



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO – CTC
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Sabrina de Mello Soares

**Estudo do potencial de regeneração da zeólita LTA aplicada à remoção do
corante Safranina-T em efluentes**

Florianópolis
2026

Sabrina de Mello Soares

Estudo do potencial de regeneração da zeólita LTA aplicada à remoção do corante Safranina-T em efluentes

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientadora: Dra. Magali Teresinha Ritter
Coorientadora: Profa. Maria Eliza Nagel Hassemer, Dra.

Florianópolis

2026

Soares, Sabrina de Mello

Estudo do potencial de regeneração da zeólita LTA aplicada à remoção do corante Safranina-T em efluentes / Sabrina de Mello Soares ; orientadora, Magali Teresinha Ritter, coorientadora, Maria Eliza Nagel Hassemer, 2026. 61 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Florianópolis, 2026.

Inclui referências.

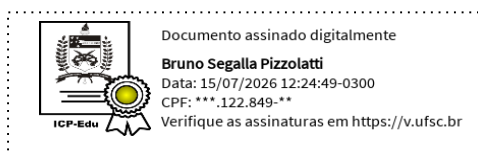
1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Dessorção. 3. Safranina-T. 4. Zeólita. 5. Regeneração de adsorventes. I. Ritter, Magali Teresinha . II. Hassemer, Maria Eliza Nagel. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. IV. Título.

Sabrina de Mello Soares

**Estudo do potencial de regeneração da zeólita LTA aplicada à remoção do corante
Safranina-T em efluentes**

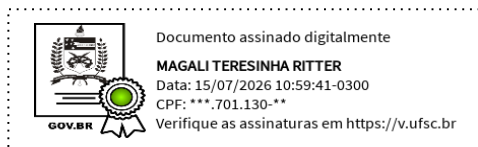
Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental.

Florianópolis, 3 de julho de 2026.



Coordenação do Curso

Banca examinadora



Dra. Magali Teresinha Ritter

Orientadora

Insira neste espaço
a assinatura

Dra. Aline Alves Freitas

Universidade Federal de Santa Catarina

Insira neste espaço
a assinatura

Bianca Wurlitzer Castillo

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Florianópolis, 2026.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por estar presente em todos os momentos de minha vida.

Ao meu pai, Virgílio, e à minha mãe, Naide, por toda a educação, os ensinamentos e as oportunidades que me proporcionaram, fundamentais para o meu desenvolvimento pessoal e profissional. Sou profundamente grata pelo apoio incondicional em cada etapa desta caminhada.

A todos os meus familiares e amigos, pela torcida e pelo apoio que sempre me dedicaram ao longo dessa jornada. Em especial à minha tia Marcia, ao meu tio Altamiro e à minha prima Maria Fernanda, pelo carinho e pelo incentivo de sempre.

À minha avó, Maria de Lourdes, e ao meu avô, Nelson (*in memorian*), que sempre valorizaram e defenderam os estudos.

Aos colegas e à equipe do Laboratório de Reúso de Águas (LARA), pelo auxílio, pela convivência e pelo apoio durante a realização dos experimentos.

À minha orientadora, Dra. Magali Teresinha Ritter, por toda a paciência e orientação que me ofereceu na realização deste estudo, por sua dedicação. Agradeço por compartilhar suas linhas de pesquisa.

À professora Maria Eliza pelo acompanhamento, orientação e contribuição ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

À IETcc-CSIC, pela disponibilização da amostra de zeólita utilizada na realização dos experimentos, fundamental para a execução desta pesquisa.

Por fim, expresso minha sincera gratidão a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a minha trajetória acadêmica e para a realização deste trabalho.

RESUMO

A indústria têxtil destaca-se como um importante setor econômico, mas gera efluentes com elevada carga de corantes de difícil degradação, dentre eles, a Safranina-T, corante catiônico nocivo à saúde e ao meio ambiente. A adsorção é uma das técnicas mais empregadas na remoção desses compostos, e a viabilidade econômica do processo depende da possibilidade de regenerar e reutilizar o material adsorvente. Este trabalho avaliou o processo de dessorção da Safranina-T adsorvida em zeólita do tipo A, sintetizada a partir de resíduos industriais de alumínio, e a capacidade de regeneração do material em ciclos sucessivos de adsorção-dessorção. Os ensaios foram conduzidos em regime de batelada, empregando-se como eluentes soluções de cloreto de sódio (NaCl) e de hidróxido de sódio (NaOH), ambas na concentração de $0,5 \text{ mol L}^{-1}$. Foram testados diferentes tempos de contato, entre 5 e 60 minutos, ao longo de três ciclos consecutivos de adsorção e dessorção. Os resultados evidenciaram que o tempo de contato não influenciou de maneira relevante o processo de dessorção, que ocorreu predominantemente nos primeiros minutos e permaneceu em torno de 30% para ambos os eluentes. Nos ciclos sucessivos de adsorção, tanto o NaCl quanto o NaOH mantiveram elevada capacidade adsorviva após a regeneração, embora tenha ocorrido redução em relação ao primeiro ciclo. Para o NaCl, a eficiência de adsorção alcançou 93,2% no primeiro ciclo, reduziu-se para aproximadamente 73,2% no segundo e 66,0% no terceiro, enquanto para o NaOH, passou de 91,5% no primeiro ciclo para 70,4% no segundo e estabilizou-se no terceiro (70,3%). A similaridade entre os valores obtidos para os dois eluentes indica que a liberação do corante ocorre principalmente por troca iônica promovida pelo íon Na^+ , uma vez que a carga catiônica da Safranina-T, associada ao nitrogênio quaternário do anel fenazínico, não pode ser neutralizada por desprotonação. Além disso, o Cl^- , por ser o contra-íon natural da Safranina-T, favorece o deslocamento de parte das moléculas adsorvidas durante a dessorção, mantendo a eficiência relativamente estável, enquanto o OH^- promove alterações estruturais cumulativas na zeólita. Desse modo, conclui-se que a zeólita preserva sua capacidade adsorviva ao longo dos ciclos, ainda que a regeneração seja apenas parcial nas condições estudadas, e que o NaCl constitui o eluente mais adequado, por proporcionar eficiência de dessorção estável sem indícios de alteração do adsorvente. O aproveitamento de resíduos de alumínio na síntese do adsorvente e a possibilidade de regeneração em ciclos sucessivos reduzem a geração de resíduos sólidos, enquanto o emprego de eluentes salino e alcalino confere menor impacto à etapa de regeneração. Em conjunto, esses aspectos reforçam o potencial da zeólita como alternativa sustentável para o tratamento de efluentes têxteis.

Palavras-chave: Adsorção; Dessorção; Zeólitas; Corantes têxteis; Safranina-T; Regeneração de adsorventes.

ABSTRACT

The textile industry is an important economic sector but generates effluents with high concentrations of hardly degradable dyes, such as Safranine-T, a cationic dye harmful to human health and the environment. Adsorption is one of the most employed techniques for removing such compounds, and the economic viability of the process depends on the possibility of regenerating and reusing the adsorbent material. This work evaluated the desorption process of Safranine-T adsorbed on type A zeolite, synthesized from industrial aluminum waste, and the regeneration capacity of the material in successive adsorption-desorption cycles. Batch experiments were conducted using sodium chloride (NaCl) and sodium hydroxide (NaOH) solutions, both at 0.5 mol L^{-1} , as eluents. Different contact times, ranging from 5 to 60 minutes, were tested over three consecutive adsorption-desorption cycles. Results showed that contact time did not significantly influence the desorption process, which occurred predominantly in the first few minutes and reached approximately 30% for both eluents. In successive adsorption cycles, both NaCl and NaOH maintained high adsorptive capacity after regeneration, although reduction occurred relative to the first cycle. With NaCl, adsorption efficiency reached 93.2% in the first cycle, decreased to approximately 73.2% in the second, and 66.0% in the third, whereas with NaOH, efficiency decreased from 91.5% in the first cycle to 70.4% in the second and stabilized at 70.3% in the third. The similarity between values obtained for both eluents indicates that dye release occurs primarily through ion exchange promoted by Na^+ ions, since the cationic charge of Safranine-T, associated with the quaternary nitrogen of the phenazinium ring, cannot be neutralized by deprotonation. Furthermore, Cl^- , as the natural counter-ion of Safranine-T, favors displacement of adsorbed molecules during desorption, maintaining relatively stable efficiency, whereas OH^- promotes cumulative structural alterations in the zeolite. Consequently, the zeolite preserves its adsorptive capacity throughout the cycles, although regeneration is only partial under the studied conditions, and NaCl is the most suitable eluent, providing stable desorption efficiency without evidence of adsorbent alteration. The use of aluminum waste in adsorbent synthesis and the possibility of regeneration over successive cycles reduce solid waste generation, while the employment of saline and alkaline eluents confers lower environmental impact to the regeneration stage. Together, these aspects reinforce the potential of zeolite as a sustainable alternative for treating textile effluents.

Keywords: Adsorption; Desorption; Zeolites; Textile dyes; Safranine-T; Adsorbent regeneration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura molecular da Safranina-T.....	22
Figura 2: Processo de adsorção em um sólido.....	24
Figura 3: Estrutura da zeólita A	33
Figura 4: Etapas de execução experimental.....	36
Figura 5: Corante Safranina-T, conhecida como Basic Red 2.....	37
Figura 6: Zeólita do tipo A (LTA) utilizada como material adsorvente neste estudo.	38
Figura 7: Diluições a partir da solução estoque a diferentes concentrações.	39
Figura 8: Curva de calibração do corante Safranina-T.	39
Figura 9: Eficiências médias de adsorção de Safranina-T ao longo de três ciclos consecutivos.....	44
Figura 10: Eficiência de dessorção da Safranina-T a partir da zeólita em função do tempo de contato nos ciclos sucessivos de dessorção, utilizando (a) solução aquosa de NaCl e (b) solução aquosa de NaOH.	45
Figura 11: Alíquotas retiradas da solução após os ensaios de adsorção (esquerda) e dessorção (direita) da Safranina-T em eluente NaCl nos ciclos sucessivos: a) 1º Ciclo; b) 2º Ciclo; c) 3º Ciclo.....	47
Figura 12: Eficiências médias de adsorção e dessorção de Safranina-T ao longo de três ciclos consecutivos, utilizando NaCl 0,5 mol/L como eluente.....	48
Figura 13: Alíquotas retiradas da solução após os ensaios de adsorção (esquerda) e dessorção (direita) da Safranina-T em eluente NaOH nos ciclos sucessivos: a) 1º Ciclo; b) 2º Ciclo; c) 3º Ciclo.	50
Figura 14: Eficiências médias de adsorção e dessorção de Safranina-T ao longo de três ciclos consecutivos, utilizando NaOH 0,5 mol L ⁻¹ como eluente.....	50
Figura 15: Cinética de dessorção pseudossegunda ordem para eluente a) NaCl e b) NaOH.	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAS – Chemical Abstracts Service

CSIC – Conselho Superior de Investigações Científicas

CTC – Capacidade de Troca Catiônica

IETcc – Instituto de Ciências da Construção Eduardo Torroja

LaRA – Laboratório de Reúso de Águas

LTA – Linde Tipo A

POA – Processos Oxidativos Avançados

ST – Safranina-T

LISTA DE SÍMBOLOS

A – Absorbância (adimensional)

C_0 – Concentração inicial do corante na solução de adsorção (mg L^{-1})

C_e – Concentração do corante no equilíbrio (mg L^{-1})

$C_{\text{eluato},n}$ – Concentração do corante no eluato ao final do ciclo n (mg L^{-1})

$C_{\text{eq,ad},n}$ – Concentração do corante ao final da adsorção do ciclo n , ou concentração de equilíbrio (mg L^{-1})

$C_{\text{retida},i}$ – Concentração de corante retido no adsorvente ao final do ciclo i (mg L^{-1})

$\%D_n$ – Eficiência de dessorção acumulada no ciclo n (%)

i – Índice de ciclo (adimensional)

K_2 – constante da taxa de adsorção de pseudossegunda ordem ($\text{g.mg}^{-1}.\text{min}^{-1}$).

m – Massa do adsorvente (g)

n – Número do ciclo de adsorção-dessorção (adimensional)

q_e – Quantidade de corante adsorvida por massa de adsorvente no equilíbrio (mg/g)

q_t – Quantidade de corante adsorvida por massa de adsorvente no tempo t (mg/g)

R^2 – Coeficiente de determinação (adimensional)

K_1 – Constante da taxa de adsorção de pseudoprimeira ordem (min^{-1}).

λ – Comprimento de onda (nm)

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO.....	16
	OBJETIVOS.....	18
	OBJETIVO GERAL	18
	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2		
2.1	INDUSTRIAS TÊXTEIS	19
2.2	3.1.1 CORANTES TÊXTEIS	20
3		
3.1	3.1.2 Safranina-T	21
	TECNOLOGIAS DE REMOÇÃO DE CORANTES EM EFLUENTES.....	22
	ADSORÇÃO.....	23
3.2	3.3.1 Capacidade de adsorção	25
3.3	3.3.2 Cinética de adsorção	26
	3.3.2.1 <i>Modelo de pseudoprimeira ordem.....</i>	26
	3.3.2.2 <i>Modelo pseudossegunda ordem.....</i>	27
3.4	FATORES QUE INFLUENCIAM O PROCESSO DE ADSORÇÃO	27
	3.4.1 Propriedades do adsorvente.....	28
	3.4.1.1 <i>Área Superficial.....</i>	28
	3.4.1.2 <i>Capacidade de Troca Catiônica.....</i>	28
	3.4.2 Propriedades do adsorvato.....	29
3.5	3.4.2.1 <i>pH</i>	29
3.6	3.4.2.2 <i>Concentração.....</i>	30
3.7	DESSORÇÃO	30
3.8		
3.9	ELUENTE	30
4	MATERIAIS ADSORVENTES.....	31
4.1	ZEÓLITAS.....	32
4.2		
4.3	REUTILIZAÇÃO DA ZEÓLITA	33
4.4	MATERIAIS E MÉTODOS	36
4.5	ADSORVATO.....	36
	MATERIAL ADSORVENTE	37
	CURVA DE CALIBRAÇÃO	38
	ENSAIOS DE ADSORÇÃO	39
	DESSORÇÃO	40

4.5.1	Regeneração.....	42
	RESULTADOS	43
	ADSORÇÃO.....	43
	EFEITO DO TEMPO DE CONTATO ENTRE ADSORVENTE E ADSORVATO NA DESSORÇÃO	44
5	CAPACIDADE DE DESSORÇÃO	46
5.1	CAPACIDADE DE REGENERAÇÃO	47
5.2	CINÉTICA DE DESSORÇÃO PSEUDOSSEGUNDA ORDEM	51
5.3	CONCLUSÃO	53
5.4	LIMITAÇÕES DE ESTUDO E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	
5.5		
6	54	
6.1	REFERÊNCIAS	55

INTRODUÇÃO

1 A indústria têxtil está entre as atividades manufatureiras mais tradicionais do Brasil (Carleial, 1993). Em Santa Catarina, o setor possui grande relevância econômica, destacando-se como um importante polo têxtil nos cenários nacional e internacional (Milnitz; Luna, 2017). Contudo, o elevado volume de produção também está associado à geração significativa de resíduos, especialmente efluentes líquidos.

