

ESTUDO DAS ISOTERMAS DE ADSORÇÃO DE SERTRALINA EM ZEÓLITAS NATURAIS E IMPLEMENTAÇÃO DE LEITO FIXO

M. R. M. Costa¹, Q. L. S. Biadola¹, J. V. S. Baddini¹, R. Bergamasco¹

¹Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil (marcosrm.costa02@gmail.com)

Resumo: Em decorrência dos métodos e mecanismos ultrapassados presentes em diversas estações de tratamento de água, é notório observar o aumento da disposição de resíduos fármacos e outros contaminantes em pós tratamentos, tais fatos estão relacionados com a criação de um alarmante cenário ao ecossistema humano devido ao elevado potencial de contaminação destas substâncias. Desse modo, pode-se comentar acerca da necessidade do desenvolvimento de processos alternativos ao tratamento de água convencional. Portanto, o foco do presente trabalho foi explorar o potencial de remoção de sertralina via adsorção em zeólitas naturais em processos de batelada, e aplicação do material em leito fixo.

Palavras-chave: Adsorção; Leito fixo; Sertralina; Tratamento de água; Zeólitas.

INTRODUÇÃO

Os fármacos são uma das classes de contaminantes emergentes ou melhor dizendo poluentes orgânicos emergentes (POE). Esses são compostos que apresentam um enorme risco potencial aos ecossistemas ambientais e à saúde humana (La Farré et al., 2008). Frequentemente, esses poluentes são descartados no meio ambiente através de várias rotas distintas, principalmente no esgoto doméstico e efluentes de ETE (Bila e Dezotti, 2006). A Figura 1, demonstra caminhos que levam a contaminação da água por fármacos, como abordado no estudo realizado por Bila (2003).

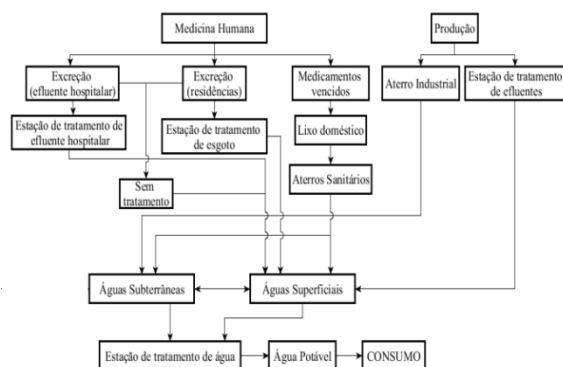


Figura 1. Possíveis rotas e o destino dos fármacos.

Fonte: Adaptado de Bila; Dezotti (2003).

Os fármacos são moléculas complexas com diferentes propriedades biológicas e físico-químicas importantes para a manutenção da saúde humana e animal e para a prevenção de doenças. Porém, seu alto consumo, associado ao descarte adequado e ao tratamento ineficaz de água e esgoto, pode causar grandes danos ao meio ambiente. O uso de drogas tem aumentado desde o século XX devido ao aumento populacional e

ao desenvolvimento tecnológico. Mas até a década de 1990, o destino das drogas e o impacto ambiental após seu uso não eram considerados importantes (Dietrich et.al 2002). Desta maneira, sem precisar analisar números, é possível imaginar a imensa quantidade de fontes de contaminações efluentes em águas mananciais.

A sertralina é um dos antidepressivos mais prescritos nos últimos anos. Portanto, não é surpreendente que seja regularmente detectado em esgotos, águas superficiais e sedimentos, e em estações de tratamento de efluentes (Esteves, 2015). Como parte do princípio ativo da maioria dos antidepressivos é metabolizado no organismo e o restante é excretado sem qualquer degradação, o grande consumo desse tipo de medicamento tem causado grave poluição ambiental. Esses compostos possuem propriedades físico-químicas e biológicas que os tornam resistentes à biodegradação, por isso são mais eficazes no corpo e quando entram na água, causam problemas no tratamento convencional das águas residuais.

