corpos hídricos por metais pesados provenientes de atividades industriais constitui um dos principais problemas ambientais da atualidade. Entre esses contaminantes, destaca-se o cobre, que, embora seja um micronutriente essencial em pequenas quantidades, em concentrações elevadas pode comprometer a qualidade da água, provocar toxicidade em organismos aquáticos e causar efeitos adversos à saúde humana (Tchounwou *et al.*, 2012).

Paralelamente, o descarte inadequado de rejeitos de caulim gerados durante o beneficiamento mineral representa um risco ambiental, podendo provocar assoreamento de cursos de água, aumento da turbidez, alteração das propriedades do solo e dispersão de partículas finas ricas em silicatos e aluminossilicatos (Preza, 2021). Estudos recentes demonstram que esses resíduos podem ser utilizados como matéria-prima para a síntese de zeólitas do tipo A por meio de processos de calcinação e síntese hidrotermal, permitindo transformar um passivo ambiental em um material de alto valor agregado (Rodrigues *et al.*, 2026).

Diversos métodos são utilizados para a remoção de metais pesados de efluentes, entretanto, a adsorção se apresenta com elevada eficiência, simplicidade operacional e menor custo de aplicação (Qasem; Mohammed; Lawan 2021). Nesse contexto, as zeólitas são excepcionais devido a sua estrutura microporosa, elevada área superficial e capacidade de troca iônica, características que favorecem a adsorção de íons metálicos (Costa *et al.*, 2024).

A eficiência dos processos de adsorção pode ser influenciada por diferentes parâmetros, dentre os quais a temperatura exerce papel importante na velocidade de adsorção e na interação entre adsorvato e adsorvente (Wang; Peng, 2010). Nesse sentido, os estudos cinéticos são



fundamentais para compreender o comportamento temporal do sistema e identificar os mecanismos predominantes envolvidos no processo adsorptivo. Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência da temperatura na cinética de adsorção de metais pesados por materiais zeolíticos sintetizados a partir de rejeito de caulim amazônico, comparando os ensaios realizados a 25 °C e 45 °C e analisando o efeito da variação de temperatura sobre o desempenho adsorptivo do material.

Material e Métodos

Síntese da zeólita

A zeólita 5A utilizada neste estudo foi sintetizada por troca iônica a partir de rejeito de caulim amazônico previamente beneficiado. O resíduo foi submetido às etapas de secagem, moagem e calcinação para obtenção de metacaulim, seguido de síntese hidrotérmica da zeólita 4A e posterior troca iônica com solução contendo cálcio para formação da zeólita 5A, conforme metodologia descrita por Rodrigues *et al.* (2026).

Difração de Raio X (DRX) E Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A caracterização da zeólita 5A sintetizada foi realizada por difração de raios X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). A análise por DRX foi empregada para identificar as fases cristalinas presentes e confirmar a obtenção da estrutura característica da zeólita 5A. A morfologia e as características superficiais do material foram avaliadas por MEV, permitindo a observação da formação dos cristais zeolíticos e a análise de aspectos relacionados ao tamanho, forma e grau de cristalização do adsorvente obtido.

Curva de calibração

Antes da realização dos ensaios de adsorção, foi construída uma curva de calibração para determinação da concentração de íons cobre por espectrofotometria UV-Vis. Inicialmente, preparou-se 1 L de solução de sulfato de cobre (CuSO_4) com concentração de 2500 ppm, utilizando água destilada como solvente. A partir dessa solução, foram preparadas soluções padrão com concentrações de 100, 250, 500, 800, 1500, 1800, 2000 e 2500 ppm, obtidas por diluição em balões volumétricos de 50 mL. As leituras de absorbância foram realizadas em espectrofotômetro UV-Vis, utilizando água destilada como branco analítico e comprimento de onda de 800 nm.

Cinética de adsorção

Os ensaios cinéticos foram conduzidos em sistema de batelada utilizando 50 mL de solução de CuSO_4 com concentração de 1500 ppm, preparada por diluição da solução mãe de 2500 ppm. Em cada ponto, foram adicionados 0,1 g de zeólita 5A em erlenmeyers contendo a solução contaminante, mantendo-se agitação constante de 150 rpm, com tempos de contato de 5, 10, 15, 25, 40, 60, 90 e 120 min, em duplicata à 25°C e, posteriormente, repetiu-se todo o processo de adsorção com a temperatura à 45°C.