O amplo uso de corantes faz de sua presença em efluentes um dos principais problemas ambientais deste setor: consomem-se cerca de 20 t.ano⁻¹ de corantes dos quais se estima que 20% sejam descartados como efluente (Dallago; Smaniotto; Oliveira, 2005; Araujo; Yokoyama; Teixeira, 2006).

Entre os diversos corantes sintéticos desenvolvidos para atender às demandas da indústria têxtil, destaca-se a Safranina-T, (Guaratini; Zanoni, 2000), um dos corantes sintéticos mais antigos, empregada no tingimento de tanino, algodão, fibras de líber, lã, seda, couro e papel (Gupta *et al.*, 2006), além de ser utilizada na coloração de células em laboratórios e hospitais (Roy *et al.*, 2024). Em virtude de sua ampla utilização e da persistência característica dos corantes sintéticos, tornam-se fundamentais o desenvolvimento e a aplicação de tecnologias capazes de promover sua remoção de efluentes antes do descarte no ambiente.

Dentre as diversas técnicas empregadas para a remoção de corantes, a adsorção destaca-se pela eficiência e versatilidade, sendo aplicável a diferentes classes de corantes (Crini, 2006). Trata-se de um processo de transferência de massa no qual certos sólidos concentram em sua superfície substâncias presentes em um fluido, permitindo a separação desses componentes (Ruthven, 1984).

Atualmente, há uma ampla variedade de materiais adsorventes empregados com sucesso na remoção de contaminantes (Alcalde-Garcia *et al.*, 2023). O custo elevado dos adsorventes convencionais, porém, tem estimulado a busca por alternativas mais econômicas, entre as quais se destacam as zeólitas, aluminossilicatos com reconhecido potencial em processos de adsorção (Crini, 2006).

Embora as zeólitas sejam tradicionalmente produzidas a partir de reativos químicos comerciais, também podem ser obtidas a partir de resíduos ricos em silício e alumínio, como cinzas de carvão, cinzas de casca de arroz e escórias provenientes da reciclagem de alumínio (Bukhari *et al.*, 2015; López-Delgado *et al.*, 2020). Essa alternativa tem despertado interesse por aliar a produção de um material de elevado

valor agregado ao aproveitamento de subprodutos que seriam destinados à aterros (Zhang *et al.*, 2024). Nesse contexto, as zeólitas produzidas a partir de resíduos de alumínio mostram-se um material adsorvente promissor para a remoção da Safranina-T presente em efluentes têxteis.

Contudo, grande parte dos estudos sobre a remoção de corantes por zeólitas concentra-se na etapa de adsorção, ao passo que a dessorção, a regeneração e o reúso do adsorvente ainda recebem pouca atenção (Rápó; Tonk, 2021; Ritter *et al.*, 2024).

Diante do exposto, o presente trabalho insere-se na linha de pesquisa do Laboratório de Reúso de Águas (LaRA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), voltada ao tratamento de efluentes têxteis e ao aproveitamento de resíduos industriais como materiais adsorventes. O estudo dá continuidade à pesquisa desenvolvida por Ritter *et al.* (2024), que otimizaram a adsorção da Safranina-T sobre a zeólita LTA sintetizada a partir de resíduo de alumínio. Como etapa subsequente para a consolidação dessa tecnologia, este trabalho tem como objetivo avaliar a capacidade de regeneração e reúso da zeólita LTA por meio de ciclos sucessivos de adsorção e dessorção da Safranina-T contribuindo para a compreensão da estabilidade do material e de seu potencial de aplicação em sistemas de tratamento de efluentes têxteis.

OBJETIVOS

OBJETIVO GERAL

- 2
- Avaliar o potencial de reúso da zeólita em processos de remoção de corante Safranina-T.

2.1

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 2.2
- Quantificar a eficiência da dessorção, avaliando a quantidade de corante liberado da zeólita em diferentes condições experimentais (tempo de contato, pH e eluentes);
 - Analisar a capacidade de regeneração da zeólita e seu desempenho em ciclos sucessivos de adsorção e dessorção;
 - Comparar a eficiência de um eluente salino (NaCl) e de um eluente básico (NaOH) na dessorção do corante adsorvido na zeólita.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

INDUSTRIAS TÊXTEIS

- 3 A indústria têxtil e de confecção possui uma trajetória de quase 200 anos no Brasil, sendo o país reconhecido como detentor da maior cadeia têxtil completa do Ocidente. O ciclo produtivo têxtil nacional abrange desde a plantação de algodão e a produção de fibras até os desfiles de moda, passando por processos como fiação, tecelagem, beneficiamento e confecção (ABIT, 2026).

O setor desempenha papel expressivo na economia, com cerca de 25,7 mil empresas, 1,34 milhão de empregos diretos e faturamento superior a R\$ 221 bilhões. A confecção figura como o segundo maior empregador da indústria de transformação do país, enquanto o Brasil se posiciona entre os cinco maiores produtores e consumidores de denim (tecido utilizado na confecção de jeans) do mundo (IEMI, 2025 apud ABIT, 2026).

No cenário regional, Santa Catarina destaca-se no segmento têxtil e de confecção, sobretudo nas regiões do Vale do Itajaí e do Norte catarinense (SEBRAE, 2013). Historicamente, o Vale do Itajaí foi sede das primeiras unidades fabris têxteis do estado, criadas no final do século XIX por artesãos e operários de origem europeia, principalmente alemã, que imigraram em razão de crises econômicas e transformações políticas. Sua origem urbana e formação operária, comercial e industrial contribuiu para a consolidação da atividade têxtil na região (Lucktenberg, 2004).

Esse processo histórico resultou na consolidação do Vale do Itajaí como um importante polo têxtil, concentrando a maior quantidade de malharias do estado. Esse contexto evidencia a relevância do setor têxtil no Brasil e, em especial, em Santa Catarina, evidencia não apenas sua importância econômica e histórica, mas também a complexidade de sua cadeia produtiva (Lucktenberg, 2004)

Entretanto, essa complexidade também está associada à geração de efluentes com elevado potencial poluidor. Apesar do progresso obtido nas técnicas de controle da poluição em vários setores industriais, a questão do descarte de resíduos no meio ambiente ainda é um problema uma vez que os sistemas convencionais de tratamento nem sempre promovem a remoção eficiente dos contaminantes.

Grande parte dos poluentes encontrados em efluentes têxteis são produtos químicos que, ao serem descartados sem tratamento em corpos hídricos, alteram as propriedades físico-químicas do meio aquático (Ramos *et al.*, 2020).

Os processos industriais da produção têxtil demandam elevado consumo de água, especialmente nas etapas de lavagem e tingimento, resultando na geração de grandes volumes de efluentes líquidos. Esses efluentes apresentam composição química diversificada e complexa, dentre a qual se destacam os corantes e outros compostos orgânicos e inorgânicos, muitos dos quais possuem potencial tóxico (Kishor *et al.*, 2021).

3.1.1 CORANTES TÊXTEIS

Durante grande parte do século XIX, o Brasil foi um dos principais fornecedores mundiais de índigo natural, extraído da planta *Indigofera tinctoria*. Até meados do século XIX, todos os corantes utilizados eram de origem natural, extraídos de plantas ou animais. O primeiro corante sintético foi descoberto em 1856 na Inglaterra, marcando o início de uma nova era para a indústria têxtil (Guaratini; Zanoni, 2000).

A história do Brasil também está intimamente ligada à produção de corantes. O próprio nome do país remete ao Pau-Brasil, madeira fonte de um corante avermelhado, explorado desde o descobrimento. A produção industrial de corantes sintéticos no país teve início após a Primeira Guerra Mundial (Guaratini; Zanoni, 2000).

O avanço na síntese de corantes sintéticos ampliou significativamente sua utilização pela indústria têxtil, setor que demanda processos de tingimento compatíveis com as propriedades de cada tipo de fibra. As fibras têxteis são classificadas em dois grandes grupos: naturais e sintéticas. Entre as fibras naturais, destacam-se as de base celulósica, como algodão e linho, compostas por cadeias poliméricas lineares de glicose, e as de base proteica, como lã e seda, formadas por polímeros complexos de aminoácidos. Já as fibras sintéticas englobam materiais como viscose, acetato de celulose, poliamida, poliéster e acrílico, cada um obtido por processos químicos específicos de polimerização ou modificações químicas da celulose ou de compostos derivados do petróleo (Guaratini; Zanoni, 2000).

A grande diversidade de fibras têxteis e as exigências crescentes dos consumidores demandam corantes com características específicas para cada aplicação. Estima-se que a produção mundial de corantes sintéticos supere 700 mil toneladas por ano, distribuídas em mais de 100 mil tipos diferentes (Berradi *et al.*, 2019).

O processo de tingimento têxtil envolve diversas etapas definidas de acordo com a natureza da fibra, as características do corante, sua disponibilidade e viabilidade econômica. O processo de tingimento pode ser dividido em três etapas principais: a difusão do corante pelo banho de tingimento até a superfície da fibra, a adsorção do corante nessa superfície e a difusão do corante da superfície para o interior da fibra (Lange, 2004).

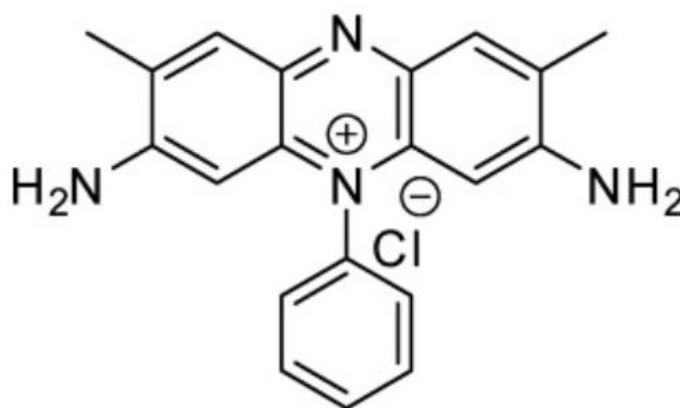
A fixação dos corantes às fibras têxteis ocorre geralmente em solução aquosa e envolve diferentes tipos de interações: ligações químicas (iônicas, covalentes e de hidrogênio) e interações fracas (Van der Waals). O corante Safranina-T, amplamente utilizado no tingimento de fibras como algodão, seda, lã e poliacrilonitrila, tem sua fixação baseada em interações iônicas, nas quais ocorre a atração eletrostática entre cargas opostas dos grupos carboxilatos presentes na fibra e a carga positiva da molécula do corante (Guaratini; Zanoni, 2000).

3.1.2 Safranina-T

A Safranina-T (ou simplesmente Safranina) é um corante catiônico bem conhecido, amplamente utilizado nas indústrias de papel, seda, lã, couro, algodão, tanino e alimentos. Também é empregada como fotossensibilizador, corante biológico e sonda fluorescente (Sadiq *et al.*, 2023).

No entanto, quando descartada inadequadamente no meio ambiente ou na ausência de tratamento adequado dos efluentes, a Safranina-T pode representar riscos ambientais e à saúde humana, podendo causar efeitos prejudiciais ao sistema cardiovascular e outros problemas graves de saúde, incluindo metahemoglobinemia, cianose, espasmos e irritação ocular e cutânea grave (Roy *et al.*, 2024). Quando ingerida, causa infecções digestivas graves, como náuseas, vômitos e diarreia. A China proibiu o uso de ST como ingrediente alimentar. Sua estrutura molecular é apresentada na Figura 1

Figura 1: Estrutura molecular da Safranina-T.



Fonte: Roy *et al.* (2024).

TECNOLOGIAS DE REMOÇÃO DE CORANTES EM EFLUENTES

3.2

A escolha do sistema de tratamento mais adequado depende de diversos fatores, incluindo as características físico-químicas do efluente, os custos associados ao processo, os requisitos de qualidade do efluente tratado e a disponibilidade de espaço físico. Adicionalmente, é necessário verificar se o efluente final atende aos parâmetros de lançamento previstos na legislação ambiental vigente e analisar a capacidade de autodepuração do corpo receptor (Tomassoni, 2019).

O tratamento dos corantes presentes em efluente têxteis representa um desafio considerável, uma vez que essas substâncias tendem a ser quimicamente estáveis e resistentes à degradação (Paschoal; Tremiliosi-Filho, 2005). Essa dificuldade está diretamente associada à complexidade de suas estruturas aromáticas, que conferem aos corantes elevada resistência à ação da luz solar, de agentes oxidantes e de microrganismos (Paschoal; Tremiliosi-Filho, 2005).

Ademais, as águas residuais têxteis apresentam elevada toxicidade inerente à variedade de sólidos suspensos e dissolvidos presentes neste efluente, grandes variações de pH, alta demanda de oxigênio, além da baixa biodegradabilidade, o que dificulta seu tratamento em estações convencionais (Piaskowski *et al.*, 2018).

Em função da alta concentração de matéria orgânica nesses efluentes, bactérias heterotróficas podem se multiplicar rapidamente, comprometendo a sobrevivência de organismos aquáticos pela competição por oxigênio. Os corantes, por sua vez, reduzem a penetração de luz, prejudicando a fotossíntese e diminuindo o oxigênio dissolvido (Ramos *et al.*, 2020).

Adicionalmente, os efluentes têxteis podem apresentar potencial carcinogênico e mutagênico, sendo os corantes, juntamente com os metais, os contaminantes mais preocupantes devido à sua alta solubilidade, nocividade e baixa degradabilidade, reforçando a necessidade de atenção aos impactos ambientais associados a essa atividade (Ramos *et al.*, 2020).

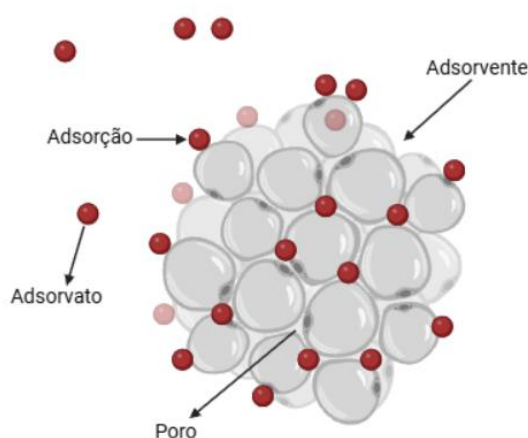
Dentre os métodos mais utilizados e estudados para o tratamento de efluentes da indústria têxtil, pode-se citar (i) tratamentos biológicos como a biossorção, bioacumulação e a biodegradação; (ii) tratamentos físico-químicos como a adsorção, coagulação/ floculação seguida de precipitação e a separação por membranas; (iii) e como parte dos tratamentos químicos, tem-se os processos Fenton, ozonização e fotocatálise, caracterizados como processos oxidativos avançados (POA). Ademais, esses tratamentos ainda podem ser utilizados de forma integralizada, em sequência ou simultâneos (Freire *et al.*, 2000).

ADSORÇÃO

3.3

A adsorção consiste na capacidade de certos sólidos em concentrar em sua superfície determinadas substâncias presentes em fluidos líquidos ou gasosos, possibilitando a separação dos componentes desses meios por meio do processo de transferência de massa. Como representado na Figura 2, a substância que se acumula na interface do material é denominada adsorvato, enquanto a superfície sólida na qual o adsorvato se acumula recebe o nome de adsorvente (Nascimento *et al.*, 2014).

Figura 2: Processo de adsorção em um sólido.



Fonte: Autor (2026).

