

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS BLUMENAU
CENTRO TECNOLÓGICO, DE CIÊNCIAS EXATAS E EDUCAÇÃO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM QUÍMICA

Luana da Silva Flores Filippi

Avaliação do potencial de adsorção de corantes por resíduos de algodão oriundos do beneficiamento têxtil

Blumenau
2026

Luana da Silva Flores Filippi

Avaliação do potencial de adsorção de corantes por resíduos de algodão oriundos do beneficiamento têxtil

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Bacharelado em Química da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Química.

Orientador(a): Ismael Casagrande Bellettini.
Coorientador(a): Luiza Gabriela Schlüter.

Blumenau

2026

Filippi, Luana da Silva Flores
AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE ADSORÇÃO DE CORANTES POR RESÍDUOS DE ALGODÃO ORIUNDOS DO BENEFICIAMENTO TÊXTIL / Luana da Silva Flores Filippi ; orientador, Ismael Casagrande Bellettini, coorientadora, Luiza Gabriela Schlüter, 2026.
58 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau, Graduação em Química - Bacharelado, Blumenau, 2026.

Inclui referências.

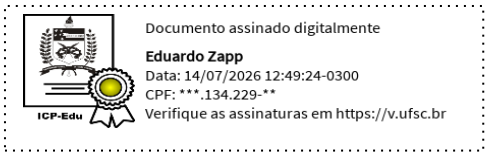
1. Química - Bacharelado. 2. Adsorção, resíduos de algodão, corantes, tratamento de efluentes.. I. Bellettini, Ismael Casagrande. II. Schlüter, Luiza Gabriela. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Química - Bacharelado. IV. Título.

Luana da Silva Flores Filippi

Avaliação do potencial de adsorção de corantes por resíduos de algodão oriundos do beneficiamento têxtil

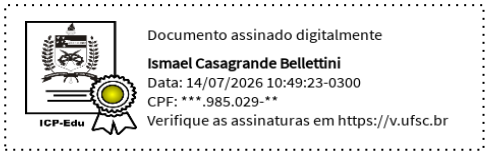
Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Química e aprovado em sua forma final pelo Curso de Bacharelado em Química.

Blumenau, 03 de Julho de 2026.

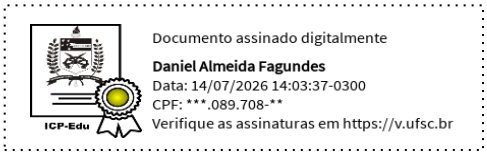


Coordenação do Curso

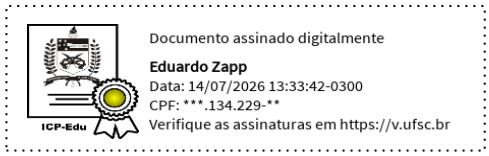
Banca examinadora



Prof. Dr. Ismael Casagrande Bellettini
Orientador



Prof. Dr. Daniel Almeida Fagundes
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Dr. Eduardo Zapp
Universidade Federal de Santa Catarina

Blumenau, 2026.

Esse trabalho é a realização de um sonho.

Eu o dedico às pessoas que o viveram junto comigo, em especial, meu esposo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por sempre estar comigo.

Ao meu esposo, Matheus, pelo companheirismo, paciência, apoio e incentivo constantes. Obrigada por estar ao meu lado em todos os momentos e por tornar essa caminhada mais leve.

À minha mãe, Gilvani, e ao meu pai, Luis, pelo amor incondicional, pelos ensinamentos e por sempre acreditarem no meu potencial, mesmo nos momentos mais desafiadores. Aos meus sogros, Augusto e Claudia, por me acompanharem e me incentivarem ao longo de toda caminhada.

Ao meu orientador, professor Ismael, e minha coorientadora, Luiza, pela dedicação, disponibilidade e valiosos ensinamentos compartilhados durante a realização deste trabalho.

Aos professores do curso de Bacharelado em Química da Universidade Federal de Santa Catarina (Blumenau), que contribuíram significativamente para minha formação acadêmica e profissional.

Aos membros da banca examinadora, pela disponibilidade em avaliar este trabalho e pelas contribuições que certamente enriquecerão esta pesquisa.

Ao Grupo Malwee, pela experiência profissional adquirida ao longo dos últimos anos e pelo incentivo ao meu crescimento técnico e pessoal. Em especial, à minha colega e amiga Isabelle, por todo apoio e carinho.

Aos meus colegas, amigos e a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho e para a minha trajetória acadêmica.

Meu sincero agradecimento a todos que fizeram parte desta conquista.

RESUMO

A indústria têxtil configura-se como um dos segmentos mais antigos e dinâmicos da economia mundial, mas gera uma quantidade significativa de resíduos sólidos e águas residuais. O principal impacto ambiental está atrelado à geração de águas residuais contendo elevada concentração de corantes. Caso o efluente não seja tratado e descartado corretamente, a presença dessas espécies pode alterar os parâmetros físico-químicos das águas superficiais, contribuindo para o aumento da turbidez e reduzindo a incidência da radiação solar no ambiente aquático. Além dos efluentes líquidos, estima-se que 10% de todo o volume produzido na indústria acaba sendo destinado ao descarte de resíduos sólidos, como o resíduo de felpa originado da etapa de felpagem, que geralmente são dispostos em aterros sanitários ou incinerados. A reciclagem desses rejeitos enfrenta múltiplas restrições técnicas, econômicas e ambientais. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo geral estudar o potencial de adsorção de um adsorvente alternativo e de baixo custo, obtido a partir de resíduos sólidos de algodão gerados no processo de felpagem da indústria têxtil de dois diferentes tipos: algodão branco (AB) e algodão tingido de vermelho (AV) para a remoção de corantes de águas residuais, sendo estes o azul de metileno (AM) e alaranjado de metila (ALM). A fim de compreender as interações entre adsorvente-adsorvato, foram realizadas caracterizações de AB e AV. A Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier por Refletância Total Atenuada (ATR-IR) resultou em bandas características do algodão, como grupos hidroxila e grupos característicos de polissacarídeos presentes na celulose. Valores de ponto de carga zero (pH_{PZC}) indicam uma superfície de AB mais negativamente carregada do que AV e a caracterização textural via isoterma de adsorção ajustada ao modelo de Brunauer-Emmett-Teller (BET) mostrou uma maior área superficial para AB em relação à AV. Testes de condutividade mostraram que há possibilidade de interação eletrostática na superfície de ambos, fator importante para a interação iônica com os corantes. Em relação à adsorção do AM, as amostras de AV removeram 100% do corante enquanto AV apresentou uma remoção de 98,4%. A remoção do ALM foi menos eficiente que a de AM, sendo os percentuais de remoção do corante de 95,6% a 96,2%. As isotermas de adsorção mostraram um ajuste para a isoterma de Freundlich na adsorção de AM pelo AB e na adsorção de ALM para AB e AV. A isoterma de Langmuir obteve um bom ajuste para a adsorção de AM por AB. Os resultados da capacidade máxima de adsorção (q_{max}) indicam que AB possui maior potencial adsortivo, alcançando 62,500 mg g^{-1}, enquanto AV apresentou q_{max} de 43,500 mg g^{-1}, resultados esperados e até superiores aos encontrados na literatura. Por fim, nota-se uma preferência do adsorvente pelo AM, uma vez que é catiônico e a superfície do material é parcialmente negativa em solução, corroborando com os resultados da caracterização do material.