Desta maneira, tomamos como uma possível medida corretiva, o processo de adsorção que é um processo de separação com grande potencial, pois é de fácil implementação e instalação, baixo custo operacional e ambientalmente amigável (Sophia et al., 2018). Dentre os materiais comumente empregados como materiais adsorventes pode-se citar o carvão ativado, zeólitas e resinas sintéticas (Geankoplis, 1998). O emprego de zeólitas naturais tem se mostrado vantajoso, pois, esses materiais atuam como adsorvente ou promove troca iônica removendo íons indesejáveis do meio aquoso (Wibowo et al., 2017). Zeólitas são materiais constituídos de óxidos metálicos cuja composição estrutural característica é XO_4 , sendo o elemento X átomos de silício (Si) ou alumínio (Al), sendo por

conta disso denominas alumino silicatos (Mansoor et al., 2018). Por conta da estrutura de conformação tridimensional, as zeólitas são empregadas como material adsorvente, peneira molecular e catalisadores (Mansoor et al., 2018).

O primeiro objetivo do presente estudo é realizar testes isotérmicos do processo em batelada, a presente situação ocorre para dar continuidade ao trabalho de Netto et al. (2022), onde foram apresentados os dados experimentais de equilíbrio que abordaram a influência do pH e testes de massa para o agente contaminante e material adsorvente atuais.

Os estudos isotérmicos são de extrema importância nos processos adsorptivos, sua importância reside na capacidade de fornecer informações cruciais sobre a interação entre um adsorvato e um adsorvente. A isoterma permite determinar as condições ideais para que a adsorção ocorra de forma eficiente.

A isoterma fornece os dados necessários para dimensionar corretamente o equipamento, determinar o tempo de vida útil do adsorvente e prever o desempenho do sistema em diferentes condições de operação. Sendo assim, surge o próximo objetivo do estudo, utilizar os dados das isotermas para implementação de um leito fixo.

A partir dos fundamentos supracitados, os processos de adsorção podem ser escalonados a níveis industriais com implementações do material adsorptivo em colunas. As operações em leito fixo são amplamente empregadas na indústria com diversas aplicações, como o tratamento de resíduos, a corrosão de substâncias e a segregação de ingredientes em uma combinação. Um sistema convencional de leito fixo é composto por uma coluna onde as partículas do adsorvente entram em contato com a solução a ser tratada. A coluna pode ser bombeada no sentido ascendente ou descendente. Além da diversidade de aplicações, as colunas são vantajosas em sua aplicação pela forma de condução do processo (contínuo), pois diferente da batelada o material não necessita de ser trocado ou aguardar a remoção de determinado volume para uma próxima remoção (Nascimento, 2014).

A eficiência de uma coluna de leito fixo, tal como seu comportamento dinâmico, é relatada através da razão entre a concentração medida pela concentração inicial (C/C_0) em relação ao tempo experimentado. E então, surgem conceitos importantes que assolam o processo de adsorção em leito fixo, como o ponto de ruptura, tempo onde a concentração medida deixa de ser zero, e então a concentração de efluente da solução começa a crescer. Além deste ponto, existe o ponto de saturação, nela a coluna já não está mais exercendo sua função, pois os poros já estão preenchidos e a capacidade de adsorção do leito se aproxima de zero (Memlak, 2019). A Figura 2 ilustra o gráfico de um

processo de adsorção em leito fixo, e seus pontos importantes.

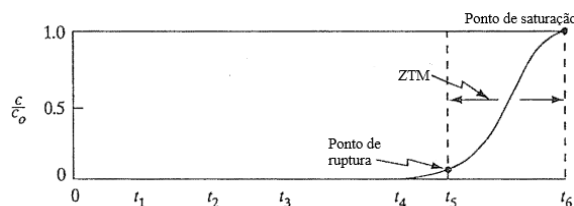


Figura 2. Gráfico $C/C_0 \times t$, de uma coluna de adsorção em leito fixo.

Fonte: Adaptado de Geankoplis (1998).