Dependendo da natureza das forças envolvidas, também segundo Nascimento *et al.* (2014), a adsorção pode ser classificada quanto à sua intensidade, em dois tipos: adsorção física (fisorção) ou adsorção química (quimissorção). A fisorção ocorre por forças intermoleculares fracas, conhecidas por forças de Van der Waals, que consistem em interações de natureza eletrostática entre o adsorvato e os átomos superficiais do adsorvente, com longo alcance, porém de baixa intensidade (Droguett, 1983). Já a quimissorção corresponde a uma interação química, na qual ocorre uma ligação química entre o adsorvato e a superfície do adsorvente, sendo geralmente irreversível (Mckay, 1996).

No contexto da remoção de corantes, cabe destacar que as moléculas possuem estruturas químicas variadas e complexas, e seu comportamento adsorptivo está diretamente relacionado à estrutura química, às dimensões das cadeias orgânicas, ao número e ao posicionamento dos grupos funcionais dos corantes (Crini; Badot, 2008).

Além dos mecanismos envolvidos na adsorção, a compreensão do equilíbrio entre as fases sólida e líquida é fundamental para descrever o processo. Nesse contexto, as isotermas de adsorção representam a relação entre a quantidade de adsorvato retida no adsorvente e sua concentração na fase fluida em equilíbrio, sob temperatura constante. Esse equilíbrio é alcançado após tempo suficiente de contato, momento em que parte do adsorvato permanece imobilizada na superfície do adsorvente, enquanto a fração restante segue dissolvida na solução (Cooney, 1999).

Existem diversos modelos de isoterma na literatura, fundamentados em diferentes mecanismos de adsorção. Entre essas, estão as equações Langmuir, Freundlich, Redlich-Peterson, Temkin e Dubinin–Radushkevich. Entretanto, os mais utilizados destacam-se: os modelos de Langmuir e Freundlich, devido à sua facilidade de aplicação e manuseio (Ruthven, 1984; Cooney, 1999; McKay, 1996; Nascimento *et al.*, 2014).

A isoterma de Langmuir foi o primeiro modelo de descrição de processos de adsorção, sendo baseado na hipótese de que as forças de interação entre as moléculas adsorvidas são desprezíveis e que cada sítio acomoda apenas uma molécula (monocamada), assim, a adsorção ocorre em um número fixo e definido de sítios (Kumar; Sivanesan, 2006).

Já o modelo de isoterma de Freundlich (1906) é amplamente difundido e utilizado em testes de adsorção, sendo aplicado para avaliar sistemas não ideais em superfícies heterogêneas. Dessa forma, a isoterma de Freundlich assume que a adsorção ocorre em multicamadas; os sítios ativos apresentam diferentes energias de adsorção, podendo adsorver mais de uma molécula, contudo, os mesmos sítios não são idênticos e nem sempre estão disponíveis.

3.3.1 Capacidade de adsorção

A capacidade de adsorção (q) é parâmetro amplamente empregado na avaliação de processos de adsorção, pois quantifica a quantidade de soluto efetivamente removida da solução e acumulada na superfície do adsorvente.

Em ensaios em batelada, a capacidade de adsorção é determinada a partir de um balanço de massa, onde a quantidade de adsorvato removida da solução corresponde à quantidade adsorvida pelo material adsorvente, conforme a Equação 1.

$$q = \frac{(C_0 - C_e) \cdot V}{m} \quad (1)$$

Onde:

q : capacidade de adsorção (mg/g);

C_0 : concentração inicial do adsorvato (mg L⁻¹);

C_e : concentração do adsorvato no equilíbrio (mg L^{-1});

V : volume da solução (L);

m : massa do adsorvente (g).

3.3.2 Cinética de adsorção

A cinética de adsorção descreve a velocidade com que o soluto é removido da fase fluida e retido no adsorvente, o estudo cinético de adsorção é muito importante, pois permite otimizar os parâmetros de controle do processo de adsorção, sendo influenciada por fatores como ordem de reação, constante de velocidade e energia de ativação, assim como, determinar o tempo necessário para que ocorra o equilíbrio da adsorção (Nascimento *et al.*, 2014).

De acordo com McKay (1996) e Crini (2005), o processo pode ser controlado por três etapas: (i) a transferência de massa externa, que corresponde ao transporte das moléculas da fase fluida para a superfície externa da partícula adsorvente através da camada limite que a envolve; (ii) transferência de massa dentro da estrutura interna do sólido poroso até os sítios de adsorção; e (iii) a difusão na superfície, que corresponde ao deslocamento das moléculas já adsorvidas ao longo da superfície interna dos poros.

A etapa de adsorção propriamente dita, em que ocorre a fixação do soluto (por fisissorção ou quimissorção) ao sítio ativo, é geralmente considerada rápida, não sendo limitante da velocidade global do processo. (Nascimento *et al.*, 2014). Logo, os modelos cinéticos são utilizados para verificar qual é o mecanismo ou etapa limitante em cada etapa adsorvativa específica, que ocorre entre o adsorvato/adsorvente (Dabrowski, 2001). Contudo, os modelos empregados com maior frequência são os de pseudoprimeira ordem e de pseudossegunda ordem (Nascimento *et al.*, 2014).

3.3.2.1 Modelo de pseudoprimeira ordem

A equação de pseudoprimeira ordem de Lagergren (1898) assume que a velocidade é proporcional ao número de sítios ainda disponíveis. Segundo esse modelo, a velocidade de remoção do adsorvato é proporcional ao número de sítios ativos ainda disponíveis (Ho; Mckay, 1999).

Através da Equação 1, apresentada na forma linearizada, pode-se por meio do gráfico de $\log(q_e - q_t)$ *versus* t encontrar os valores de q_e e K_1 (Moreira, 2008).

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \left(\frac{k_1}{2,303}\right).t \quad (2)$$

Sendo:

q_e : quantidades adsorvidas por grama de adsorvente no equilíbrio (mg/g);

q_t : quantidades adsorvidas por grama de adsorvente no tempo t (mg/g);

K_1 : constante da taxa de adsorção de pseudoprimeira ordem (min^{-1}).

Segundo Aksu (2001), por não se ajustar bem para toda a faixa de tempo na maior parte dos casos, a equação de primeira ordem de Lagergren costuma ser aplicável apenas aos 20 a 30 minutos iniciais do processo.

3.3.2.2 Modelo pseudossegunda ordem

O modelo de pseudossegunda ordem baseia-se também na capacidade de adsorção do adsorvente. Ao contrário do modelo anterior, este modelo prediz o comportamento cinético sobre toda a faixa de tempo de adsorção (Aksu, 2001).

A equação 2 fornece uma relação linear, na qual q_e e K_2 podem ser obtidos a partir do coeficiente angular e do coeficiente linear do gráfico (t/q_t) *versus* t , não sendo necessário nenhum outro parâmetro (Nascimento *et al.*, 2014).

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{t}{q_t} \quad (3)$$

3.4 Onde:

K_2 : constante da taxa de adsorção de pseudossegunda ordem ($\text{g.mg}^{-1}.\text{min}^{-1}$).

FATORES QUE INFLUENCIAM O PROCESSO DE ADSORÇÃO

O processo de adsorção é influenciado por diversos fatores, que podem ser classificados em três aspectos fundamentais: propriedades do adsorvente, propriedades do adsorvato e condições operacionais. As propriedades do adsorvente incluem características texturais, como área superficial, tamanho de poro e densidade, além de outros atributos do sólido que regem a adsorção, tais como grupos funcionais

presentes na superfície e hidrofobicidade do material. Por sua vez, a natureza do adsorvato depende da polaridade, do tamanho da molécula, da solubilidade e da acidez ou basicidade, principalmente no contexto da adsorção em fase líquida. Já as condições operacionais que influenciam o processo incluem, principalmente, a concentração da espécie a ser adsorvida, a temperatura, o pH e a natureza do solvente (Cooney, 1999).

3.4.1 Propriedades do adsorvente

As propriedades do adsorvente são determinantes para a eficiência do processo de adsorção, uma vez que a natureza físico-química do adsorvente define a capacidade e a taxa de adsorção, em função da área superficial específica, porosidade, volume específico de poros, distribuição do tamanho de poros, dos grupos funcionais presentes na superfície do adsorvente e da natureza do material precursor (Nascimento *et al.*, 2014).

3.4.1.1 Área Superficial

A intensidade da adsorção geralmente é proporcional à área superficial específica do material adsorvente, visto que a adsorção é um fenômeno de superfície. Para partículas maiores, a resistência à difusão é maior e grande parte da superfície interna da partícula não é disponibilizada para adsorção (Sekar *et al.*, 2004). Compostos com diâmetros moleculares menores têm mais facilidade em difundir-se para o interior do sólido e, como consequência, a adsorção é maior.

3.4.1.2 Capacidade de Troca Catiônica

A capacidade de troca catiônica (CTC) representa a quantidade total de cátions que um material é capaz de reter de forma reversível e permutável. Determinados adsorventes, como argilas minerais e óxidos de ferro e alumínio, possuem superfícies eletricamente carregadas que atraem íons e moléculas polarizadas. Em razão da predominância de cargas negativas, a adsorção é favorecida para cátions, o que reflete diretamente na capacidade do adsorvente de

interagir com cátions presentes em solução. Além dos adsorventes catiônicos, existem adsorventes aniônicos disponíveis para aplicações específicas em tratamento de efluentes, sendo a escolha dependente da natureza dos contaminantes a serem removidos (Ronquim, 2010).

3.4.2 Propriedades do adsorvato

3.4.2.1 pH

O pH é um dos principais fatores que influenciam o processo de adsorção, pois determina a distribuição das espécies químicas em solução e afeta diretamente as cargas superficiais do adsorvente, que variam conforme sua composição e características (Nascimento *et al.*, 2014). Além disso, o pH interfere na atividade dos grupos funcionais do adsorvente, na competição com íons coexistentes na solução e nas propriedades dos contaminantes, incluindo a dissociação das moléculas de corante e a ionização das espécies adsorvidas. Não apenas o adsorvente, mas também a estrutura química do corante pode ser alterada pelo pH do meio (Rápó; Tonk, 2021).

Como indicado por Chakraborty *et al.* (2011), a superfície do adsorvente tende a ficar carregada positivamente em condições ácidas, devido à protonação dos grupos funcionais presentes em sua superfície, levando a uma diminuição dos sítios disponíveis para adsorção de corantes catiônicos carregados positivamente, o que gera repulsão eletrostática. Com o aumento do pH, os sítios carregados negativamente no adsorvente se tornam mais disponíveis para a atração eletrostática com os cátions do corante, devido à desprotonação dos grupos carregados positivamente no adsorvente. Em contrapartida, a adsorção de corantes aniônicos não é eficaz em condições de pH mais elevado, uma vez que a superfície desprotonada gera repulsão eletrostática com o corante (Rápó; Tonk, 2021).

A relação entre o pH e a carga superficial do adsorvente pode ser expressa por meio do ponto de carga zero (pH_{PZC}), definido como o valor de pH no qual a carga líquida da superfície é nula. Quando o pH do meio é inferior ao (pH_{PZC}), a superfície assume carga positiva, favorecendo a adsorção de ânions; quando superior, a carga superficial torna-se negativa, favorecendo a adsorção de cátions (Nascimento *et al.*, 2014).

3.4.2.2 Concentração

O efeito da concentração inicial do corante está intimamente relacionado à concentração do corante e aos sítios presentes na superfície do adsorvente. Em geral, o percentual de remoção do corante diminui com o aumento da concentração inicial, o que leva à saturação dos sítios de adsorção na superfície do adsorvente. Por outro lado, o aumento da concentração inicial do corante eleva a capacidade de adsorção devido ao fato de que quanto mais corante há na solução, mais moléculas tentam migrar para a superfície do adsorvente, ocupando mais sítios e aumentando a quantidade total adsorvida (Soltani; Faramarzi; Mousavi Parsa, 2021).

DESSORÇÃO

3.5

A dessorção é o processo inverso da adsorção e pode ser definida como a liberação de uma substância acumulada na interface entre a superfície sólida e a solução, devolvendo o adsorvato à fase líquida (Freitas, 2010).

Os estudos de dessorção tem como objetivo retirar o adsorvato retido com o menor volume de solução eluente, de modo a obter a máxima concentração possível, sem comprometer a capacidade adsorptiva do material, tornando-o reutilizável em sucessivos ciclos de adsorção e dessorção (Nascimento *et al.*, 2014).

A eficiência da dessorção é influenciada por diversos fatores, incluindo as características físico-químicas do adsorvente, a natureza iônica dos corantes e as condições empregadas durante o processo de adsorção (Rápó; Tonk, 2021).

Assim, a porcentagem de corante dessorvido do adsorvente pode ser calculada por meio da Equação 4 (Roy *et al.*, 2024).

$$3.6 \quad \%Dessorção = \frac{\text{Quantidade liberada para a solução } (\frac{mg}{L})}{\text{Total adsorvido } (\frac{mg}{L})} \times 100 \quad (4)$$

ELUENTE

O eluente promove a quebra da ligação do adsorvato ao adsorvente saturado, sendo assim, para a escolha de um eluente fazem-se necessários critérios comuns

como compatibilidade com o adsorvato e o adsorvente, facilidade de quebra da ligação do adsorvato ao adsorvente, pH do eluente, capacidade de complexação, teor de modificadores orgânicos, concentração do eluente, tipo de dessorção (em lote ou coluna) e seu volume. A seleção do eluente, como solventes aniônicos, catiônicos ou orgânicos para dessorção, baseia-se no tipo de sistema adsorvente-adsorvato (Patel, 2021).

Ainda segundo Patel (2021), a concentração do eluente deve ser moderada, pois concentrações mais altas podem danificar a estrutura do adsorvente saturado, enquanto concentrações mais baixas podem resultar em taxas de dessorção mais lentas e exigir um volume maior de eluente.

MATERIAIS ADSORVENTES

3.7

De acordo com Crini e Badot (2008), um bom material adsorvente deve apresentar baixo custo, ampla disponibilidade, alta seletividade, capacidade de adsorção e eficiência na remoção de diferentes substâncias. Os adsorventes podem ser classificados em inorgânicos e orgânicos. Entre os materiais inorgânicos, destacam-se os óxidos de alumínio, sílica, vidros porosos, zeólitas, argilas e minerais como a vermiculita. Já os adsorventes orgânicos são representados principalmente pelo carvão ativado e por biomassas oriundas de resíduos agroindustriais, vegetais e microrganismos, como bactérias, fungos e leveduras.

A maioria dos adsorventes apresenta estrutura altamente porosa, com poros de dimensões reduzidas, o que resulta em elevada área superficial específica e, conseqüentemente, maior eficiência no processo de adsorção (McCABE *et al.*, 1991).

Entre os adsorventes inorgânicos, as zeólitas destacam-se por apresentarem características que favorecem sua aplicação em processos de adsorção, como elevada capacidade de troca catiônica, estrutura porosa e estabilidade química. Os métodos convencionais de síntese de zeólitas apresentam limitações significativas, como baixo rendimento do processo e necessidade de múltiplas etapas de tratamento (López-Delgado *et al.*, 2020). Diante dessas limitações, a utilização de resíduos industriais como materiais adsorventes apresenta-se como alternativa promissora, contribuindo para o aproveitamento sustentável de subprodutos e redução dos custos associados ao processo de adsorção (Lermen *et al.*, 2021).