Palavras-chave: Adsorção, resíduos de algodão, corantes, tratamento de efluentes.

ABSTRACT

The textile industry is one of the oldest and most dynamic sectors of the global economy, but it generates a significant amount of solid waste and wastewater. The main environmental impact is linked to the generation of wastewater containing high concentrations of dyes. If the effluent is not treated and disposed of properly, the presence of these substances can alter the physicochemical parameters of surface waters, contributing to increased turbidity and reducing the incidence of solar radiation in the aquatic environment. In addition to liquid effluents, it is estimated that 10% of the total volume produced by the industry ends up as solid waste, such as lint residue from the linting stage, which is generally disposed of in landfills or incinerated. The recycling of these wastes faces multiple technical, economic, and environmental constraints. In this context, the overall objective of this study is to investigate the adsorption potential of an alternative, low-cost adsorbent derived from solid cotton waste generated during the carding process in the textile industry, specifically two different types: white cotton (AB) and red-dyed cotton (AV), for the removal of dyes from wastewater, specifically methylene blue (AM) and methyl orange (ALM). To understand the adsorbent-adsorbate interactions, characterizations of AB and AV were performed. Attenuated Total Reflectance Fourier Transform Infrared Spectroscopy (ATR-IR) revealed bands characteristic of cotton, such as hydroxyl groups and groups characteristic of polysaccharides present in cellulose. Point of zero charge (pH_{PZC}) values indicate that the AB surface is more negatively charged than that of AV, and textural characterization via an adsorption isotherm fitted to the Brunauer-Emmett-Teller (BET) model showed a larger surface area for AB compared to AV. Conductivity tests showed that electrostatic interaction is possible on the surface of both materials, an important factor for ionic interaction with dyes. Regarding AM adsorption, the AV samples removed 100% of the dye, while AV achieved 98.4% removal. The removal of ALM was less efficient than that of AM, with dye removal percentages ranging from 95.6% to 96.2%. The adsorption isotherms showed a good fit to the Freundlich isotherm for AM adsorption by AB and for ALM adsorption by both AB and AV. The Langmuir isotherm provided a good fit for AM adsorption by AB. The results for maximum adsorption capacity (q_{max}) indicate that AB has greater adsorption potential, reaching 62.500 mg g^{-1}, while AV exhibited a q_{max} of 43.500 mg g^{-1}, results that were expected and even higher than those reported in the literature. The adsorbent shows a preference for AM, since it is cationic and the material's surface is partially negative in solution, which is consistent with the results of the material characterization.

Keywords: Adsorption, cotton waste, dyes, wastewater treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma geral da cadeia produtiva da indústria têxtil 8
Figura 2: Perfis de isotermas típicos 15
Figura 3: Estrutura molecular do azul de metileno 18
Figura 4: Estrutura molecular do alaranjado de metila 19
Figura 5: Fluxograma geral da metodologia experimental 21
Figura 6: Amostras dos resíduos de algodão AB e AV 21
Figura 7: Espectros de infravermelho das amostras de algodões 25
Figura 8: Perfil condutométrico de AV e AB obtido por titulação com NaCl 29
Figura 9: Comparação de adsorção de diferentes massas de AV e AB para remoção de AM 31
Figura 10: Amostras das soluções de corante AM antes da adsorção (A) e após a adsorção com o algodão AV (B) e AB (C) após 24h 31
Figura 11: Comparação de adsorção de diferentes massas de AV e AB para remoção de ALM 32
Figura 12: Amostras das soluções de corante AM antes da adsorção (A) e após a adsorção com o algodão AV (B) e AB (C) após 24h 33
Figura 13: Isotermas de adsorção de AV e AB para o corante AM 36
Figura 14: Isotermas de adsorção de AV e AB para o corante ALM 38
Figura 15: Espectros de absorção eletrônica da mistura inicial dos corantes azul de metileno e alaranjado de metila e após o processo de adsorção dos algodões 39
Figura 16: Amostras da mistura inicial de corantes (A) e após a adsorção com o algodão vermelho (B) e branco (C) 40
Figura 17: Interações entre AM e ALM com a superfície do adsorvente 41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais resíduos sólidos gerados no beneficiamento têxtil.....9
Tabela 2: Diferentes tecnologias utilizadas para de remoção de corantes, suas vantagens e desvantagens 11
Tabela 3: Estudos de adsorção de corante com diferentes adsorventes produzido a partir de algodão 13
Tabela 4: Descrição dos principais parâmetros de adsorção.....14
Tabela 5: Concentrações dos corantes AM e ALM 24
Tabela 6: Variação de condutividade de 10, 25 e 50 mg 28
Tabela 7: Comprimento de onda de máxima absorção e equação linear da curva de calibração dos corantes AM e ALM.....30
Tabela 8: Parâmetros das isotermas de adsorção dos modelos linearizados de Langmuir e Freundlich do corante AM com AV e AB 34
Tabela 9: Parâmetros das isotermas de adsorção dos modelos linearizados de Langmuir e Freundlich do corante ALM com AV e AB 37

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA 5
2 OBJETIVOS 7
2.1 OBJETIVO GERAL 7
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 7
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 7
3.1 CONTEXTO GERAL DA INDÚSTRIA TÊXTIL 8
3.2 RESÍDUOS SÓLIDOS GERADOS NA INDÚSTRIA TÊXTIL 9
3.3 EFLUENTES TÊXTEIS 10
3.4 TRATAMENTO DE EFLUENTES TÊXTEIS 11
3.5 ADSORÇÃO 12
3.5.1 Fatores que influenciam na adsorção 14
3.5.2 Isotermas de adsorção 15
3.6 CORANTES 17
3.6.1 Azul de metileno 18
3.6.2 Alaranjado de metila 19
3.6.3 Propriedades ópticas dos corantes 19
4 METODOLOGIA 20
4.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS 21
4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS ADSORVENTES 22
4.3 CURVA DE CALIBRAÇÃO 23
4.4 TESTES DE OTIMIZAÇÃO 23
4.5 ENSAIOS DE ADSORÇÃO 23
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES 24
5.1 CARACTERIZAÇÕES 24
5.1.1 Caracterização do material por Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier por Refletância Total Atenuada (ATR-IR) 25
5.1.2 Determinação do ponto de carga zero 26
5.1.3 Caracterização textural via isoterma de adsorção ajustada ao modelo de Brunauer-Emmett-Teller (BET) 27
5.1.4 Estudo da condutividade 27
5.2 CURVAS DE CALIBRAÇÃO 30
5.3 ENSAIOS PRELIMINARES DE ADSORÇÃO 30
5.4 ISOTERMAS DE ADSORÇÃO 33
5.4.1 Adsorção do corante azul de metileno 34
5.4.2 Isotermas de adsorção do corante alaranjado de metila 36