Observando a figura acima, pode-se notar a ZTM (Zona de transferência de massa), que ocorre a partir do ponto de ruptura, e vai até o ponto de saturação. Além disso, vale ressaltar que no caso ideal, a ZTM não existiria, pois haveria um salto e de forma imediata o leito estaria saturado. Portanto, pode-se notar que conforme menor for a ZTM de determinado processo, mais eficaz ele se torna.

Por sim, ao que tange essa operação, pode se citar alguns parâmetros que influenciam diretamente na eficiência do processo, como por exemplo a vazão e concentração da solução efluente, a massa de adsorvente na coluna e seu empacotamento com discutido no estudo de Peruzzo (2003).

Portanto, o presente trabalho tem por objetivo estudar o potencial tratamento adsorptivo para água contaminada com sertralina em batelada e aplica-la em um processo contínuo em coluna.

MATERIAL E MÉTODOS

Ao que diz respeito aos materiais utilizados, as zeólitas naturais foram fornecidas pela empresa Celta Brasil, para utilização nos ensaios adsorptivos. O fármaco empregado sertralina foi obtido através da indústria farmacêutica Edezio Ballaroti & Cia LTDA (Farmácia Catanduvas).

Para a garantia da homogeneidade dos resultados para o estudo é necessário que haja um padrão. Desta maneira o material adsorvente foi separado perante a uma faixa granulométrica específica (425-600 μ m), lavado (Com água destilada, somente) e seco adequadamente (Em estufa, a 70°C), como sugerido nas referências encontradas na literatura.

Para os ensaios em batelada, as análises deste estudo foram realizadas em duplicata para assegurar a precisão e minimizar quaisquer erros práticos que pudessem surgir. Os resultados foram coletados e examinados após um período de 24 horas de agitação em um shaker, focando nos valores das concentrações finais para cada amostra.

Além de determinar as concentrações finais, o estudo também se concentrou em calcular a porcentagem de

remoção da sertralina da água, comparando suas quantidades antes e depois do processo de adsorção. Por fim, foi investigada a capacidade adsorviva (q_e), que tem como objetivo quantificar a quantidade de contaminante que foi adsorvida por cada grama de zeólita presente na solução, conforme a metodologia descrita pela Equação 1.

$$q_e = \frac{C_i - C_e}{m_{\text{adsorvente}}} V \quad (1)$$

Sendo, q_e (capacidade adsorviva); C_i (Concentração inicial); C_e (Concentração final); V (Volume de solução); m_{ads} (massa de adsorvente).

E como teste de ensaio adsorvivo (em batelada), tem-se o estudo da isoterma de adsorção. Essencialmente, sabe-se que esta análise tem como objetivo informar sobre quais temperaturas, a atividade adsorviva é favorecida. Para isso, contou-se com diferentes concentrações de solução de sertralina (20-200 mg/L), 0,03 L de solução de sertralina, pH natural e uma agitação em shaker a 150 rpm por 24 h contínuas em diferentes temperaturas: 15°C, 25°C, 35°C e 45°C.

A realização dos ensaios de adsorção em um leito fixo fora realizada em uma coluna de vidro, com diâmetro de 1,8 cm e altura total de 15 cm. A solução contaminada foi bombeada por uma bomba peristáltica em fluxo ascendente pela coluna. Além disso, o leito foi ajustado com esferas de vidro, e um pequeno recorte de meia fina separava o material adsorvente das esferas. O sistema descrito está ilustrado pela Figura 3.

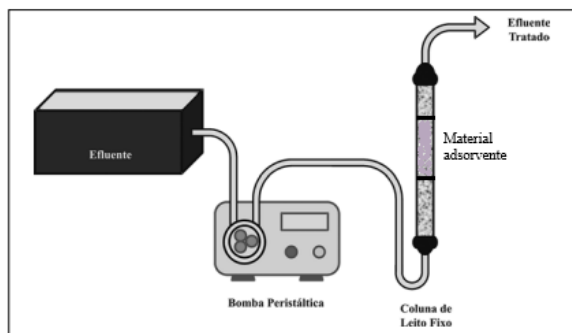


Figura 3. Esquema de adsorção em leito fixo.