ZEÓLITAS

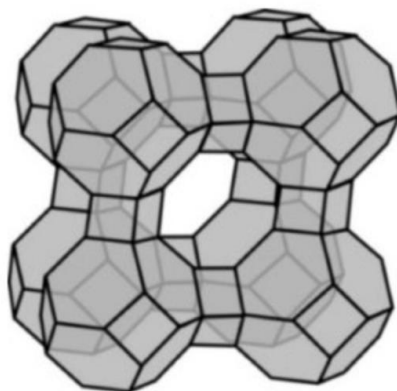
3.8 As zeólitas são aluminossilicatos de metais alcalinos ou alcalinos terrosos, predominantemente sódio e cálcio, sendo reconhecidas pela primeira vez em 1756 pelo mineralogista sueco Axel Fredrik Cronstedt com a descoberta da stilbita (Clarke, 1980 Apud Luz, 1994).

Em 1850, Way descobriu que determinados tipos de solos tinham a propriedade de reter sais de amônia, e Breck constatou que os silicatos hidratados de alumínio no solo eram os responsáveis pela troca iônica. Em 1925, Weigel e Steinhof foram os primeiros a constatar que a zeólita chabazita absorvia seletivamente moléculas orgânicas menores e rejeitava as maiores. A partir das décadas de 40 e 50, os estudos sobre as propriedades das zeólitas se intensificaram, evidenciando seu potencial de utilização em processos industriais (Clifton, 1987 apud Luz, 1994).

Embora as pesquisas tenham avançado significativamente no século XX, a primeira síntese de uma zeólita já havia sido descrita em 1862 por St. Clair Deville, que obteve a zeólita levynita por meio do aquecimento, a 170 °C, de uma solução aquosa de silicato de potássio e aluminato de sódio. À Barrer (1951) é creditada a primeira síntese da zeólita analcima com reprodutibilidade de resultados, caracterizada por difração de raios-X, feito inédito até então, devido à falta de técnicas adequadas. Em 1980 já haviam sido identificadas 40 zeólitas naturais e, ao final da década de 80, conheciam-se mais de 10.000 patentes relacionadas à sua síntese (Gianneto, 1989 apud Luz, 1994).

Estruturalmente, as zeólitas possuem estrutura tridimensional coordenada por tetraedros, nos quais um átomo de silício ou alumínio ocupa a posição central e, em sua volta, quatro átomos de oxigênio (Figura 3). Esses aluminossilicatos são constituídos por tetraedros de óxidos de silício e alumínio, produzindo assim uma carga negativa nas estruturas. Dessa forma, torna-se necessária a presença de cátions de compensação para equilibrar eletroquimicamente a carga negativa introduzida pelos átomos de Al e Si, presentes nas zeólitas, sendo Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ os principais contra-íons (Melo; Riella, 2010).

Figura 3: Estrutura da zeólita A



Fonte: Melo; Riella (2010).

Além disso, a estrutura das zeólitas permite a transferência de espécies entre seus espaços intracristalinos, porém, essa transferência é limitada pelo diâmetro dos poros da zeólita (Kubu; Millini; Žilková, 2019). Assim, apenas moléculas com dimensões inferiores a um valor crítico conseguem ingressar ou sair desses espaços intracristalinos, que varia conforme o tipo de zeólita (Rigo *et al.*, 2009).

Quanto à origem, as zeólitas podem ser naturais, formadas por processos geológicos, ou sintéticas, produzidas em condições controladas que lhes conferem maior pureza e uniformidade estrutural. A síntese costuma partir de reagentes químicos como fontes de silício e de alumínio, porém, materiais residuais ricos nesses elementos também têm sido utilizados como matéria-prima alternativa (Luz, 1994).

Entre as zeólitas sintéticas, a zeólita do tipo A, segundo Rigo, Luvison e Pergher (2000), é um composto microporoso com elevado volume de poros, boa estabilidade hidrotérmica e baixa hidrofobicidade. Além disso, apresenta baixa razão silício/alumínio, próxima da unidade, o que lhe confere expressiva capacidade de troca iônica e de adsorção. López-Delgado *et al.* (2020) demonstraram a viabilidade de obtê-la a partir de resíduos industriais de alumínio e silicato de sódio comercial como fontes de alumínio e silício, respectivamente.

REUTILIZAÇÃO DA ZEÓLITA

A reutilização dos adsorventes é um dos aspectos mais importantes para a viabilidade econômica e ambiental dos processos de adsorção. Após a saturação dos sítios ativos, sua eficiência tende a diminuir significativamente nos ciclos

subsequentes de adsorção, tornando necessária a substituição do material e o descarte do adsorvente esgotado. Além de aumentar os custos operacionais, a geração contínua de adsorventes saturados pode representar uma fonte secundária de contaminação ambiental. Dessa forma, além de elevada capacidade adsortiva e seletividade pelos contaminantes de interesse, os adsorventes devem apresentar potencial de regeneração e reutilização (Alcalde-Garcia *et al.*, 2023).

Segundo Patel (2021), os adsorventes saturados constituem uma parcela relevante dos resíduos sólidos perigosos gerados pelos processos de adsorção e a incineração, frequentemente empregada como destinação final dos adsorventes saturados, resulta na perda total do composto e dos produtos químicos adsorvidos, evidenciando a importância do desenvolvimento de estratégias de regeneração e reaproveitamento desses materiais.

A avaliação da reutilizabilidade do adsorvente em ciclos de reprodução é indispensável para determinar sua vida útil, a qual pode ser expressa pelo número de ciclos em que o material preserva sua capacidade adsortiva, permitindo sua regeneração e viabilidade econômica (Rápó; Tonk, 2021).

Existem diversas técnicas de regeneração de adsorventes, cada uma com seus respectivos mecanismos (Renu; Sithole, 2024). Entre os métodos mais empregados para zeólitas, destacam-se as regenerações térmicas, ultrassônicas, oxidativas e químicas.

A regeneração térmica consiste na aplicação de altas temperaturas, promovendo a oxidação, a desnaturação ou a carbonização dos poluentes adsorvidos (Renu; Sithole, 2024). Esse método é adequado para materiais adsorventes com alta resistência térmica, como carvão ativado e zeólitas, sendo geralmente realizado em uma faixa de temperatura entre 150 e 800 °C (Alcalde-Garcia *et al.*, 2023). No entanto, trata-se de um processo altamente dependente de energia, o que o torna caro em comparação com as outras técnicas de regeneração (Renu; Sithole, 2024).

Outra abordagem utilizada é a regeneração ultrassônica, que utiliza ondas sonoras de alta intensidade, geralmente na faixa de 20 a 40 kHz, produzindo alternâncias de compressão e expansão que levam a formação de bolhas, as quais colapsam assimetricamente à superfície do adsorvente, provocando efeitos mecânicos e térmicos capazes de romper as interações entre adsorvente e adsorvato (Alcalde-Garcia *et al.*, 2023).

Os métodos oxidativos envolvem a oxidação e redução de fotocatalisadores e fotossensibilizadores sob incidência de luz, gerando radicais livres que degradam os poluentes aderidos à superfície do adsorvente e, assim, regeneram o material. O adsorvente saturado pode ser exposto à luz visível, ultravioleta ou solar, conforme o fotocatalisador empregado (Alcalde-Garcia *et al.*, 2023).

Na regeneração química, o mecanismo depende do reagente químico selecionado para desestabilizar a interação adsorvente-adsorvato, modificar as características da superfície do adsorvente ou degradar o contaminante. Entre os principais agentes empregados destacam-se os solventes orgânicos, os eluentes ácidos e alcalinos, além das soluções salinas (Alcalde-Garcia *et al.*, 2023).

Os solventes orgânicos atuam promovendo a solubilização dos contaminantes adsorvidos e reduzindo as forças de interação entre o adsorvato e o adsorvente, a eficiência dessa técnica depende de fatores como a solubilidade do adsorvato no solvente (Alcalde-Garcia *et al.*, 2023).

Nos eluentes ácidos, o excesso de cátions H^+ e H_3O^+ favorece a protonação dos sítios ativos do adsorvente, enquanto em eluentes alcalinos o predomínio de ânions OH^- , favorece a desprotonação. Em ambos os casos, essa alteração reduz a afinidade pelo contaminante e promove sua liberação no meio. Entre os reagentes mais utilizados destacam-se os ácidos clorídrico, sulfúrico e nítrico, bem como o hidróxido de sódio, o hidróxido de potássio e a amônia (Alcalde-Garcia *et al.*, 2023).

Além disso, soluções salinas têm sido avaliadas como uma alternativa de eluente. Em concentrações elevadas os sais favorecem a dessorção por mecanismos de troca iônica (Alcalde-Garcia *et al.*, 2023).

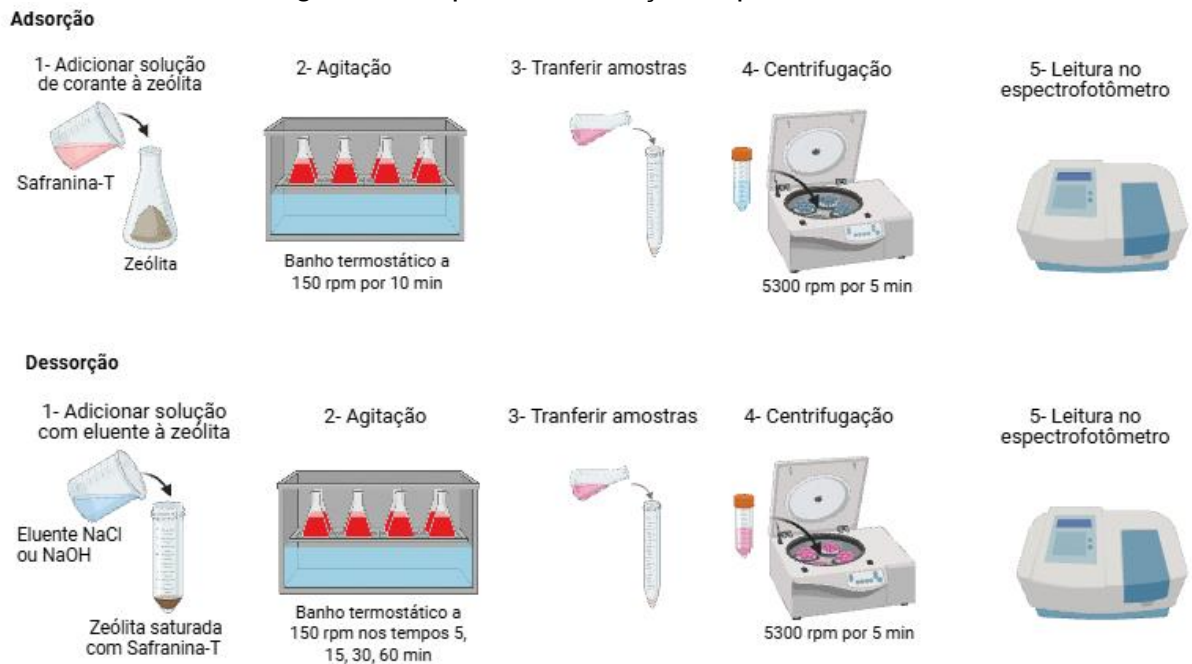
Em comparação com outros eluentes, os solventes orgânicos apresentam como principal desvantagem seu maior potencial de toxicidade e os impactos ambientais associados, como ocorre com o metanol e o benzeno. Nesse contexto, a substituição desses reagentes por alternativas menos agressivas ao meio ambiente tem sido incentivada. Assim, eluentes alcalinos e soluções salinas destacam-se como opções mais ecológicas, por reduzirem o impacto ambiental e por demonstrarem boa eficiência na regeneração de adsorventes, especialmente em processos baseados em protonação/desprotonação e troca iônica (Alcalde-Garcia *et al.*, 2023).

MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos realizados nesse trabalho foram conduzidos no Laboratório de Reúso de Águas (LARA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) de Florianópolis/SC. A Figura 4 demonstra as etapas da execução do experimento.

4

Figura 4: Etapas de execução experimental.



Fonte: Autor (2026).

4.1

ADSORVATO

O corante utilizado neste trabalho como adsorvato foi a Safranina-T, conhecida como Basic Red 2 (CAS nº 477–73-6), da marca NEON (Figura 5).

Para a realização dos ensaios, foi preparado uma solução estoque adicionando 0,5 g de adsorvente à 1000 mL de água destilada dentro de um balão volumétrico de 1 L, e mantida sob agitação em agitador magnético a 1200 rpm e a temperatura ambiente durante 1 hora, resultando na concentração nominal de 500 mg L⁻¹.

Figura 5: Corante Safranina-T, conhecida como Basic Red 2.



Fonte: Autor (2026).

MATERIAL ADSORVENTE

4.2

A zeólita utilizada como material adsorvente neste estudo foi fornecida pelo Instituto de Ciências da Construção Eduardo Torroja (IETcc), pertencente ao Conselho Superior de Investigações Científicas (CSIC) de Madrid, Espanha (Figura 6).

Trata-se de um material obtido por meio do aproveitamento de um resíduo perigoso da indústria do alumínio, correspondente à fração fina resultante da moagem de escórias de alumínio, empregado como matéria-prima em substituição aos reagentes convencionais. A síntese foi conduzida por via hidrotérmica, em etapa única e sob condições brandas, com adição de solução comercial de silicato de sódio para ajustar a baixa razão Si/Al do resíduo e de hidróxido de sódio como agente alcalino. O material obtido apresentou razão Si/Al de 1,19 e foi integralmente convertido em zeólita, sem a geração de outros resíduos sólidos. (López-Delgado *et al.*, 2020).

A zeólita sintetizada foi caracterizada como do tipo A, com estrutura mesoporosa e fração de microporos. O material possui área superficial específica de $19,7 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$, diâmetro de poro predominante de 3,8 nm e capacidade de troca catiônica (CTC) de $1,70 \text{ meq g}^{-1}$ (Lobo-Recio *et al.*, 2021). Esse valor de CTC evidencia o potencial do material para aplicações envolvendo processos de troca catiônica e adsorção.

Figura 6: Zeólita do tipo A (LTA) utilizada como material adsorvente neste estudo.



Fonte: Autor (2026).

4.3 CURVA DE CALIBRAÇÃO

A construção da curva de calibração foi necessária para permitir a quantificação da concentração de corante remanescente nas soluções após o processo de adsorção. Por meio dessa relação, torna-se possível correlacionar valores de absorbância medidos em espectrofotômetro com concentrações conhecidas do corante, viabilizando sua determinação em amostras desconhecidas.

A partir dessa solução estoque de concentração de 500 mg L^{-1} , foram preparadas soluções (50 mL) nas concentrações de 1, 2, 5, 10, 15 e 20 mg L^{-1} com volume de solução calculados a partir da equação fundamental da diluição (Equação 5).

$$C_1 \cdot V_1 = C_2 \cdot V_2 \quad (5)$$

Onde C_1 e V_1 representam, respectivamente, a concentração e o volume da solução estoque e C_2 e V_2 a concentração e o volume final da solução padrão a ser preparada. Na Figura 7 são apresentadas as diferentes diluições do corante ST utilizadas para a obtenção da curva de calibração.

