



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

Laura Bin Alcantara

**Análise da remoção de corantes de efluente têxtil sintético utilizando adsorção
com zeólita sintetizada a partir de escórias de alumínio**

Florianópolis
2025

Laura Bin Alcantara

**Análise da remoção de corantes de efluente têxtil sintético utilizando adsorção
com zeólita sintetizada a partir de escórias de alumínio**

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 Bacharela em Engenharia Sanitária e Ambiental

Orientadora: Dra. Magali Teresinha Ritter
Coorientador: Prof. André Aguiar Battistelli, Dr.

Florianópolis

2025

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela
BU/UFSC. Dados inseridos pela própria autora.

Alcantara, Laura Bin

Análise da remoção de corantes de efluente têxtil
sintético utilizando adsorção com zeólita sintetizada a
partir de escórias de alumínio / Laura Bin Alcantara ;
orientadora, Magali Teresinha Ritter, coorientador, André
Aguiar Battistelli, 2025.

72 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico, Graduação em Engenharia Sanitária e
Ambiental, Florianópolis, 2025.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. zeólitas. 3.
adsorção. 4. efluente têxtil sintético. I. Ritter, Magali
Teresinha. II. Battistelli, André Aguiar. III.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia Sanitária e Ambiental. IV. Título.

Laura Bin Alcantara

**Análise da remoção de corantes de efluente têxtil sintético utilizando adsorção
com zeólita sintetizada a partir de escórias de alumínio**

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

Florianópolis, 04 de dezembro de 2025.



Prof. Bruno Segalla Pizzolatti, Dr.
Coordenador do Curso

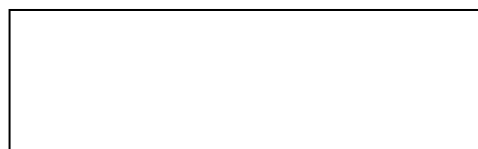
Banca examinadora



Dra. Magali Teresinha Ritter
Orientadora



Prof.(a) Maria Eliza Nagel Hassemer, Dra.
Universidade Federal de Santa Catarina



Me. Amanda Dalalibera
Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 2025

Dedico este trabalho à pesquisa brasileira, às Universidades Federais e ao ensino público, que transformam vidas e constroem caminhos. Dedico também ao meio ambiente, que mais pessoas tenham acesso a uma educação de qualidade e compreendam o valor do recurso mais valioso para a manutenção da vida: a água.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, por me conceder mais uma oportunidade de aprendizado e evolução. Agradeço à Universidade Federal de Santa Catarina pela estrutura de ensino e pelos professores qualificados, que tiveram papel fundamental na construção da minha bagagem profissional. Agradeço ao Laboratório de Reuso das Águas (LaRA) e ao Laboratório Integrado do Meio Ambiente (LIMA), os quais foram essenciais para o desenvolvimento experimental deste trabalho.

Expresso minha profunda gratidão aos meus pais e à minha irmã, pelo suporte e incentivo ao longo de toda a graduação. Ao meu pai, Sidnei, pelas inúmeras caronas até a Universidade ao longo desses anos; e à minha mãe, Rosangela, por sempre me auxiliar na rotina diária. Agradeço também ao meu namorado, pelo apoio, dedicação e paciência, especialmente durante a elaboração deste trabalho.

Sou imensamente grata à minha orientadora, Dra. Magali Ritter, por sua constante presença, orientação e apoio no desenvolvimento desta pesquisa, tanto nos ensaios laboratoriais quanto na escrita. Estendo meu agradecimento ao Professor André Battistelli, pela colaboração e revisão deste trabalho.

Agradeço ainda aos amigos e colegas que encontrei ao longo desses anos de graduação. Em especial, ao querido grupo “Carreta Furacão”, que me acompanha desde 2016; ao “Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio do Meio”, pela companhia diária nas aulas; e às “Divas do CREA” e “Fofocas Econômicas”, amigas de curso e departamento que fizeram parte essencial dessa trajetória.

Por fim, agradeço aos colegas de trabalho e a todas as pessoas que contribuíram para a minha formação, os quais foram essenciais para que eu me tornasse quem sou hoje, tanto pessoalmente quanto como futura engenheira.

“Valham-nos águas divinas, para nossa proteção, para saciar nossa sede, para trazer-nos bem-aventurança e felicidade. Águas soberanas que reinam sobre o que é precioso e sobre a humanidade. Invocamos o bálsamo de vossa cura”.
(Invocação de Rigveda)

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência de adsorção da zeólita sintetizada a partir de escórias de alumínio na remoção dos corantes Safranina-T (ST) e Azul de Metileno (AM) de efluente têxtil sintético. A metodologia utilizou o Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) para a otimização das variáveis dose de zeólita e velocidade de agitação nos ensaios adsorptivos. Adicionalmente, foram conduzidos ensaios cinéticos e isotérmicos para determinar o tempo de contato ideal, a taxa de adsorção e o mecanismo envolvido no processo. Os resultados evidenciaram que a dose de zeólita exerceu influência mais significativa na eficiência de remoção do que a velocidade de agitação. A eficiência máxima de remoção total de corantes foi de 96,98%, para uma concentração inicial de 38,88 mg/L, sob as condições ótimas de 32 g/L de zeólita e 123 rpm de agitação. A cinética indicou um processo rápido, com equilíbrio atingido em 10 minutos, ajustando-se majoritariamente ao modelo de Pseudo-Segunda Ordem ($R^2 = 0,9993$). O equilíbrio isotérmico foi melhor representado pelo modelo de Langmuir ($R^2 = 0,9877$), o que sugere formação de monocamada. Além disso, a análise energética obtida a partir dos modelos de Temkin e Dubinin–Radushkevich indicou que o mecanismo predominante é característico de fisorção. Conclui-se, portanto, que a zeólita obtida a partir de escórias de alumínio apresenta elevado potencial como adsorvente para o tratamento de efluentes têxteis, na remoção de corantes.

Palavras-chave: zeólitas; adsorção; efluente têxtil sintético.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the adsorption efficiency of zeolite synthesized from aluminum slag in the removal of the dyes Safranin-T (ST) and Methylene Blue (MB) from synthetic textile effluent. The methodology employed a Central Composite Rotational Design (CCRD) to optimize the variables zeolite dose and agitation rate in the adsorption experiments. Additionally, kinetic and isothermal studies were conducted to determine the optimal contact time, adsorption rate, and the mechanism involved in the process. The results showed that the zeolite dose had a more significant influence on removal efficiency than the agitation rate. The maximum dye removal efficiency reached 96.98% for an initial concentration of 38.88 mg/L, under optimal conditions of 32 g/L of zeolite and 123 rpm of agitation. The kinetic analysis indicated a rapid process, with equilibrium reached within 10 minutes, and was best fitted by the Pseudo-Second-Order model ($R^2 = 0.9993$). The adsorption equilibrium was best represented by the Langmuir model ($R^2 = 0.9877$), suggesting monolayer formation. In addition, the energy analysis from the Temkin and Dubinin–Radushkevich models indicated that the predominant mechanism is physisorption. It is therefore concluded that the zeolite obtained from aluminum slag has high potential as an adsorbent for the treatment of textile effluents, particularly in dye removal.

Keywords: zeolites; adsorption; synthetic textile effluent; dye removal.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Processo de adsorção.....	24
Figura 2: Fluxograma de ensaios experimentais.....	29
Figura 3: Efluente têxtil sintético produzido.....	30
Figura 4: Estrutura molecular 3D da Safranina-T.....	30
Figura 5: Estrutura molecular 3D do Azul de Metileno.....	31
Figura 6: (A) Azul de Metileno e (B) Safranina-T.....	31
Figura 7: Soluções de Azul de Metileno e Safranina-T.....	32
Figura 8: Zeólita LTA utilizada nos ensaios de adsorção e estudos cinético e isotérmico.....	33
Figura 9: Diluições para as curvas de calibração do efluente têxtil sintético (A), Azul de Metileno (B) e da Safranina-T (C).....	35
Figura 10: Espectrofotômetro utilizado para medir as absorbâncias e fazer a curva de calibração.....	35
Figura 11: Ensaios de adsorção.....	40
Figura 12: Curva de calibração do Azul de Metileno.....	44
Figura 13: Curva de calibração da Safranina-T.....	44
Figura 14: Curva de calibração do efluente têxtil sintético medido a 664 nm (Azul de Metileno).....	45
Figura 15: Curva de calibração do efluente têxtil sintético medido a 520 nm (Safranina-T).....	46
Figura 16: Resultado visual do processo de adsorção para as doses mínima e máxima de zeólita, sob as mesmas condições de agitação e tempo de contato.....	49
Figura 17: Resultado visual do processo de adsorção para diferentes doses de zeólita e taxas de agitação, sob o mesmo tempo de contato.....	49
Figura 18: Gráfico de Pareto dos efeitos estimados das variáveis dose de zeólita e agitação nos processos de adsorção.....	50
Figura 19: Gráfico de superfície resposta e curva contorno da eficiência de remoção dos corantes.....	50
Figura 20: Dados experimentais obtidos nos estudos cinéticos.....	53
Figura 21: Resultado dos ajustes cinéticos.....	54
Figura 22: Dados experimentais obtidos nos estudos isotérmicos.....	57
Figura 23: Resultado dos ajustes aos modelos isotérmicos.....	59

Figura 24: Comparação dos modelos isotérmicos com os dados experimentais. 63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetro de cor de acordo com a classe e categoria do corpo hídrico conforme Resolução CONAMA 357/2005.	28
Tabela 2: Reagentes utilizados na produção do efluente têxtil.	30
Tabela 3: Reagentes utilizados na produção da solução de Safranina-T.....	32
Tabela 4: Reagentes utilizados na produção da solução de Azul de Metileno.....	32
Tabela 5: Características da zeólita utilizada nos ensaios experimentais.	34
Tabela 6: Soluções utilizadas para a construção das curvas de calibração.....	36
Tabela 7: Resposta do DCCR para o planejamento experimental.	39
Tabela 8: Linearização dos modelos cinéticos.	41
Tabela 9: Linearização dos modelos isotérmicos.	42
Tabela 10: Absorbâncias medidas e valores calculados nas curvas de calibração dos corantes puros e da mistura para o cálculo dos resíduos.	46
Tabela 11: Resultado do cálculo dos resíduos para os respectivos corantes.	47
Tabela 12: Resultado das eficiências de remoção dos corantes obtidos nos ensaios de adsorção.....	48
Tabela 13: Resultado dos estudos de cinética de adsorção.	52
Tabela 14: Resultado dos estudos isotérmicos de adsorção.	57
Tabela 15: Parâmetros dos modelos isotérmicos.....	58

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivo Geral.....	17
1.1.2	Objetivos específicos	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DA INDÚSTRIA TÊXTIL	18
2.2	EFLUENTE TÊXTIL E SUAS CARACTERÍSTICAS.....	19
2.3	CORANTES TÊXTEIS NO EFLUENTE	20
2.4	IMPACTOS DO EFLUENTE TÊXTIL AO MEIO AMBIENTE.....	21
2.5	ALTERNATIVAS E TRATAMENTOS PARA A REMOÇÃO DE COR DO EFLUENTE TÊXTIL.....	21
2.6	ADSORÇÃO.....	23
2.7	ADSORVENTES	26
2.8	ZEÓLITAS.....	26
2.9	LEGISLAÇÃO VIGENTE PARA LANÇAMENTO DE EFLUENTES E SEUS PARÂMETROS	27
3	METODOLOGIA	28
3.1	EFLUENTE SINTÉTICO	29
3.2	ZEÓLITA.....	33
3.3	CURVAS DE CALIBRAÇÃO	34
3.3.1	Cálculo dos resíduos.....	37
3.4	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	38
3.4.1	Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR).....	38
3.4.2	Ensaio de Adsorção.....	39
3.4.3	Estudo cinético	40
3.4.4	Estudo isotérmico.....	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
4.1	CURVAS DE CALIBRAÇÃO	43
4.1.1	Cálculo dos resíduos.....	46
4.2	ENSAIOS DE ADSORÇÃO.....	48
4.3	ESTUDOS CINÉTICOS	51
4.3.1	Modelos Cinéticos	53

4.4	ESTUDOS ISOTÉRMICOS.....	56
4.4.1	Modelos Isotérmicos	58
4.5	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS COM A LEGISLAÇÃO BRASILEIRA 63	
5	CONCLUSÃO	65

1 INTRODUÇÃO

A indústria têxtil é um dos principais setores econômicos e industriais no Brasil. De acordo com dados da Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção (ABIT) estima-se que há mais de 33 mil empresas atuando neste ramo no país (ABIT, 2017). No ano de 2016, este setor obteve um faturamento de R\$129 bilhões, representando uma fração de 5,8 % do faturamento industrial brasileiro (ABIT, 2017).

No entanto, este segmento consome uma grande quantidade de água em seu processo produtivo (Pizato et al., 2017). De modo geral, a cadeia de produção da indústria têxtil consiste em três etapas principais: fiação, tecelagem e acabamento (Freitas, 2002). Um dos maiores consumos de água e geração de efluentes ocorre principalmente na etapa de acabamento, composta pelo tratamento, tingimento e estamparia (Araújo; Castro, 1984). O tingimento se destaca pela geração de efluentes coloridos, contendo corantes e outras substâncias orgânicas e inorgânicas de complexidade química (Pizato et al, 2017).

Os corantes utilizados no tingimento dos tecidos possuem uma estrutura molecular complexa, sendo resistentes à luz, mudanças de temperatura e à oxidação (Banerjee; Chattopadhyaya, 2017). O conjunto desses fatores dificulta a sua degradação, tornando o seu tratamento um grande desafio.

O despejo irregular de efluente têxtil nos corpos hídricos sem um tratamento prévio pode ocasionar diversos impactos ambientais negativos. A presença de cor no ambiente aquático dificulta a penetração da luz solar na água, interferindo nos processos de fotossíntese no meio, além de reduzir o oxigênio dissolvido, levando à diminuição da qualidade da água (Lalnunhlumi e Krishnaswamy, 2016; Ramasany et al, 2012). Além disso, o corante, ao entrar em contato com organismos vivos, pode levar a uma bioacumulação, resultando em doenças ou distúrbios mais graves (Banerjee; Chattopadhyaya, 2017).

Para a remoção de cor do efluente têxtil existem algumas alternativas de tratamento, como por exemplo os métodos de coagulação e floculação, filtração por membranas, processos biológicos e processos oxidativos avançados (Oliveira Chaves et al, 2022; Srivastava et al., 2022). Estes, porém, possuem custos elevados e eficiência limitada, podendo gerar poluentes secundários resultantes do tratamento (Tacas et al., 2021).

Neste contexto, a adsorção se destaca por ser um dos métodos mais eficientes e econômicos. A adsorção é uma técnica que se baseia no princípio da transferência de massa, onde a substância a ser adsorvida (adsorvato) adere-se à superfície do material poroso (adsorvente), removendo a substância ou poluente de interesse do meio aquoso ou gasoso (Nascimento et al, 2014; Lobo-Recio et al., 2021)

O carvão ativado é um dos adsorventes mais utilizados nesse processo, mas, outros materiais com potencial adsorptivo têm sido estudados, como é o caso das zeólitas (Ritter et al., 2024).

A zeólita é um mineral aluminossilicato que pode ser encontrado naturalmente no meio ambiente ou sintetizado em laboratório, sendo composto por sílica e alumínio (Mallapur; Oubagaranadin, 2017). Devido às suas propriedades e à sua estrutura regular porosa, este material é aplicado em diversas áreas industriais, como no tratamento de água e efluentes (Collins et al., 2020). Uma alternativa sustentável, visando a diminuição da exploração dos recursos naturais e o reaproveitamento de resíduos, é a síntese de zeólitas a partir de resíduos industriais ricos em sílica e alumínio (Eren et al., 2024). Estudos apontam as zeólitas obtidas a partir de escórias de alumínio como um adsorvente promissor na remoção de corantes de efluentes têxteis (Ritter, 2024).

Além disso, o uso deste material, produzido a partir de resíduos industriais, traz um viés mais sustentável para o tratamento, visto que o resíduo da indústria do alumínio é uma grande problemática, devido ao grande volume gerado, a alta toxicidade, decorrente da presença de metais pesados e o risco de lixiviação e contaminação ambiental (Harmaji et. al, 2024; Raj et. al, 2024). Assim, é possível agregar valor a um resíduo altamente poluente, como alternativa de tratamento de um efluente de grande complexidade e impacto ambiental, trazendo uma perspectiva de economia circular.

Ressalta-se que, esta pesquisa, faz parte dos estudos sobre processos adsorptivos desenvolvidos no Laboratório de Reuso das Águas (LaRA), na Universidade Federal de Santa Catarina. Destacam-se os estudos de Tomassoni (2019), que investigou a remoção de cor do efluente têxtil sintético por meio de processos de eletrocoagulação e de adsorção utilizando carvões ativados produzidos a partir de folhas de Chuva de Ouro (*Cassia fistula L.*) e de abacateiro (*Persea americana Mill.*). Schallemberger (2021) também contribuiu para essa temática ao avaliar a adsorção de corantes têxteis utilizando substratos residuais provenientes da

produção do cogumelo *Pleurotus ostreatus*. Além disso, enfatiza-se o trabalho de Ritter (2024), que analisou o desempenho de zeólitas produzidas a partir de escória salina de alumínio na adsorção da Safranina-T, corante amplamente utilizado na indústria têxtil. Considerando esse panorama, o presente estudo dá continuidade a essa linha de investigação, ampliando o conhecimento acerca da aplicação da zeólita como potencial adsorvente para a remoção de corantes têxteis.

A partir disso, o objetivo deste trabalho é avaliar a capacidade das zeólitas sintetizadas a partir de escórias de alumínio, como material adsorvente na remoção de corantes de efluente têxtil sintético.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a capacidade de adsorção da zeólita sintetizada a partir de escórias de alumínio na remoção de corantes de efluente têxtil sintético.

1.1.2 Objetivos específicos

- i) Estabelecer a taxa de agitação e dose de zeólita ótimas através da análise estatística;
- ii) Determinar o tempo de contato ótimo entre o adsorvente e adsorvato e a taxa de remoção de corante através de ensaios cinéticos;
- iii) Determinar o equilíbrio e mecanismo de adsorção e a capacidade máxima da zeólita através de ensaios isotérmicos;
- iv) Avaliar a capacidade de descoloração do efluente têxtil pelas zeólitas, comparando com a legislação vigente.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA INDÚSTRIA TÊXTIL

A indústria têxtil é um dos setores mais antigos e populares do mundo, apresentando grande relevância econômica (Oliveira Chaves et al., 2022; Selim et al., 2021). Trata-se de um dos principais segmentos industriais global, sendo responsável por aproximadamente 2% do PIB mundial (Shirvanimoghaddam et al., 2020). A Ásia se destaca como o continente líder nesse setor, principalmente devido ao baixo custo em relação a mão de obra (Siliņa; Dāboliņa; Lapkovska, 2024).