Fonte: Adaptado de Nascimento (2014).

Com isso, semelhante ao procedimento dos experimentos em batelada, em determinados intervalos de tempo uma amostra era coletada e com auxílio de um espectrofotômetro foram medidas as concentrações. Foram feitas medições de concentração em 1 min, 3 min e 5 min, a partir disso foram determinados intervalos de tempo de 5 min até que atingisse 30 min de operação, e então de 15 min até que atingisse 1 h, e por fim, de 20 min até que a concentração do efluente tratado fosse aproximadamente 90% da concentração inicial.

Seguindo este procedimento para avaliação da melhor condição de operação, primeiramente foram testadas as influências da vazão (3, 5 e 7 mL/min) em uma coluna com 1 g de zeólitas naturais e concentração inicial de 20,11 mg/L.

Por fim, foram testadas as influências com a mudança da altura da coluna, ou seja, a massa de adsorvente (2 e 3g). Isto mediante as melhores condições estabelecidas nos casos anteriores.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos dados obtidos através dos testes, foram realizados os ajustes das isotermas de adsorção de Sertralina aos modelos de Langmuir, Freundlich e Sips em quatro temperaturas diferentes (15, 25, 35 e 45°C) e em concentrações variando de 0 a 200 mg/L, com o objetivo de determinar qual modelo apresenta o melhor ajuste e, assim, contribuir para a compreensão do mecanismo de adsorção. As isotermas de adsorção de Sertralina em Zeólitas naturais estão presentes nas Figura 4-7, e seus parâmetros correspondentes estão representados na Tabela 1.

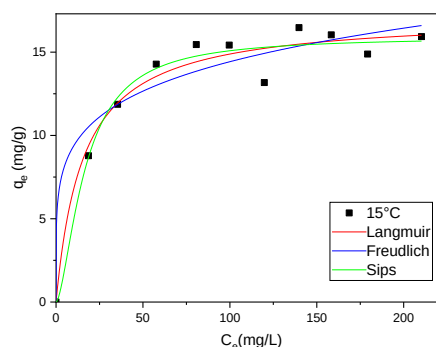


Figura 4. Isoterma de 15°.

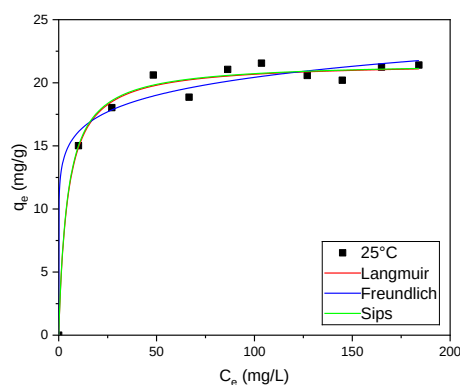


Figura 5. Isoterma de 25°.

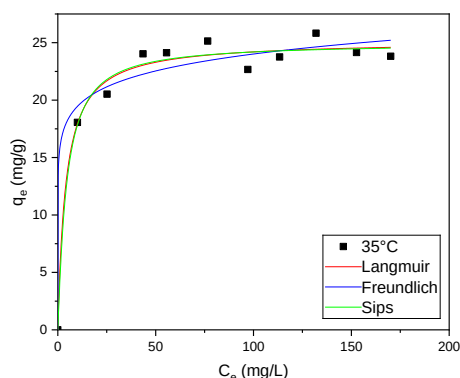


Figura 6. Isoterma de 35°C.

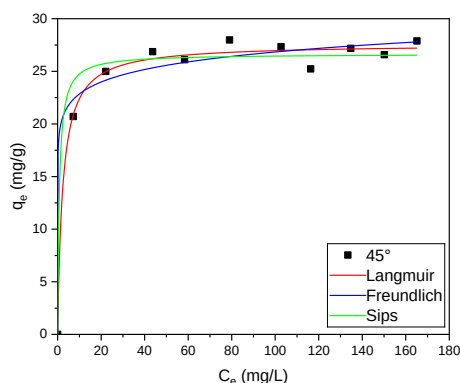


Figura 7. Isoterma de 45°C.