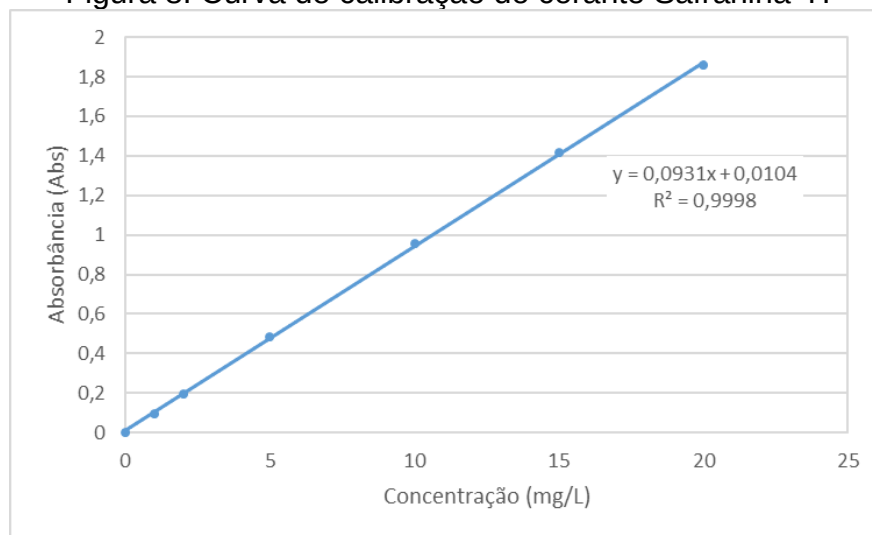
Figura 7: Diluições a partir da solução estoque a diferentes concentrações.



Fonte: Autor (2026).

As leituras de absorbância das soluções preparadas em diferentes concentrações deram origem à curva de calibração apresentada na Figura 8, com base na Lei de Lambert-Beer. As leituras foram realizadas no comprimento de onda de 520 nm, que corresponde ao comprimento de máxima absorção ($\lambda_{\text{máx}}$) do corante ST, determinado por varredura espectral em espectrofotômetro UV-Vis (Modelo Dr 5000, marca Hach).

Figura 8: Curva de calibração do corante Safranina-T.



Fonte: Autor (2026).

ENSAIOS DE ADSORÇÃO

Para conduzir os ensaios de adsorção foram preparados 2000 mL de solução de corante ST a uma concentração inicial de 50 mg L⁻¹. Para isso foram utilizados 200

mL da solução estoque ($C_0 = 500 \text{ mg L}^{-1}$), completando-se o volume do balão volumétrico de 2 L com água destilada.

As condições experimentais empregadas nos ensaios de adsorção basearam-se nas condições ótimas determinadas por Ritter *et al.* (2024) para o mesmo material adsorvente. Considerando as condições que proporcionaram elevado desempenho de remoção, foram estabelecidos os parâmetros operacionais utilizados neste trabalho, empregando-se 1,5 g de zeólita por frasco, o que equivale a uma dose de 30 g L^{-1} , e velocidade de agitação de 150 rpm.

Adicionalmente, considerando que os mesmos autores observaram que a remoção do corante ocorre em aproximadamente um minuto de contato, definiu-se um tempo de contato de 10 minutos como margem de segurança, de modo a garantir o estabelecimento do equilíbrio de adsorção.

O ensaio de adsorção foi realizado em regime de batelada, transferindo-se volumetricamente 50 mL da solução de corante para Erlenmeyers de 100 mL contendo 1,5 g de zeólita. Os testes foram feitos em duplicata, totalizando 16 Erlenmeyers.

Após a adição da solução, os frascos foram brevemente agitados de forma manual, para promover o contato inicial entre adsorvente e adsorvato, e em seguida dispostos em banho termostático, sob agitação de 150 rpm, em temperatura ambiente, durante 10 minutos.

Decorrido o tempo de contato, o conteúdo de cada Erlenmeyer foi transferido para tubos Falcon previamente identificados e submetido à centrifugação a 5300 rpm por 5 minutos. Decorrido esse tempo, alíquotas do sobrenadante foram retiradas e quantificadas por meio da leitura da absorbância em espectrofotômetro a partir da curva de calibração já estabelecida.

DESSORÇÃO

O processo de dessorção tem como principal objetivo avaliar a possibilidade de reutilização do material adsorvente, assim como sua capacidade de liberação do adsorvato previamente retido.

Para esse fim, foram preparados dois eluentes, hidróxido de sódio (NaOH) e cloreto de sódio (NaCl), ambos na concentração de $0,5 \text{ mol L}^{-1}$, escolhida para minimizar danos estruturais à zeólita mantendo eficácia.

A solução de NaOH (CAS n° 1310-73-2), da marca NEON, foi preparada considerando a sua molaridade de 40 g mol^{-1} . Dessa forma, foram pesados 20,0 g do reagente, os quais foram adicionados a aproximadamente 900 mL de água destilada, mantido sob agitação magnética a 1000 rpm e temperatura de 40°C , até completa dissolução. Posteriormente, a solução foi transferida para um balão volumétrico de 1000 mL, completando-se o volume final com água destilada.

De maneira análoga, para o preparo do eluente NaCl (CAS n° 7647-14-5), da marca NEON, foram pesados 29,2 g do reagente, seguindo-se o mesmo procedimento de dissolução e transferência volumétrica descrito anteriormente. O pH da solução de NaOH foi 13,69 e o pH da solução de NaCl foi 6,37, caracterizando as condições alcalina e neutra dos eluentes, respectivamente.

Concluído o ensaio de adsorção e realizada a centrifugação, o sobrenadante foi cuidadosamente separado, preservando-se apenas a zeólita decantada no fundo dos tubos Falcon para a etapa subsequente. Ao adsorvente retido em cada tubo foram adicionados 50 mL da solução de eluente e o conteúdo foi retornado aos respectivos Erlenmeyers, posteriormente dispostos no banho termostático, sob agitação de 150 rpm e temperatura ambiente. O procedimento foi realizado simultaneamente para os 16 frascos, divididos em dois grupos de 8 frascos, conforme o eluente a ser empregado.

Para a avaliação da influência do tempo de contato sobre a eficiência de dessorção, os Erlenmeyers foram retirados do banho em tempos distintos, em duplicata: 2 frascos a 5 minutos, 2 a 15 minutos, 2 a 30 minutos e 2 a 60 minutos. À medida que cada par de frascos era retirado, seu conteúdo era transferido para tubos previamente identificados e submetido novamente à centrifugação a 5300 rpm por 5 minutos. Após esse tempo, alíquotas foram retiradas e quantificadas mediante a leitura da concentração em espectrofotômetro com base na curva de calibração já estabelecida.

Para avaliar a capacidade de reutilização e regeneração do adsorvente, todo o procedimento de adsorção e dessorção foi repetido por três ciclos sucessivos sobre a mesma amostra de zeólita.

4.5.1 Regeneração

A regeneração do adsorvente raramente ocorre de forma completa, uma vez que parte do adsorvato pode permanecer retida na estrutura do material após as etapas de dessorção, influenciando diretamente seu desempenho em ciclos subsequentes.

A ausência da etapa de lavagem foi uma escolha metodológica adotada com o objetivo de reduzir o consumo de água e a geração de efluentes secundários, aproximando o estudo de uma condição operacional com menor impacto ambiental. Diferentemente de estudos que empregam sucessivas lavagens com água deionizada para remover completamente os resíduos do eluente, esta abordagem busca reproduzir condições mais próximas da aplicação prática, tornando os resultados mais representativos para cenários reais de regeneração do adsorvente.

No procedimento adotado, uma nova solução de ST foi adicionada à mesma amostra de zeólita a cada ciclo, sem etapa de lavagem intermediária. Assim, o corante adsorvido e não removido pela dessorção permaneceu no material e somou-se ao corante adicionado no ciclo seguinte. Dessa forma, nos ciclos seguintes a zeólita carrega consigo o corante residual acumulado dos ciclos anteriores, correspondendo à fração que foi adsorvida mas não removida pelas dessorções precedentes.

Para contemplar esse acúmulo, adotou-se um balanço de massa cumulativo, no qual o denominador da eficiência inclui tanto o corante recém-adsorvido no ciclo observado quanto o residual acumulado dos ciclos anteriores, considerando um volume constante das soluções de adsorção e dessorção, o que resulta na Equação 6.

$$\%D_n = \frac{C_{eluato,n}}{(C_0 - C_{eq,ad,n}) + \sum_{i=1}^{n-1} C_{retida,i}} \times 100 \quad (6)$$

Sendo:

$C_{eluato,n}$: concentração do corante no eluato ao final do ciclo n (mg L^{-1});

C_0 : concentração inicial da solução de adsorção (mg L^{-1});

$C_{eq,ad,n}$: concentração de corante em solução, no equilíbrio, ao final da adsorção do ciclo n (mg L^{-1});

$C_{retida,i}$: concentração de corante retido no adsorvente ao final do ciclo i , determinada conforme a Equação 7.

A massa retida ao final de cada ciclo n , expressa em termos de concentração, foi determinada pela diferença entre a quantidade adsorvida e a quantidade dessorvida no respectivo ciclo, conforme apresentado na Equação 7.

$$C_{retida,n} = (C_0 - C_{eq,ad,n}) - C_{eluato,n} \quad (7)$$

RESULTADOS

5 ADSORÇÃO

5.1 A etapa inicial consistiu em avaliar a capacidade adsortiva da zeólita LTA frente à Safranina-T em meio aquoso. Os resultados apresentados a seguir caracterizam o comportamento de remoção do corante e o desempenho do material como adsorvente.

O primeiro ciclo correspondeu à adsorção sobre a zeólita virgem, anterior a qualquer etapa de regeneração. Foram observadas eficiências altas de 93,2% e 91,5% quando comparado para as séries posteriormente regeneradas com NaCl e NaOH. Esses resultados são coerentes com os obtidos por Ritter *et al.* (2024), que também reportaram eficiências iniciais próximas de 98,12% para a adsorção da Safranina-T em zeólita LTA sob condições otimizadas.

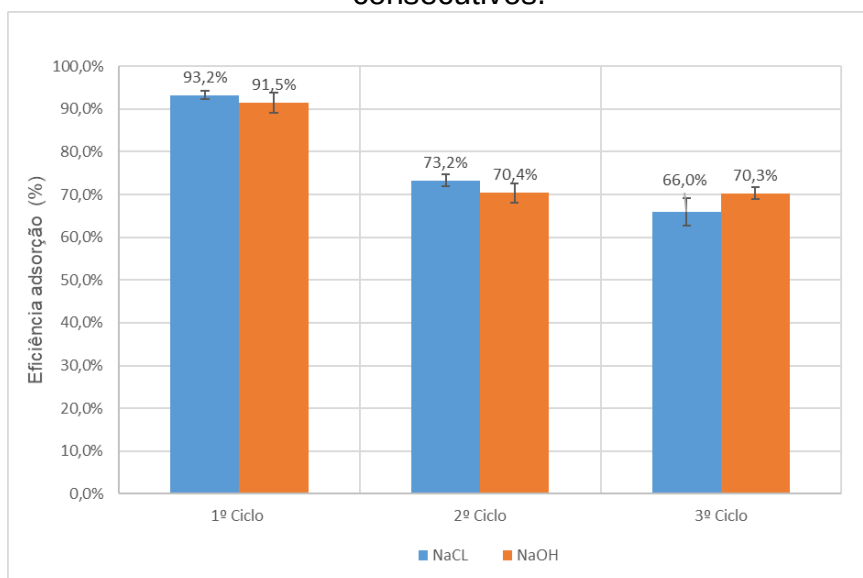
A partir do segundo ciclo, as eficiências passam a refletir o desempenho do material regenerado, com valores próximos a 70%, o que pode estar associado à retenção parcial do corante nos sítios de maior afinidade da zeólita. Essa fração adsorvida não é completamente removida durante a etapa de regeneração, permanecendo na estrutura porosa do material e, conseqüentemente, reduzindo o número de sítios ativos disponíveis para um novo ciclo de adsorção.

No terceiro ciclo, os dois eluentes apresentaram comportamentos distintos. Com NaCl, houve continuidade da redução da eficiência, atingindo 66,0%. Em contrapartida, com NaOH, a eficiência permaneceu praticamente constante em relação ao segundo ciclo, em 70,3%.

Ainda que haja perda de desempenho em relação ao material original, o sistema manteve capacidade adsortiva significativa, sugerindo viabilidade de

reutilização parcial do adsorvente. A evolução das eficiências de adsorção ao longo de três ciclos consecutivos é apresentada na Figura 9.

Figura 9: Eficiências médias de adsorção de Safranina-T ao longo de três ciclos consecutivos.



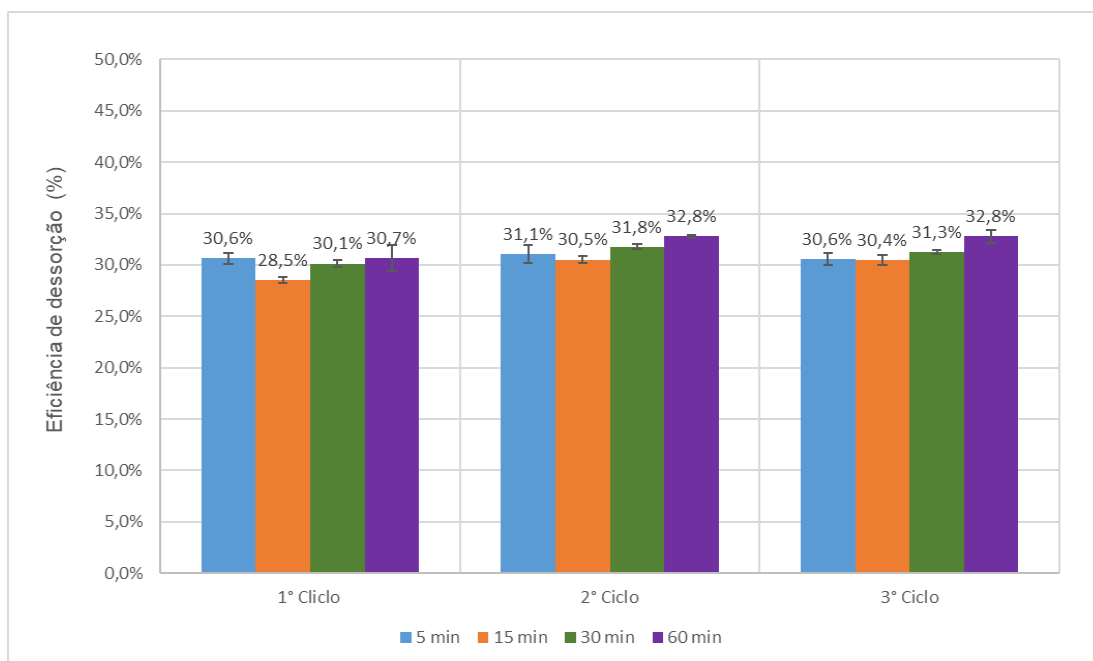
Fonte: Autor (2026).