O Brasil ocupa uma posição de destaque no cenário global, abrigando a quinta maior indústria têxtil do mundo e a quarta maior indústria de confecção (ABIT, 2017). Além disso, o setor apresenta contínua expansão no país, possuindo a maior cadeia têxtil e de confecção integrada do Ocidente (ABIT, 2017). Com isso, em 2017, esse segmento representou quase 6% do faturamento industrial brasileiro e foi responsável por mais de 16% dos empregos no Brasil (ABIT, 2017).

O processo produtivo têxtil envolve diversas etapas, começando pelo beneficiamento primário para a eliminação de sujeiras e contaminações das fibras. Em seguida, tem-se a mercerização, com a aplicação de alguns produtos químicos para depois passar pela purga, onde aplica-se outros reagentes para preparar as fibras do tecido e seguir para o alveijamento. Esta é uma etapa essencial para a eliminação de cor ou possíveis manchas para receber a etapa final de tingimento e acabamento (Dos Santos; Cervantes; Van Lier, 2007).

Com isso, ocorre um grande consumo de água, colocando a indústria têxtil entre os segmentos que mais consome recursos hídricos, com volumes que podem atingir 400 L/kg de tecido acabado, o que gera em torno de 100 litros de efluente por quilograma de tecido produzido (Holkar et al., 2016).

Desta forma, as indústrias têxteis produzem grandes volumes de efluentes que possuem uma composição complexa devido aos inúmeros produtos químicos e corantes utilizados durante todo o processo, dificultando o seu tratamento (Kunz et al., 2002). Se despejados de forma incorreta em corpos d'água, pode-se gerar um impacto ambiental negativo altamente severo (Karthikeyan et al., 2017).

2.2 EFLUENTE TÊXTIL E SUAS CARACTERÍSTICAS

Os efluentes têxteis possuem uma composição complexa devido aos inúmeros componentes e reagentes utilizados durante o processo industrial (Kunz et al., 2002). Muitos desses insumos são indispensáveis, por desempenharem um papel fundamental na fixação da cor durante o tingimento das fibras (Holkar et al., 2016).

Dessas substâncias, destaca-se a alta concentração de corantes, que são os principais responsáveis pela coloração do efluente. Os corantes são utilizados na etapa de tingimento, podendo ser de vários tipos, o que varia a sua complexidade de remoção (Oliveira Chaves et al., 2022).

Estima-se que 20% dos corantes utilizados no processo de tingimento dos tecidos não se fixam à fibra, sendo descartados no efluente (Honorato et al., 2015). Devido à complexidade química e estrutural de diversos corantes, essas substâncias podem apresentar elevada resistência à degradação biológica, à luz e a agentes oxidantes, o que torna seu tratamento desafiador, limitando a eficácia dos métodos convencionais (Banerjee; Chattopadhyaya, 2017; Kunz et al., 2002; Oliveira Chaves et al., 2022).

Ademais, produtos químicos auxiliares de natureza orgânica e inorgânica são amplamente utilizados nessa indústria (Pizato et al., 2017). Dentre esses produtos podem ser encontrados compostos fenólicos, tensoativos sais dissolvidos e metais pesados, deixando suas características tóxicas (Pizato et al., 2017).

Como consequência, observa-se a elevação de diversos parâmetros do efluente, incluindo: Demanda Química de Oxigênio (DQO) elevada, indicando altas concentrações de matéria orgânica e inorgânica oxidável; pH alcalino, resultante do uso de agentes alcalinizantes para a fixação das cores; elevada quantidade de sólidos sedimentáveis provenientes de fragmentos de tecido; aumento dos sólidos dissolvidos e altos teores de cloreto, adicionados para favorecer a fixação dos corantes (Pizato et al., 2017; Ramasany; Ahmed; Karthik, 2012). Quando descartado incorretamente – sem o devido tratamento – o efluente têxtil pode causar diversos impactos ambientais negativos (Oliveira Chaves et al., 2022).

Devido a coloração do efluente, este fator impede a penetração de luz solar nos corpos hídricos, influenciando nas atividades fotossintéticas e contribuindo com a degradação da qualidade do ambiente aquático (Kunz et al., 2002; Oliveira Chaves et al., 2022). Além de outros compostos que possuem características tóxicas presentes

no efluente têxtil, alguns dos quais carcinogênicos e/ou mutagênicos, podendo impactar nos organismos e até mesmo na saúde humana (Kunz et al., 2002).

2.3 CORANTES TÊXTEIS NO EFLUENTE

Os corantes constituem um dos principais insumos empregados pela indústria têxtil, sendo responsáveis pela coloração das fibras. Em sua maioria, são moléculas aromáticas complexas, frequentemente de origem sintética e derivadas do petróleo (Pizato et al., 2017). Estima-se que 20% dos corantes utilizados na etapa de tingimento são liberados nas águas residuais, devido a ineficiência de fixação nas fibras do tecido (Kunz et al., 2002).

Esses corantes possuem uma estrutura molecular aromática complexa, sendo a maioria solúvel em água (Oliveira Chaves et al., 2022). Com isso, existem diversas classes de corantes com particularidades e estruturas químicas, que são amplamente utilizados, dentre eles: reativos, ácidos, básicos, diretos, azoicos, pré-metalizados entre outros (Oliveira Chaves et al., 2022).

A Safranina-T (ST) é um corante têxtil catiônico amplamente utilizado na indústria têxtil, principalmente para tingir algodão, seda, lã entre outros tipos de tecidos (Saha et al., 2021). A ST é classificada quimicamente como um corante heterocíclico nitrogenado, o que dificulta a sua degradação em comparação aos demais corantes aromáticos (Jialiang et al., 2012). Com isso, torna-se ainda mais difícil o tratamento para a descoloração de efluentes com altas concentrações deste corante, necessitando de metodologias e processos mais complexos e avançados (Ghosh et al., 2021; Sharafinia; Farrokhnia; Lemraski, 2022).

O Azul de Metileno (AM) é um corante sintético de grande relevância histórica e industrial, principalmente na indústria têxtil e em aplicações biológicas e medicinais (Cooksey, 2017). O AM pertence à classe dos corantes básicos, de caráter catiônico, solúvel em água, muito utilizado na indústria têxtil para tingimento de algodões e lãs (Gupta; Suhas, 2009; Honorato et al., 2015). Quando lançado em corpos hídricos sem tratamento prévio e de forma descontrolada, os corantes podem alterar significativamente a coloração da água, reduzindo a penetração de luz e comprometendo processos fotossintéticos. Além dos impactos ecológicos, a exposição humana a esses compostos pode acarretar efeitos adversos à saúde, incluindo aumento da frequência cardíaca, dores de cabeça, náuseas, diarreias, entre

outros sintomas decorrentes de intoxicação aguda (Ghosh; Bhattacharyya, 2002; Kunz et al., 2002).

2.4 IMPACTOS DO EFLUENTE TÊXTIL AO MEIO AMBIENTE

O despejo irregular de efluente têxtil no meio ambiente sem um tratamento adequado, pode acarretar em um impacto ambiental negativo severo, com a degradação dos corpos hídricos e ameaças à fauna e à flora, podendo causar alterações nos ecossistemas (Karthikeyan et al., 2017). A principal característica do efluente têxtil é a cor, devido aos corantes e demais produtos químicos utilizados em toda a cadeia produtiva (Kunz et al., 2002). Ao ser lançado no ambiente aquático, a cor dificulta a passagem dos raios solares, causando alterações nas atividades fotossintéticas. Como consequência, tem-se a diminuição de oxigênio dissolvido, impactando diretamente na biota aquática (Lalnunhlimi; Krishnaswamy, 2016; Ramasany; Ahmed; Karthik, 2012).

Ademais, os efluentes têxteis no meio aquático podem gerar efeitos ecotoxicológicos a curto e longo prazo, em decorrência das substâncias químicas e alguns metais pesados que podem estar presentes em alguns tipos de corante, gerando efeitos acumulativos, podendo atingir a dose letal e ocasionar a morte de alguns organismos (Tomassoni, 2019). Além disso, estudos indicam que podem ser formados subprodutos carcinogênicos e mutagênicos, resultantes da biotransformação de determinados corantes, formando substâncias do grupo aminas aromáticas e benzidinas, intensificando as atividades mutagênicas nos corpos hídricos poluídos pelos efluentes têxteis (Sukriti et al., 2017).

Devido a coloração, os corantes são facilmente perceptíveis, podendo ser notáveis mesmo em concentrações mais baixas. Assim, quando o nível de poluição decorrente do despejo irregular de efluentes têxteis supera a capacidade de autodepuração do corpo hídrico, resulta-se na contaminação, podendo impactar outros corpos receptores e contaminar os organismos e os seres humanos (Bilal et al., 2016).

2.5 ALTERNATIVAS E TRATAMENTOS PARA A REMOÇÃO DE COR DO EFLUENTE TÊXTIL

A remoção de cor e a degradação dos compostos orgânicos complexos presentes nos efluentes têxteis representam um desafio significativo (Khandegar;

Saroha, 2013). Devido à elevada resistência dos corantes à degradação, sua eliminação torna-se limitada quando se utilizam processos de tratamento convencionais (Paschoal; Tremiliosi-Filho, 2005)

Atualmente, diversos métodos são empregados com a finalidade de obter-se uma elevada eficiência, com um resultado que atenda os parâmetros dispostos nas legislações. A coagulação e floculação consiste na adição de reagentes químicos (coagulantes) com objetivo de agrupar as partículas coloidais para facilitar a remoção através da formação de flocos sedimentáveis (Verma; Dash; Bhunia, 2012). Este método se destaca pela facilidade operacional e por apresentar um custo relativamente baixo. Entretanto, possui algumas limitações, como o grande volume de lodo gerado e a baixa eficiência para remoção de alguns corantes dissolvidos (Verma; Dash; Bhunia, 2012). A filtração por membrana se destaca pela sua elevada eficiência, podendo ser aplicada através de técnicas como a microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose reversa, sendo essas três últimas as mais eficazes para a remoção da maioria dos corantes (Gupta; Suhas, 2009). Uma de suas desvantagens é o alto custo e as incrustações nos poros das membranas, que mesmo com sua elevada eficiência, pode não ser viável economicamente (Verma et al., 2012).

Os processos oxidativos avançados (POAs), são alternativas que utilizam agentes oxidantes para a degradação de poluentes, os quais têm sido considerados uma tecnologia bastante promissora, principalmente para a remoção de corantes (Brito; Marinho Silva, 2012; Deng; Zhao, 2015). Dos métodos que utilizam esse processo, pode-se mencionar a ozonização, fotocatálise, oxidação fotoquímica (UV/H₂O₂), Processo Fenton e Foto-Fenton. Essas técnicas possuem como principal vantagem a não geração de lodo. No entanto, suas desvantagens estão atreladas aos custos operacionais elevados, geração de subprodutos tóxicos, restrições no pH entre outras limitações (Katheresan; Kansedo; Lau, 2018).

Já o tratamento biológico, emprega microrganismos para a decomposição dessas substâncias, como fungos, leveduras e bactérias, através de processos aeróbios ou anaeróbios (Gupta; Suhas, 2009). Esse método apresenta como principais vantagens o baixo custo operacional e a sustentabilidade, visto que utiliza organismos para a decomposição da matéria orgânica, diminuindo assim a utilização de produtos químicos. Por outro lado, necessita de uma grande área para implantação e tempo maior para o processo de degradação, não sendo eficiente para todos os corantes (Gupta; Suhas, 2009).

Outra alternativa considerada simples, eficiente e altamente promissora para o tratamento de efluentes têxteis é a eletrocoagulação. O processo baseia-se em reações eletroquímicas que promovem a geração de agentes coagulantes, por meio da oxirredução de eletrodos (Qi; You; Ren, 2017). Uma de suas vantagens é a formação de flocos extremamente estáveis, facilitando a sedimentação e promovendo uma melhor eficiência (Song et al., 2017). Entretanto, suas desvantagens estão no alto consumo energético, custo de substituição dos eletrodos e o alto volume de lodo gerado (Srivastava et al., 2022).

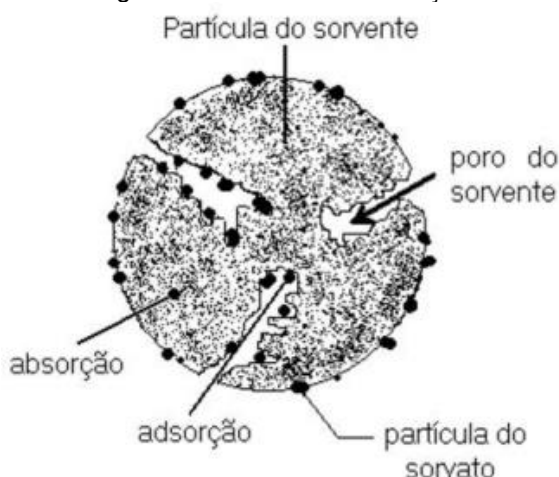
Por fim, a adsorção se sobressai por ser uma metodologia bastante eficaz na remoção de corantes, dependendo principalmente do tipo de material empregado, concentração inicial da substância a ser removida e do tempo de contato (Balarak et al., 2015). Além disso, pode se tornar um método econômico, visto que estudos recentes mostram que resíduos industriais são promissores materiais adsorventes (Mallapur; Oubagaranadin, 2017; Ritter et al., 2024). Outro aspecto favorável da adsorção é a possibilidade de regeneração do adsorvente e também a não geração de lodo. A desvantagem desse processo pode estar relacionada ao custo elevado a depender do material adsorvente e a dificuldade de regeneração (Rida; Bouraoui; Hadnine, 2013).

2.6 ADSORÇÃO

O processo de adsorção (Figura 1) baseia-se no princípio de transferência de massa, onde avalia-se a capacidade de determinados sólidos em reter em sua superfície substâncias dissolvidas em um meio líquido ou gasoso, permitindo a separação da substância do fluido (Nascimento et al., 2014).

Essa interação ocorre entre o adsorvente, que é o material sólido com capacidades adsorptivas, e o adsorvato, substância presente no fluido, a qual será aderida na superfície do material adsorvente (Nascimento et al., 2014). À medida que ocorre a adsorção, as moléculas da fase fluida tendem a se acumular na região interfacial do material adsorvente, impulsionadas pelas forças atrativas de sua superfície (Xavier et al., 2023). Por ser um processo que ocorre na interface sólido-fluido, a adsorção torna-se mais intensa quanto maior for a área superficial específica disponível pelo adsorvente (Nascimento et al., 2014).

Figura 1: Processo de adsorção.



Fonte: Adaptado de Montanher et al. (2007).

Este processo pode ser classificado em dois mecanismos principais: fisorção e a quimissorção.

A fisorção é definida pelo processo físico, que ocorre através da interação entre o adsorvente e o adsorvato, por meio das forças de Van der Waals, que é caracterizada por ser uma ligação fraca (Coulson; Richardson, 1979; Nascimento et al., 2014).

Em relação à termodinâmica, a fisorção envolve quantidades baixas de calor, geralmente inferiores a 10 kcal/mol. Além disso, o processo ocorre em toda a superfície do material adsorvente, sendo considerado um processo não localizado (Alves, 2012; Nascimento et al., 2014). Normalmente, o processo de fisorção tende a ser rápido e reversível, decorrente das forças intermoleculares fracas entre o adsorvente e adsorvato (Nascimento et al, 2014).

Na adsorção química (quimissorção), a interação entre adsorvente e adsorvato envolve um processo de troca de elétrons, resultando na formação de ligações químicas mais intensas do que na fisorção (Alves, 2012; Nascimento et al., 2014).

Além disso, a quimissorção possui um caráter muito específico, diferentemente da fisorção, onde apenas algumas superfícies do material dispõem de sítios ativos aptos para realizar o processo. Ademais, não são todas as moléculas presentes no fluido que são capazes de interagir e se ligar com os sítios ativos do adsorvente (Kunz et al., 2002; Nascimento et al., 2014). Outro fator característico

desse mecanismo, é o calor envolvido, diferente do processo físico, o calor de adsorção pode ser superior à 20 kcal/mol (Alves, 2012; Nascimento et al., 2014).

Outro aspecto que distingue os dois processos é que, na fisissorção, a adsorção pode ocorrer em toda a superfície do adsorvente, ao passo que, na quimissorção, ela se limita aos sítios ativos do material, caracterizando um mecanismo localizado (Nascimento et al., 2014).

Ressalta-se que diversos parâmetros podem influenciar o processo de adsorção, incluindo as propriedades do adsorvente e do adsorvato, bem como as condições do meio em que a adsorção ocorre (Duarte-Neto et al., 2014; Nascimento et al., 2014; Xavier et al., 2023). Entre esses fatores, destaca-se o pH da solução, que afeta diretamente o Ponto de Carga Zero (PCZ) do material – valor de pH no qual a superfície do adsorvente apresenta carga líquida nula (Nascimento et al., 2014). A concentração inicial do adsorvato também exerce papel fundamental, pois interfere tanto na eficiência quanto na capacidade máxima de adsorção (Umpierres, 2021; Nascimento et al., 2014). Além disso, a dose de adsorvente utilizada, o tempo de contato e a temperatura do sistema são variáveis determinantes para o desempenho do processo (Nascimento et al., 2014).

A determinação do mecanismo de adsorção, assim como a taxa de remoção do adsorvato e o tempo de equilíbrio ocorre através das análises de modelos isotérmicos e cinéticos, respectivamente.

A cinética de adsorção é a taxa de remoção do adsorvato em função do tempo, a qual pode envolver transferência de massa de um ou mais moléculas na fase líquida para o interior do adsorvente. Esse processo pode ocorrer através de: transferência de massa externa, difusão intrapartícula ou adsorção na superfície (Nascimento et al., 2014). Os modelos amplamente utilizados para esse tipo de estudo são os de Pseudo-Primeira Ordem (PPO), Pseudo-Segunda Ordem (PSO), Difusão Intrapartícula (DI), Elovich, entre outros (Nascimento et al., 2014).

O estudo das isotermas, por sua vez, são essenciais para determinar o mecanismo em que ocorre a adsorção e para estimar a capacidade máxima de adsorção do adsorvente (Xavier et al., 2023). Os modelos mais utilizados para essa finalidade são os de Langmuir e Freundlich, os quais determinam se o processo ocorre em uma monocamada – que considera que os sítios são homogêneos com energia equivalente, ou se ocorre com a formação de multicamadas, considerando uma superfície heterogênea (Nascimento et al., 2014). Além de outros modelos que

auxiliam principalmente na análise da energia livre de adsorção e na quantidade de energia envolvida, como é o caso das isotermas de Temkin e Dubinin–Radushkevich (D-R) (Nascimento et al., 2014).

