



## Aplicação de zeólitas na adsorção de benzotriazol em sistemas aquosos

**Silva, R. O. F. S.<sup>1</sup>; Silva, G. R. P.<sup>2</sup>; Resende, C. C.<sup>2</sup>; Quintella, S.C.<sup>2</sup> Carneiro, P. A.<sup>1,2</sup>; De Pietre, M. K.<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Universidade Federal Fluminense, Campus de Volta Redonda, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental; <sup>2</sup> Universidade Federal Fluminense, Campus de Volta Redonda, Instituto de Ciências Exatas, Departamento de Química.

*Palavras-chave: adsorção; zeólita; troca iônica; meio-ambiente; nanoestrutura.*

### INTRODUÇÃO

Atualmente há uma preocupação com a qualidade da água devido aos avanços tecnológicos e industriais e o alto índice de descarte de substâncias químicas lançadas no ambiente aquático<sup>1</sup>. Durante o tratamento de água no Brasil, compostos orgânicos podem não ser eliminados no processo, fazendo com que eles passem quase que imperceptíveis por todo tratamento<sup>2</sup>. Além disso, não há regulamentação sobre a presença de diversos compostos orgânicos em corpos hídricos, fazendo com que muitos permaneçam presentes na água após o tratamento tradicional, sendo caracterizados como contaminantes emergentes<sup>1</sup>.

Entre essas substâncias, destaca-se o benzotriazol (BTA), um inibidor de corrosão amplamente utilizado devido à sua alta estabilidade térmica e química, mas que possui elevada persistência ambiental e baixa biodegradabilidade. O benzotriazol (BTA, =99%, Sigma-Aldrich) e seus derivados, são frequentemente detectados em águas superficiais, subterrâneas e em efluentes tratados, evidenciando a ineficiência dos processos tradicionais de tratamento de águas na remoção completa destes poluentes<sup>3</sup>.

Diante desse cenário, a busca por técnicas eficientes para a remoção de inibidores corrosivos, a adsorção destaca-se como uma técnica promissora pela sua simplicidade operacional, baixo custo e alta eficiência na remoção de poluentes em baixas concentrações<sup>4</sup>. Dentre os adsorventes, as zeólita minerais microporosos naturais ou sintéticos destacam-se pela elevada área superficial, seletividade molecular, estabilidade química e capacidade de regeneração. Zeólitas do tipo BEA (Beta) apresentam elevado potencial para a captura seletiva de compostos orgânicos, como o benzotriazol, sobretudo quando modificadas ou combinadas com outros materiais<sup>3</sup>.

A utilização de zeólitas na adsorção de compostos orgânicos, como o benzotriazol, configura uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente segura para o tratamento de águas contaminadas. Este estudo avalia a eficiência das zeólitas beta e mordenita na remoção de benzotriazol em meio aquoso, considerando parâmetros físico-químicos e isotermas de adsorção, a fim de subsidiar o desenvolvimento de sistemas de tratamento mais eficientes.

### METODOLOGIA

A síntese da zeólita beta foi conduzida pela adição de tetraetilamônio (TEAOH, = 20wt. % H<sub>2</sub>O, Sigma-Aldrich), seguida da incorporação de hidróxido de sódio (NaOH PA, Merck) e aluminato de sódio (NaAlO<sub>2</sub>, Vetec). Em seguida, adicionou-se tetraetilortossilicato (TEOS, =98%, Sigma-Aldrich) onde o material foi transferido para um reator de síntese autoclave (Autoclave Parr 4749, 125 mL) e submetido a tratamento hidrotérmico em estufa (Estufa Fanem 320-SE, 60 ± 2 °C) a 140 °C por 48 horas. O sólido resultante foi calcinado na mufla (Quimis Q318M) para remoção do direcionador orgânico e estabilização da estrutura zeolítica<sup>5</sup>. A troca iônica foi realizada a partir de uma solução precursora contendo nitrato de cério hidratado, com a zeólita mantida sob agitação contínua. O sistema permaneceu em envelhecimento durante 5 dias, seguido de lavagem, filtração e secagem em estufa a 60 °C. Posteriormente, a zeólita Ce-BEA foi obtida por calcinação a 540 °C durante 6 h em atmosfera de O<sub>2</sub> em um forno de mufla.

A zeólita mordenita foi sintetizada a partir de solução aquosa de hidróxido de sódio, nitrato de alumínio e sílica coloidal, seguida de envelhecimento por 20 h a 25 ± 2 °C e tratamento hidrotermal a 180 °C por 5 dias em autoclave revestida com Teflon.

Os experimentos foram realizados em triplicata, com tempo de contato de 60 min. Após essa etapa, o material foi separado por centrifugação em Centrífuga Eppendorf 5810R, rotor A-4-62 (r = 15 cm) a 3000 rpm durante 6 min e o sobrenadante filtrado em membrana de PTFE (0,45 µm). As leituras de adsorção foram realizadas no espectrofotômetro SHIMADZU UV – 2600 para quantificação do benzotriazol adsorvido e a zeólita mordenita foi testada nesse estudo a fins comparativos de aferição de resultados.