5.2 EFEITO DO TEMPO DE CONTATO ENTRE ADSORVENTE E ADSORVATO NA DESSORÇÃO

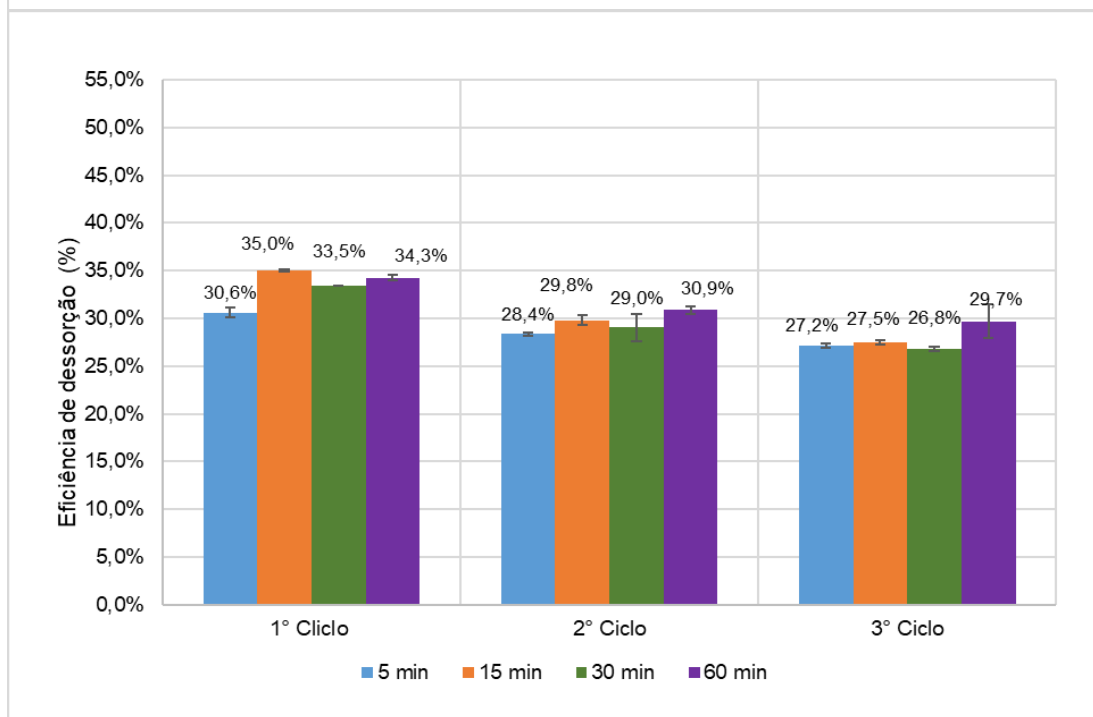
O resultado dos experimentos realizados nos três ciclos sucessivos de adsorção/dessorção, com tempos de contato variando entre 5, 15, 30 e 60 minutos para os eluentes NaCl e NaOH, ambos ($0,5 \text{ mol L}^{-1}$), são apresentados na Figura 10. O percentual de dessorção foi calculado por meio da Equação (6) (Seção 4.5.1).

Figura 10: Eficiência de dessorção da Safranina-T a partir da zeólita em função do tempo de contato nos ciclos sucessivos de dessorção, utilizando (a) solução aquosa de NaCl e (b) solução aquosa de NaOH.

a)



b)



Fonte: Autor (2026).

Observou-se que a eficiência de dessorção do corante Safranina-T não apresentou influência significativa com o aumento do tempo de contato nos diferentes eluentes. Considerando os três ciclos avaliados, os valores médios obtidos variaram entre 30,1% para o tempo de contato de 5 minutos a 32,1% para 60 minutos para o

eluente NaCl. Já para o NaOH, a eficiência média foi de 28,7% para o tempo de contato de 5 minutos e de 31,6% para 60 minutos. Esses resultados indicam que a dessorção em sua maior parte ocorre nos primeiros minutos, visto que o aumento do tempo de contato de 5 para 60 minutos não promoveu mudanças consideráveis na liberação do corante adsorvido à zeólita para a solução aquosa.

CAPACIDADE DE DESSORÇÃO

5.3 A eficiência de dessorção com NaCl não apresentou variação significativa entre os ciclos sucessivos, mantendo-se em 30,0% no primeiro, 31,5% no segundo e 31,3% no terceiro. O resultado pressupõe que a dessorção está relacionada ao mecanismo de troca iônica promovido pela solução de NaCl. A Safranina-T encontra-se adsorvida na zeólita na forma catiônica, interagindo com os sítios aniônicos da estrutura aluminossilicática por meio das cargas positivas do nitrogênio do anel fenazínico. Durante a dessorção, os íons Na^+ competem por esses sítios, deslocando parte do corante para a solução aquosa. Entretanto, esse processo parece favorecer apenas a fração adsorvida em sítios de menor energia de interação, enquanto as moléculas associadas a sítios de maior afinidade permanecem retidas na estrutura da zeólita.

Em decorrência desse comportamento, a eficiência de dessorção não apontou variações significativas, uma vez que o corante ligado aos sítios de menor afinidade é deslocado para o meio aquoso na dessorção e, após a etapa de adsorção seguinte, com recarga de corante na mesma concentração, esses sítios são novamente ocupados e voltam a ser liberados na dessorção subsequente, enquanto os sítios de maior afinidade permanecem continuamente ocupados.

Com isso, a solução de NaCl promove, de forma consistente, a liberação de uma mesma fração do corante adsorvido, correspondente àquele ligado aos sítios de menor afinidade, nos quais os íons Na^+ atuam por meio de mecanismos de troca iônica.

Para o NaOH, observaram-se valores de eficiência de dessorção próximos aos obtidos com NaCl, com discreta redução ao longo dos ciclos, passando de 33,3% no primeiro, para 29,5% no segundo e 27,8% no terceiro. Os resultados indicam que a dessorção ocorre por meio da troca iônica promovida pelo íon Na^+ , comum aos dois eluentes.

Comportamento análogo foi descrito por Roy *et al.* (2024) na dessorção de Safranina em MOF-5, na qual NaOH e NaCl apresentaram capacidades de dessorção comparáveis, onde foi atribuído à presença do mesmo cátion (Na^+), enquanto o OH^- se mostrou um pouco mais efetivo apenas sobre antisséptico tópico merbromina, de caráter aniônico.

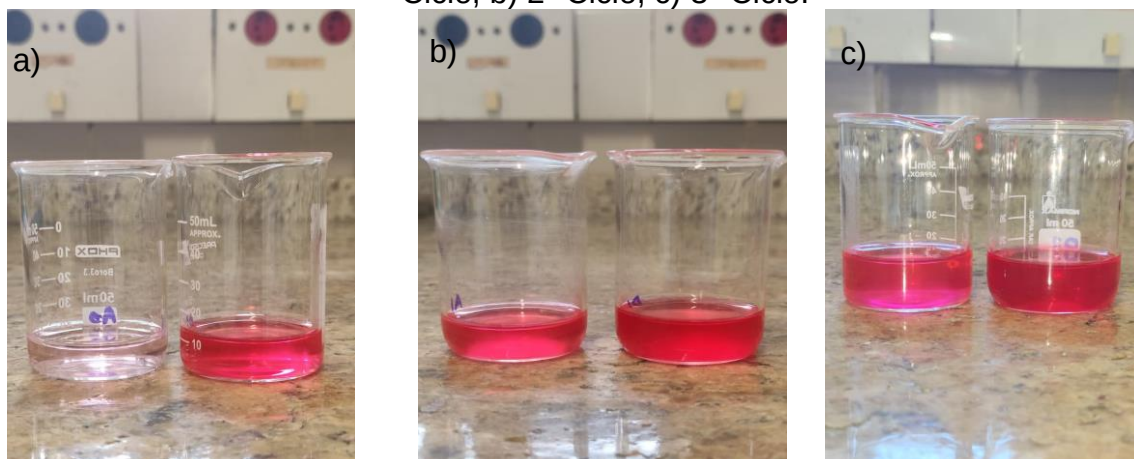
CAPACIDADE DE REGENERAÇÃO

5.4 A capacidade de regeneração da zeólita foi avaliada pela eficiência de dessorção e adsorção da Safranina-T (ST) ao longo dos três ciclos sucessivos. O primeiro ciclo de adsorção corresponde a zeólita virgem, representando a condição de referência do material íntegro.

Com NaCl, os ensaios de adsorção demonstraram queda da eficiência ao longo dos ciclos, de 93,2% no primeiro para 73,2% no segundo e 66,0% no terceiro, enquanto a dessorção permaneceu próxima de 31% nos três ciclos sucessivos, conforme a Figura 12.

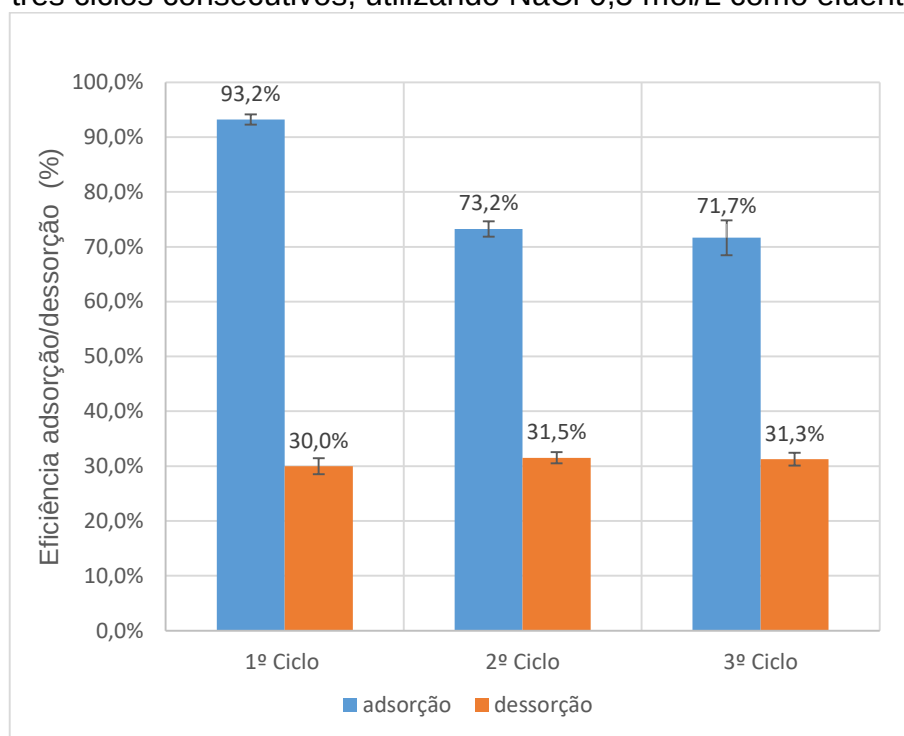
Na análise visual da Figura 11, é possível observar que as alíquotas retiradas durante a dessorção apresentaram coloração semelhante entre os ciclos, o que corrobora a estabilidade da eficiência do processo, enquanto as amostras da adsorção demonstram aumento da intensidade da coloração após o primeiro ciclo, evidenciando a redução da capacidade adsorptiva da zeólita nos ciclos subsequentes.

Figura 11: Alíquotas retiradas da solução após os ensaios de adsorção (esquerda) e dessorção (direita) da Safranina-T em eluente NaCl nos ciclos sucessivos: a) 1º Ciclo; b) 2º Ciclo; c) 3º Ciclo.



Fonte: Autor (2026).

Figura 12: Eficiências médias de adsorção e dessorção de Safranina-T ao longo de três ciclos consecutivos, utilizando NaCl 0,5 mol/L como eluente.



Fonte: Autor (2026).

A redução da eficiência de adsorção pode ser explicada pelo comportamento observado nos ensaios de dessorção. Como a fração do corante ligada aos sítios de maior afinidade não é removida e permanece retida na estrutura da zeólita, o número de sítios disponíveis para novos ciclos de adsorção diminui progressivamente. Uma vez que a troca iônica com NaCl não recupera esses sítios, o acúmulo se mantém a cada ciclo e a eficiência de adsorção decresce de forma contínua ao longo dos três ciclos.

A esse efeito pode somar-se a hipótese de que a ausência da etapa de lavagem entre a dessorção e o ciclo subsequente de adsorção tenha favorecido a permanência de parte do eluente nos poros e na superfície da zeólita, mantendo concentrações residuais de Na^+ e Cl^- no início da etapa de adsorção.

A presença de NaCl em solução aumenta a densidade eletrônica na dupla camada elétrica da interface do adsorvente, devido à alta eletronegatividade do íon Cl^- (Finney *et al.*, 2021). Esta dupla camada elétrica mais densa dificulta as interações eletrostáticas entre os sítios de adsorção do material e as moléculas de Safranina-T, reduzindo a capacidade adsorptiva do sistema. Além disso, devida a alta eletronegatividade do íon Cl^- estas ligações são significativamente mais intensas que

as formadas pelo NaOH. Assim, o aumento da força iônica com NaCl poderia favorecer a blindagem eletrostática entre a Safranina T e a superfície do adsorvente, contribuindo para a redução observada da capacidade adsortiva nos ciclos subsequentes.

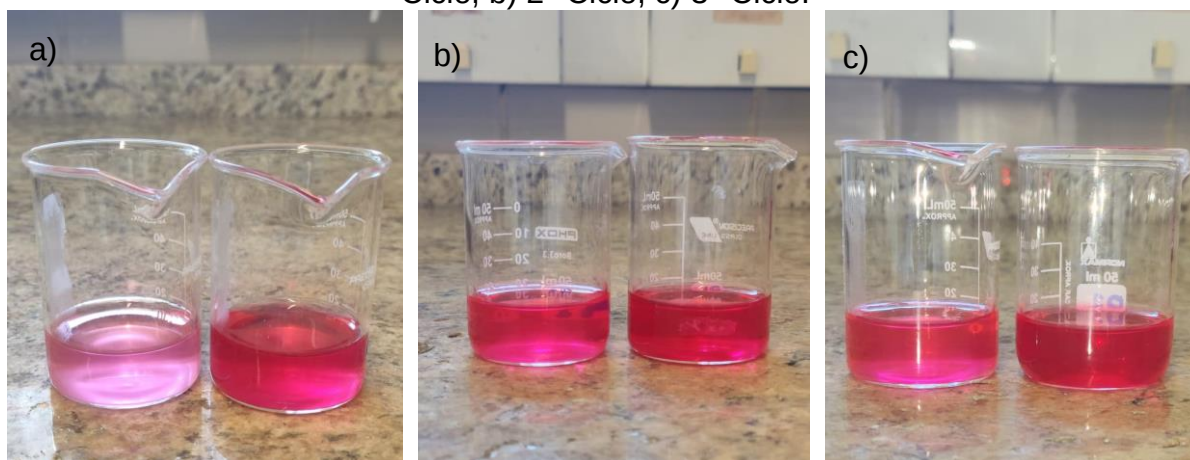
A constância da dessorção, em torno de 31%, sugere que apenas a fração de menor afinidade participa de forma reversível dos ciclos de adsorção e dessorção. Esse comportamento pode ser atribuído, predominantemente, à troca catiônica reversível promovida pelo NaCl, na qual o íon Cl^- , como contra-íon natural da Safranina-T, compete com o adsorvente pela associação ao corante, facilitando seu deslocamento (Finney *et al.*, 2021).

Ressalta-se que a zeólita continua adsorvendo o corante em todos os ciclos, de modo que a redução observada não representa perda de funcionalidade do material, mas a ausência de uma regeneração total, visto que, a capacidade de adsorção não retorna ao valor inicial após a dessorção, o que resulta em uma regeneração parcial.

O eluente NaOH apresentou comportamento distinto em relação ao NaCl. A Figura 13 apresenta as alíquotas obtidas ao longo dos ciclos de adsorção e dessorção, possibilitando a visualização das alterações na coloração das soluções durante o processo.