Diante disso, esse processo tem sido amplamente estudado para o tratamento de efluente têxteis, especialmente na etapa de polimento final, para a remoção de corantes que resistem às etapas anteriores de tratamento (Baccar et al., 2010; Dáuria et al., 2022).

2.7 ADSORVENTES

Os adsorventes são materiais sólidos porosos que possuem a capacidade de reter moléculas ou íons presentes na fase líquida ou gasosa na sua superfície, através de interações físicas ou químicas (Nascimento et al., 2014). Esses materiais são amplamente utilizados em processos de purificação e separação, principalmente no tratamento de águas e efluentes, atuando na remoção de contaminantes (Sahu et al., 2024). A eficiência está atrelada principalmente às características do adsorvente, como a área superficial, tamanho das partículas, porosidade e a afinidade com o adsorvato (Nascimento et al., 2014). Dentre os materiais utilizados, destaca-se o carvão ativado, o qual possui uma elevada capacidade de adsorção. Entretanto, pode apresentar um custo mais elevado quando utilizado o carvão ativado comercial (Banerjee; Chattopadhyaya, 2017; Hamdaoui, 2006).

Diante disso, diversos estudos têm sido desenvolvidos para buscar alternativas de adsorventes eficientes, sustentáveis e de baixo custo, que possam ser utilizados especialmente no tratamento de efluentes industriais (Hamdaoui, 2006; Rápó; Tonk, 2021; Zhou et al., 2019). Desses materiais, destacam-se os bioadsorventes, como os bagaços de cana-de-açúcar, cascas de frutos, serragem, quitosana proveniente da casca de crustáceos, entre outros (Zhou et al., 2019). Além disso, os minerais e demais materiais argilosos são bastantes promissores para os processos de adsorção, devido a suas elevadas áreas superficiais e baixa toxicidade, como é o caso das zeólitas (Ritter et al., 2024; Zhou et al., 2019).

2.8 ZEÓLITAS

As zeólitas são materiais cristalinos formados por aluminossilicatos, caracterizados por uma estrutura altamente porosa. Nos últimos anos, o interesse por

esses materiais aumentou significativamente, devido às suas propriedades e pela variedade de usos no setor industrial (Eren et al., 2024).

Sua estrutura é constituída por polímeros cristalinos em um arranjo tridimensional de tetraedros podendo conter sílica ou alumínio ligados à átomos de oxigênio para a formação de redes (Carvalho et al., 2010; Eren et al., 2024).

As zeólitas possuem uma área superficial alta e bastante porosa, com poros variando entre 0,3 a 1,0 nm. Além disso, apresentam estabilidade térmica, alta capacidade de troca catiônica e capacidade de regeneração, o que agrega um grande valor para a sua aplicação em diversos setores (Eren et al., 2024).

Embora as zeólitas ocorram naturalmente, a síntese em laboratório permite a obtenção de mais de 200 tipos sintéticos com propriedades controladas, podendo utilizar resíduos industriais como fonte de matéria-prima (Eren et al., 2024; Mallapur; Oubagaranadin, 2017).

Diante disso, têm sido desenvolvidos cada vez mais estudos sobre a síntese de zeólitas a partir de resíduos industriais, com a finalidade de reaproveitar esses rejeitos e empregar alternativas mais sustentáveis (Eren et al., 2024). A indústria do alumínio gera um grande volume de resíduos tóxicos com risco de lixiviação podendo causar contaminações ambientais (Harmaji et al, 2024; Raj et al., 2024). As zeólitas sintetizadas a partir de resíduos industriais, como escórias de alumínio, já demonstraram sua capacidade na remoção de alguns corantes e também de alguns metais pesados através de processo adsortivos (Carvalho et al., 2010; Eren et. al, 2024; Lobo-Recio et al., 2021; Ritter et al., 2024; Turp et al., 2020).

Nesse contexto, o presente trabalho avalia a capacidade de zeólitas sintetizadas a partir de escórias de alumínio na remoção de corantes de um efluente têxtil sintético.

2.9 LEGISLAÇÃO VIGENTE PARA LANÇAMENTO DE EFLUENTES E SEUS PARÂMETROS

Atualmente no Brasil, a legislação que dispõe sobre os parâmetros de lançamento de efluentes em corpos hídricos de diferentes classes é a Resolução CONAMA nº 357 de 17 de março de 2005. Este instrumento estabelece as diretrizes ambientais para o enquadramento de corpos d'água e define os padrões e condições de lançamento de efluentes em todo território nacional (Brasil, 2005). Em 13 de maio

de 2011, foi aprovada a Resolução CONAMA nº430, com o objetivo de alterar e complementar algumas diretrizes da Resolução de 2005 (Brasil, 2011).

Em relação ao parâmetro cor, são estabelecidos pela CONAMA nº 357/2005 os seguintes critérios apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetro de cor de acordo com a classe e categoria do corpo hídrico conforme Resolução CONAMA 357/2005.

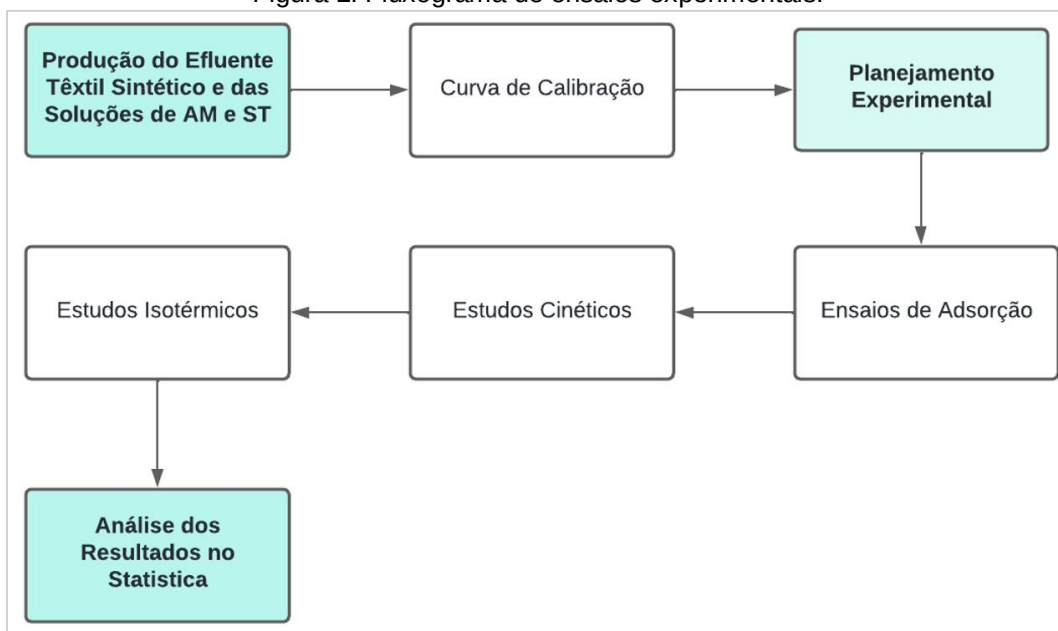
Categoria	Classe	Corantes de fonte antrópicas	Cor verdadeira
Águas Doces	Classe Especial	Devem ser mantidas as condições naturais do corpo de água.	Nível de cor natural do corpo hídrico
	Classe I	Virtualmente ausentes	Nível de cor natural do corpo hídrico
	Classe II	Não permitido a presença de corantes que não sejam removíveis por tratamento convencional	Até 75 mg Pt/L
	Classe III	Não permitido a presença de corantes que não sejam removíveis por tratamento convencional	Até 75 mg Pt/L
	Classe IV	Não há critério específico para cor	Não especificado
Águas Salinas	Classe I	Virtualmente ausentes	Não especificado
	Classe II	Virtualmente ausentes	Não especificado
	Classe III	Virtualmente ausentes	Não especificado
Águas Salobras	Classe I	Virtualmente ausentes	Não especificado
	Classe II	Virtualmente ausentes	Não especificado
	Classe III	Virtualmente ausentes	Não especificado

Fonte: Adaptado de Brasil (2005).

3 METODOLOGIA

Os ensaios experimentais deste trabalho foram realizados no Laboratório de Reuso das Águas (LaRA), pertencente ao departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina. Na Figura 2 é apresentado o fluxograma dos ensaios experimentais realizados.

Figura 2: Fluxograma de ensaios experimentais.



Fonte: Elaborado pela autora.

3.1 EFLUENTE SINTÉTICO

Para a execução dos testes laboratoriais, foi preparado um efluente têxtil sintético (Figura 3), visando simular as substâncias residuais do tratamento biológico de uma estação de tratamento de efluentes industriais, que não foram degradadas pelos microrganismos. Assim, utilizou-se os corantes Safranina-T (ST) e Azul de Metileno (AM), mesclados a outros reagentes utilizados nos processos da indústria têxtil, seguindo o procedimento adaptado de Mo et al. (2007), apresentado na Tabela 2.

A Safranina-T é um corante básico, de caráter catiônico, conhecido como Basic Red 2, CAS nº477–73–6 (Chemical Abstracts Service), com fórmula molecular $C_{20}H_{19}ClN_4$ e estrutura molecular apresentada na Figura 4. O corante utilizado nos testes é da marca Neon ® (Figura 6).

O Azul de Metileno também é um corante básico muito utilizado na indústria têxtil, conhecido internacionalmente como Basic Blue 9, possui CAS 122965-43-9, com a fórmula molecular $C_{16}H_{18}ClN_3S \cdot H_2O$ e estrutura apresentada na Figura 5. Utilizou-se o Azul de Metileno da marca QHEMIS ® (Figura 6).

Tabela 2: Reagentes utilizados na produção do efluente têxtil.

Reagente	Quantidade
Safranina-T (Corante 01)	0,04 g
Azul de Metileno (Corante 02)	0,04 g
NaCl (Cloreto de Sódio)	4,00 g
Na ₂ SO ₄ (Sulfato de Sódio)	0,376 g
Água deionizada	2,00 L

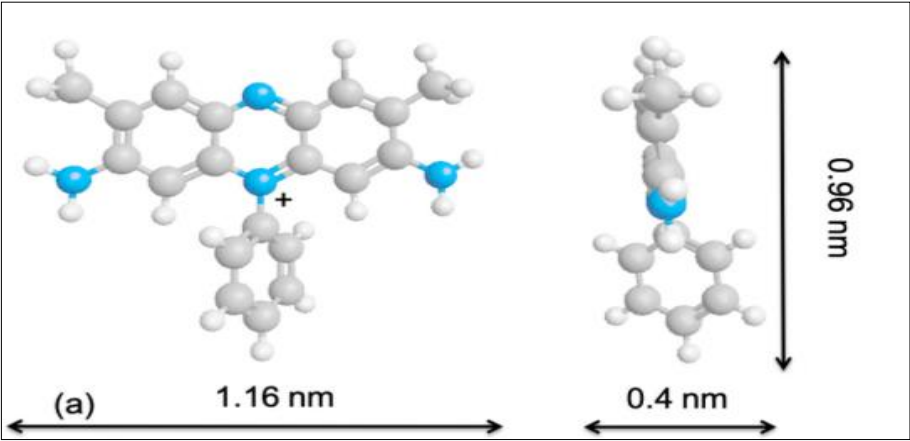
Fonte: Adaptado de Mo et al. (2007).

Figura 3: Efluente têxtil sintético produzido.



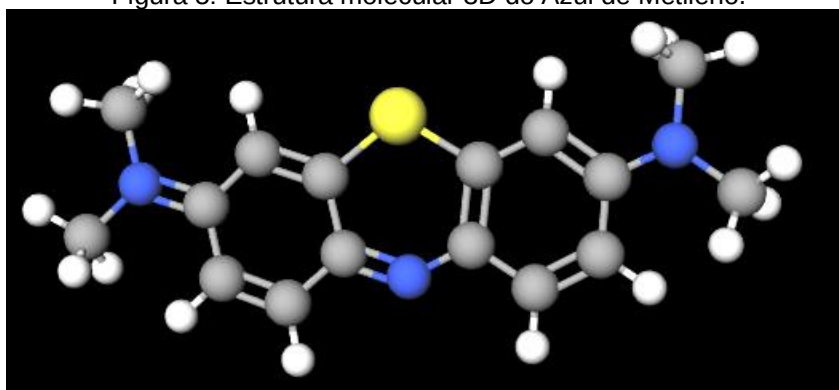
Fonte: Acervo da autora (2025).

Figura 4: Estrutura molecular 3D da Safranina-T.



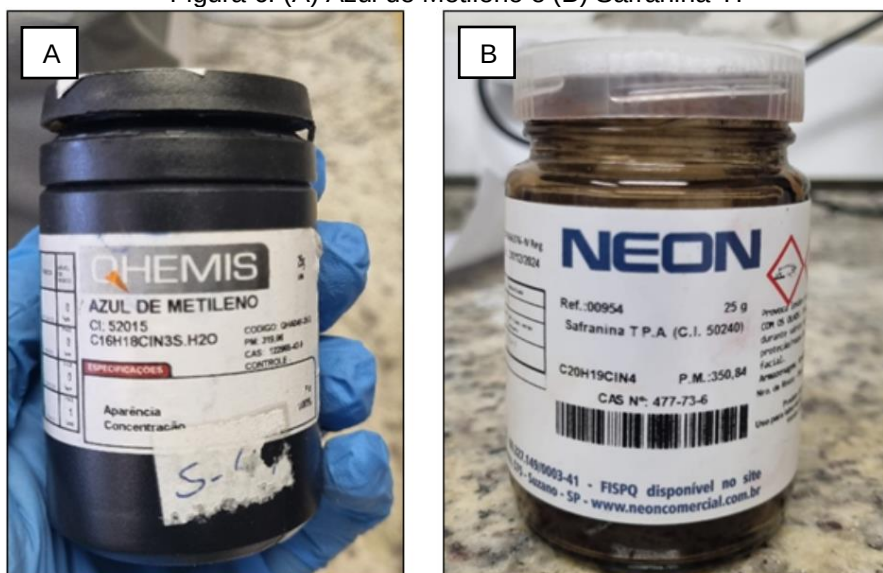
Fonte: Shi et. al (2024).

Figura 5: Estrutura molecular 3D do Azul de Metileno.



Fonte: Molview (2025).

Figura 6: (A) Azul de Metileno e (B) Safranina-T.



Fonte: Acervo da autora (2025).

Para a obtenção das curvas de calibração de cada corante, foram preparadas soluções individuais de Safranina-T e Azul de Metileno (Figura 7), utilizando os mesmos reagentes empregados na produção do efluente sintético. As quantidades de reagentes utilizadas estão apresentadas nas Tabela 3 e Tabela 4.

Figura 7: Soluções de Azul de Metileno e Safranina-T.



Fonte: Acervo da autora (2025).

Tabela 3: Reagentes utilizados na produção da solução de Safranina-T.

Reagente	Quantidade
Safranina-T (Corante 01)	0,005 g
NaCl (Cloreto de Sódio)	0,50 g
Na ₂ SO ₄ (Sulfato de Sódio)	0,047 g
Água deionizada	0,25 L

Fonte: Adaptado de Mo et. al (2007)

Tabela 4: Reagentes utilizados na produção da solução de Azul de Metileno.

Reagente	Quantidade
Azul de Metileno (Corante 02)	0,005 g
NaCl (Cloreto de Sódio)	0,50 g
Na ₂ SO ₄ (Sulfato de Sódio)	0,047 g
Água deionizada	0,25 L

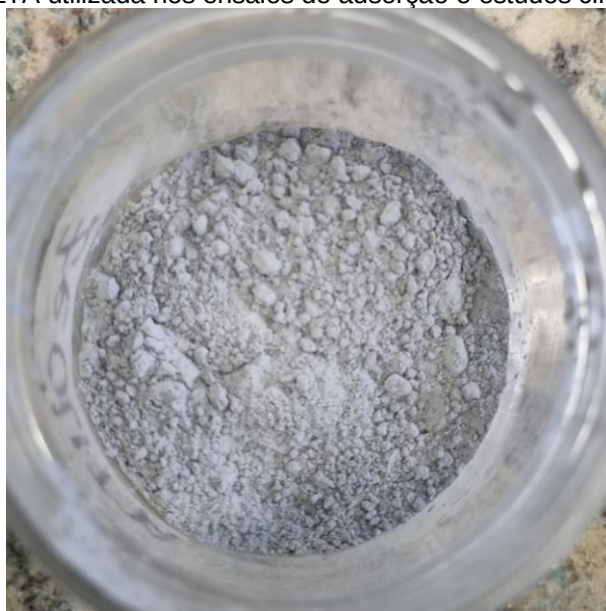
Fonte: Adaptado de Mo et. al (2007)

A partir dessas soluções foi possível elaborar as curvas de calibração do efluente sintético e das soluções individuais de ambos os corantes no espectrofotômetro UV-Vis.

3.2 ZEÓLITA

Para os ensaios de adsorção e estudos cinético e isotérmico, utilizou-se como adsorvente uma zeólita Linde Tipo-A (LTA) (Figura 8) sintetizada a partir de resíduos de alumínio em condições de 80°C por 12 horas (Lobo-Recio et al., 2020). As características físico-químicas da zeólita utilizada estão apresentadas na (Tabela 5).

Figura 8: Zeólita LTA utilizada nos ensaios de adsorção e estudos cinético e isotérmico.



Fonte: Acervo da autora (2025).

Tabela 5: Características da zeólita utilizada nos ensaios experimentais.