5.4.3 Adsorção de uma mistura de corantes 38
6 CONCLUSÕES 42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 44
APÊNDICE A 50
APÊNDICE B 51
APÊNDICE C 52

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A indústria têxtil configura-se como um dos segmentos mais antigos e dinâmicos da economia mundial, destacando-se pela sua capacidade de adaptação tecnológica e pela diversidade de produtos gerados. A cadeia produtiva abrange desde a transformação de fibras, naturais ou sintéticas, até a confecção de produtos, destinados aos setores de vestuário, automotivo, médico e de construção civil (Fernandez-Stark; Bamber; Couto, 2022). No Brasil, o ramo movimenta boa parte da economia do país: 3,5% do Produto Interno Bruto (PIB) provém do setor, conferindo ao país a posição de quinto maior produtor têxtil global (ABIT, 2021).

Uma vez que a indústria têxtil assume papel estratégico no mercado, é pertinente que os desafios associados à eficiência produtiva, inovação tecnológica e sustentabilidade avancem conjuntamente. Queiroz *et al*. (2019) destacam a urgência do segmento produtivo em apoderar-se do conceito de ecoeficiência; o termo trata da utilização mais eficiente dos recursos naturais durante os processos, minimizando os desperdícios e o despejo de contaminantes tóxicos no ambiente, de modo a fomentar a reciclagem e estender a durabilidade dos produtos. No entanto, apesar da adoção gradual de práticas sustentáveis, a cadeia produtiva têxtil gera uma quantidade significativa de resíduos aquosos e sólidos, oriundos de diferentes processos.

O principal impacto ambiental ocasionado pelo setor têxtil corresponde à geração de grandes quantidades de águas residuais contendo corantes, surfactantes, íons inorgânicos, agentes umectantes, dentre outras espécies químicas classificadas como compostos recalcitrantes[1] (Queiroz, *et al*., 2019). Os corantes são os principais poluentes da cadeia produtiva, uma vez que modificam os parâmetros físico-químicos das águas superficiais, contribuindo para o aumento da turbidez e reduzindo a incidência da radiação solar no ambiente aquático, interferindo nos ciclos biogeoquímicos (Hai; Yamamoto; Fukushi, 2007).

A resolução 430, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), estabelece as condições e os padrões nacionais de lançamento de efluentes em corpos receptores, tais como a faixa adequada de pH, concentração máxima de

[1] Classe de contaminantes persistentes em solos e sedimentos que apresentam pouca solubilidade e volatilidade e baixa reatividade (Vinayaka; Kadkol, 2022).

compostos orgânicos, inorgânicos e metais pesados, e a demanda bioquímica de oxigênio (DBO), além de exigir que o despejo de águas residuais não altere as características naturais do corpo receptor, incluindo cor, odor e turbidez. A lei 9.605, proposta em 1998, dispõe que o lançamento de efluentes têxteis em desacordo com normas técnicas é crime ambiental, punível com multa e detenção.

Para além dos efluentes líquidos, a geração de resíduos sólidos também é um desafio para a indústria. Para Garcia *et al*. (2019), a geração de sobras oriundas da produção de artigos têxteis é inevitável: no Brasil, o setor gerou, em 2015, 175 mil toneladas de rejeitos, os quais precisam ser gerenciados e dispostos de maneira adequada para prevenir impactos socioambientais.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei Federal n° 12.305 (2010), determina que a gestão de resíduos deve observar, respectivamente, uma sequência de prioridades: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento de resíduos sólidos e destinação final adequada do material rejeitado. No Brasil, cerca de 49% dos municípios ainda utilizam aterros sanitários para a disposição de rejeitos sólidos. Além disso, dados apontam que, em 2020, apenas 1% dos municípios possuíam usinas de triagem (Abetre, 2021).

Nesse contexto, o tratamento do efluente têxtil, bem como a incorporação de práticas de reuso do resíduo gerado a partir da matéria-prima, é de grande responsabilidade e obrigatório por parte das indústrias desse ramo, fato que reforça a importância de estudos que analisem seus processos, impactos e potencial de transformação. Assim, o foco deste trabalho é propor o uso de resíduos sólidos, oriundos da etapa de beneficiamento, como um adsorvente de baixo custo para remoção de corantes em efluentes, visando mitigar os problemas ambientais associados ao descarte de sólidos e despejo de águas residuais.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral consiste em estudar o potencial de adsorção de um adsorvente alternativo e de baixo custo, obtido a partir de resíduos sólidos de algodão gerados no processo de felpagem da indústria têxtil, para a remoção de corantes de águas residuais.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos dividem-se em:

- Determinar a área superficial do resíduo de algodão utilizando a isoterma de adsorção ajustada ao modelo de Brunauer-Emmett-Teller (BET);
- Determinar o ponto de carga zero (pH_{PZC}) do resíduo de algodão;
- Caracterizar o resíduo de algodão por espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR);
- Avaliar a adsorção dos corantes azul de metileno (AM) e alaranjado de metila (ALM) pelas isotermas de Langmuir e Freundlich;

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

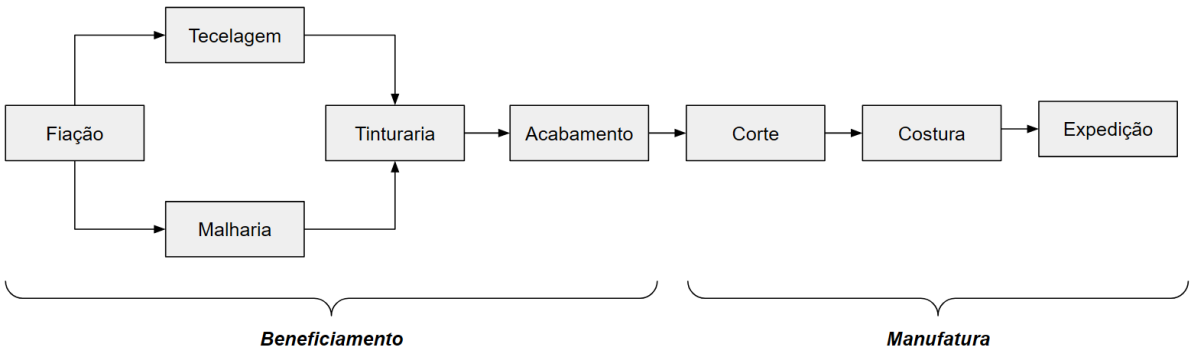
O capítulo a seguir tem por objetivo expor os conceitos e estudos fundamentais que baseiam o desenvolvimento deste trabalho. Em um primeiro momento, é apresentado o panorama geral da indústria têxtil, enfatizando seus processos de produção e os efeitos ambientais relacionados. Na sequência, discutem-se as características dos rejeitos produzidos por esse setor, com foco nos resíduos sólidos. Por fim, abordam-se os métodos de tratamento de efluentes, destacando a adsorção como uma técnica promissora e, de modo complementar, são apresentados os conceitos teóricos dos corantes.