O modelo de Langmuir apresentou o melhor ajuste em todas as temperaturas, conforme indicado pelos valores do coeficiente de determinação (R^2) e do qui-quadrado (χ^2). Os maiores valores de R^2 foram observados a 15°C ($R^2 = 0,964$), 25°C ($R^2 = 0,988$), 35°C ($R^2 = 0,982$) e 45°C ($R^2 = 0,991$), sendo o melhor resultado geral obtido a 25°C ($R^2 = 0,988$, $\chi^2 = 0,518$), conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros das isotermas de adsorção.

Isotermas	Parâmetro	15 °C	25 °C	35 °C	45 °C	
Langmuir	$q_{m\acute{a}x}$ (mg/g)	17,205 ± 0,687	21,625 ± 0,348	25,181 ± 0,506	27,588 ± 0,358	
	K_L (min.)	0,064 ± 0,015	0,218 ± 0,037	0,247 ± 0,054	0,431 ± 0,077	
	$q_e = \frac{q_{m\acute{a}x} K_L C_e}{1 + K_L C_e}$	R^2	0,964	0,988	0,982	0,991
		χ^2	0,944	0,518	1,063	0,698
Freundlich	n	6,055 ± 1,249	12,686 ± 1,090	15,758 ± 1,611	19,455 ± 1,431	
	K_F (mg.g ⁻¹ /mg.L ⁻¹)	5,305 ± 1,242	9,665 ± 1,788	10,930 ± 2,796	14,315 ± 3,469	
	$q_e = K_F \cdot C_e^{1/n}$	R^2	0,939	0,980	0,970	0,980
		χ^2	1,611	0,878	1,803	1,461

Sips	K_S (min.)	0,011 ± 0,018	0,224 ± 0,193	0,194 ± 0,231	1,292 ± 0,062
	$q_{m\acute{a}x}$ (mg/g)	15,927 ± 0,797	21,652 ± 0,952	24,947 ± 1,139	26,654 ± 0,062
$q_e = \frac{q_{m\acute{a}x} K_S C_e^t}{1 + K_S C_e^t}$	t	0,621 ± 0,215	1 ± 0,389	0,9011 ± 0,429	1 ± 0,039
	R^2	0,970	0,988	0,982	0,614
	χ^2	0,908	0,589	1,187	1,356

O modelo de Langmuir é extremamente reconhecido e utilizado para descrever isotermas de adsorção devido à sua abordagem direta e bem fundamentada. No modelo é assumido que a adsorção ocorre em uma superfície homogênea e plana, levando à formação de uma monocamada, sem interações entre as moléculas adsorvidas em diferentes sítios (Langmuir, 1918). De acordo com esse modelo, um número fixo de sítios ativos na superfície retém as moléculas adsorvidas, e uma vez que um sítio é ocupado, não ocorre mais adsorção nesse local, garantindo que não haja interação entre as espécies adsorvidas (Swenson, 2019). A seguir, a Tabela 2, mostra o comparativo de adsorventes utilizados para remoção de sertralina na literatura.

Tabela 2. Comparativo de capacidades adsorptivas.

Adsorvente	Temp.	$q_{m\acute{a}x}$ (mg/g)	Referência
Nanocomp. de MoS ₂ /Fe ₃ O ₄ enx. em dendrímero	25 °C	5,24	(Hesabi et al., 2022)
Polímeros impressos molecularmente	25 °C	26,60	(Gornik et al., 2021)
Zéolitas funcionalizadas com íons metálicos	25 °C	25,19	(Beltran et al., 2025)
Zéolitas naturais	25 °C	21,63	Presente trabalho

Portanto, é notório o grande potencial que existe na utilização das zeólitas naturais para remoção de sertralina.