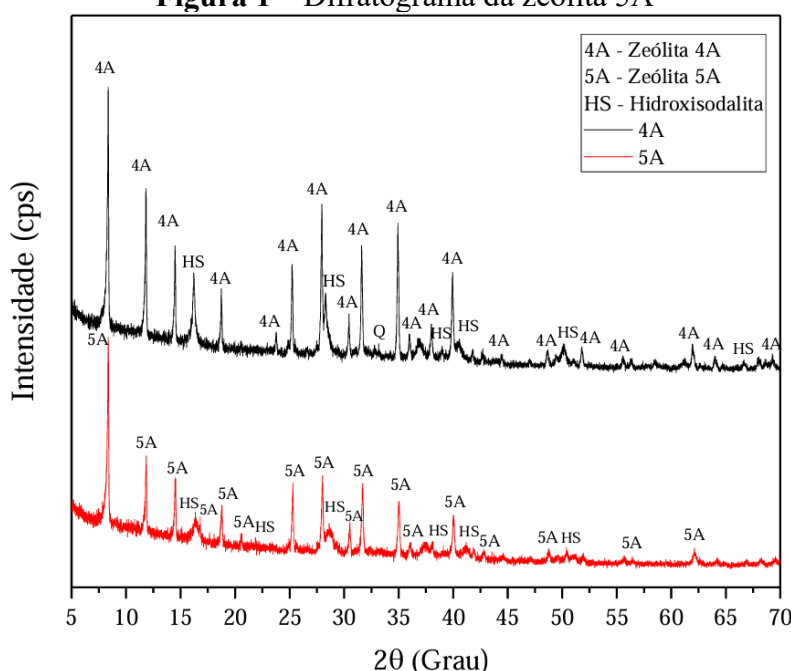
Após cada intervalo de tempo, as amostras foram filtradas para separação do adsorvente e foram analisadas por espectrofotometria UV-Vis, utilizou-se a curva de calibração obtida para determinação da concentração residual de íons cobre. A capacidade de adsorção e a eficiência de remoção foram calculadas a partir das concentrações inicial e final do contaminante. Os dados experimentais foram ajustados aos modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem, pseudo-segunda ordem, Elovich e difusão intrapartícula de Weber-Morris, visando avaliar a influência da temperatura sobre a velocidade de adsorção e os mecanismos predominantes do processo adsorptivo.

Resultados e Discussão

Caracterização da zeólita 5A

A Figura 1 apresenta o difratograma obtido por Difração de Raios X (DRX) da zeólita 5A sintetizada a partir de rejeito de caulim amazônico.

Figura 1 – Difratograma da zeólita 5A



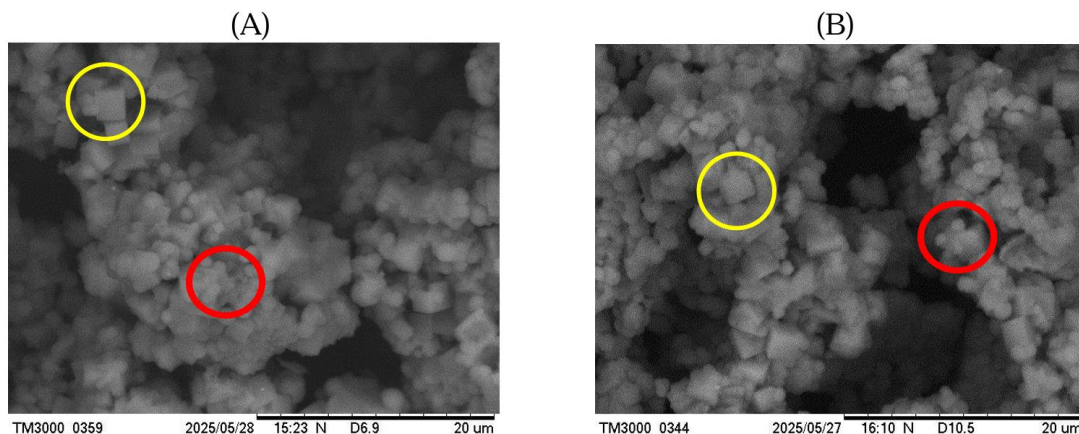
Fonte: Autores, 2026.

Observam-se picos característicos da fase zeolítica, indicando a conversão eficiente do material precursor em uma estrutura cristalina compatível com a zeólita 5A. A presença desses picos confirma o sucesso da síntese hidrotérmica e da etapa subsequente de troca iônica empregada para obtenção do material adsorvente. Esses resultados corroboram aqueles relatados na literatura para materiais zeolíticos obtidos a partir de resíduos cauliníticos.