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta que a adsorção de benzotriazol foi avaliada em materiais zeolíticos do tipo beta e Ce-beta. Os resultados mostraram que as isotermas foram bem descritas pelo modelo de Freundlich, apresentando



coeficientes de determinação ( $R^2$ ) próximos de 1, o que evidencia a natureza favorável do processo de adsorção<sup>4</sup>. Como esperado, a Beta apresentou uma maior incorporação de Ce (9,68%), gerando mais sítios de troca iônica o que sugere que o método de modificação empregado foi eficaz na introdução de cério na BEA, provavelmente por troca iônica com  $\text{Na}^+$ . A atribuição da significativa performance dessa zeólita se deve ao tamanho dos poros ( $6.4 \text{ \AA} \times 7.6 \text{ \AA}$  e  $5.6 \text{ \AA} \times 5.6 \text{ \AA}$ ). De acordo com Fu (2022), o diâmetro efetivo do BTA é de  $\sim 4,1 \text{ \AA}$ , logo o acesso da molécula do benzotriazol aos sítios ativos da Beta foi positivo e encaminhado conforme o esperado.

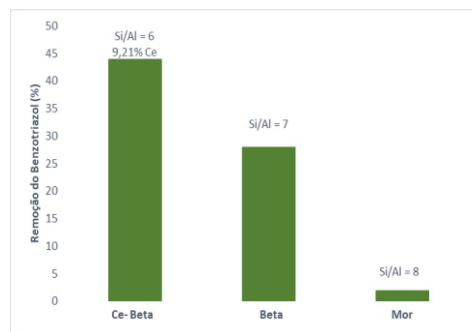
Tabela 1 – Parâmetros de Langmuir e Freundlich obtidos a partir da remoção de BTA com os adsorventes BEA e Ce-BEA

Isoterma	Parâmetros	Beta	Ce-Beta
Langmuir	$q_m$ ( $\text{mg.g}^{-1}$ )	$8,37 \pm 0,59$	$8,66 \pm 1,29$
	$K_L$ ( $\text{L.mg}^{-1}$ )	0,10	0,21
	$R^2$	0,9976	0,9815
Freundlich	$K_F$ ( $\text{mg.g}^{-1}$ )	$0,92 \pm 0,02$	$1,63 \pm 0,13$
	$1/n$	0,71	0,65
	$R^2$	0,9988	0,9869

Fonte: Próprio autor (2025).

A Figura 1 apresenta os valores de remoção do benzotriazol (BTA), demonstram que a zeólita BEA apresentou desempenho satisfatório. Após o processo de troca iônica, a eficiência adsorptiva foi potencializada<sup>3</sup>, influenciando na interação com estruturas do BTA.

Figura 1 – Remoção de BTA em meio aquoso por BEA e Ce-BEA ( $m = 50 \text{ mg}$ ,  $V = 50 \text{ mL}$ ,  $T = \sim 25^\circ\text{C}$ ,  $\text{pH} = \sim 6,1$ ,  $t = 60 \text{ min}$ ). Erros = DP,  $n = 3$



Fonte: Próprio autor (2025).

Assim, a Tabela 1 e a Figura 1 evidenciam valores satisfatórios para a adsorção de BTA. Contudo, mesmo diante dos resultados positivos, o material ainda apresenta limitações no processo adsorptivo.

## CONCLUSÕES

A zeólita Ce-BEA apresentou maior adsorção de benzotriazol, associada à configuração de poros e à hidrofobicidade do material. A introdução de cério favoreceu o processo, fornecendo sítios adicionais de adsorção. As isotermas foram melhor descritas pelo modelo de Freundlich, devido ao fato da adsorção se desenvolver em multicamadas onde o benzotriazol é adsorvido nos poros da zeólita Beta estudada com eficiência.

## AGRADECIMENTOS

À FAPERJ pelo apoio financeiro.

## REFERÊNCIAS

- [1] MASCARENHAS, B. C. **Obtenção e funcionalização da superfície da zeólita FAU particulada e imobilizada em fibras de PLA para a adsorção de corantes**. 2017. 82 f. Dissertação (Mestrado em Química). Programa de Pós-graduação em Química, Universidade Federal de São Carlos, 2017.
- [2] MORAIS, C. S. **Zeólitas funcionalizadas para adsorção de miclobutanil em matrizes aquosas**. 2022. 70 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) – Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental, Universidade Federal Fluminense, 2022.
- [3] FU, M. **Adsorption of organic micropollutants by zeolite granules and subsequent ozone-based regeneration**. 2022. Tese. Delft: Delft University of Technology, 2022.
- [4] ZHENG, X.; JIANG, N. *et al.* Predicting adsorption isotherms of organic micropollutants by high-silica zeolite mixtures. **Environmental Science & Technology**, v. 55, n. 6, p. 3866–3875, 2021.
- [5] ZHANG, D.; DUAN, A.; ZHAO, Z.; XU, C. Synthesis, characterization, and catalytic performance of NiMo catalysts supported on hierarchically porous Beta-KIT-6 material in the hydrodesulfurization of dibenzothiophene. **Journal of Catalysis**, v. 274, n. 2, p. 273-286, 2010.