Por seguinte, foi realizado o empacotamento das zeólitas em um leito fixo. E então, foi mensurado o tempo de saturação a partir de medidas de concentração ao decorrer de determinado tempo de fluxo do contaminante. O desempenho da coluna foi baseado no tempo de saturação, ou seja, o tempo até

que no material não consegue remover eficientemente o contaminante, na capacidade adsorviva e na porcentagem de remoção de sertralina. Os dados experimentais foram ajustados a partir da equação proposta por Borba et al. (2012) aplicando a equação 2:

$$q_e = \frac{C_0 Q}{m_{ads}} \int_0^{t_{sat}} \left(1 - \frac{C_t}{C_0}\right) dt \quad (2)$$

Sendo, q_e (capacidade adsorviva); C_0 (Concentração inicial de sertralina); C_t (Concentração final avaliada na saída da coluna em determinado tempo); m_{ads} (massa de adsorvente presente no recheio do leito); t_{sat} (tempo de saturação do leito); Q (Vazão volumétrica do leito).

Ao entrar em contato com o adsorvente no leito da coluna, o adsorvato sofre processos difusionais que promovem a interação entre as fases. Essas interações são resultantes de forças de Van der Waals, no caso da adsorção física, ou de mecanismos de troca iônica, característicos da adsorção química. Com o decorrer do tempo, o adsorvente retém as partículas do contaminante tanto em sua superfície quanto em seus sítios ativos.

O ponto de ruptura do material é definido quando a razão entre a concentração do contaminante na saída da coluna (C_t) e a concentração inicial (C_0) atinge o valor de 0,1. A partir desse ponto, observa-se a diminuição da eficiência do adsorvente, permitindo a detecção de traços do contaminante no efluente (Patel, 2019).

A saturação do sistema é alcançada quando o adsorvente perde completamente sua capacidade de retenção do adsorvato, em razão, principalmente, do esgotamento dos sítios ativos. Esse estado é evidenciado pela estabilização das concentrações de saída ao longo do tempo, indicando a incapacidade do material em continuar promovendo a remoção do contaminante (Chowdhury et al., 2013).

Primeiramente, foi estudado o efeito da vazão sobre a coluna. O estudo foi realizado em 3, 5 e 7 mL/min. As curvas que representam a dinâmica dos processos estão representadas na Figura 9.

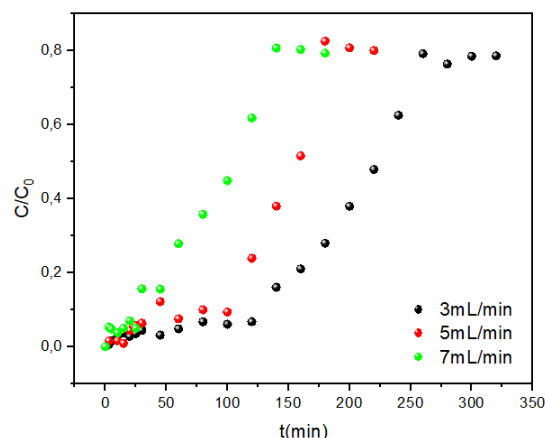


Figura 8. Curvas de influência da vazão no processo.

Os resultados obtidos a partir dos dados foram organizados na Tabela 3.

Tabela 3. Dados obtidos das curvas de vazão.

Vazão	Tempo	q_e	Remoção
3mL/min	320min	13,05mg/g	61,57%
5mL/min	220min	12,36mg/g	56,97%
7mL/min	180min	11,07mg/g	51,00%

Fazendo uma breve análise sobre os resultados é possível notar que o aumento da vazão tem influência inversamente proporcional a remoção e capacidade de adsorção da zeólita.

Por fim, foi realizado os testes com a mudança na altura do leito, ou em outras termos, na massa de adsorvente presente no recheio da coluna. Para tal, foram dispostos nos experimentos 2 e 3g do zeólitas, que representam 3,4cm e 5,1cm, respectivamente, no leito fixo.