Micrografias

As micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), apresentadas na Figura 2, evidenciam a formação de cristais com morfologia predominantemente cúbica e superfícies bem definidas, características típicas da zeólita 5A.

Figura 2 - Micrografias MEV das zeólitas 4A (A) e 5A (B).



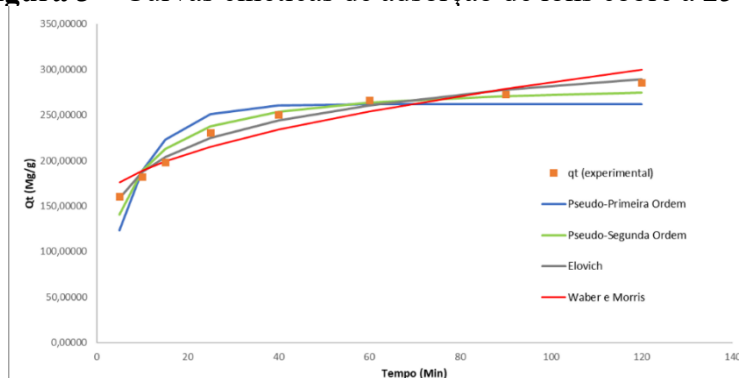
Fonte: Autores, 2026.

A presença dessas estruturas indica elevado grau de cristalização do material sintetizado, favorecendo a disponibilidade de sítios ativos para adsorção e contribuindo para o desempenho observado nos ensaios cinéticos.

Cinética de adsorção de íons cobre

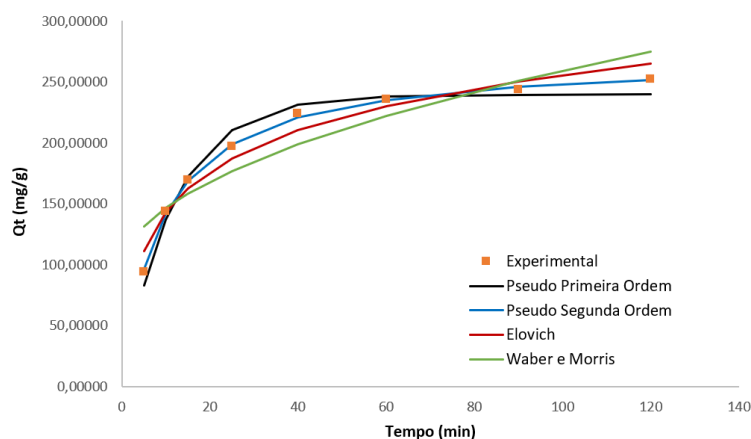
Após a obtenção da zeólita 5A, foram realizados ensaios de adsorção de íons cobre em sistema de batelada nas temperaturas de 25 °C e 45 °C. As Figura 3 e 4 apresentam as curvas dos modelos cinéticos comparados as experimentais obtidas para ambas as condições de temperatura.

Figura 3 – Curvas cinéticas de adsorção de íons cobre a 25 °C.



Fonte: Autores, 2026.

Figura 4 – Curvas cinéticas de adsorção de íons cobre a 45 °C.



Fonte: Autores, 2026.

Observou-se aumento da capacidade de adsorção em função do tempo de contato para ambas as temperaturas avaliadas. Nos instantes iniciais ocorreu rápida remoção dos íons metálicos, comportamento associado a elevada disponibilidade de sítios ativos na superfície do adsorvente. Com o avanço do processo, a velocidade de adsorção diminuiu gradativamente em razão da ocupação progressiva desses sítios até a aproximação do equilíbrio.

Entre os modelos avaliados, o modelo de pseudo-segunda ordem apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais obtidos a 45 °C, apresentando coeficiente de determinação ($R^2 = 0,9988$), superior aos observados para os modelos de pseudo-primeira ordem, Elovich e Weber-Morris. Esse resultado sugere que o processo de adsorção está associado predominantemente as interações entre os íons cobre e os sítios ativos presentes na estrutura zeolítica. Além disso, a capacidade de adsorção no equilíbrio estimada pelo modelo foi de 270,893 mg g⁻¹, evidenciando a elevada afinidade do material pelos íons metálicos. Resultados semelhantes foram reportados por Markovska *et al.* (2016), que verificou que o modelo de pseudo-segunda ordem foi o mais adequado para descrever a adsorção de Cu (II) em zeólita NaA, indicando predominância de mecanismos associados à quimissorção.