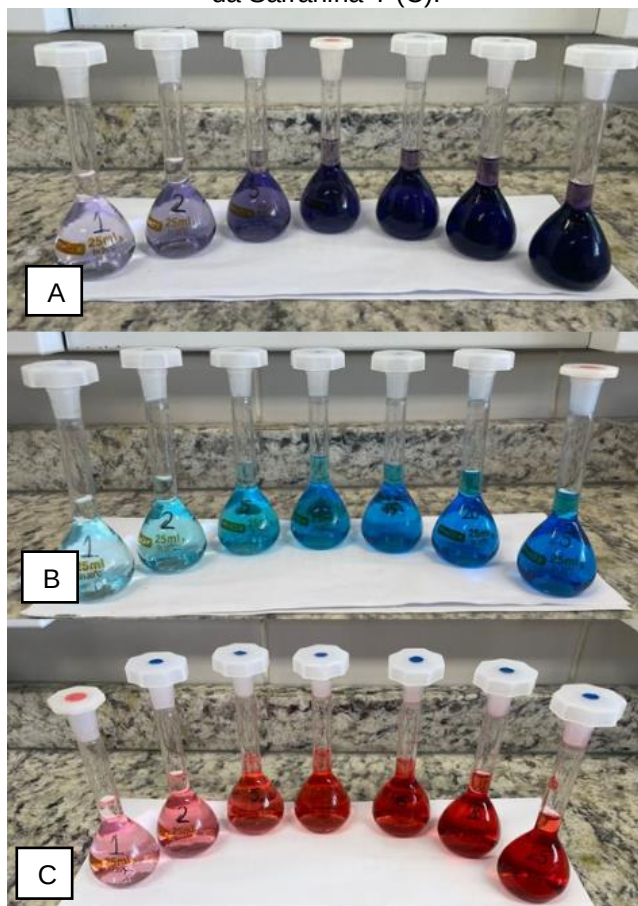
Características da Zeólita	
Capacidade de Troca Iônica	1,70 meq/g
Área superficial específica (SBET)	19,70 m ² /g
Potencial Zeta (Pz)	5,60

*SBET: Área superficial específica medida pelo método Brunauer–Emmett–Teller (BET)
 Fonte: Adaptado de Lobo-Recio (2020).

3.3 CURVAS DE CALIBRAÇÃO

Para realizar a curva de calibração do efluente sintético e de cada corante individualmente, foram realizadas 06 diluições da solução estoque e das soluções de ST e do AM (Figura 9), medindo-se a absorbância no espectrofotômetro UV-Vis, modelo DR 5000, da marca Hach ® (Figura 10). Com base na Lei de Lambert-Beer, que estabelece que a quantidade absorvida de luz de uma solução é diretamente proporcional a sua concentração, foi possível determinar o $\lambda_{\text{máx}}$, o qual corresponde ao comprimento de onda na qual se obtêm a máxima absorção de luz (Canassa, 2018; Lima, 2013).

Figura 9: Diluições para as curvas de calibração do efluente têxtil sintético (A), Azul de Metileno (B) e da Safranina-T (C).



Fonte: Acervo da autora (2025).

Figura 10: Espectrofotômetro utilizado para medir as absorvâncias e fazer a curva de calibração.



Fonte: Acervo da autora (2025).

Na Tabela 6 estão apresentadas as diluições realizadas para a construção das curvas de calibração do efluente têxtil sintético e dos corantes individuais.

Tabela 6: Soluções utilizadas para a construção das curvas de calibração.

Concentração (g/L)	Volume solução estoque (mL)	Volume água deionizada (mL)
1,6	1,00	24,00
3,2	2,00	23,00
8	5,00	20,00
16	10,00	15,00
24	15,00	10,00
32	20,00	5,00
40	25,00	0,00

Fonte: Elaborado pela autora.

3.3.1 Cálculo dos resíduos

Para avaliar a adequação das curvas de calibração utilizadas na quantificação dos corantes, foram calculados os resíduos entre as absorvâncias observadas nas curvas da mistura (efluente sintético) e aquelas previstas pelas curvas puras de cada corante (ST e AM). Os resíduos representam a diferença entre o valor experimental e o valor previsto pelo modelo, funcionando como um indicador de ajuste (Equação 1).

$$\text{Resíduo} = \text{Absorvância da mistura} - \text{Absorvância da curva pura} \quad \text{Eq.1}$$

Com isso, procedeu-se à medição das absorvâncias de cada corante em suas respectivas curvas puras, bem como na curva construída para o efluente têxtil sintético. A partir desses valores, aplicaram-se as equações de calibração correspondentes, obtendo-se as absorvâncias previstas para cada corante. Em seguida, esses valores foram inseridos na Equação 2, permitindo determinar a diferença entre a resposta experimental e a resposta prevista pelas curvas puras. Em seguida, realizou-se a soma dos quadrados dos resíduos, a fim de quantificar o erro global.

Esse procedimento possibilitou avaliar a existência de interferências e a adequação das curvas para quantificação individual dos corantes.

3.4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

3.4.1 Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR)

Para otimizar as condições experimentais e determinar a quantidade de ensaios necessários, utilizou-se o software STATISTICA 13.3 ®, empregado na análise de dados. Para tanto, aplicou-se a ferramenta Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), um método de planejamento fatorial experimental amplamente utilizado, que possibilita uma análise estatística otimizada com o mínimo de experimentos dentro de um nível de confiança estabelecido (Myers; Montgomery, 1995).

Diversos fatores como a temperatura, pH e concentração do adsorvato, podem influenciar significativamente no processo de adsorção (Duarte-Neto et al., 2014). No entanto, por serem características próprias do efluente e, portanto, de difícil padronização, optou-se por concentrar a investigação em variáveis passíveis de controle operacional durante o tratamento. Diante disso, este estudo avaliou a influência da dose de zeólita (g/L) e a taxa de agitação (rpm) sobre a eficiência do processo.

Estudos demonstram que a taxa de agitação tem uma grande influência sob o processo de adsorção, pois o aumento da velocidade permite que ocorra uma maior transferência de massa do corante para o adsorvente, devido à agitação das partículas (Dáuria et al., 2022). Ademais, a dose do adsorvente também influencia no processo de adsorção, visto que tem-se um maior número de sítios disponíveis para interagir com o adsorvato (Zhou et al., 2019).

Com a definição de dois fatores e um bloco, o programa resultou em um total de 12 ensaios a serem realizados (Tabela 7). O delineamento empregou escores fatoriais (-1 e +1), representando a variação mínima e máxima das variáveis, além de quatro pontos centrais (0), fixados em 20,00 g/L de zeólita e 120 rpm de agitação, estabelecidos a partir de testes preliminares. Também foram incluídos os pontos axiais (-1,414 e +1,414) calculados conforme a Equação 2.

$$\alpha = (2^n)^{1/4} \quad \text{Eq. 2}$$

Sendo,

α = Distância axial do ponto central;

n = número de variáveis dependentes;

Assim, foram determinados os valores máximos e mínimos a serem testados, tanto para a dose de zeólita quanto para a taxa de agitação (Tabela 7). Os 12 ensaios foram realizados em duplicata, totalizando 24 ensaios.

Tabela 7: Resposta do DCCR para o planejamento experimental.

Nº ensaio	Nível do fator	Taxa de Agitação (rpm)	Nível do fator	Dose Zeólita (g/L)
1	-1	100	-1	10
2	+1	140	-1	10
3	-1	100	+1	30
4	+1	140	+1	30
5	0	120	-1,414	3
6	0	120	+1,414	37
7	-1,414	90	0	20
8	+1,414	150	0	20
9 (C)	0	120	0	20
10 (C)	0	120	0	20
11 (C)	0	120	0	20
12 (C)	0	120	0	20

(C): Pontos Centrais;
Fonte: Elaborado pela autora.

3.4.2 Ensaios de Adsorção

Para a realização dos ensaios de adsorção, inicialmente foram conduzidos testes preliminares com o objetivo de determinar o tempo de contato mais adequado, considerando também informações reportadas na literatura. Os resultados apontaram que o tempo de 5 minutos apresentou o melhor desempenho, sendo, portanto, adotado como parâmetro para os ensaios subsequentes.

Com isso, os ensaios de adsorção foram realizados adicionando 50 mL da solução estoque de efluente têxtil sintético e as zeólitas adsorventes em Erlenmeyers de 125 mL. As massas de zeólita foram pesadas utilizando uma balança analítica com quatro casas decimais de precisão. Os Erlenmeyers foram mantidos sob agitação em um agitador mecânico “Banho Dubnoff”, modelo NT 232, da marca Novatecnica® (Figura 11). Os ensaios foram conduzidos seguindo os valores estabelecidos no planejamento experimental, conforme apresentado na Tabela 7. A temperatura foi mantida em 23°C (temperatura ambiente) e o tempo de contato, determinado em testes iniciais, realizados previamente, foi de 5 minutos.

Figura 11: Ensaios de adsorção.



Fonte: Acervo da autora (2025).

Após passado o tempo de contato estabelecido, as amostras foram filtradas a vácuo com microfiltros de fibra de vidro da marca Macherey-Nagel ®. Em seguida, foi medida a absorvância no espectrofotômetro UV-Vis utilizando uma cubeta de quartzo, nos comprimentos de onda de 520 nm e 664 nm, que correspondem à Safranina-T e ao Azul de Metileno, respectivamente. O branco foi medido com água deionizada. Para quantificar a remoção total de corantes (quantidade de ST e AM), utilizou-se a soma das concentrações obtidas nos picos característicos nas curvas de calibração das soluções puras de ST e AM. Em seguida, aplicou-se a Equação 3, para verificar a eficiência de remoção da zeólita, expressa em porcentagem.

$$E(\%) = \frac{(C_0 - C)}{C_0} \times 100 \quad \text{Eq. 3}$$

Sendo,

E(%): Eficiência de remoção do corante em %;

C₀: Concentração inicial do corante (g/L);

C: Concentração final do corante (g/L).

3.4.3 Estudo cinético

Os estudos cinéticos são fundamentais para analisar o processo de adsorção, permitindo avaliar o tempo de contato ótimo necessário para alcançar a eficiência de

remoção obtida, além de auxiliar na identificação do mecanismo de adsorção, posteriormente determinado por meio dos ensaios isotérmicos.

Para isso, realizou-se os testes com 50 mL da solução estoque de efluente têxtil sintético, avaliando os tempos de contato de 1, 2, 5, 10, 15 e 30 minutos, com a agitação e dose ótima de zeólita determinadas através do DCCR. A temperatura foi mantida em 23 °C. Os valores referentes à dose de zeólita e a taxa de agitação, foram obtidos através do DCCR, a partir dos ensaios de adsorção, conforme explicado anteriormente. Ressalta-se que os ensaios foram realizados em duplicata.

Para analisar o processo cinético da reação, foram empregados três modelos cinéticos: Pseudo-Primeira Ordem (PPO), Pseudo-Segunda Ordem (PSO) e o Difusão Intrapartícula (ID), aplicando-se a linearização, conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8: Linearização dos modelos cinéticos.

Modelo cinético	Equação	Linearização
Pseudo-Primeira Ordem (PPO)	$q_t = q_e(1 - e^{(-K_1 t)})$	$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - K_1 * t$
Pseudo-Segunda Ordem (PSO)	$q_t = \frac{K_2 q_e^2 t}{1 + K_2 q_e t}$	$\frac{t}{qt} = \frac{t}{q_e} + \frac{1}{K_2 * q_e^2}$
Difusão Intrapartícula (DI)	$q_t = K_{int} t^2 + C$	$qt = K_{int} * t^{0,5} + C$

qt: quantidade de corante adsorvido no tempo (mg/g); qe: quantidade de corante adsorvido no equilíbrio (mg/g); K1: taxa da constante de adsorção da cinética de primeira ordem (L/min); K2: taxa de equilíbrio de adsorção da cinética de segunda-ordem (g/(mg.min)); Kint: constante da taxa de difusão intrapartícula (mg/g.min^{1/2}); C: constante indicativa da transferência de massa externa (mg/g); t: tempo (min);

Fonte: Adaptado de Nascimento et al. (2014).

Estes modelos são os mais comumente empregados na análise cinética e, a partir deles, é possível examinar o mecanismo controlador do processo de adsorção, como reações químicas, difusão e transferência de massa (Nascimento et al., 2014).

3.4.4 Estudo isotérmico

O estudo isotérmico constitui uma etapa fundamental na análise do processo de adsorção, pois permite determinar a quantidade de corante adsorvida por grama de zeólita após o sistema atingir o equilíbrio (qe). Assim, a aplicação do modelo isotérmico que melhor descreve os dados experimentais permite avaliar o mecanismo pelo qual o processo de adsorção ocorre (Nascimento et al., 2014).

Para isso, foram avaliadas concentrações de 10, 15, 19, 24, 29, 39 e 49 mg/L do efluente têxtil sintético, utilizando a taxa de agitação e a dose ótima de zeólita obtidas a partir do DCCR e o tempo de contato ótimo determinado por meio dos ensaios cinéticos.

Os modelos isotérmicos utilizados são apresentados na Tabela 9, juntamente com suas respectivas linearizações.

Tabela 9: Linearização dos modelos isotérmicos.

Modelo isotérmico	Equação	Linearização
Langmuir	$q_t = \frac{q_{max} K_L C_e}{1 + K_L C_e}$	$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_{max}} + \frac{1}{q_{max} K_L}$
Freundlich	$q_e = K_F C_e^{1/n}$	$\ln(q_e) = \frac{\ln(C_e)}{n} + \ln(K_F)$
Temkin	$q_t = \frac{RT}{b_T} \ln(A_T C_e)$	$q_e = B \cdot \ln(C_e) + B \cdot \ln(A_T)$
Dubinin-Radushkevich	$q_e = q_{máx} \exp(-K_{ads} \varepsilon^2)$	$\ln(q_e) = -K_{ads} + \ln(q_{máx})$

qt: quantidade de corante adsorvido no tempo (mg/g); q_{máx}: capacidade máxima de adsorção (mg/g); C_e: concentração de adsorvato no equilíbrio (mg/L); K_L: constante de equilíbrio da isoterma de Langmuir (L/mg); K_F: constante da isoterma de Freundlich (mg/g)^{1/n}; 1/n: coeficiente empírico da isoterma de Freundlich; K_{ads}: constante da isoterma de Dubinin–Radushkevich (mol²/kJ²); ε: energia média de adsorção (kJ/mol); b_T: constante de calor de adsorção de Temkin; R: constante dos gases (0,00814 kJ/mol); T: temperatura (K).

Fonte: Adaptado de Nascimento et al. (2014).

A capacidade de adsorção da zeólita foi determinada usando aplicando-se a Equação 4.

$$q_e = V * \frac{C_0 - C_e}{m} \quad \text{Eq. 4}$$

Sendo,

q_e: Capacidade de adsorção da zeólita (mg/g);

V: volume da solução (L);

C₀: Concentração inicial do efluente (mg/L);

C_e: Concentração do efluente no equilíbrio (mg/L);

m: massa de zeólita (g).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

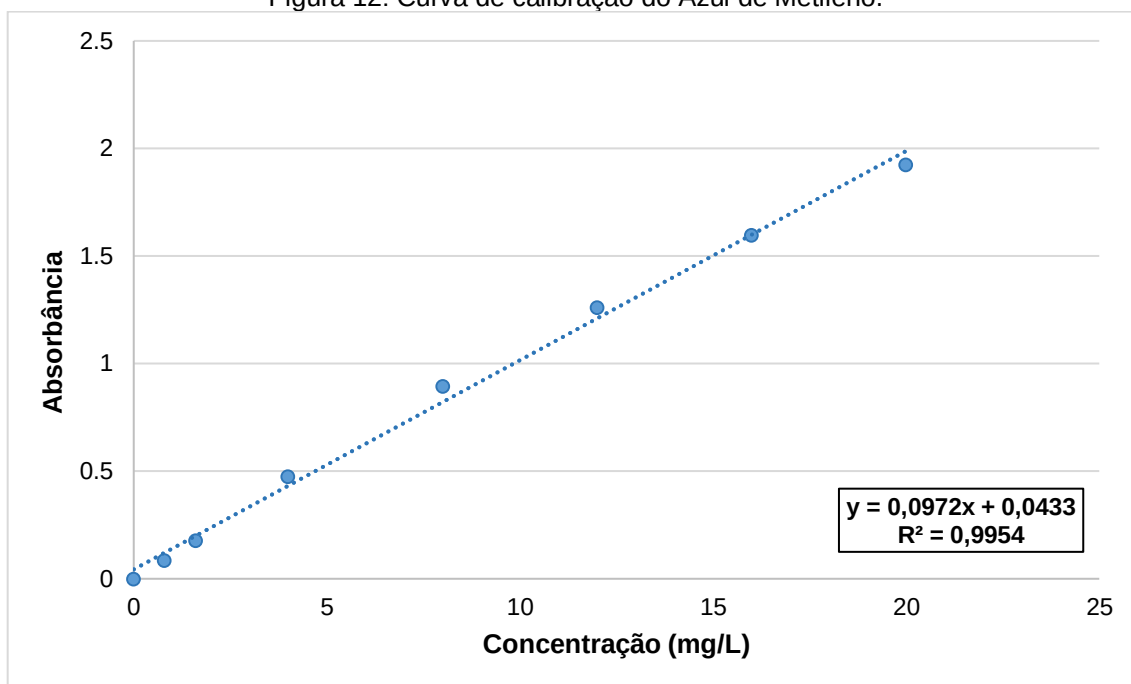
4.1 CURVAS DE CALIBRAÇÃO

As curvas de calibração construídas para os corantes Safranina-T (ST) e Azul de Metileno (AM) foram essenciais para quantificar individualmente as espécies no efluente têxtil sintético. Através delas, foi possível determinar a concentração de cada corante de forma independente, visto que os picos de absorbância não se sobrepuseram, o que pressupõe a inexistência de interferências espectrais significativas entre eles.

Durante o processo de adsorção, a proporção entre a ST e o AM pode se alterar devido às diferenças de afinidades e às taxas de remoção de cada corante pelo adsorvente. Assim, é possível que um dos compostos seja removido mais rapidamente ou em maior quantidade do que o outro, modificando a composição inicial da mistura. É importante ressaltar que, essa variação pode comprometer a representatividade da curva de calibração do efluente sintético, uma vez que ela não reflete com precisão as condições reais do sistema durante o tratamento, especialmente em situações de competição por sítios ativos de adsorção (Yu et al., 2018).