3.1 CONTEXTO GERAL DA INDÚSTRIA TÊXTIL

A produção de artigos têxteis compreende um conjunto de etapas interligadas que envolvem operações físicas, químicas e bioquímicas voltadas à transformação de fibras. Para atender à demanda de consumo e inovação exigida no mercado, atualmente existe uma ampla diversidade de fibras têxteis com diferentes composições, capazes de conferir propriedades específicas ao produto final (Abetre, 2021). As fibras, segundo Mather, Wardman e Rana (2024), podem ser classificadas de acordo com a sua origem: naturais, como o algodão, ou sintéticas, como o poliéster.

A cadeia produtiva, esquematizada na Figura 1, divide-se em duas etapas principais: beneficiamento e manufatura. A operação inicia-se na fiação, onde a matéria-prima é convertida em fios que, posteriormente, seguem à tecelagem e/ou malharia para elaboração de tecidos planos ou malhas. Subsequentemente, o substrato têxtil segue para a etapa de beneficiamento, onde ocorrem as transformações físicas, responsáveis pela remoção de impurezas na superfície do artigo, e químicas, que alteram a coloração do material; neste último caso, técnicas como alvejamento, branqueamento óptico, tingimento e estampagem estão dentre as mais utilizadas (Mather, Wardman e Rana, 2024).

Figura 1: Fluxograma geral da cadeia produtiva da indústria têxtil



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Após a pigmentação, o tecido ou a malha é direcionado à etapa de enobrecimento, onde se aplicam tratamentos especiais responsáveis por conferir estabilidade na estrutura do artigo e realizar o acabamento que confere as

características desejadas ao produto final (Queiroz *et al*., 2019). O material, agora acabado, é destinado à manufatura, onde os setores de corte e costura confeccionam as peças que, posteriormente, são expedidas ao cliente final.

3.2 RESÍDUOS SÓLIDOS GERADOS NA INDÚSTRIA TÊXTIL

Ao longo da cadeia produtiva, gera-se uma grande quantidade de resíduos sólidos, ocasionados a partir das sobras e perda de matéria-prima ao decorrer da fabricação. Chamados de resíduos de pré-consumo, cerca de 10% da produção têxtil é descartada durante a produção, trazendo prejuízo econômico à indústria (Garcia *et al*., 2019). A Tabela 1 apresenta um resumo dos principais rejeitos sólidos observados durante as operações de fiação, tecelagem, beneficiamento e enobrecimento. O principal ofensor são as operações físicas, responsáveis por gerar aparas, fibras curtas, poeiras e fragmentos, que comumente são depositados em aterros sanitários, ocupando espaço, ou incinerados, contribuindo para a liberação de substâncias tóxicas e poluentes no ar, água e solo (Tang, 2023).

Tabela 1: Principais resíduos sólidos gerados no beneficiamento têxtil

Processo	Resíduo gerado
Fiação	Cascas, fibras, fios, cones, borras de fibra
Tecelagem e/ou Malharia	Cones, goma, fibras, pedaços de tecidos e malhas
Beneficiamento	Fibras queimadas, fibras retidas durante as operações de mercerização, purga, lavagem, felpagem, pastas para estampar, telas, óleo térmico, banho de acabamento
Enobrecimento	Fibras queimadas, fibras retiradas durante as operações de impregnação de álcali, alvejamento, purga, lavagem, felpagem, navalhagem e esmerilhagem, pastas de estampar, telas, embalagens diversas, óleo térmico e banho de acabamento

Fonte: Bastian, 2016.

No processo de enobrecimento, o resíduo da felpa origina-se a partir da felpagem, que consiste em uma operação física destinada a modificar a superfície para conferir volume e textura ao material. O acabamento mecânico é realizado por

meio de cilindros recobertos com agulhas, entre os quais a malha é conduzida de forma contínua, ocasionando abrasão controlada e gerando o efeito característico de flanela, comum em moletons flanelados. O atrito das agulhas com o material remove as partículas fibrosas superficiais, as quais se acumulam durante o processamento e, posteriormente, são destinados para triagem. Estima-se que de 20 a 40% dos resíduos sólidos provêm de fibras (Kdhar, 2024).

A reciclagem dos rejeitos provenientes da felpagem enfrenta múltiplas restrições técnicas, econômicas e ambientais, uma vez que são compostos por uma mistura de fibras com beneficiamentos distintos. Enquanto as fibras sintéticas demandam elevada energia para reciclagem, as fibras naturais ainda não possuem destino específico, limitando a triagem e reciclagem de resíduos têxteis, tornando seu descarte a única opção viável em muitos países (Tang, 2023).

3.3 EFLUENTES TÊXTEIS

Além do subproduto sólido, o processo têxtil também é responsável pela geração de águas residuais em todos os processos da cadeia. Estima-se que, para confeccionar 1 quilo de malha acabada, há o consumo médio de 184 litros de água, dos quais pelo menos 160 litros são descartados como efluente líquido (Dilaver *et al*., 2018). Do volume de rejeitos, calcula-se que 85% são descartados durante o tingimento, proveniente da carga de corante e demais produtos químicos[2] que não se fixaram na fibra (Katheresan; Kansedo; Lau, 2018).

De acordo com Roy *et al.* (2010), a composição do efluente pode variar conforme a época do ano devido às oscilações de produção. Quanto aos parâmetros físico-químicas do resíduo, destacam-se o pH alcalino, na faixa 8 a 11, sólidos totais entre 1.000 e 1.600 mg L^{-1} e teor de sólidos da suspensão entre 30 e 50 mg L^{-1}; quanto à cor, é inviável quantificar o teor de corante no meio, uma vez que o efluente apresenta ampla flutuação na composição e na intensidade de coloração (Chicatto; Gonçalves; Altmajer-Vaz; Tavares, 2018).

[2] Os principais produtos químicos utilizados são enzimas, detergentes, ácidos, álcalis e sais, a depender da natureza da fibra e da característica desejada ao produto final (Roy *et al*., 2010).