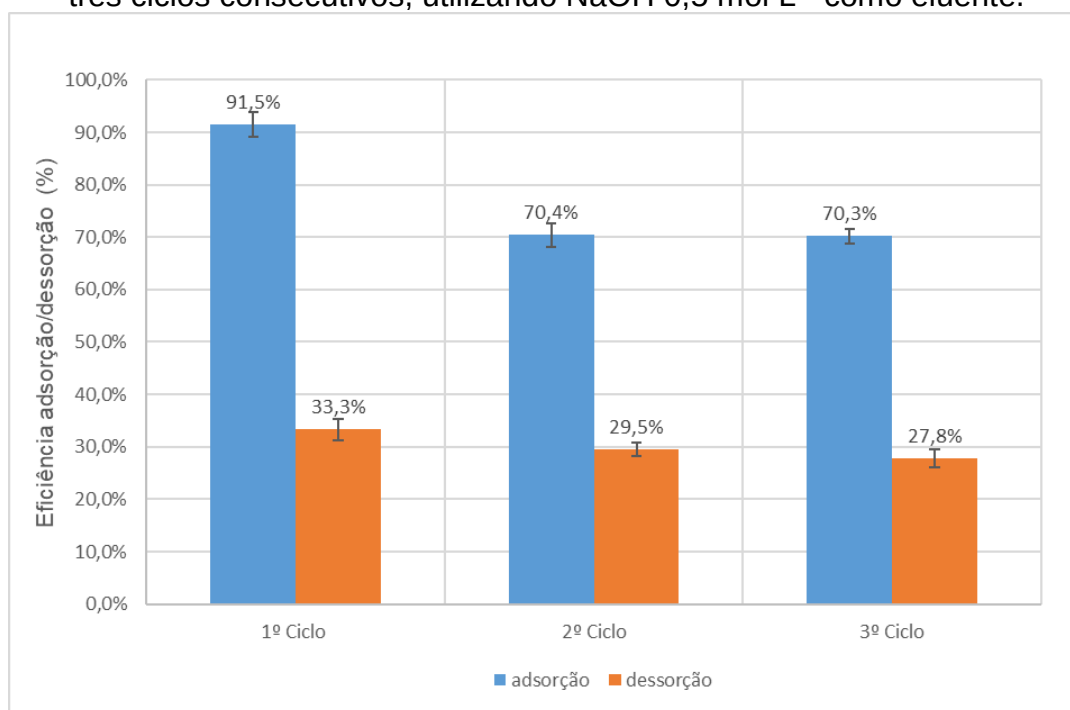
Nos ensaios de adsorção, observou-se redução da eficiência de 91,5% no primeiro ciclo para 70,4% no segundo, mantendo-se praticamente constante no terceiro ciclo, com eficiência de 70,3%. Em relação à dessorção observou-se uma discreta redução entre os ensaios sucessivos, passando de 33,3% no primeiro ciclo para 29,5% no segundo e 27,8% no terceiro, conforme apresentado na Figura 14.

Figura 13: Alíquotas retiradas da solução após os ensaios de adsorção (esquerda) e dessorção (direita) da Safranina-T em eluente NaOH nos ciclos sucessivos: a) 1º Ciclo; b) 2º Ciclo; c) 3º Ciclo.



Fonte: Autor (2026).

Figura 14: Eficiências médias de adsorção e dessorção de Safranina-T ao longo de três ciclos consecutivos, utilizando NaOH 0,5 mol L⁻¹ como eluente.



Fonte: Autor (2026).

Esse comportamento sugere que o sistema atingiu um novo equilíbrio após a primeira regeneração, no qual a perda de capacidade adsorptiva cessou e a eficiência se manteve em torno de 70%.

A redução progressiva da eficiência de dessorção, por sua vez, sugere a ocorrência de alterações cumulativas no adsorvente em meio alcalino. Conforme

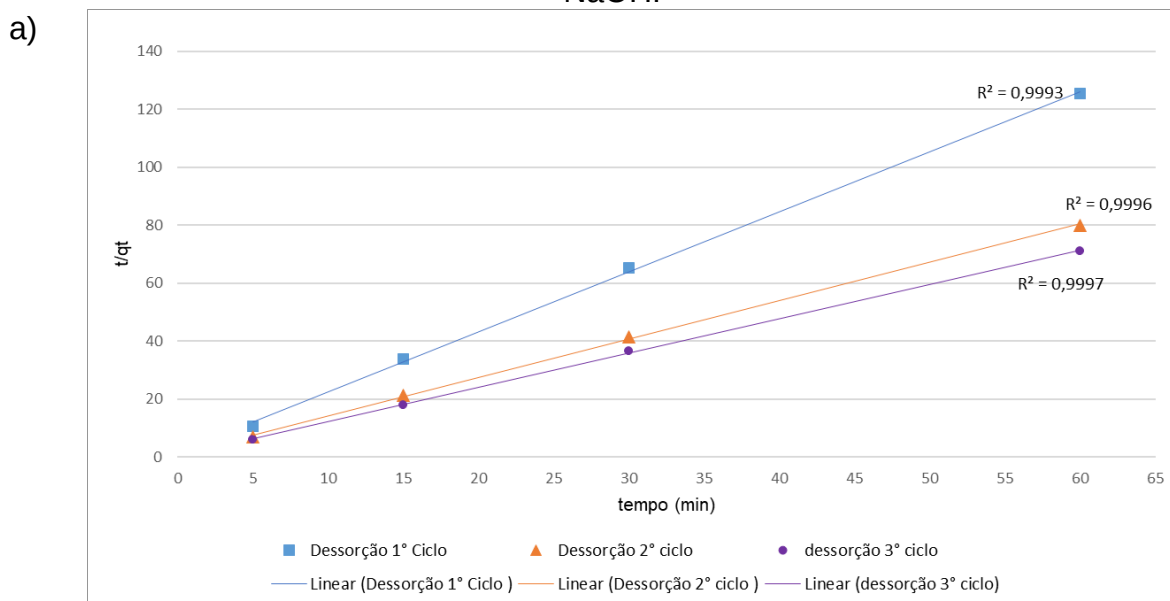
observado por Čižmek *et al.*, os íons OH^- são capazes de romper as ligações Si–O–Si e Si–O–Al da estrutura zeolítica, promovendo a dissolução parcial da rede aluminossilicato. Segundo esses autores, essa dissolução ocorre de forma congruente, com remoção simultânea de silício e alumínio, e não preferencialmente de silício. Considerando que os ensaios foram conduzidos com NaOH 0,5 mol L⁻¹ em condições alcalinas agressivas (pH 13,69) à temperatura ambiente, é provável que essas alterações estruturais tenham ocorrido de forma cumulativa e progressiva ao longo dos ciclos de regeneração, o que é compatível com a redução gradual da eficiência de dessorção observada. Entretanto, essa hipótese deve ser confirmada por análises complementares da estrutura da zeólita.

CINÉTICA DE DESSORÇÃO PSEUDOSSEGUNDA ORDEM

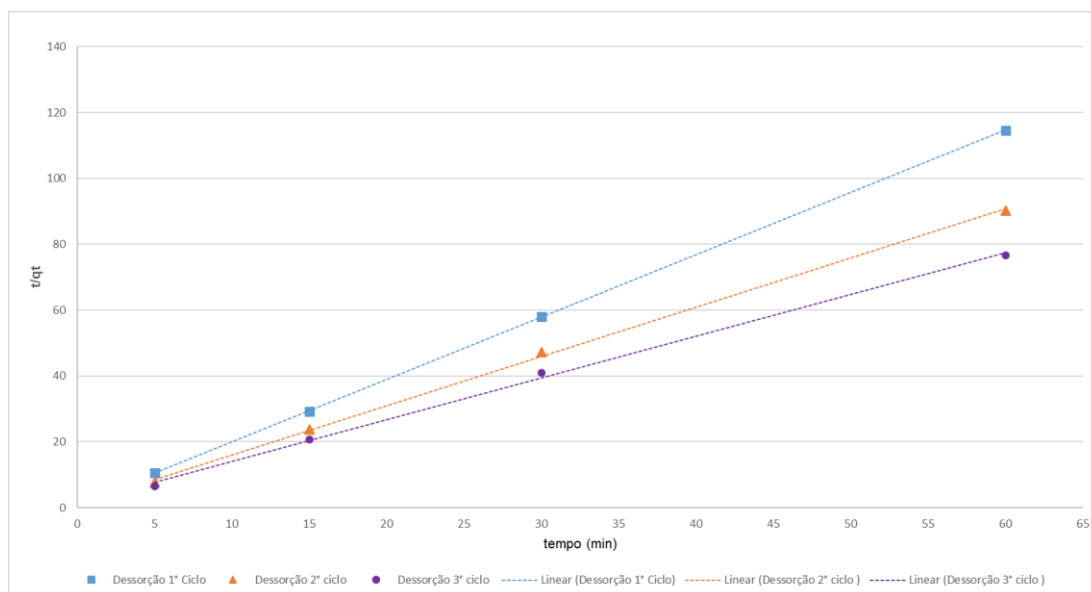
5.5

Observa-se que todos os três ciclos apresentam comportamento linear bem definido, com coeficientes de determinação muito elevados ($R^2 \approx 0,999$), indicando que o modelo de pseudo-segunda ordem descreve adequadamente a cinética de dessorção do corante na presença de NaCl e NaOH (Figura 15).

Figura 15: Cinética de dessorção pseudossegunda ordem para eluente a) NaCl e b) NaOH.



b)



Fonte: Autor (2026).

Comparando os ciclos, nota-se que o 1º ciclo apresenta valores mais elevados de t/q_t ao longo do tempo, o que sugere um comportamento cinético ligeiramente diferente em relação aos ciclos subsequentes, possivelmente associado à maior disponibilidade inicial de sítios ativos ou maior quantidade de corante inicialmente retido. Já o 2º e 3º ciclos apresentam curvas mais próximas entre si, indicando maior estabilidade do sistema após a primeira reutilização do material.

De forma geral, os resultados mostram que o processo de dessorção mantém um comportamento cinético consistente entre os ciclos, sem alterações significativas no mecanismo, sugerindo boa reprodutibilidade do processo ao longo das reutilizações do adsorvente.

CONCLUSÃO

O presente trabalho avaliou a dessorção do corante Safranina-T adsorvido em zeólita do tipo A, sintetizada a partir de resíduos da indústria de alumínio, e a capacidade de regeneração do material ao longo de ciclos sucessivos de adsorção e dessorção, empregando-se NaCl e NaOH como eluentes.

A quantificação da dessorção mostrou que o tempo de contato exerce influência pouco expressiva sobre a liberação do corante, concentrando-se nos minutos iniciais do processo. A dessorção acumulada situou-se em torno de 30% para ambos os eluentes, valor que reflete a remoção restrita à fração do corante ligada aos sítios de menor energia de interação, enquanto as moléculas retidas em sítios de maior afinidade permanecem na estrutura da zeólita. A similaridade entre os resultados obtidos com NaCl e NaOH indica que a dessorção é por meio da troca iônica promovida pelo íon Na^+ , comum aos dois reagentes, e não pelo caráter alcalino do meio, visto que a carga positiva da Safranina-T, localizada no nitrogênio quaternário do anel fenazínico, não é passível de neutralização por desprotonação.

Ao longo dos ciclos, no entanto, os dois eluentes apresentaram comportamentos distintos. A dessorção com NaCl manteve-se estável, ao passo que a dessorção com NaOH sofreu discreta redução, atingindo valores inferiores aos obtidos com NaCl. Como o cátion é comum aos dois processos, essa divergência não pode ser atribuída ao Na^+ , mas ao ânion presente no meio alcalino. A redução observada apenas com NaOH é compatível com uma alteração gradual do adsorvente em meio alcalino, hipótese que requer confirmação por caracterização do material após os ciclos.

Em relação ao segundo objetivo, os ensaios em três ciclos sucessivos revelaram redução da eficiência de adsorção do primeiro para o segundo ciclo, de cerca de 93% para aproximadamente 70%, com posterior estabilização no terceiro. Esse comportamento decorre da permanência do corante nos sítios de maior afinidade, que reduz o número de sítios disponíveis para novas adsorções. Ainda assim, o material preservou capacidade adsorviva em todos os ciclos, de modo que a queda observada não representa perda de funcionalidade, mas uma regeneração parcial, já que a capacidade inicial não é integralmente recuperada após a dessorção.

Entre os dois eluentes, o NaCl mostrou-se mais adequado à regeneração, por manter a eficiência de dessorção estável ao longo dos ciclos e não evidenciar

alteração do adsorvente, ao passo que o NaOH, embora apresente dessorção inicial ligeiramente superior, exibiu redução progressiva associada ao efeito do meio alcalino sobre o material.

Os resultados confirmam o potencial de reutilização da zeólita no tratamento de efluentes contendo Safranina-T, ainda que a regeneração parcial limite o número de ciclos com eficiência plena.

A adsorção é reconhecida como um método sustentável para a remediação de águas, nessa mesma direção, o emprego de eluentes salino e alcalino na regeneração evita solventes orgânicos de maior repercussão ambiental, o que reforça o caráter sustentável do processo proposto.

LIMITAÇÕES DE ESTUDO E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

6.1

Para etapas futuras, recomenda-se a caracterização físico-química do adsorvente antes e após os ciclos, por técnicas como difração de raios X, espectroscopia no infravermelho e análise de área superficial, a fim de confirmar a integridade estrutural do material e esclarecer a hipótese de alteração em meio alcalino, além de monitorado do pH ao longo dos ensaios, o que restringe a análise de efeitos associados a essa variável.

Sugere-se avaliar diferentes eluentes e concentrações, bem como outros métodos de regeneração, de modo a ampliar a recuperação do corante e aproximar a aplicação do material das condições reais de operação. Recomenda-se ainda a realização de um número maior de ciclos sucessivos, mantendo o caráter sustentável do processo. Além disso, estudos comparativos entre sistemas com e sem lavagem intermediária podem auxiliar na definição do equilíbrio mais adequado entre eficiência de regeneração, consumo de água, impacto ambiental e viabilidade econômica do processo.

REFERÊNCIAS

- ABIT. Perfil do setor. São Paulo, 2026. Disponível em: <https://www.abit.org.br/cont/perfil-do-setor>. Acesso em: 10 jun. 2026.
- ABIT. Indústria têxtil e de confecção avança em 2025. São Paulo, 21 jan. 2026. Disponível em: <https://www.abit.org.br/noticias/industria-textil-e-de-confeccao-avanca-em-2025>. Acesso em: 20 mai. 2026.
- ARAÚJO, F. V. F.; YOKOYAMA, L.; TEIXEIRA, L. A. C. Remoção de cor em soluções de corantes reativos por oxidação com H₂O₂/UV. **Química Nova**, v. 29, n. 1, p. 11-14, 2006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/>.
- AKSU, Z. Equilibrium and kinetic modeling of cadmium (II) biosorption by *C. vulgaris* in a batch system: effect of temperature. **Separation and Purification Technology**, v. 21, p. 285-294, 2001.
- ALCALDE-GARCIA, F.; PRASHER, S.; KALIAGUINE, S.; TAVARES, J. R.; DUMONT, M.-J. Desorption strategies and reusability of biopolymeric adsorbents and semisynthetic derivatives in hydrogel and hydrogel composites used in adsorption processes. **ACS Engineering Au**, v. 3, n. 6, p. 443-460, 2023. DOI: 10.1021/acsengineeringau.3c00022. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acsengineeringau.3c00022>.
- ALCALDE-GARCIA, F.; PRASHER, S.; KALIAGUINE, S.; TAVARES, J. R.; DUMONT, M.-J. Desorption strategies and reusability of biopolymeric adsorbents and semisynthetic derivatives in hydrogel and hydrogel composites used in adsorption processes. **ACS Engineering Au**, v. 3, n. 6, p. 443-460, 2023. DOI: 10.1021/acsengineeringau.3c00022. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acsengineeringau.3c00022>.
- BARRER, R. M.; HINDS, L.; WHITE, E. A. The hydrothermal chemistry of silicates. Part III. Reactions of analcite and leucite. **Journal of the Chemical Society**, p. 1466-1475, 1953. DOI: 10.1039/JR9530001466. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/JR9530001466>. Acesso em: 08 mar. 2026.
- BERRADI, M.; Hsissou, R.; Khudhair, M.; Assouag, M.; Cherkaoui, O.; El Bachiri, A.; El Harfi, A. Textile finishing dyes and their impact on aquatic environs. **Heliyon**, v. 5, n. 11, e02711, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02711>
- BRECK, D. W. Zeolite molecular sieves: Structure, chemistry and use.** New York: John Wiley & Sons, 1974.
- BUKHARI, S. S.; BEHIN, J.; KAZEMIAN, H.; ROHANI, S. Conversion of coal fly ash to zeolite utilizing microwave and ultrasound energies: a review. **Fuel**, v. 140, p. 250-266, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.09.077>.