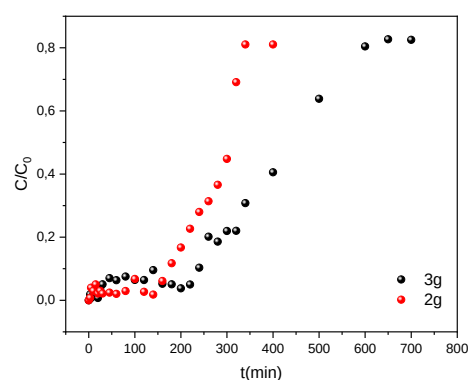


Figura 9. Curvas de influência da altura de leito no processo.

Os resultados obtidos a partir dos dados foram organizados na Tabela 3.



Tabela 4. Dados obtidos das curvas de altura.

Altura	Tempo	q_e	Remoção
3,4cm	500min	9,19mg/g	60,95%
5,1cm	700min	8,80mg/g	62,51%

Então, com esses últimos ensaios, pode-se observar que à medida que a massa de zeólita é somada tem a tendência de uma maior remoção no processo. Entretanto, a capacidade adsorviva do material tende a ser reduzida por existir mais material para adsorver tal concentração.

CONCLUSÃO

A partir da realização de todo estudo, pôde-se concluir os objetivos no que diz respeito aos ensaios e procedimentos experimentais realizados. Desde as etapas do processo de preparação das zeólitas até a aplicação das mesmas, fez-se possível estabelecer a necessidade e o intuito de cada teste realizado para que tudo ocorresse da maneira mais eficiente possível visando viabilidade prática de aplicação quanto à adoção destes materiais adsorventes como sendo parte de uma solução diante da problemática apresentada pelos sistemas convencionais, ineficientes para o tratamento de água e, principalmente quanto aos resíduos de contaminantes emergentes, que a cada dia que passa, coloca mais em risco a vida de todos as espécies que compõem o meio ambiente.

A partir das curvas isotérmicas foi possível observar e compreender a influência que a temperatura tem no processo de adsorção. E então, com o implemento do material em coluna, a zeólita natural demonstrou ser um adsorvente eficiente na remoção da sertralina, com alto tempo de operação em análises de leito fixo, que demonstra uma alta vida útil em experimentos contínuos.

Os resultados obtidos nos ensaios de adsorção evidenciam que a vazão do fluido e a altura do leito adsorvente (relacionada à massa de adsorvente utilizada) são parâmetros operacionais cruciais a serem considerados no dimensionamento de sistemas de tratamento por adsorção. Observou-se que as condições de menor vazão, associadas ao uso de uma maior massa de adsorvente, proporcionaram melhor desempenho do sistema, resultando em uma eficiência de remoção de 62,51% e um tempo de saturação prolongado, atingindo 700 minutos.

AGRADECIMENTOS

Expresso minha sincera gratidão ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio e fomento à pesquisa científica, promovendo o engajamento de pesquisadores em todo

o território nacional e contribuindo para a consolidação de um legado científico duradouro. Registro, ainda, meu agradecimento ao COMCAP/UEM, em especial à sua equipe técnica, pela valiosa colaboração e pela disponibilização de recursos e suporte essenciais à realização das análises que fundamentam este trabalho.