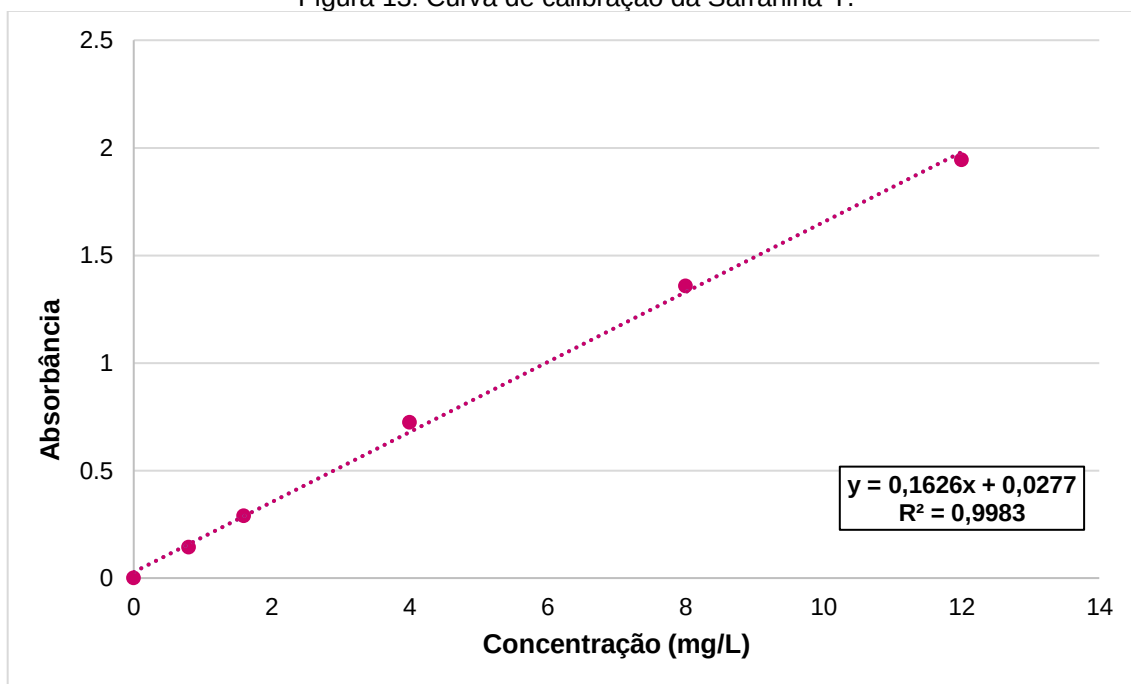
As curvas de calibração da ST e do AM (Figura 12 e Figura 13) foram construídas a partir da medição da absorbância de diferentes diluições em espectrofotômetro UV-Vis, nos comprimentos de onda de máxima absorção dos corantes, 520 nm e 664 nm, respectivamente. Após a análise das curvas, que apresentaram $R^2 = 0,9954$ (AM) e $R^2 = 0,9983$ (ST), observou-se um excelente ajuste linear, confirmando assim, a relação linear direta entre a concentração das soluções e a absorbância medida, conforme previsto pela Lei de Lambert-Beer, a qual estabelece que a absorbância é proporcional à concentração da substância em solução (Canassa, 2018; Lima, 2013).

Figura 12: Curva de calibração do Azul de Metileno.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 13: Curva de calibração da Safranina-T.

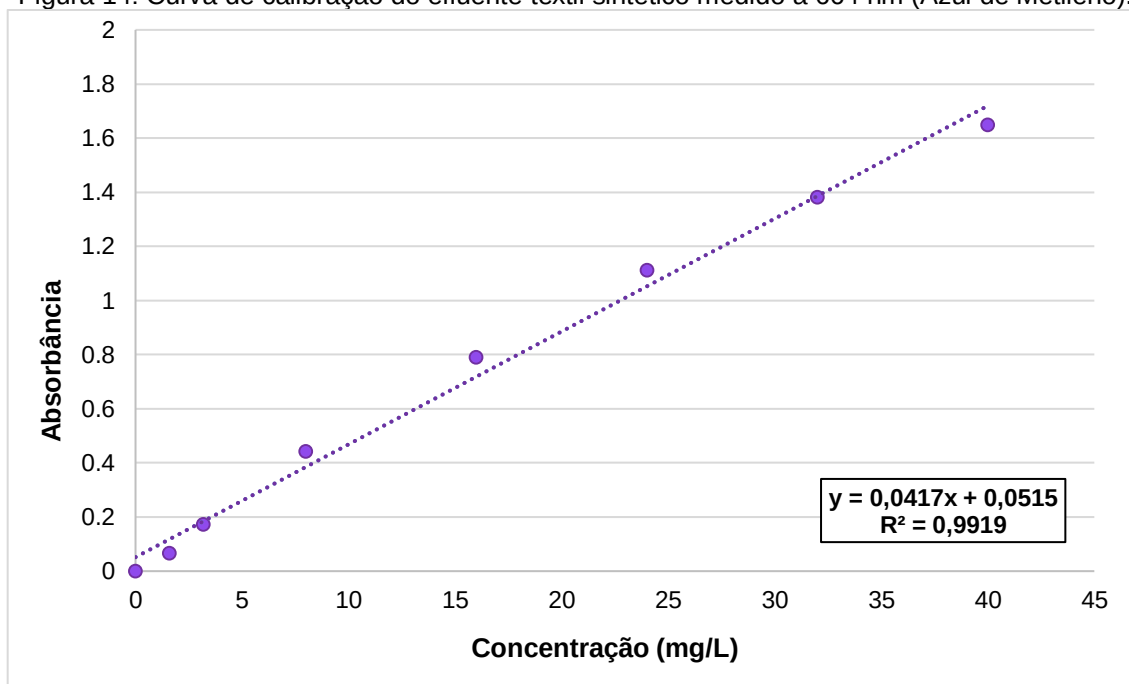


Fonte: Elaborado pela autora.

As curvas de calibração apresentaram comportamento linear, elevado coeficiente de correlação ($R^2 > 0,99$) e boa reprodutibilidade, confirmando a confiabilidade do método espectrofotométrico para determinação quantitativa dos corantes estudados.

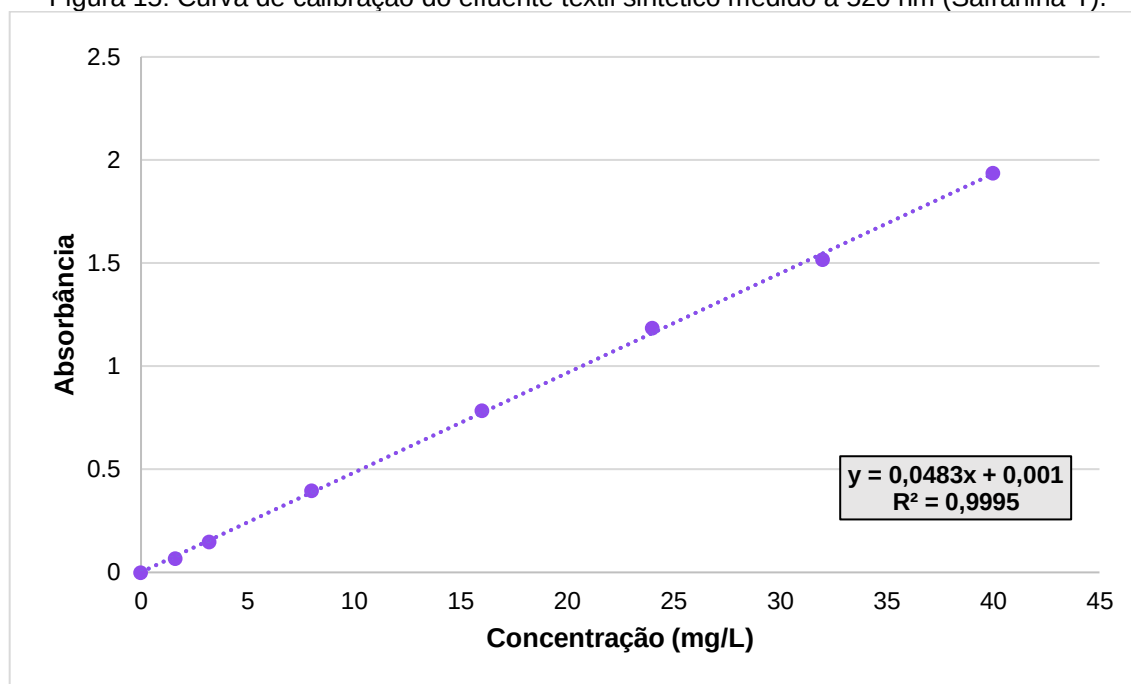
O mesmo procedimento foi adotado para construir a curva de calibração do efluente têxtil sintético, preparado a partir da mistura dos corantes, representando a cor global do sistema. Após a varredura no intervalo do visível (190-700 nm), verificou-se que não houve formação de novos picos de absorção, sendo mantidos aqueles característicos de cada corante. Com base nisso, as leituras de absorbância foram realizadas nos comprimentos de onda específicos de cada corante, possibilitando a avaliação do comportamento da mistura. Mediante a análise dos resultados, observou-se que, para ambas as curvas, os valores do coeficiente de determinação (R^2) foram elevados, indicando um ajuste linear satisfatório, conforme apresentado nas Figura 14 e Figura 15.

Figura 14: Curva de calibração do efluente têxtil sintético medido a 664 nm (Azul de Metileno).



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 15: Curva de calibração do efluente têxtil sintético medido a 520 nm (Safranina-T).



Fonte: Elaborado pela autora.

4.1.1 Cálculo dos resíduos

Para verificar a confiabilidade das medições no espectrofotômetro, foi realizado o cálculo dos resíduos, comparando-se as absorbâncias previstas pelas curvas puras com aquelas obtidas experimentalmente para a mistura.

Desta forma, após a leitura da absorbância das soluções individuais de corante nas curvas correspondentes às soluções puras e a do efluente têxtil sintético, os valores obtidos foram inseridos na variável x das respectivas equações de calibração, conforme demonstrado a seguir na Tabela 10.

Tabela 10: Absorbâncias medidas e valores calculados nas curvas de calibração dos corantes puros e da mistura para o cálculo dos resíduos.

Curva de Calibração dos Corantes Puros			
Corante	Equação da Curva	Absorbância medida (x)	Absorbância na curva pura (y)
ST	$y = 0,1626x + 0,0277$	0,21	0,061846
AM	$y = 0,0972x + 0,0433$	0,12	0,152164
Curva de Calibração do Efluente Têxtil Sintético (Mistura)			
Corantes	Equação da Curva	Absorbância medida (x)	Absorbância na curva da mistura (y)
ST	$y = 0,0483x + 0,001$	1,88	0,091804
AM	$y = 0,0417x + 0,0515$	2,48	0,154916

Fonte: Elaborado pela autora.

Assim, a partir dos valores de absorvância obtidos nas curvas dos corantes puros e da mistura, aplicou-se a Equação 1 para o cálculo dos resíduos. Com isso, foram determinados os resíduos referentes aos comprimentos de onda da ST e do AM e, em seguida, realizado o somatório dos quadrados, tendo os resultados apresentados na Tabela 11.

Tabela 11: Resultado do cálculo dos resíduos para os respectivos corantes.

Resíduo ST (520 nm)	Resíduo AM (664 nm)
0,0299	0,0028
Somatório dos quadrados dos resíduos	$9,05 \times 10^{-4}$

Fonte: Elaborado pela autora.

Os valores obtidos para os resíduos em ambas as curvas dos corantes indicam uma boa concordância entre o modelo e os dados experimentais. O somatório dos quadrados dos resíduos resultou em $9,05 \times 10^{-4}$, demonstrando que os desvios são pequenos e que as curvas puras representam adequadamente o comportamento dos corantes na solução. Esses resultados indicam que as interferências espectrais entre os corantes são desprezíveis, permitindo a utilização das curvas puras para a quantificação da ST e do AM.

Dessa forma, considerou-se que o modelo aplicado representa satisfatoriamente o comportamento experimental, validando o uso das curvas de calibração puras para determinar as concentrações residuais de cada corante.

As curvas obtidas com o efluente sintético, por sua vez, podem ser utilizadas como índice espectral de cor global, complementando a análise individual ao ilustrar a descoloração visual total do sistema.

4.2 ENSAIOS DE ADSORÇÃO

Os ensaios de adsorção foram realizados com 50 mL da solução estoque de corante ($C_0 = 38,88 \text{ mg/L}$), utilizando as respectivas doses de zeólitas e a agitação previamente estabelecida, e o tempo de contato de 5 minutos. Conforme verificado com os cálculos de resíduos, os corantes não apresentaram interferências na leitura espectrofotométrica, desta forma as concentrações finais das amostras foram determinadas a partir das curvas de calibração individuais de cada corante e, posteriormente, somadas para o cálculo da remoção total e da eficiência do processo.

Os resultados de eficiência de remoção dos corantes do efluente têxtil sintético são apresentados na Tabela 12, enquanto a alteração visual da cor após o processo de adsorção é ilustrada nas Figura 16 e Figura 17.

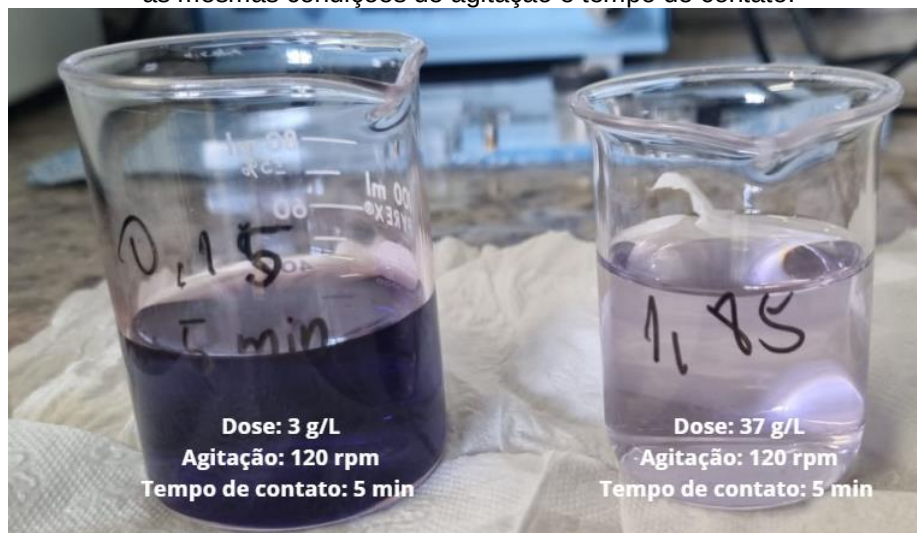
Tabela 12: Resultado das eficiências de remoção dos corantes obtidos nos ensaios de adsorção.

Nº Ensaio	Dose Zeolita (g/L)	Agitação (rpm)	Eficiência (%)
1	10	100	76,66
2	30	100	94,70
3	10	140	74,82
4	30	140	92,84
5	20	90	90,05
6	20	150	93,35
7	3	120	68,13
8	37	120	96,98
9 (C)	20	120	90,81
10 (C)	20	120	90,66
11 (C)	20	120	91,64
12 (C)	20	120	91,59

(C): Pontos Centrais

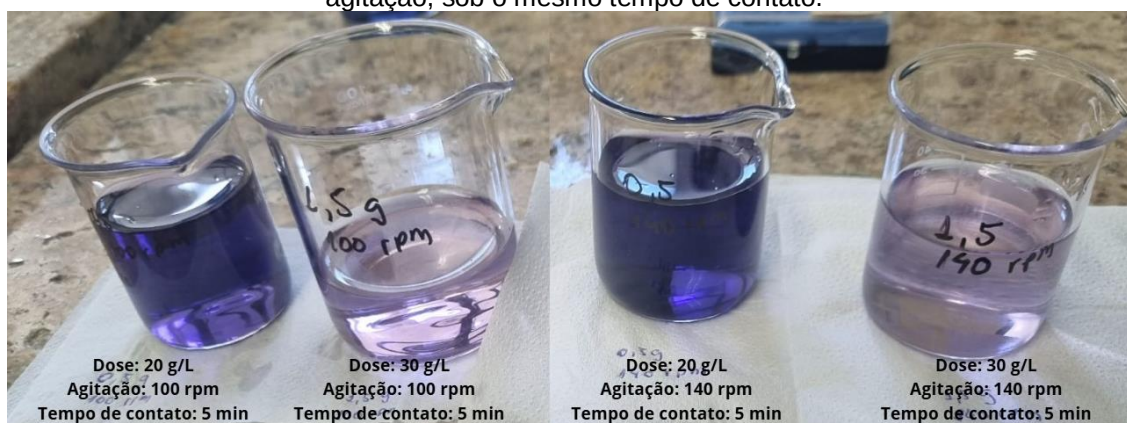
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 16: Resultado visual do processo de adsorção para as doses mínima e máxima de zeólita, sob as mesmas condições de agitação e tempo de contato.



Fonte: Acervo da autora (2025).

Figura 17: Resultado visual do processo de adsorção para diferentes doses de zeólita e taxas de agitação, sob o mesmo tempo de contato.



Fonte: Acervo da autora (2025).

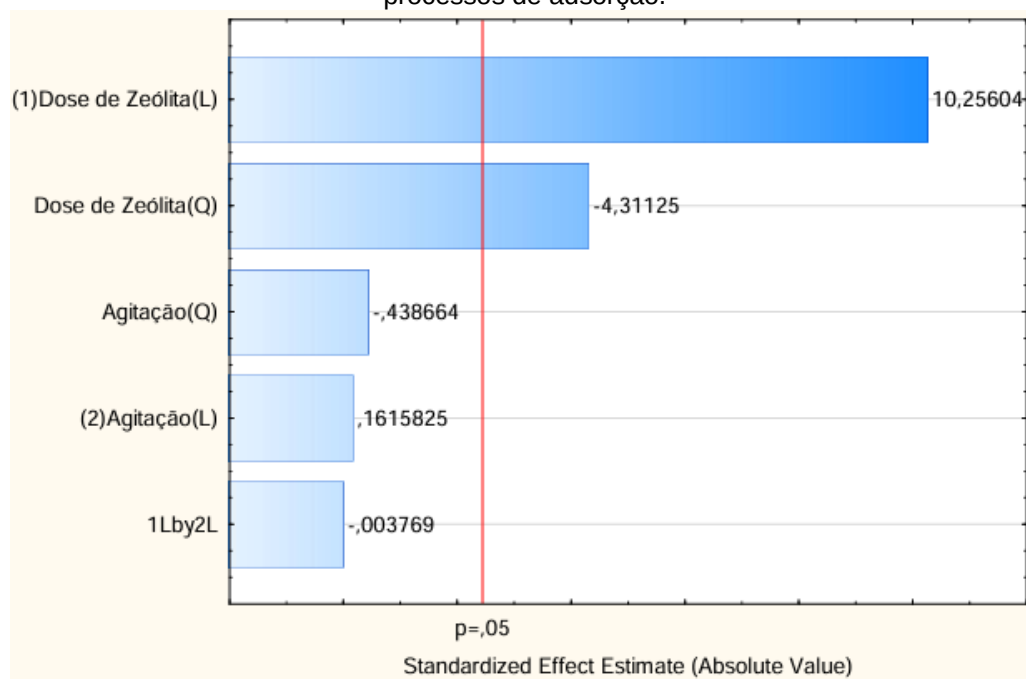
Diante dos resultados obtidos, observou-se que a melhor eficiência de remoção dos corantes foi alcançada com a dose de 37 g/L de zeólita e agitação de 120 rpm, para as quais se registrou uma eficiência superior a 96%.

Os efeitos estimados, utilizados para avaliar a influência de cada fator na eficiência de remoção dos corantes, foram analisados com base no valor de p , com um nível de confiança de 95%. Conforme apresentado no gráfico de Pareto (Figura 18), é possível identificar as variáveis que exerceram maior influência sobre a eficiência do processo.