CARLEIAL, Liana Maria da Frota. A questão regional no Brasil contemporâneo. In: LAVINAS, Lena et al. (org.). **Reestruturação do espaço urbano e regional no Brasil**. São Paulo: Hucitec; ANPUR, 1993. p. 35-58.

CHAKRABORTY, Sagnik; CHOWDHURY, Shamik; DAS SAHA, Papita. Adsorption of Crystal Violet from aqueous solution onto NaOH-modified rice husk. **Carbohydrate Polymers**, v. 86, p. 1533-1541, 2011. DOI: 10.1016/j.carbpol.2011.06.058.

COONEY, D. O. **Adsorption design for wastewater treatment**. Boca Raton: CRC Press, 1999

CRINI, Grégorio; BADOT, Pierre-Marie. Application of chitosan, a natural aminopolysaccharide, for dye removal from aqueous solutions by adsorption processes using batch studies: a review of recent literature. **Progress in Polymer Science**, v. 33, n. 4, p. 399-447, 2008. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2007.11.001.

CRINI, Grégorio. Adsorventes não convencionais de baixo custo para remoção de corantes: uma revisão. *Bioresource Technology*, v. 97, n. 9, p. 1061–1085, jun. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.05.001>

ČIŽMEK, Ankica; KOMUNJER, Ljepša; SUBOTIĆ, Boris; ŠIROKI, Marija; RONČEVIĆ, Sanda. Kinetics of zeolite dissolution: Part 1. Dissolution of zeolite A in hot sodium hydroxide. **Zeolites**, v. 11, n. 3, p. 258-264, 1991. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0144-2449\(05\)80229-5](https://doi.org/10.1016/S0144-2449(05)80229-5).

DALLAGO, R. M.; SMANIOTTO, A.; OLIVEIRA, L. C. A. de. Resíduos sólidos de curtumes como adsorventes para a remoção de corantes em meio aquoso. **Química Nova**, v. 28, n. 3, p. 433-437, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422005000300013>

DAŁBROWSKI, Andrzej. Adsorption — from theory to practice. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 93, n. 1-3, p. 135-224, 2001. DOI: 10.1016/S0001-8686(00)00082-8.

DROGUETT, S.E., **Elementos de Catalisis Heterogenea. Secretaria General de la Organization de los Estados Americanos**, Washington, 1983.

FINNEY, Aaron R.; McPHERSON, Ian J.; UNWIN, Patrick R.; SALVALAGLI, Matteo. Electrochemistry, ion adsorption and dynamics in the double layer: a study of NaCl(aq) on graphite. **Chemical Science**, v. 12, n. 33, p. 11166–11180, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1039/d1sc02289j>

FREIRE, Renato Sanches; PELEGRINI, Ronaldo; KUBOTA, Lauro T.; DURÁN, Nelson; PERALTA-ZAMORA, Patrício. Novas tendências para o tratamento de resíduos industriais contendo espécies organocloradas. **Química Nova**, v. 23, n. 4, p. 504-511, 2000. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/D9BYtFL43V6hzdmHX8FkmGz/>.

FREITAS, I. C. V. Adsorção e dessorção de metais no solo e coeficientes de isotermas de Freundlich e Langmuir. **Agropecuária Técnica**, Areia, PB. v. 31, 2010.

FREUNDLICH, Herbert M. F. Over the adsorption in solution. **Journal of Physical Chemistry**, v. 57, p. 385-471, 1906.

GUARATINI, Cláudia C. I.; ZANONI, Maria Valnice B. Corantes têxteis. **Química Nova**, v. 23, n. 1, p. 71-78, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422000000100013>.

GRIGORAŞ, C.-G.; SIMION, A.-I.; FAVIER, L. Exploration of Reactive Black 5 dye desorption from composite hydrogel beads: adsorbent reusability, kinetic and equilibrium isotherms. **Gels**, v. 9, n. 4, art. 299, 2023. DOI: 10.3390/gels9040299. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/gels9040299>. Acesso em: 9 jun. 2026.

GUPTA, V. K.; MITTAL, A.; JAIN, R.; MATHUR, M.; SIKARWAR, S. Adsorption of Safranin-T from wastewater using waste materials—activated carbon and activated rice husks. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 303, n. 1, p. 80-86, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2006.07.036>.

HO, Y. S.; MCKAY, G. Pseudo-second order model for sorption processes. **Process Biochemistry**, v. 34, n. 5, p. 451-465, 1999.

KHATTRI, S. D.; SINGH, M. K. Colour removal from dye wastewater using sugar cane dust as an adsorbent. **Adsorption Science & Technology**, v. 17, n. 4, p. 269-282, 1999. DOI: 10.1177/026361749901700404. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/026361749901700404>. Acesso em: 9 jun. 2026.

KISHOR, R.; PURCHASE, D.; SARATALE, G. D.; SARATALE, R. G.; FERREIRA, L. F. R.; BILAL, M.; CHANDRA, R.; BHARAGAVA, R. N. Ecotoxicological and health concerns of persistent coloring pollutants of textile industry wastewater and treatment approaches for environmental safety. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 9, n. 2, p. 105012, 2021. DOI: 10.1016/j.jece.2020.105012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343720313610>. Acesso em: 13 jul. 2026.

KUMAR, K. Vasanth; SIVANESAN, S. Equilibrium data, isotherm parameters and process design for partial and complete isotherm of methylene blue onto activated carbon. **Journal of Hazardous Materials**, v. 134, n. 1-3, p. 237-244, 2006.

KUNZ, Airton; PERALTA-ZAMORA, Patricio; MORAES, Sandra Gomes de; DURÁN, Nelson. Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. **Química Nova**, v. 25, n. 1, p. 78-82, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422002000100014>.

KUBŮ, M.; MILLINI, R.; ŽILKOVÁ, N. 10-ring zeolites: synthesis, characterization and catalytic applications. **Catalysis Today**, v. 324, p. 3-14, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2018.06.011>.

LANGE, Catia Rosana. **Estudo das condições operacionais do processo de tingimento de fibra mista acrílico/algodão em bobina cruzada**. 2004. 00 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/87736/212405.pdf?sequence>. Acesso em: 12 jun. 2026

LANGE, Catia Rosana. **Estudo das condições operacionais do processo de tingimento de fibra mista acrílico/algodão em bobina cruzada**. 2004. 00 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/87736/212405.pdf?sequence>. Acesso em: 21 jun. 2026

LANGMUIR, I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. **Journal of the American Chemical Society**, v. 40, n. 9, p. 1361-1403, set. 1918.

LAGERGREN, S. Zur Theorie der sogenannten Adsorption gelöster Stoffe. **Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens Handlingar**, v. 24, p. 1-39, 1898.

LERMEN, Andréia Monique *et al.* A utilização de resíduos agroindustriais para adsorção do corante azul de metileno: uma breve revisão. *Brazilian Applied Science Review*, Curitiba, v. 5, n. 1, p. 273–288, jan./fev. 2021. DOI: <https://doi.org/10.34115/basrv5n1-017>.

LOBO-RECIO, María Ángeles et al. Highly efficient removal of aluminum, iron, and manganese ions using Linde type-A zeolite obtained from hazardous waste. **Chemosphere**, v. 267, 2021, art. 128919. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128919>.

LÓPEZ-DELGADO, A.; ROBLA, J. I.; PADILLA, I.; LÓPEZ-ANDRÉS, S.; ROMERO, M. Zero-waste process for the transformation of a hazardous aluminum waste into a raw material to obtain zeolites. **Journal of Cleaner Production**, v. 255, art. 120178, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120178>.

LUCKTENBERG, Isabela Albertina Barreiros. A indústria têxtil catarinense e o caso da Cia. Hering. 2004. 261 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente, 2004. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/89795>. Acesso em: 21 jun. 2026.

LUZ, Adão Benvindo da. **Zeólitas: propriedades e usos industriais**. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq, 1994. 37 p. (Série Tecnologia Mineral, n. 68).

MELO, Carolina Resmini; RIELLA, Humberto Gracher. Síntese de zeólita tipo NaA a partir de caulim para obtenção de zeólita 5A através de troca iônica. **Cerâmica**, v. 56, n. 340, p. 340-346, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132010000400005>.

MILNITZ, Diego; LUNA, Mônica Maria Mendes. Caracterização da indústria têxtil e de confecções do estado de Santa Catarina: principais elos, parceiros e produtos comercializados. **Revista da UNIFEBE**, Brusque, v. 1, n. 22, p. 166-182, set./dez. 2017. Disponível em:

<https://periodicos.unifebe.edu.br/index.php/RevistaUnifebe/article/view/627>. Acesso em: 12 mai. 2026.

MCCABE, W.L., SMITH, J.C., HARRIOTT, P. Operaciones unitarias en ingeniería química. McGraw-Hill, Inc., Madrid, Esp. 1991.

MCKAY, G. **Use of adsorbents for the removal of pollutants from wastewaters**. Florida: CRC Press, Inc., 1996.

MOREIRA, Sarah de Abreu. **Adsorção de íons metálicos de efluente aquoso usando bagaço do pedúnculo de caju: estudo de batelada e coluna de leito fixo**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

NASCIMENTO, Ronaldo Ferreira do et al. **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais**. Fortaleza: Imprensa Universitária, UFC, 2014.

PASCHOAL, F. M. M.; TREMILIOSI-FILHO, G. Aplicação da tecnologia de eletrofloculação na recuperação do corante índigo blue a partir de efluentes industriais. **Química Nova**, São Paulo, v. 28, n. 5, p. 766-772, 2005.

PATEL, H. Review on solvent desorption study from exhausted adsorbent. **Journal of Saudi Chemical Society**, v. 25, n. 8, art. 101302, 2021. DOI: 10.1016/j.jscs.2021.101302. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2021.101302>. Acesso em: 9 jun. 2026.

PIASKOWSKI, K.; ŚWIDERSKA-DĄBROWSKA, R.; ZARZYCKI, P. K. Dye removal from water and wastewater using various physical, chemical, and biological processes. **Journal of AOAC International**, v. 101, n. 5, p. 1371-1384, 2018.

RÁPÓ, Eszter; TONK, Szende. Factors affecting synthetic dye adsorption; desorption studies: a review of results from the last five years (2017-2021). **Molecules**, v. 26, n. 17, p. 5419, 2021. DOI: 10.3390/molecules26175419.

RAMOS, M. D. N.; CLAUDIO, C. C.; REZENDE, P. H. V.; CABRAL, L. P.; SANTOS, L. A.; MESQUITA, P. L.; AGUIAR, A. Análise crítica das características de efluentes industriais do setor têxtil no Brasil. **Revista Virtual de Química**, v. 12, n. 4, p. 913-929, 2020. Disponível em: <http://static.sites.sbgq.org.br/rvq.sbgq.org.br/pdf/v12n4a18.pdf>.

RIGO, R. T.; PERGHER, S. B. C.; PETKOWICZ, D. I.; SANTOS, J. H. Z. Um novo procedimento de síntese de zeólita A empregando argilas naturais. **Química Nova**, v. 32, n. 1, p. 21-25, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/btLtFPDFmknjNh86Gm4bb6m/>.

RITTER, Magali Teresinha; LOBO-RECIO, María Ángeles; PADILLA, Isabel; NAGEL-HASSEMER, Maria Eliza; ROMERO, Maximina; LÓPEZ-DELGADO, Aurora. Adsorption of Safranin-T dye using a waste-based zeolite: optimization, kinetic and isothermal study. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 136, p. 177-187, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2024.02.005>.

RESENDE, N. G. A. M.; MONTE, M. B. M.; PAIVA, P. R. P. Zeólitas naturais. In: LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. (ed.). Rochas e minerais industriais: usos e especificações. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. p. 890-915.

ROBINSON, T.; McMULLAN, G.; MARCHANT, R.; NIGAM, P. Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. **Bioresource Technology**, v. 77, n. 3, p. 247-255, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00080-8](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00080-8)

RONQUIM, Carlos Cesar. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2010. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 8).

ROY, Nilanjan; DAS, Chanchal; PAUL, Mohuya; IM, Jungkyun; BISWAS, Goutam. Adsorptive elimination of a cationic dye and a Hg(II)-containing antiseptic from simulated wastewater using a metal organic framework. **Molecules**, v. 29, n. 4, 886, 2024. DOI: 10.3390/molecules29040886.

RUTHVEN, D. M. **Principles of adsorption and adsorption processes**. New York: John Wiley & Sons, 1984.

SADIQ, Muhammad Usman; SHAH, Afzal; NISAR, Jan; SHAH, Iltaf. Photoelectrocatalytic detection and degradation studies of a hazardous textile dye Safranin T. *Nanomaterials*, Basel, v. 13, n. 15, p. 2218, 2023. DOI: 10.3390/nano13152218.

SEBRAE/SC. **Santa Catarina em números: macrorregião Vale do Itajaí**. Florianópolis: SEBRAE/SC, 2013. Disponível em: https://amve.org.br/uploads/sites/580/2023/08/1031039_Macrorregiao_Vale_do_Itajaí.pdf. Acesso em: 20 mai. 2026.

SOLTANI, Ali; FARAMARZI, Mehdi; MOUSAVI PARSA, Seyed Aboutaleb. A review on adsorbent parameters for removal of dye products from industrial wastewater. **Water Quality Research Journal**, v. 56, n. 4, p. 181, 2021. DOI: 10.2166/wqrj.2021.023.

SILVA, Weber Lara Lima da. **Otimização do processo de adsorção de azul de metileno em zeólita A sintetizada a partir de uma nova ocorrência de caulim da região de Bom Jardim de Goiás – GO**. 2013. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2013. Disponível em: <https://ri.ufmt.br/handle/1/1830>. Acesso em: 22 jun. 2026.

TOMASSONI, Fabíola. **Remoção de cor de efluente têxtil sintético por processos de eletrocoagulação e adsorção com carvões ativados produzidos a partir de folhas de *Persea americana* Mill. e de *Cassia fistula* L.** 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

VASQUES, Andressa Regina. **Caracterização e aplicação de adsorvente para remoção de corantes de efluentes têxteis em batelada e colunas de leito fixo.** 2008. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

WAY, J. T. On the power of soils to absorb manure and on the source of nitrogen of plants. **Journal of the Royal Agricultural Society**, v. 11, p. 313-379, 1850.