3.4 TRATAMENTO DE EFLUENTES TÊXTEIS

A remoção de contaminantes das águas residuais pode ser realizada através de tratamentos biológicos, químicos ou físicos. As técnicas convencionais, tais como coagulação, floculação, oxidação, fotocatálise, adsorção, filtração e biodegradação, são comumente aplicadas de forma isolada para a descoloração de corantes (Su; Low; Teng; Wong, 2016). A Tabela 2 apresenta as principais vantagens e desvantagens associadas às técnicas de tratamento para remoção de corantes.

Tabela 2: Diferentes tecnologias utilizadas para de remoção de corantes, suas vantagens e desvantagens

Tratamento	Método	Vantagens	Desvantagens
Físico	Membrana	Alta eficiência	Incrustação da membrana
	Troca iônica	Alta eficiência, baixo custo	Seletividade
	Adsorção	Simples, compatível com ampla classe de corantes	Alto custo
Químico	Oxidação avançada	Cinética de reação rápida	Alto custo, formação de subprodutos, sensível à de pH
	Eletroquímico	Não requer adição de produtos químicos	Alto consumo elétrico, baixa eficiência
	Coagulação	Baixo custo	Produção de lodo concentrado
Biológico	Enzimas	Não tóxicas, reutilizáveis	Produção limitada de enzimas
	Fungos	Compatível com ampla variedade de corantes	Longa fase de crescimento, sensível ao pH
	Algas	Baixo custo	Sensíveis às condições ambientais
	Bactérias	Baixo custo	Sensível à de pH

Fonte: Elaborado pela autora, baseado em Samsami *et al.*, 2020.

Para Semsami *et al*. (2020), nenhum método pode ser utilizado de forma isolada, visto que cada técnica apresenta suas particularidades e limitações em

relação ao custo, eficiência, viabilidade e impactos ambientais. Devido à complexidade do efluente têxtil, a utilização de processos híbridos, em detrimento das técnicas convencionais, apresenta maior eficiência e melhores resultados na decomposição das moléculas de corante.

3.5 ADSORÇÃO

Para Kamaruddin *et al*. (2013), o processo de adsorção é considerado a técnica mais adequada para o tratamento de águas residuais provenientes do setor têxtil, cuja utilização em conjunto com outra metodologia, potencializa a remoção de corantes. A adsorção trata-se de um fenômeno que ocorre na região de interface, resultado da adesão de moléculas de um soluto, chamado de adsorvato, em uma superfície sólida, denominado adsorvente (Rajahmundry *et al*., 2022). A depender da natureza da interação, o processo pode ocorrer através de ligações químicas ou físicas.

A quimissorção surge a partir da formação de ligações químicas do soluto em sítios ativos do adsorvato, demandando elevada energia de ativação, o que, por consequência, torna o processo lento e pouco reversível; dessa forma, há a formação de uma camada de soluto em torno da partícula de adsorvente. A fisissorção, por sua vez, resulta de interações de natureza física entre o adsorvato e o adsorvente, não demandando energia de ativação (Shaw, 1975).

A técnica de adsorção se destaca como uma das metodologias mais eficazes para eliminar corantes de efluentes, resultando em água tratada de qualidade superior quando comparada a outros métodos de descoloração. Foo e Hameed (2010) indicam que a técnica é de fácil utilização, uma vez que não requer nenhum recurso específico, cuja principal limitação é o elevado custo do adsorvente. Dessa forma, um número crescente de pesquisadores tem se empenhado na criação de materiais adsortivos alternativos, com caráter sustentável e de baixo custo, para a aplicação no tratamento e remoção de corantes de efluentes. A Tabela 3 reúne uma série de estudos de adsorção com diferentes adsorventes obtidos a partir de resíduos têxteis.

Tabela 3: Estudos de adsorção de corante com diferentes adsorventes produzido a partir de algodão

Adsorvente	Modificação	Adsorvato	Capacidade máxima de adsorção	Referência
Retalhos de tecido de algodão	Preparo de hidrogéis de celulose regenerada	Azul de metileno	174,71 mg g^{-1}	Wang *et al*., 2021
Retalhos de tecido de algodão	Carbonização e ativação química usando $ZnCl_2$ e KOH	Azul de metileno	Tratamento com $ZnCl_2$: 73,53 mg g^{-1} Tratamento com KOH: 45,45 mg g^{-1}	Chaiya *et al*., 2025
Celulose comercial	Preparo de compósitos magnéticos de celulose, Fe_3O_4 e carvão ativado	Vermelho congo	66,09 mg g^{-1}	Katheresan *et al*., 2012
Resíduos de algodão industrial	Pirólise e impregnação de $ZnCl_2$	Vermelho reativo 141	970,34 mg g^{-1}	Khan *et al*., 2022
Retalhos de tecido de algodão	Carbonização e ativação com KOH	Azul de metileno e vermelho congo	Azul de metileno: 2331 mg g^{-1} Vermelho congo: 7265 mg g^{-1}	Chen *et al*., 2025
Fibras de algodão comercial	Fibras de algodão revestidas com nanopartículas de prata	Azul de metileno e verde malaquita	Azul de metileno: 1538,5 mg g^{-1} Verde malaquita: 944,0 mg g^{-1}	Kalam *et al*., 2021
Resíduos têxteis de algodão pré-consumo	Pirólise	Azul de metileno	502,45 mg g^{-1}	Hossain *et al*., 2025

Fonte: Elaborado pela Autora, 2026.

3.5.1 Fatores que influenciam na adsorção

A fim de aprimorar a taxa de adsorção, é essencial realizar o monitoramento de diferentes variáveis, incluindo as concentrações do adsorvente e do adsorvato, a duração do tempo de contato entre as espécies e as condições do meio, como pH e temperatura. Em um artigo de revisão, Katheresan, Kansedo e Lau (2018) discutiram a definição e o impacto desses aspectos sobre a adsorção, propondo uma faixa de otimização ideal, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4: Descrição dos principais parâmetros da adsorção de corantes

Parâmetro	Descrição	Otimização
Dosagem do Adsorvente	Depende do número de locais de sorção disponíveis na superfície do adsorvente.	Em torno de 10 g L^{-1}
Concentração do Corante	Medida da quantidade de corante dissolvido em água.	Em torno de 0,1 g L^{-1}
Tempo de Contato	Medida de tempo que o adsorvente e o adsorvato são colocados em contato um com o outro.	Para adsorventes eficientes, 3 h
pH	Medida da acidez ou alcalinidade de uma solução, controlando o grau de cargas eletrostáticas transmitidas por moléculas de corante ionizadas.	pH em torno de 6
Temperatura	Medida da temperatura da solução quando a adsorção ocorre. Indica se a adsorção, se é endotérmica ou exotérmica.	Em torno de 30 °C

Fonte: Adaptado de Katheresan, Kansedo e Lau, 2018.