REFERÊNCIAS

- BILA, D. M.; DEZOTTI, M. Presença de poluentes emergentes no meio ambiente. *Revista de Ciência e Tecnologia*, v. 6, p. 57-68, 2006.
- BORBA C., SANTOS G., SILVA E., Mathematical modeling of a ternary Cu-Zn-Na ion exchange system in a fixed-bed column using Amberlite IR 120. *Chem Eng J.* 189-190 (2012)
- CHOWDHURY ZZ, ZAIN SM, RASHID AK, RAFIQUE RF, KHALID K. (2013). Breakthrough curve analysis for column dynamics sorption of Mn (II) ions from wastewater by using Mongostana garnicia peel-based granular-activated carbon. *J Chem Article*.
- DEMITI, G. M. M.; BARBOSA DE ANDRADE, M.; MARCUZZO, J. S.; VIEIRA, M. F.; BERGAMASCO, R. A novel magnetic adsorbent from activated carbon fiber and iron oxide nanoparticles for 2,4-D removal from aqueous medium. *Environmental Technology*, p. 1-19, 2022.
- DIETRICH, D. R., WEBB, S. F., PETRY, T. Hot spot pollutants: pharmaceuticals in the environment. *Toxicology Letters*, v. 131, p. 1-3, 2002.
- ESTEVEZ, O. A tradução e a sua relevância na indústria farmacêutica. *Dissertação, Grau de Mestre em Tradução Especializada, Universidade de Aveiro*, 2015.
- GEANKOPLIS, C. J. *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. 3. ed. [s.l.: s.n.]
- GORNIK, T., SHINDE, S., LAMOVSEK, L., KOBLAR, M., HEATH, E., SELLERGREN, B., KOSJEK, T., 2021. Molecularly imprinted polymers for the removal of antidepressants from contaminated wastewater. *Polymers (Basel)* 13, 1–20. <https://doi.org/10.3390/polym13010120>
- HESABI, E., NIKPOUR NEZHATI, M., AHMAD PANAHI, H., BANDARCHIAN, F., MONIRI, E., 2022. Synthesis of MoS₂/Fe₃O₄/aminosilane/glycidyl methacrylate/melamine dendrimer grafted polystyrene/poly(N-vinylcaprolactam) nanocomposite for adsorption and controlled release of sertraline from aqueous solutions. *Int. J. Polym. Mater. Polym. Biomater.* 71, 1090–1103. <https://doi.org/10.1080/00914037.2021.1941956>.



BELTRAN, L. B., RIBEIRO, A. C., Zeolite functionalized with metal ions: A dual strategy for water purification – removal of sertraline hydrochloride and pathogenic bacteria. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, Volume 23, 2025, 101060, ISSN 2215-1532.
<https://doi.org/10.1016/j.enmm.2025.101060>.

LA FARRÉ, M.; PÉREZ, S.; KANTIANI, L.; BARCELÓ, D. Fate and toxicity of emerging pollutants, their metabolites and transformation products in the aquatic environment. *Trends in Analytical Chemistry*, v. 27, p. 991-1007, 2008.

MEMLAK, D. M. Aplicação de coluna de leito fixo na adsorção e dessorção mono e multicomponente de metais tóxicos presentes em água utilizando adsorvente alternativo. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Pinhalzinho, 2019. Disponível em: Scribd. Acesso em: 29 maio 2025

MANSOOR, E. et al. Impact of long-range electrostatic and dispersive interactions on theoretical predictions of adsorption and catalysis in zeolites. *Catalysis Today*, v. 312, n. December 2017, p. 51–65, 2018.

NASCIMENTO, R. F.; LIMA, A. C. A.; VIDAL, C. B.; MELO, D. Q.; RAULINO, G. S. C. Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014.

NETTO, V. I. et al. Efeito da concentração e do pH na remoção de sertralina a partir de zeólitas naturais. In: Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica. Anais.Maringá(PR) Universidade Estadual de Maringá, 2022. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/COBEQIC2022/533219-EFEITO-DA-CONCENTRACAO-E-DO-PH-NA-REMOCAO-DE-SERTRALINA-A-PARTIR-DE-ZEOLITAS-NATURAIS>. Acesso em: 30/05/2025

PATEL, H. Fixed-bed column adsorption study: a comprehensive review. *Appl Water Sci* 9, 45 (2019). <https://doi.org/10.1007/s13201-019-0927-7>.

PERUZZO, L. C. Influência de agentes auxiliares na adsorção de corantes de efluentes da indústria têxtil em colunas de leito fixo. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. 2003.

SWENSON, H., STADIE, N.P., 2019. Langmuir's theory of adsorption: a centennial review.

Langmuir 35, 5409–5426.
<https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b00154>.

WIBOWO, E. et al. Reduction of seawater salinity by natural zeolite (Clinoptilolite): Adsorption isotherms, thermodynamics and kinetics. *Desalination*, v. 409, p. 146–156, 2017.