A partir disso, observou-se que o fator dose de zeólita (efeito tanto linear quanto quadrático) apresentou influência significativa na eficiência de remoção. Por outro lado, a variável taxa de agitação (efeito linear e quadrático) não apresentou

efeitos significativos sobre o processo, assim como o fator de interação entre a dose de zeólita e a agitação, representado por “1Lby2L”. Observou-se que o valor negativo obtido para o termo quadrático da dose de zeólita indica que o aumento de segunda ordem da dose do adsorvente tende a diminuir a eficiência de remoção.

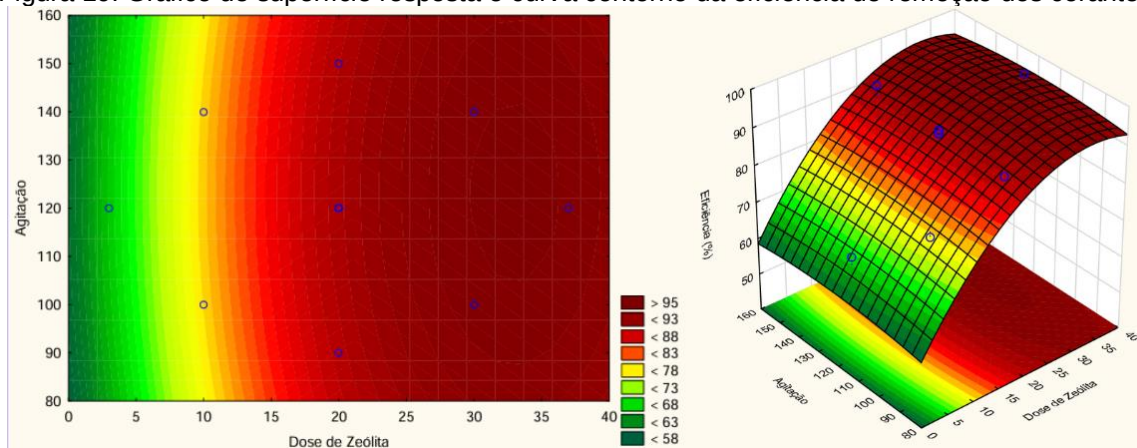
Figura 18: Gráfico de Pareto dos efeitos estimados das variáveis dose de zeólita e agitação nos processos de adsorção.



Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 19 apresenta os gráficos de superfície de resposta e a curva de contorno dos ensaios de adsorção, os quais relacionam a eficiência de remoção dos corantes com a dose de zeólita e a agitação.

Figura 19: Gráfico de superfície resposta e curva contorno da eficiência de remoção dos corantes.



Fonte: Elaborado pela autora.

A partir dos gráficos de superfície de resposta e curva de contorno, verificou-se que as eficiências de remoção dos corantes estão mais vinculadas à dose de zeólita do que à taxa de agitação. Observou-se que, para uma mesma condição de agitação, o aumento da dose de zeólita proporcionou incrementos mais significativos na eficiência de remoção do que o aumento da agitação mantendo-se a mesma dose. Nesse sentido, a maior eficiência de remoção (> 96%) foi alcançada com a dose de adsorvente de 37 g/L e agitação de 120 rpm. Ao avaliar a eficiência nessa mesma faixa de agitação, constatou-se que a redução da dose de zeólita resultou na diminuição proporcional da eficiência, evidenciando a forte dependência desse parâmetro no processo adsorptivo.

Com base nos resultados observados nos gráficos de Pareto, superfície resposta e curva de contorno, verifica-se que a dose da zeólita desempenha maior influência sob a eficiência de remoção do que a taxa de agitação.

Este comportamento também foi observado por Ritter et al (2024), que avaliaram a eficiência de adsorção da zeólita sintetizada a partir de resíduos de alumínio para a remoção da Safranina-T em solução aquosa.

4.3 ESTUDOS CINÉTICOS

Conforme mencionado anteriormente, os ensaios cinéticos foram realizados utilizando a solução estoque do efluente têxtil sintético ($C_0 = 38,88$ mg/L), adotando as condições ótimas de dose de zeólita (32 g/L) e agitação (123 rpm), determinadas a partir da análise do DCCR.

A fim de verificar a taxa de adsorção e o tempo ótimo de contato entre o adsorvente e o efluente, foram aplicados os modelos cinéticos de Pseudo-Primeira Ordem (PPO), Pseudo-Segunda Ordem (PSO) e Difusão Intrapartícula (DI), com os resultados obtidos apresentados na Tabela 13.

Tabela 13: Resultado dos estudos de cinética de adsorção.

C₀: 38,88 mg/L; Dose de Zeólita: 32 g/L; Agitação: 123 rpm; T: 23 C°

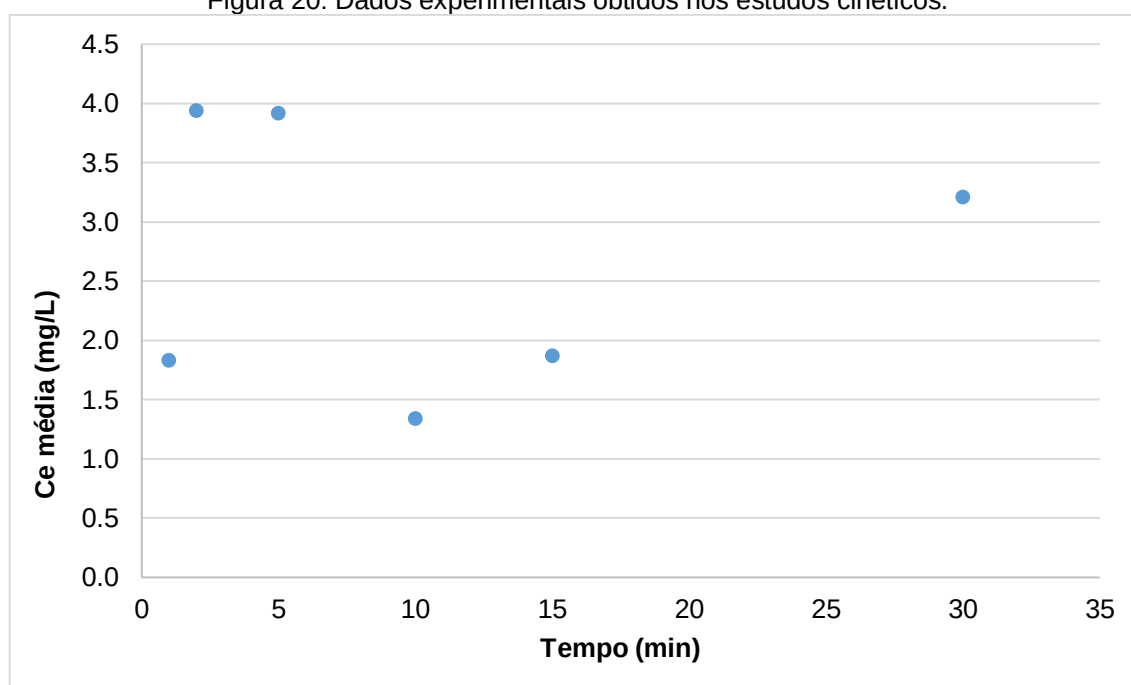
Tempo (min)	Cméd (mg/L)	qt exp.	qe	E (%)	PPO				PSO				ID			
					qt calc.	qe	K1	R²	qt calc.	qe	K2	R²	qt calc.	C	Kint	R²
1	1,84	1,16	1,17	95,28	0,0001	0,0164	-0,0083	0,0018	1,26	1,120	-8,30	0,9993	1,127	1,126	0,0019	0,0081
2	3,94	1,09		89,87	0,0003				1,18				1,128			
5	3,92	1,09		89,92	0,0007				1,14				1,130			
10	1,34	1,17		96,55	0,0013				1,13				1,132			
15	1,87	1,16		95,19	0,0019				1,13				1,133			
30	3,21	1,11		91,74	0,0036				1,12				1,136			

Cméd: concentração média remanescente de corante (mg/L); qt exp: capacidade de adsorção da zeólita obtida experimentalmente (mg/g); qe: capacidade de adsorção da zeólita no equilíbrio (mg/g); E: eficiência de remoção (%); qt calc: capacidade de adsorção da zeólita calculada; K1: taxa da constante de adsorção da cinética de primeira ordem (L/min); K2: taxa de equilíbrio de adsorção da cinética de segunda-ordem (g/(mg.min)); C: constante indicativa da transferência de massa externa (mg/g); Kint: constante da taxa de difusão intrapartícula (mg/g.min^{1/2}).

Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme os resultados obtidos, observou-se que já no primeiro minuto de contato, a zeólita atingiu uma eficiência de remoção de 95,28%, evidenciando a rápida cinética do processo de adsorção dos corantes. Nos minutos subsequentes, verificou-se um pequeno aumento na concentração do corante na solução, atingindo o equilíbrio em aproximadamente 10 minutos, momento em que foi observada a eficiência máxima de remoção, de 96,55%. Na Figura 20 o comportamento dos dados experimentais evidencia que o tempo de 10 minutos é o suficiente para atingir o ponto ótimo. Nos intervalos subsequentes observou-se um acréscimo na concentração remanescente, podendo indicar o início de um processo de dessorção.

Figura 20: Dados experimentais obtidos nos estudos cinéticos.

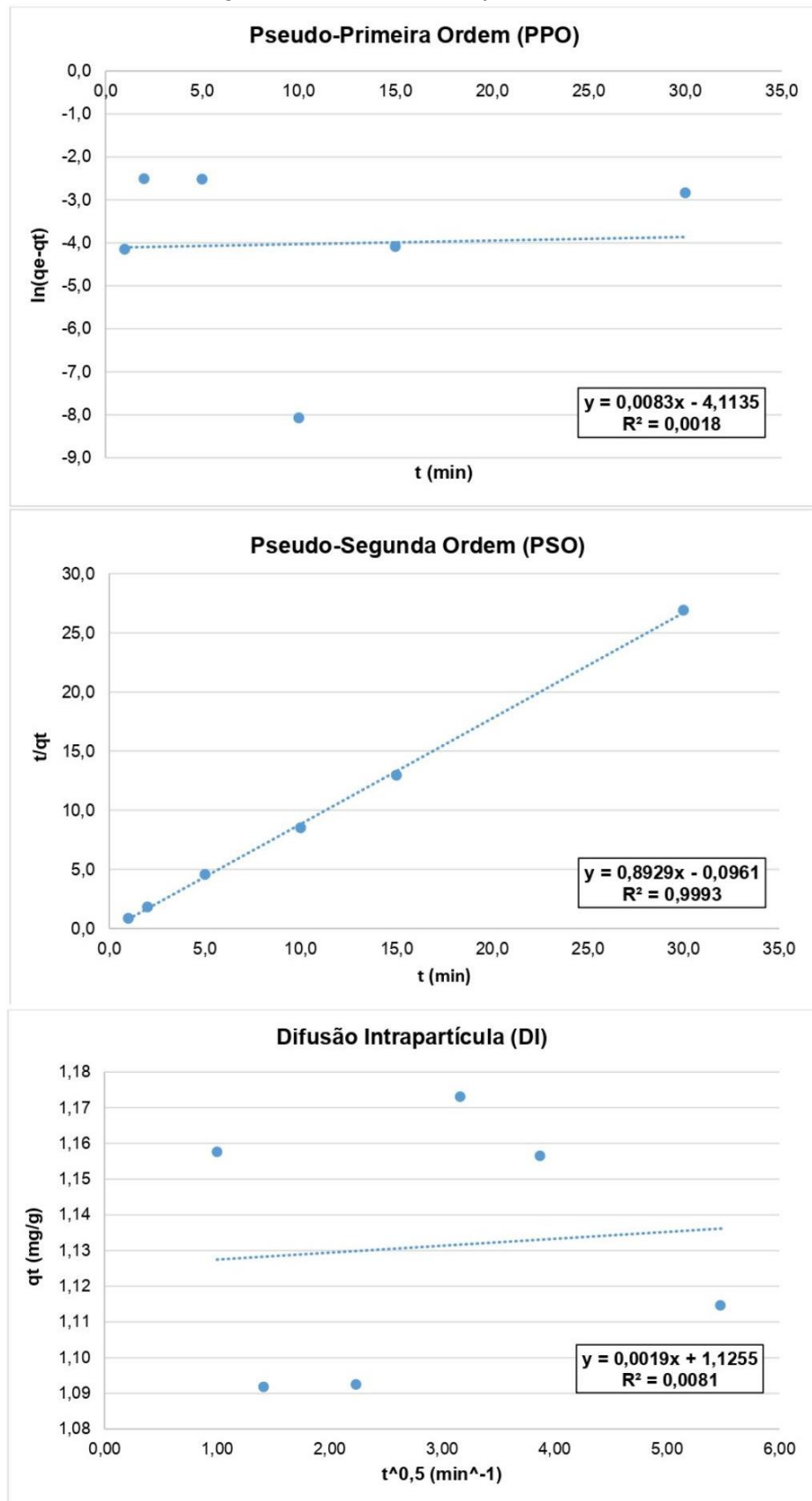


Fonte: Elaborado pela autora.

4.3.1 Modelos Cinéticos

Com o objetivo de estimar os parâmetros cinéticos e prever a taxa de adsorção do corante, foram aplicados os modelos de Pseudo-Primeira Ordem, Pseudo-Segunda Ordem e Difusão Intrapartícula. Para tanto, após o procedimento experimental aplicando a dose de zeólita e taxa de agitação ótimas obtidas através do DCCR, em diferentes tempos de contato, aplicaram-se os modelos cinéticos. Os resultados dos ajustes das cinéticas são exibidos na Tabela 13 e Figura 21.

Figura 21: Resultado dos ajustes cinéticos.



Fonte: Elaborado pela autora.

A partir dos gráficos, percebe-se que o modelo que apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais foi o de Pseudo-Segunda Ordem, o qual resultou em um $R^2 = 0,9993$.

Nota-se que os demais modelos não se adequaram aos dados experimentais, apresentando um R^2 extremamente baixo, tanto para o modelo de Difusão Intrapartícula ($R^2 = 0,0081$), indicando que este não foi um fator limitante no mecanismo de reação (Nascimento et al, 2014), quanto para o modelo de Pseudo-Primeira Ordem, o qual se obteve um $R^2 = 0,0018$, não se adequando aos dados experimentais obtidos.

Outros estudos também apontaram o modelo cinético de Pseudo-Segunda Ordem como o que melhor se ajusta aos dados experimentais em processos de adsorção utilizando zeólitas para a remoção de corantes de efluentes têxteis sintéticos. Sob essa perspectiva, Turp et al. (2020) analisaram o uso de zeólitas naturais e sintéticas na remoção de Azul de Metileno em solução aquosa, empregando concentrações de até 5 mg/L do corante e doses de adsorvente variando entre 2 g/L e 200 g/L. Os autores verificaram que o modelo de Pseudo-Segunda Ordem apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais, sendo a dose de 40 g/L aquela que resultou na maior eficiência de remoção.

Carvalho et al. (2010) conduziram experimentos para avaliar a eficiência de remoção e a cinética de adsorção do corante Reativo Laranja 16, com concentração máxima de 15 mg/L e uma dose de zeólita sintética de 10 g /L. Os resultados também indicaram o modelo cinético de Pseudo-Segunda Ordem como o que melhor se ajustou aos dados experimentais.

Em contrapartida, Ritter et al (2024), realizou o processo de adsorção com zeólita sintetizada para a remoção de Safranina-T em solução aquosa, com concentração máxima de 50 mg/L, onde o modelo de Pseudo-Primeira Ordem foi o que apresentou melhor ajuste, apresentando um $R^2 = 0,9999$. Entretanto, o modelo de Pseudo-Segunda Ordem também demonstrou um resultado muito satisfatório, com um $R^2 = 0,9993$.

O modelo cinético de Pseudo-Segunda Ordem indica que a taxa de adsorção depende do quadrado da diferença entre a quantidade de adsorvato no equilíbrio e a quantidade adsorvida no tempo $((q_e - q_t)^2)$. Em termos práticos, este resultado sugere que o processo é controlado principalmente pela disponibilidade de sítios ativos no adsorvente e pode indicar interações químicas entre o corante e a zeólita (Nascimento

et al, 2014). No entanto, a interpretação desses mecanismos não pode ser determinada apenas por ajustes de curvas simples, sendo necessária a confirmação por meio de estudos isotérmicos (Hu; Pang; Wang, 2022).

Em relação ao tempo ótimo de contato, este é um parâmetro de extrema relevância na avaliação do processo de adsorção, representando o tempo necessário para o sistema atingir o seu equilíbrio (Turp et al., 2020). Algumas pesquisas indicam que este fator pode variar entre 10 minutos até 3 horas, a depender das condições experimentais (Turp et al., 2020). Neste sentido, nos experimentos conduzidos por Turp et al. (2020), foi determinado o tempo de contato ótimo em 60 minutos.

No estudo realizado por Carvalho et al. (2010), observou-se uma melhor eficiência de remoção em tempos de contato menores, mas que apresentaram uma diminuição conforme o tempo aumentou, atingindo seu equilíbrio próximo dos 120 minutos.

No entanto, Ritter et al. (2024), encontraram um tempo ótimo de contato de apenas 1 minuto com uma dose de zeólita de 21,5 g/L, apresentando uma eficiência de remoção superior a 97%.

Diante dos resultados obtidos neste trabalho, foi observado que o tempo de contato entre o adsorvente e a substância a ser removida apresenta grande relevância no tratamento de efluentes têxteis através de adsorção (Carvalho et al., 2010). Além disso, a taxa de remoção da zeólita ficou próxima de 0,1174 mg/g.min com o tempo ótimo de contato alcançado em 10 minutos, o que indica uma cinética breve e eficiente.

A rápida remoção do adsorvato combinada com o alcance do equilíbrio em um curto período de tempo, demonstra que o adsorvente testado apresenta um grande potencial de utilização em processo de adsorção em escala piloto ou industrial (Mal et al., 2006 apud Carvalho et al., 2020; Ritter et al., 2024).