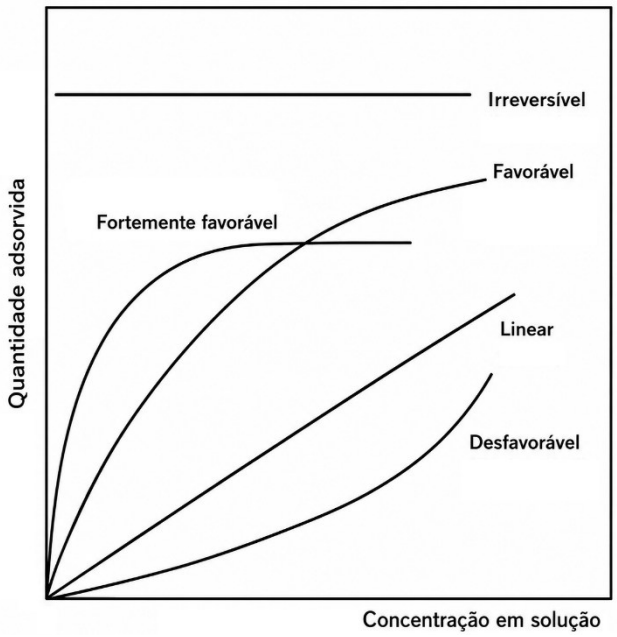
Além dos parâmetros citados na Tabela 4, a capacidade de adsorção é diretamente influenciada pela área superficial do material, local onde se encontram os sítios ativos (Carrión-Fité, 2015). Estudos demonstram que o aumento na área da superfície garante uma capacidade de adsorção otimizada, uma vez que disponibilizam mais pontos de interação com o soluto (Debnath; Das, 2023).

Para além, a variações na carga na camada externa do material também podem alterar, significativamente, a afinidade do sistema. Hu *et al*. (2013) demonstraram experimentalmente que as atrações eletrostáticas, provenientes da superfície do adsorvente, promovem a adsorção, ao passo que a repulsão eletrostática entre as partículas suprime as interações.

3.5.2 Isotermas de adsorção

As isotermas de adsorção relacionam, a uma temperatura constante, o equilíbrio entre as quantidades de material adsorvido e o adsorvato no contido na fase fluida (McCabe *et al*., 1993). A partir destas representações, é possível avaliar as interações entre as espécies e inferir as condições mais favoráveis para o sistema através do perfil da isoterma, exemplificado na Figura 2.

Figura 2: Perfis de isotermas típicos



Fonte: Adaptado de McCabe *et al*., 1993.

Tipicamente, isotermas convexas correspondem a processos favoráveis, onde elevadas concentrações de sólidos podem ser retidas por uma pequena quantidade de adsorvente; pelo gráfico, situações de elevada afinidade são caracterizadas por apresentarem uma curva crescente, seguida por um platô (Malik, 2004). Em contrapartida, curvas côncavas indicam que o processo é desfavorável, com baixa transferência de massa da fase aquosa para o adsorvente (Majd *et al*., 2022).

Ademais, para assegurar a confiabilidade dos parâmetros de adsorção, é essencial determinar a correlação mais adequada para a curva de equilíbrio, de modo que seja possível prever, com precisão, as concentrações das espécies no estado de equilíbrio. Para descrever matematicamente uma isoterma, foram desenvolvidos

modelos com diferentes equações que detalham o processo através de ajustes dos dados experimentais, tais como as de Langmuir e Freundlich, ambas estudadas neste trabalho.

3.5.2.1 Isoterma de Langmuir

A isoterma de Langmuir, proposta em 1918, parte da hipótese de que as interações com o adsorvato ocorrem em locais específicos e energeticamente equivalentes na superfície do adsorvente. O modelo, representado na Equação 1, delimita que cada sítio ativo retém apenas uma única partícula de soluto, resultando na formação de uma monocamada (Al-Ghouti; Da'ana, 2020).

$$q_e = \frac{q_{max} K_L C_e}{1 + K_L C_e} \qquad \text{(Equação 1)}$$

A Equação 1 descreve que a quantidade do soluto adsorvido no equilíbrio (q_e) é dependente da concentração do adsorvato na solução (C_e), sendo limitada pela capacidade máxima de adsorção (q_{max}) e pela constante de Langmuir (K_L), que expressa a afinidade entre adsorvente e adsorvato (Amrutha *et al.*, 2023). Ao rearranjar a Equação 1, o modelo pode ser linearizado e resultar na Equação 2, onde K_L ajusta-se aos dados experimentais.

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{Q_{max} K_L} + \frac{C_e}{Q_{max}} \qquad \text{(Equação 2)}$$

Ademais, Kalam *et al*. (2021) apontam a existência de um importante parâmetro relacionado à isoterma de Langmuir: o fator de separação, denotado por R_L. O termo é capaz de verificar se a adsorção é favorecida: de modo geral, se R_L for maior que 1, o processo tende a ser favorável; quanto menor R_L, o sistema é desfavorável. A Equação 3 elucida o fator de separação.

$$R_L = \frac{1}{1 + (K_L \cdot q_{max})} \qquad \text{(Equação 3)}$$

3.5.2.2 Isoterma de Freundlich

Em contraste com a isoterma de Langmuir, a de Freundlich descreve a adsorção em multicamadas, formadas a partir das interações existentes entre sítios heterogêneos (Hu *et al*., 2023). O modelo apresenta um perfil exponencial, sendo matematicamente expresso pela Equação 4.

$$q_e = K_F \cdot C_e^{\frac{1}{n}} \qquad \text{(Equação 4)}$$

Os termos q_e e C_e relacionam-se através da constante de Freundlich (K_F), um indicador da capacidade de adsorção. Quanto maior o valor de K_F, maior será a capacidade de adsorção. O termo exponencial (1/n) da expressão descreve a heterogeneidade da superfície (McCabe *et al*., 1993). Assim, quando a razão 1/n é maior que zero (0 < 1/n < 1), a adsorção é favorável; quando 1/n é maior que 1, o processo de adsorção é desfavorável; e, quando 1/n = 1, o processo é considerado irreversível (Kalam *et al*., 2021). A forma linearizada do modelo pode ser expressa em função do logaritmo, conforme apresentado na Equação 5.

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \qquad \text{(Equação 5)}$$

3.6 CORANTES

Corantes são uma importante classe de macromoléculas orgânicas complexas, projetadas para conferir tonalidade à superfície dos materiais, podendo ser de origem natural ou sintética. Entretanto, estima-se que entre 30 a 40% dos corantes empregados em processos industriais são descartados através dos efluentes gerados na indústria têxtil, permanecendo nas residuais (Piccin; Gomes; Feris; 2012).