Em comparação aos resultados obtidos a 25 °C, verificou-se que a elevação da temperatura favoreceu o desempenho adsorptivo da zeólita 5A. O aumento da temperatura proporciona maior mobilidade dos íons em solução, reduz as resistências à transferência de massa e facilita a difusão do adsorvato em direção aos poros e sítios ativos do material. Como consequência, observou-se um incremento na capacidade de adsorção e na velocidade do processo, indicando influência positiva da temperatura sobre a remoção de íons cobre. Esse comportamento está de acordo com estudos realizados com zeólitas sintéticas, nos quais foi observado que o aumento da temperatura favorece a adsorção de cobre (Markovska *et al.*, 2016)

O modelo de Weber-Morris apresentou o menor ajuste entre os modelos avaliados, indicando que a difusão intrapartícula não é a única etapa responsável pelo controle da adsorção. Dessa forma, o processo provavelmente ocorre por meio de mecanismos simultâneos



envolvendo transporte de massa na solução, difusão nos poros da zeólita e interação entre o adsorvato e a superfície do adsorvente. Resultados semelhantes foram observados por Svilović; Rusić; Stipisić (2009) ao estudarem a adsorção de cobre em zeólitas sintéticas, demonstrando que mecanismos difusionais não atuam isoladamente como etapa controladora do processo.

Conclusões

A zeólita 5A sintetizada a partir de rejeito de caulim amazônico apresentou características estruturais compatíveis com a fase desejada, conforme evidenciado pelas análises de DRX e MEV, confirmando a eficiência da rota de síntese empregada. Os ensaios de adsorção demonstraram que o material possui elevada capacidade para remoção de íons cobre em solução aquosa, destacando seu potencial para aplicações ambientais.

A temperatura exerceu influência positiva sobre o processo adsorptivo, sendo observadas maiores capacidades de adsorção e melhor desempenho cinético a 45 °C em comparação a 25 °C. Entre os modelos cinéticos avaliados, o de pseudo-segunda ordem apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais ($R^2 = 0,9988$), indicando que o processo é predominantemente controlado pelas interações entre os íons metálicos e os sítios ativos presentes na superfície da zeólita.

Dessa forma, os resultados evidenciam que o rejeito de caulim amazônico constitui uma matéria-prima promissora para a obtenção de zeólita 5A de elevado valor agregado, possibilitando simultaneamente o aproveitamento de um resíduo mineral abundante na região amazônica e a produção de adsorventes eficientes para a remoção de metais pesados em sistemas aquosos, contribuindo para o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis voltadas ao tratamento de efluentes.

Referências

QASEM, N. A. A.; MOHAMMED, R. H.; LAVAL, D. U. The use of zeolite-based geopolymers as adsorbent for copper removal from aqueous media. **Royal Society Open Science**, v. 9, n. 3, 2022. Disponível em: 10.1098/rsos.211644.

COSTA, A.C.F.M.; SILVA, A.L.; LEAL, E.; SALES, H.B.; DANTAS, J. Princípios e Aplicações em Catálise. **Editora Poisson**. Belo Horizonte, 2024.

MARKOVSKA, Irena. The Removal of Cu (II) Ions from Aqueous Solutions on Synthetic Zeolite NaA. **World Academy of Science, Engineering and Technology**, v. 64, 2012.

PREZA, Carmen Raiza Aires Soares. Síntese e caracterização de geopolímeros, a partir de argila, caulim ferruginoso e cinzas volantes – classe C. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos), Belém, 2021.

RODRIGUES, E. C.; DIAS, C. S.; FERREIRA, J. L.; FARIAS, B. M.; ESTUMANO, D. C.; VIEGAS, B. M.; SOUZA, J. A. S.; MACÊDO, E. N. Semipilot Scale Synthesis of Zeolite A



from Kaolin Filler: Process Optimization with Boiler Steam, Mathematical Modeling, and Cu^{2+} Adsorption. **ACS Omega**, v. 11, n. 22, 2026. Disponível em: [10.1021/acsomega.5c13534](https://doi.org/10.1021/acsomega.5c13534).

SVILOVIĆ, S.; RUSIĆ, D.; STIPIŠIĆ, R. Modeling batch kinetics of copper ions sorption using synthetic zeolite NaX. **Journal of Hazardous Materials**, v. 170, n. 2–3, 2009. Disponível em: [10.1016/j.jhazmat.2009.05.063](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.05.063).

TCHOUNWOU, P. B., YEDJOU, C. G., PATLOLLA, A. K.; SUTTON, D. J. (2012). Heavy metal toxicity and the environment. **Experientia supplementum**, 2012. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6.

WANG, Shaobin; PENG, Yuelian. Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment. **Chemical Engineering Journal**, v.156, 1 jan. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.10.029>.