4.4 ESTUDOS ISOTÉRMICOS

A fim de determinar o mecanismo de adsorção do processo e a capacidade máxima de adsorção da zeólita, foram aplicados os modelos isotérmicos de Langmuir, Freundlich, Temkin e Dubinin-Radushkevich. Para tanto, após o procedimento experimental aplicando a dose de zeólita e agitação ótimas obtidas por meio do DCCR, sob o tempo de contato determinado nos ensaios cinéticos, aplicou-se os

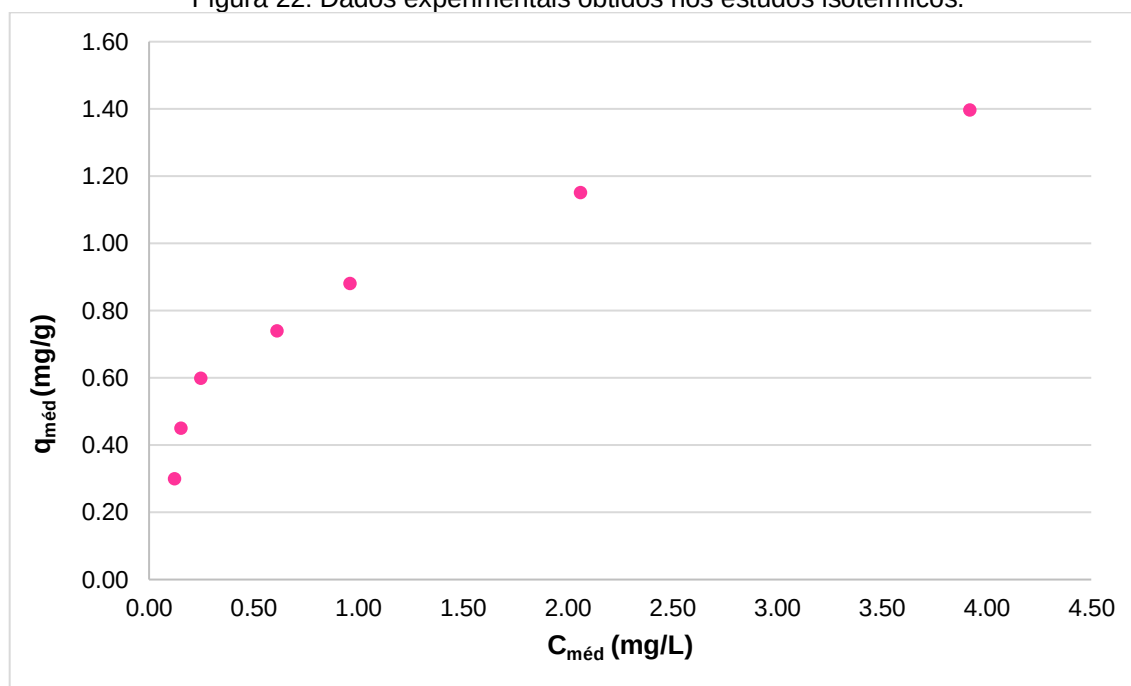
modelos isotérmicos linearizados (Tabela 9), sendo os resultados dos ajustes das isotermas exibidos na Tabela 14 e Figura 22.

Tabela 14: Resultado dos estudos isotérmicos de adsorção.

C0 (mg/L)	Ce (mg/L)	Eficiência (%)	qe (mg/g)
10	0,12	98,77	0,30
15	0,15	98,97	0,45
19	0,25	98,74	0,60
24	0,61	97,49	0,74
29	0,96	96,71	0,88
39	2,06	94,71	1,15
49	3,92	91,95	1,40

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 22: Dados experimentais obtidos nos estudos isotérmicos.



Fonte: Elaborado pela autora.

Diante dos resultados, verificou-se que o processo apresentou melhor eficiência em concentrações mais baixas de corantes, atingindo uma eficiência superior a 98% em concentrações inferiores a 20 mg/L. No entanto, mesmo na concentração mais elevada, de 49 mg/L, a eficiência manteve-se acima de 90%, apresentando um desempenho bastante satisfatório. Além disso, observou-se que a capacidade adsorptiva da zeólita (q_e) elevou-se com o aumento da concentração inicial

do corante, apresentando um valor de 0,30 mg/g para a concentração de 10 mg/L e atingindo 1,40 mg/g na concentração de 49 mg/L.

Esse comportamento também foi observado em outros estudos, uma vez que em concentrações mais altas, ocorre uma maior competição entre as moléculas pelos sítios ativos do adsorvente, o que reduz a eficiência de remoção, mas aumenta a quantidade total adsorvida por unidade de massa do adsorvente (Yusuff; Popoola; Babatunde, 2019). Em contrapartida, em situações de baixas concentrações, há uma grande disponibilidade de sítios ativos para um número reduzido de moléculas de corante, o que favorece a remoção quase completa do adsorvato, aumentando a eficiência de remoção (Banerjee; Chattopadhyaya, 2017).

Ou seja, em concentrações mais elevadas, o corante gera uma força motriz maior para superar a transferência de massa entre o líquido (efluente têxtil sintético) e o sólido (adsorvente), resultando na saturação dos sítios ativos e diminuindo a eficiência de remoção (Yadav et al., 2023).

4.4.1 Modelos Isotérmicos

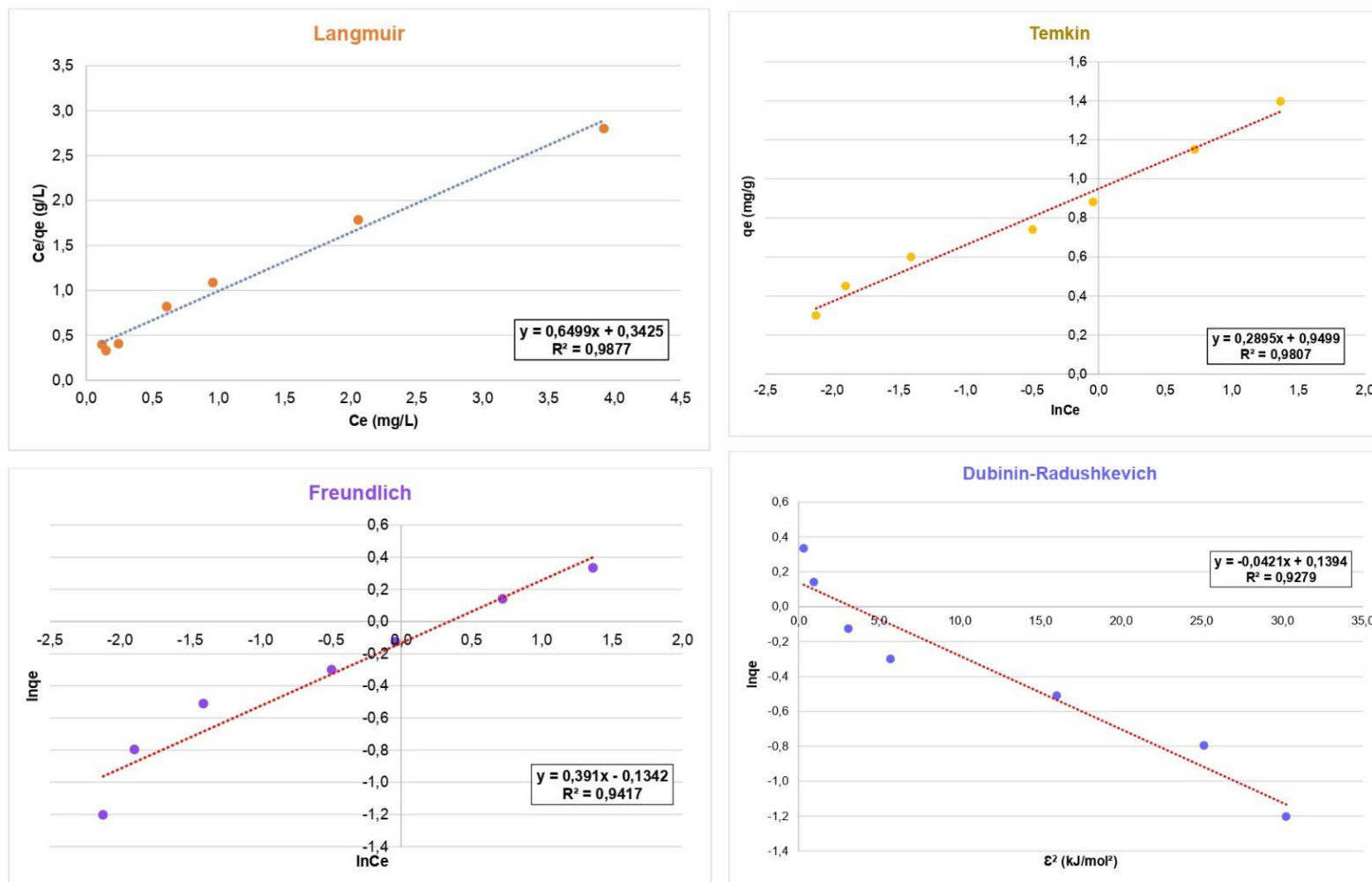
A fim de determinar o mecanismo de adsorção do processo e a capacidade máxima de adsorção da zeólita, foram aplicados os modelos isotérmicos de Langmuir, Freundlich, Temkin e Dubinin-Radushkevich. Para tanto, após o procedimento experimental aplicando a dose de zeólita e agitação ótimas obtidas por meio do DCCR, sob o tempo de contato determinado nos ensaios cinéticos, aplicou-se os modelos isotérmicos linearizados (Tabela 9), sendo os resultados dos ajustes das isotermas exibidos na Tabela 15 e Figura 23.

Tabela 15: Parâmetros dos modelos isotérmicos.

Modelo	Parâmetros		Unidade	R ²
Langmuir	qmáx	1,5387	mg/g	0,9877
	KL	1,8975	L/mg	
Freundlich	Kf	0,8744	(mg/g)*(mg/L) ^{1/n}	0,9417
	n	2,5575	Adimensional	
Temkin	AT	26,6070	Adimensional	0,9807
	bT	8,505	kJ/mol	
Dubinin-Radushkevich	qmáx	1,1496	mg/g	0,9279
	Kads	0,0421	Adimensional	

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 23: Resultado dos ajustes aos modelos isotérmicos.



Fonte: Elaborado pela autora.

A partir dos resultados obtidos, ao comparar o R^2 dos quatro modelos, percebeu-se que o modelo isotérmico de Langmuir foi o que obteve o maior coeficiente de determinação $R^2 = 0,9877$. Em seguida, tem-se os modelos Temkin ($R^2 = 0,9807$), Freundlich ($R^2 = 0,9417$) e Dubinin-Radushkevich ($R^2 = 0,9279$).

O modelo de Langmuir sugere que a adsorção ocorre em uma superfície homogênea com sítios ativos energeticamente equivalentes, formando uma monocamada, sem interação entre as moléculas adsorvidas, ou seja, os sítios ativos são ocupados por uma única molécula de adsorvato (Nascimento et al., 2014).

Os parâmetros $q_{\text{máx}}$ e KL da isoterma de Langmuir representam, respectivamente, a capacidade máxima de adsorção da zeólita e a constante de equilíbrio, que descreve a afinidade entre o adsorvente e o adsorvato (Nascimento et al., 2014). Conforme apresentado na Tabela 15, foram encontrados valores para $q_{\text{máx}} = 1,5387 \text{ mg/L}$ e $KL = 1,8975 \text{ L/mg}$.

De acordo com Nascimento et al. (2014), geralmente, em sistemas eficientes, o adsorvente tende a apresentar um valor elevado para a capacidade máxima de adsorção ($q_{\text{máx}}$) e para a constante de equilíbrio (KL).

O valor de KL pode ser relacionado com a energia livre de adsorção, ou seja, um alto valor de KL , indica que há uma maior afinidade entre a superfície do adsorvente e o adsorvato (Nascimento et al., 2014).

Com base nessas premissas e nos resultados obtidos, percebeu-se que há uma forte interação entre os sítios ativos da zeólita e as moléculas de corantes, demonstrando uma elevada eficiência.

Esse comportamento também foi observado nos trabalhos de Turp et al. (2020) e Carvalho et al. (2010), para os quais ambos obtiveram um melhor ajuste dos dados experimentais ao modelo isotérmico de Langmuir. Turp et al. (2020) relataram valores inferiores de $q_{\text{máx}}$ e KL na adsorção de azul de metileno, sendo observado um valor negativo para a constante, o que sugere uma possível limitação do modelo em representar adequadamente o sistema.

Por outro lado, Carvalho et al. (2010), encontraram valores mais elevados desses parâmetros para a remoção do corante Reativo Laranja 16 a partir da adsorção com zeólitas sintética, apresentando um resultado satisfatório.

Apesar da isoterma de Langmuir não ter sido o modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais de Ritter et al. (2024), ainda assim foram observados valores bastante elevados para $q_{\text{máx}}$ e KL na remoção da Safranina-T, indicando que o

adsorvente, neste caso a zeólita sintetizada a partir de escórias de alumínio, tem uma boa afinidade com o corante.

O modelo de Temkin foi o segundo que melhor se adequou aos dados experimentais, com um $R^2 = 0,9807$. Este modelo dispõe sobre as interações entre o adsorvente e o adsorvato e a distribuição da energia de ligação, onde o calor de adsorção das moléculas na camada tende a diminuir de forma linear, exceto em concentrações muito baixas ou elevadas (Nascimento et al., 2014).

De acordo com os resultados obtidos, foi encontrado um valor de 8,505 kJ/mol para a constante de calor de adsorção de Temkin. Alguns estudos indicam que o processo de adsorção tende a ser físico (fisorção) quando os valores de energia de adsorção se encontram na faixa de 5 a 40 kJ/mol, enquanto valores superiores a 40 kJ/mol estão associados à adsorção química (quimissorção) (Baccar et al., 2010; Girish, 2025). O modelo isotérmico de Dubinin–Radushkevich (D–R) tem como objetivo avaliar o mecanismo de adsorção e estimar a energia média envolvida no processo. Esse modelo baseia-se na teoria do potencial de Polanyi e considera que o mecanismo predominante é o preenchimento dos poros do adsorvente, em vez da formação de monocamadas superficiais, como proposto por outros modelos clássicos (Hutson; Yang, 1997).

A energia média de adsorção (E) é um parâmetro fundamental para a compreensão do mecanismo adsorptivo. Valores de E inferiores a 8 kJ/mol indicam interações fracas e reversíveis entre o adsorvato e o adsorvente, típicas de um processo de adsorção física nos sítios ativos da zeólita (Hosseini Nami; Mousavi, 2023). A partir da análise do modelo de Dubinin–Radushkevich (D–R), obteve-se um valor de $E = 3,45$ kJ/mol, indicando a predominância de um mecanismo de fisorção. Resultados semelhantes foram reportados por Ritter et al. (2024) e Turp et al. (2020), que também observaram baixas energias de adsorção, compatíveis com interações físicas. A isoterma de Freundlich trabalha com o princípio da heterogeneidade, presumindo que o adsorvente é heterogêneo, com a aplicação de uma distribuição exponencial para caracterizar os diversos tipos de sítios de adsorção, os quais possuem energias adsorptivas diferentes (Nascimento et al., 2014).

Desta forma, o modelo sugere que conforme a adsorção avança, a energia envolvida no processo diminui (Freundlich, 1906; Nascimento et al., 2014). Empiricamente, isto ocorre devido a heterogeneidade da superfície do adsorvente,

que apresenta sítios ativos com diferentes energias de adsorção (Nascimento et al., 2014).

Ao analisar os resultados obtidos na aplicação deste modelo aos dados experimentais, obteve-se um valor de $n = 2,5575$. Essa constante é relacionada à heterogeneidade da superfície, e de acordo com Nascimento et al. (2014) um processo adsorptivo é considerado favorável quando a constante n está em um intervalo de 1 a 10. Desta forma, quanto maior o valor de n e menor a relação $1/n$, mais forte é a interação entre o adsorvente e o adsorvato (Nascimento et al., 2014). Quando essa relação for igual a 1, indica que a adsorção é linear, sugerindo que a energia dos sítios ativos é igual. Por outro lado, quando a relação $1/n$ for maior que 1, indica que o adsorvente tem maior afinidade pelo solvente (neste caso, a água), sugerindo uma atração molecular forte entre ambos (Delle-Site, 2001 apud Nascimento et al., 2014).

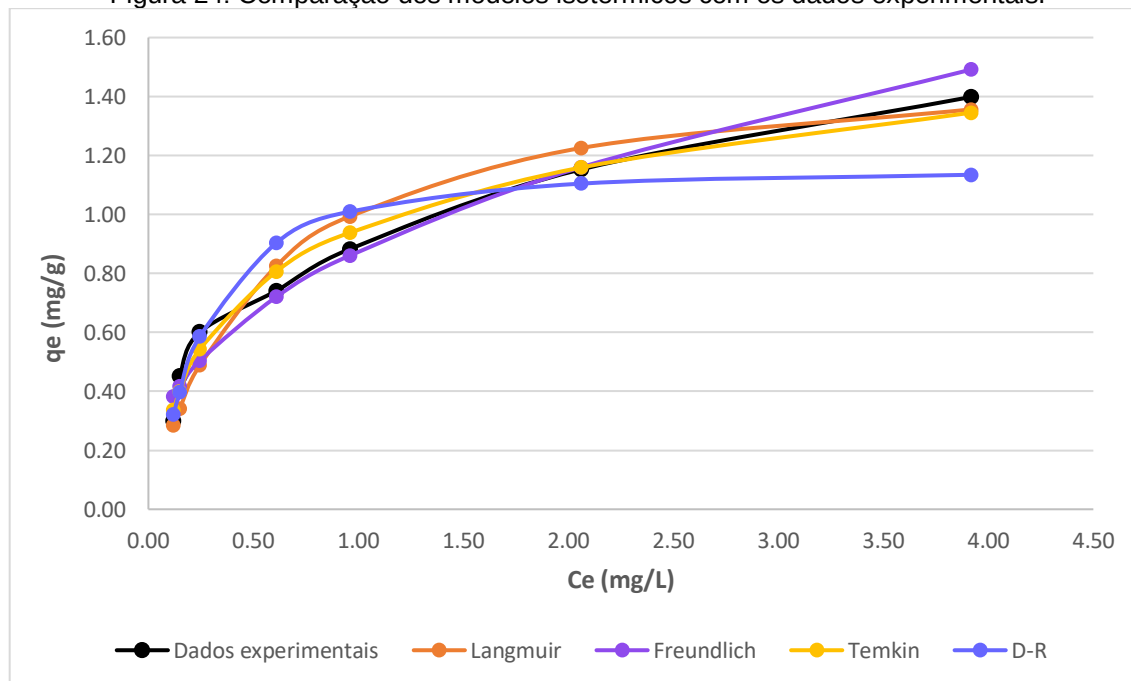
Nesse sentido, a partir da análise da isoterma de Freundlich, obteve-se uma relação $1/n = 0,39$. Este comportamento também foi observado por Ritter et al. (2024), Carvalho et al. (2010) e Turp et al. (2020), o que pode sugerir que o mecanismo de adsorção da zeólita sintética com os corantes do efluente têxtil sintético, ocorre através da fisorção. Esta suposição pode ser validada também pelos resultados observados com a isoterma de Dubinin–Radushkevich e Temkin, o qual indicaram uma baixa energia de adsorção, característica dos processos de fisorção.