A presença dessa carga orgânica em rios, lagos e mares pode acarretar efeitos negativos sobre a vida aquática pois, além de causarem poluição estética, afetam ciclos biológicos e prejudicam, em particular, o processo de fotossíntese devido ao seu caráter colorido (Lee; Pavlostathes, 2004). Pesquisas realizadas por Chequer *et al.* (2011) também apontam que alguns destes compostos, em especial os

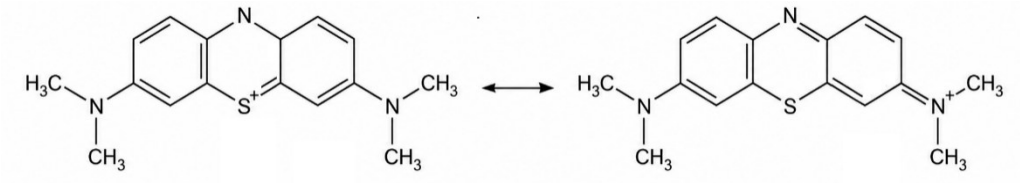
azocorantes e seus derivados, apresentam potencial para induzir câncer e mutações na população.

A forma mais comum de classificar os corantes têxteis é com base nos grupos funcionais que constituem a estrutura molecular, também chamados de cromóforos (Rauf; Ashraf, 2012). Samsami *et al.* (2020) afirmam que, comercialmente, podem ser classificados como reativos, diretos, ácidos, a cuba, sulfurosos, dispersos ou pré-metalizados, a depender da sua aplicação. Complementarmente, os compostos apresentam propriedades físico-químicas essenciais para fixação nos diferentes tipos de fibras naturais, como o algodão e a seda, ou sintéticas, como a poliamida e o poliéster.

3.6.1 Azul de metileno

O azul de metileno (AM) é um corante tiazínico catiônico com extensa aplicação no tingimento no têxtil. O composto, ilustrado na Figura 3, possui uma estrutura heterocíclica contendo um átomo de enxofre (S) e nitrogênio (N) localizados no anel central da molécula planar. Em solução aquosa, a carga positiva do AM é estabilizada através de um sistema de ressonância ao longo de sua conjugação (Khan et *al*., 2022).

Figura 3: Estrutura molecular do azul de metileno



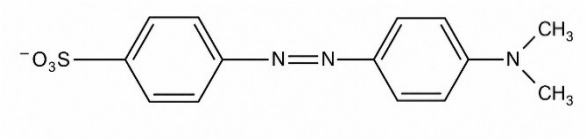
Fonte: Elaborado pela Autora, 2026.

Para Bollinger *et al*. (2025), o principal interesse em estudos relacionados ao tratamento de efluentes que contenham AM deve-se ao seu elevado grau de estabilidade e solubilidade em água à temperatura ambiente. Devido a essa característica, o corante é dificilmente removido do meio, uma vez que tende a manter-se disperso no ambiente. Para além, Willmott, Guthrie e Nelson (1998), reforçam que, de modo geral, o maior desafio no tratamento de efluentes está associado aos corantes solúveis.

3.6.2 Alaranjado de metila

O alaranjado de metila (ALM) é um corante aniônico pertencente à classe dos azocorantes. Sua estrutura molecular, apresentada na Figura 4, é constituída por um grupo funcional azo (N=N) ligado a dois anéis aromáticos, resultando em um sistema conjugado responsável pela intensa coloração do composto. Além disso, a molécula possui um grupo sulfonato (SO_3^-), responsável pelo caráter aniônico do composto quando este encontra-se em solução aquosa com pH superior a 4,4 (Afadzi, 2025).

Figura 4: Estrutura molecular do alaranjado de metila



Fonte: Elaborado pela Autora, 2026.

Ito e Yamamoto (2015) relatam que, além de sua aplicação na indústria têxtil, o ALM também é utilizado como um indicador ácido-base, apresentando transição de cor visível quando o pH do meio está contido em uma faixa de 3,1 a 4,4, uma vez que atua como aceptor de prótons em soluções aquosas. Contudo, devido à sua elevada solubilidade em água, estabilidade química e fácil detecção por técnicas espectrofotométricas, o corante é frequentemente utilizado como molécula modelo em estudos de adsorção aplicados ao tratamento de efluentes sintéticos.

3.6.3 Propriedades ópticas dos corantes

A principal propriedade de um corante consiste na capacidade de absorver seletivamente energia ultravioleta e visível do espectro eletromagnético. Tal característica óptica deve-se à presença de grupos cromóforos que possibilitam transições eletrônicas entre os orbitais moleculares (Zollinger, 1991). Por consequência, quando há a incidência de luz, determinados comprimentos de onda da luz visível são absorvidos pela molécula, enquanto os demais são transmitidos, originando a cor observada. Assim, a absorção de energia é quantizada e conduz a passagem dos elétrons de orbitais do estado fundamental para orbitais de maior energia em um estado excitado (Miessler; Fischer; Tarr, 2014).

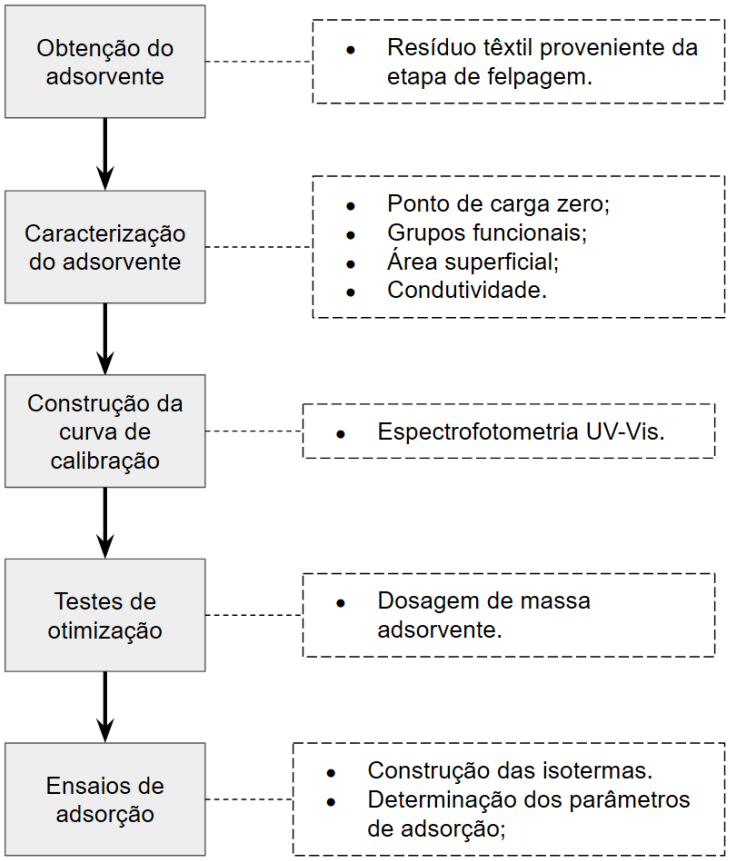
A quantização pode ser realizada através de análises espectroscópicas, tais como a espectroscopia no ultravioleta-visível (UV-Vis). Por intermédio dela, é possível obter informações sobre os tipos de ligações entre átomos, a vizinhança atômica desses átomos e ligações, a presença e a concentração de substâncias em amostras, entre diversas outras finalidades (Leite; Prado, 2012).