Os dados cinéticos deste estudo ajustaram-se melhor ao modelo de Pseudo-Segunda Ordem, indicando que a velocidade do processo depende da disponibilidade de sítios ativos e da interação sorvato-sorvente, o que muitas vezes é associado a mecanismos de caráter químico. Contudo, a análise isotérmica revelou que o modelo de Langmuir descreve adequadamente o equilíbrio, sugerindo adsorção em monocamada sobre sítios energeticamente homogêneos, característica típica de materiais microporosos como as zeólitas (Collins et al., 2020). Alguns estudos demonstram que o modelo de Langmuir pode ser o que melhor se ajusta aos dados experimentais mesmo quando o mecanismo de adsorção predominante é a fisorção (Abbas; Trari, 2023; Abukhadra; Mostafa, 2019).

Conforme mostra a Figura 24, os modelos isotérmicos apresentaram um bom ajuste com os dados experimentais. Observa-se que os modelos de Temkin e Langmuir apresentaram valores de capacidade máxima adsorptiva bastante próximos

aos obtidos experimentalmente, indicando um bom ajuste entre os dados experimentais e os valores previstos por esses modelos.

Figura 24: Comparação dos modelos isotérmicos com os dados experimentais.



Fonte: Elaborado pela autora.

Apesar do comportamento cinético do tipo Pseudo-Segunda Ordem, a avaliação das energias de adsorção obtidas pelos modelos de Dubinin-Radushkevich e Temkin indicaram valores característicos de fisorção, demonstrando que as interações predominantes são fracas (ligações de Van der Waals). Dessa forma, os resultados são coerentes e complementares onde a cinética PSO não implica necessariamente na quimissorção, mas indica que a taxa de adsorção segue um ajuste matemático de segunda ordem. Em contrapartida, a combinação de Langmuir e das energias de adsorção confirma que o processo ocorre majoritariamente por fisorção em sítios uniformes.

4.5 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS COM A LEGISLAÇÃO BRASILEIRA

Ressalta-se que, ao analisar os resultados visuais apresentados nas Figura 16 e Figura 17 e compará-los à legislação brasileira vigente para o lançamento de efluentes em corpos hídricos, observa-se que, para algumas concentrações de corantes, o parâmetro cor não atende aos padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005.

Embora tenham sido obtidas elevadas eficiências de remoção — superiores a 90%, com valor máximo de 96,98% — o efluente ainda apresentou coloração levemente perceptível. Para a maior parte das classes de corpos hídricos, a Resolução determina que a cor seja virtualmente ausente, não sendo permitida a presença de corantes que não possam ser removidos por processos convencionais de tratamento (Brasil, 2005). Ademais, destaca-se a limitação da legislação quanto à precisão dos indicadores disponíveis, uma vez que o parâmetro cor, expresso em unidades de Platina-Cobalto (PtCo), é mais adequado para caracterizar a coloração de águas superficiais, e não de efluentes industriais.

5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, a zeólita sintetizada a partir de escórias de alumínio demonstrou ser um adsorvente altamente promissor para a remoção dos corantes Safranina-T e Azul de Metileno presentes no efluente têxtil sintético. As eficiências obtidas foram de 96,98% para a maior concentração avaliada (38,88 mg/L), enquanto a eficiência máxima, de 98,97%, foi alcançada na concentração de 15 mg/L, evidenciando o desempenho expressivo do material. Além disso, os cálculos dos resíduos confirmaram que não houve interferência entre os corantes durante as medições de absorvância, garantindo a confiabilidade dos resultados.

As condições experimentais ótimas determinadas foram de 32 g/L de dose de zeólita e 123 rpm de taxa de agitação, com as análises estatísticas indicando que a dose de zeólita foi a única variável que exerceu influência significativa sob o processo adsorptivo.

Ademais, com base nos ensaios cinéticos, o processo de adsorção demonstrou ser rápido, atingindo seu equilíbrio em 10 minutos, com uma taxa de adsorção de 0,117 mg/g.min. Além disso, o modelo de Pseudo-Segunda Ordem foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais, indicando que a taxa de adsorção depende da relação quadrática da diferença entre a quantidade de adsorvato no equilíbrio e a quantidade adsorvida no tempo $((q_e - q_t)^2)$.

A partir dos modelos isotérmicos, constatou-se que o processo de adsorção ocorre predominantemente por fisorção em sítios ativos homogêneos, sendo o modelo de Langmuir o que melhor se ajustou aos dados experimentais e indicando a formação de uma monocamada na superfície do adsorvente. Os modelos de Temkin e Dubinin–Radushkevich apresentaram baixas energias de adsorção, indicando interações físicas fracas entre os corantes e a superfície da zeólita.

Por fim, recomenda-se que estudos futuros investiguem o desempenho da zeólita em sistemas de tratamento contínuo e frente a diferentes classes de corantes, além de incorporarem ensaios de dessorção e testes de regeneração da zeólita para avaliar sua estabilidade e capacidade de reutilização. Tais abordagens contribuirão para consolidar o potencial do material em aplicações reais de tratamento de efluentes têxteis.

O estudo desenvolvido contribui significativamente para o avanço de tecnologias sustentáveis aplicadas ao tratamento de efluentes, ao demonstrar que resíduos industriais, como as escórias de alumínio, podem ser transformados em

materiais adsortivos com a finalidade de remoção de poluentes. A aplicação da zeólita sintetizada a partir de resíduos industriais não apenas promove a mitigação da poluição hídrica causada por corantes sintéticos, como também fortalece práticas alinhadas à economia circular, ao reaproveitar um resíduo perigoso em um produto de elevado valor agregado. Assim, os resultados reforçam o potencial desse material como alternativa eficiente, economicamente viável e ambientalmente responsável para melhorar a qualidade da água e reduzir os impactos ambientais associados às atividades industriais.

REFERÊNCIAS

- ABBAS, Moussa; TRARI, Mohamed. Contribution of zeolite to remove malachite green in aqueous solution by adsorption processes: Kinetics, isotherms and thermodynamic studies. **Textile Research Journal**, v. 93, n. 15–16, p. 3765–3776, ago. 2023.
- ABIT. Associação Brasileira da Indústria Têxtil e Confecção. Confederação Nacional Da Indústria; Associação Brasileira Da Indústria Têxtil E De Confecção (Abit). O setor têxtil e de confecção e os desafios da sustentabilidade. Brasília: CNI; São Paulo: ABIT, 2017. 102 p.
- ABUKHADRA, Mostafa R.; MOSTAFA, Merna. Effective decontamination of phosphate and ammonium utilizing novel muscovite/phillipsite composite; equilibrium investigation and realistic application. **Science of The Total Environment**, v. 667, p. 101–111, jun. 2019.
- ALVES, Cibele Cristina de Oliveira. Remoção de Aminoácidos Aromáticos de Soluções Aquosas por Adsorvente Preparado de Resíduo Agrícola. 2012. 225 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência de Alimentos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.
- ARAÚJO, M.; CASTRO, E. M. Manual de Engenharia Têxtil. v. 2. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1984.
- BACCAR, R. *et al.* Equilibrium, thermodynamic and kinetic studies on adsorption of commercial dye by activated carbon derived from olive-waste cakes. **Chemical Engineering Journal**, v. 165, n. 2, p. 457–464, dez. 2010.
- BALARAK, Davoud *et al.* The use of low-cost adsorbent (Canola residues) for the adsorption of methylene blue from aqueous solution: Isotherm, kinetic and thermodynamic studies. **Colloids and Interface Science Communications**, v. 7, p. 16–19, jul. 2015.
- BANERJEE, Sushmita; CHATTOPADHYAYA, M. C. Adsorption characteristics for the removal of a toxic dye, tartrazine from aqueous solutions by a low cost agricultural by-product. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 10, p. S1629–S1638, maio 2017.
- CANASSA, Thalita. Utilização da lei de Lambert-Beer para determinação da concentração de soluções. **Journal of Experimental Techniques and Instrumentation**, v. 1, n. 2, p. 23–30, 6 jul. 2018.
- CARVALHO, Terezinha Elizabeth Mendes De *et al.* Adsorção do corante reativo laranja 16 de soluções aquosas por zeólita sintética. **Química Nova**, v. 33, n. 2, p. 358–363, 2010.
- COLLINS, Fiona *et al.* A critical review of waste resources, synthesis, and applications for Zeolite LTA. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 291, p. 109667, jan. 2020.
- COOKSEY, Cj. Quirks of dye nomenclature. 8. Methylene blue, azure and violet. **Biotechnic & Histochemistry**, v. 92, n. 5, p. 347–356, 4 jul. 2017.

COULSON, J. M.; RICHARDSON, J. F. Tecnologia química. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1979.

DÁURIA, Bianca Alves *et al.* Estudo da capacidade de adsorção de um corante reativo do efluente da indústria têxtil, utilizando material adsorvente obtido da cápsula do fruto da Paineira (*Chorisia speciosa* A. St.–Hil). **Research, Society and Development**, v. 11, n. 13, p. e252111335249, 6 out. 2022a.

DOS SANTOS, André B.; CERVANTES, Francisco J.; VAN LIER, Jules B. Review paper on current technologies for decolourisation of textile wastewaters: Perspectives for anaerobic biotechnology. **Bioresource Technology**, v. 98, n. 12, p. 2369–2385, set. 2007.

DUARTE-NETO, J. F. *et al.* Processos de adsorção de corantes em argilas esmectíticas: uma revisão. [S.d.].

EREN, Sena *et al.* Synthesis of zeolite from industrial wastes: a review on characterization and heavy metal and dye removal. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 31, n. 29, p. 41791–41823, 11 jun. 2024.

FREITAS, Kátia Regina de *et al.* Caracterização e reuso de efluentes do processo de beneficiamento da indústria têxtil. 2002. Dissertação (Mestre em Engenharia Química) - 59 Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

GHOSH, Indrajit *et al.* Adsorptive removal of Safranin-O dye from aqueous medium using coconut coir and its acid-treated forms: Adsorption study, scale-up design, MPR and GA-ANN modeling. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 19, p. 100374, abr. 2021.

GIRISH, Chikmagalur Raju. Determination of thermodynamic parameters in adsorption studies: a review. **Chemical Papers**, v. 79, n. 9, p. 5687–5706, set. 2025.

GUPTA, V. K.; SUHAS. Application of low-cost adsorbents for dye removal – A review. **Journal of Environmental Management**, v. 90, n. 8, p. 2313–2342, jun. 2009.

HAMDAOUI, O. Batch study of liquid-phase adsorption of methylene blue using cedar sawdust and crushed brick. **Journal of Hazardous Materials**, v. 135, n. 1–3, p. 264–273, 31 jul. 2006.

HARMAJI, Andrie *et al.* Valorization of Residue from Aluminum Industries: A Review. **Materials**, v. 17, n. 21, p. 5152, 23 out. 2024.

HOLKAR, Chandrakant R. *et al.* A critical review on textile wastewater treatments: Possible approaches. **Journal of Environmental Management**, v. 182, p. 351–366, nov. 2016.

HONORATO, Andressa C. *et al.* Biossorção de azul de metileno utilizando resíduos agroindustriais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 7, p. 705–710, jul. 2015.

HOSSEINI NAMI, Shamin; MOUSAVI, Seyed Borhan. Nitrate Removal Performance of Different Granular Adsorbents Using a Novel Fe-Exchanged Nanoporous Clinoptilolite. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 62, n. 8, p. 3659–3671, 1 mar. 2023.

HU, Qili; PANG, Shuyue; WANG, Dan. In-depth Insights into Mathematical Characteristics, Selection Criteria and Common Mistakes of Adsorption Kinetic Models: A Critical Review. **Separation & Purification Reviews**, v. 51, n. 3, p. 281–299, 3 jul. 2022.

HUTSON, Nick D.; YANG, Ralph T. Theoretical basis for the Dubinin-Radushkevitch (D-R) adsorption isotherm equation. **Adsorption**, v. 3, n. 3, p. 189–195, set. 1997.

JIALIANG, Ruan *et al.* Biodegradation of Safranin T by an isolated bacterium *Pseudomonas aeruginosa* WZS-A. [S.d.].

KUNZ, Ailton *et al.* Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. **Química Nova**, v. 25, n. 1, p. 78–82, fev. 2002.

LALNUNHLIMI, Sylvine; KRISHNASWAMY, Veenagayathri. Decolorization of azo dyes (Direct Blue 151 and Direct Red 31) by moderately alkaliphilic bacterial consortium. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 47, n. 1, p. 39–46, jan. 2016.

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, p. 128919, mar. 2021.

MALLAPUR, Veeresh P.; OUBAGARANADIN, John U. Kennedy. A Brief Review on the Synthesis of Zeolites from Hazardous Wastes. **Transactions of the Indian CERAMIC SOCIETY**, V. 76, N. 1, P. 1–13, 2 jan. 2017.

MOLVIEW. Disponível em: <https://molview.org/>. Acesso em: 25 nov. 2025.

MONTANHER, C. C.; Coradin, D. C.; Fontoura-da-Silva, S. E. Mecanismos de adsorção: transferência de massa externa, difusão intrapartícula e adsorção nos sítios ativos. *Estudos Biológicos*. 2007.

MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C. Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments. New York: John Wiley & Sons, 700 p., 1995.

NASCIMENTO, R. F; *et al.* Adsorção aspectos teóricos e aplicações ambientais. 1 ed. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014.

OLIVEIRA CHAVES, Nayane *et al.* As Principais Técnicas Utilizadas para Remoção de Corantes das Águas Residuais da Indústria Têxtil: Uma Revisão. **Revista Eletrônica Perspectivas da Ciência e Tecnologia - ISSN: 1984-5693**, v. 14, 23 dez. 2022.

PIZATO, Everton *et al.* Caracterização de efluente têxtil e avaliação da capacidade de remoção de cor utilizando o fungo *Lasiodiplodia theobromae* MMPI. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 22, n. 5, p. 1027–1035, out. 2017.

RAJ, Rohit *et al.* Red mud utilisation for sustainable construction and soil improvement: a comprehensive review. **Discover Sustainability**, v. 5, n. 1, p. 398, 13 nov. 2024.

RAMASANY, Rajendra; AHMED, Hasab; KARTHIK, Sundaram. Development of microbial consortium for the biodegradation and biodecolorization of textile effluents. **Journal of Urban and Environmental Engineering**, v. 6, n. 1, p. 36–41, 30 jun. 2012.

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, 6 set. 2021.

RIDA, Kamel; BOURAOUI, Sarra; HADNINE, Selma. Adsorption of methylene blue from aqueous solution by kaolin and zeolite. **Applied Clay Science**, v. 83–84, p. 99–105, out. 2013.

RITTER, Magali Teresinha *et al.* 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, ago. 2024.

SAHA, Swastika *et al.* Production and purification of biofloculants from newly isolated bacterial species: a comparative decolourization study of cationic and anionic textile dyes. **Environmental Technology**, v. 42, n. 23, p. 3663–3674, 15 out. 2021.

SCHALLEMBERGER, Juliana Barden. Remoção de Corantes Têxteis Utilizando o Substrato Residual da Produção de Cogumelo *Pleurotus ostreatus*: Degradação Enzimática e Adsorção. 2021. 139 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021.

SELIM, Mohamed T. *et al.* Biological Treatment of Real Textile Effluent Using *Aspergillus flavus* and *Fusarium oxysporium* and Their Consortium along with the Evaluation of Their Phytotoxicity. **Journal of Fungi**, v. 7, n. 3, p. 193, 9 mar. 2021.

SHARAFINIA, Soheila; FARROKHANIA, Abdolhadi; LEMRASKI, Ensieh Ghasemian. The adsorption of cationic dye onto ACPMG@ZIF-8 core-shell, optimization using central composite response surface methodology (CCRSM). **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 634, p. 128039, fev. 2022.

SHI, Yan *et al.* Removal of Toluidine Blue and Safranin O from Single and Binary Solutions Using Zeolite. Crystals, v. 11, n. 10, p. 1181, 28 set. 2021.

SHIRVANIMOGHADDAM, Kamyar *et al.* Death by waste: Fashion and textile circular economy case. **Science of The Total Environment**, v. 718, p. 137317, maio 2020.

SPENCER LIMA, Luís; FACULDADE DE CIÊNCIAS DA UNIVERSIDADE DO PORTO. Lei de Lambert–Beer. **Revista de Ciência Elementar**, v. 1, n. 1, 30 dez. 2013.

SRIVASTAVA, Ankita *et al.* Emerging bioremediation technologies for the treatment of textile wastewater containing synthetic dyes: a comprehensive review. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**, v. 97, n. 1, p. 26–41, jan. 2022.

TACAS, Arjay Christopher J. *et al.* Degradation and biotoxicity of azo dyes using indigenous bacteria-acclimated microbial fuel cells (MFCs). **Process Biochemistry**, v. 102, p. 59–71, mar. 2021.

TOMASSONI, F. 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. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental)–Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, 2019. 177 p.

TURP, Sinan Mehmet *et al.* Enhanced adsorption of methylene blue from textile wastewater by using natural and artificial zeolite. **Water Science and Technology**, p. wst2020358, 3 ago. 2020.

UMPIERRES, Cibele Sant'anna. Ativados derivados da semente de Tucumã, como adsorventes para remoção de contaminantes emergentes. 2021. 88 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

VERMA, Akshaya Kumar; DASH, Rajesh Roshan; BHUNIA, Puspendu. A review on chemical coagulation/flocculation technologies for removal of colour from textile wastewaters. **Journal of Environmental Management**, v. 93, n. 1, p. 154–168, jan. 2012.

XAVIER, Cinthia Sany França *et al.* Tratamento de ambientes aquáticos: revisão sobre a adsorção do herbicida glifosato. **CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES**, v. 16, n. 12, p. 31935–31955, 19 dez. 2023.

YADAV, Sarita *et al.* Novel composites of *Pennisetum glaucum* with CNT: preparation, characterization and application for the removal of safranin O and methylene blue dyes from single and binary systems. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 13, n. 18, p. 16925–16942, dez. 2023.

YU, Huijing *et al.* Competitive Adsorption of Dye Species onto Biomass Nanoporous Carbon in Single and Bicomponent Systems. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 35, n. 1, p. 253–264, jan. 2018.

YUSUFF, Adeyinka Sikiru; POPOOLA, Lekan Taofeek; BABATUNDE, Esther Olubunmi. Adsorption of cadmium ion from aqueous solutions by copper-based metal organic framework: equilibrium modeling and kinetic studies. **Applied Water Science**, v. 9, n. 4, p. 106, jun. 2019.

ZHOU, Yanbo *et al.* Recent advances for dyes removal using novel adsorbents: A review. **Environmental Pollution**, v. 252, p. 352–365, set. 2019.