A técnica UV-Vis é baseada na medição da transmitância ou da absorbância das soluções contidas em células transparentes com um comprimento de caminho óptico específico. Na técnica, amostras cujas moléculas contenham vibrações excitadas à luz visível (190-800 nm) são analisadas, resultando em espectros de absorbância por concentração, cuja relação é linear dada a lei de Lambert-Beer (Skoog; Holler; Crouch, 2018).

4 METODOLOGIA

O presente capítulo apresenta os materiais e as etapas realizadas para o estudo de adsorção de corantes empregando o uso de resíduos têxteis como material adsorvente, bem como os ensaios de caracterização do resíduo, cujos principais procedimentos metodológicos estão sintetizados no fluxograma da Figura 5.

Figura 5: Fluxograma geral da metodologia experimental



Fonte: Elaborado pela Autora, 2026.

4.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

O resíduo têxtil foi cedido por uma indústria têxtil localizada em Jaraguá do Sul (SC), proveniente do processo de felpagem do moletom. Foram coletadas amostras de fibras de algodão tingidos nas cores vermelho (AV) e branco (AB), conforme apresentado na Figura 6. A escolha por coletar resíduos de diferentes cores se deu para que o estudo avaliasse a eficiência do mecanismo de adsorção de resíduos com diferentes processamentos têxteis.

Figura 6: Amostras dos resíduos de algodão AB e AV



Fonte: Elaborado pela Autora, 2026.

Quanto aos reagentes, foram utilizados: azul de metileno da Êxodo Científica; alaranjado de metila da Sigma Aldrich; e ácido clorídrico, hidróxido de sódio e cloreto de sódio da Anidrol. Quanto aos equipamentos, foram empregados: espectrômetro Perkin Elmer Frontier; espectrofotômetro da Shimadzu, modelo UV-1800; pHmetro de bancada Kaviski; condutivímetro Metrohm, modelo 912; shaker Goshaker, modelo SK 180-Pro; balança semi-analítica; e agitador magnético.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS ADSORVENTES

A caracterização química dos algodões foi realizada via espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) por reflectância total atenuada (ART) em um espectrômetro Perkin Elmer Frontier. Os espectros foram obtidos na faixa de número de onda de 4.000 a 450 cm^{-1}, com resolução 2 cm^{-1} e 16 varreduras.

Para determinar o ponto de carga zero (pH_{PZC}) dos adsorventes, foram preparadas 10 soluções de cloreto de sódio (NaCl) 0,1 mol L^{-1} com pH em uma faixa de 2 a 11, ajustados com hidróxido de sódio (NaOH) e ácido clorídrico (HCl), ambos na concentração de 0,1 mol L^{-1}. Posteriormente, uma alíquota de 10 mL de cada solução foi coletada e transferida para um tubo de ensaio contendo 10 mg de adsorvente. As amostras foram mantidas sob agitação em 200 rotações por minuto (RPM) por 24 h. Após o tempo de contato, o pH final de cada solução foi aferido com um pHmetro digital e, na sequência, foi calculado a diferença entre o pH inicial e final, correspondente à variação do pH, em função do pH inicial.

Quanto à caracterização textural, esta por sua vez foi realizada no departamento de Química da UFSC Florianópolis. Nesse contexto, as amostras foram previamente submetidas à vácuo a uma temperatura de 100 °C por 24 h. A partir da isoterma de adsorção ajustada ao modelo de BET (Brunauer-Emmett-Teller), foi determinada a área superficial.

Por fim, foi realizado um estudo de condutividade dos algodões em meio aquoso. Para tanto, 10 mg de cada algodão foram adicionados em béqueres com 10 e 20 mL de água, sob agitação magnética durante 10 minutos. Decorrido o tempo de contato, a condutividade da água foi mensurada através de um condutivímetro. De maneira complementar, foi realizada uma titulação condutimétrica com NaCl 0,1 mol L^{-1}, mediante a sucessivas adições da solução salina em um béquer contendo 10 mg de algodão e 20 mL de água.

4.3 CURVAS DE CALIBRAÇÃO

As construções das curvas de calibração foram realizadas em duas etapas. Inicialmente, foi realizada uma análise de varredura na região do UV-Vis para determinar o comprimento de onda de absorção máxima dos corantes AM e ALM, na concentração inicial de 10 mg L^{-1} respectivamente. Posteriormente, realizou-se seis diluições das soluções iniciais e mediu-se suas absorbâncias por espectrofotometria UV-Vis, seguindo as concentrações de: 9; 7; 6; 5; 3; e 2 mg L^{-1}.

4.4 TESTES DE OTIMIZAÇÃO

A fim de estabelecer a quantidade ideal de material necessário para construir as isotermas, foi conduzido um estudo preliminar para analisar a eficácia na remoção dos corantes. Para tanto, a adsorção, realizada em triplicata, foi feita com 5 mL de solução de AM e ALM nas concentrações de 60 e 6 mg L^{-1} respectivamente, variando a quantidade do resíduo de algodão entre 10, 20 e 50 mg. As amostras foram acondicionadas em frascos âmbar e mantidos sob agitação simultânea de 200 RPM por 24h.

Ao final do tempo de contato, foi realizada a leitura das amostras por espectrofotometria UV-Vis. O percentual de remoção foi calculado por meio da Equação 6, onde C_0 é a concentração inicial da solução e C_t é a concentração final.

$$R(\%) = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \qquad \text{(Equação 6)}$$

4.5 ENSAIOS DE ADSORÇÃO

Partindo dos parâmetros de dosagem de adsorvente otimizados, os testes de adsorção foram conduzidos em triplicata e em temperatura ambiente, utilizando frascos âmbar individuais contendo uma alíquota de 5 mL da solução de corante, cujas concentrações empregadas estão detalhadas na Tabela 5. As amostras foram mantidas sob agitação simultânea de 200 RPM por 24h e, ao final do tempo de

contato, foi realizada a leitura das amostras por espectrofotometria UV-Vis na faixa de 720 a 300 nm.

Tabela 5: Concentrações dos corantes AM e ALM

Concentração AM (mg L^{-1})	Concentração ALM (mg L^{-1})
100	10
80	8
70	6
60	4
50	2
40	1
30	0,5
20	0,3
-	0,1

Fonte: Elaborado pela Autora, 2026.

De maneira complementar, foram realizados ensaios de adsorção individuais para cada adsorvente empregando uma mistura dos corantes AM e ALM, nas concentrações de 100 mg L^{-1} e 10 mg L^{-1} respectivamente. O teste foi realizado seguindo as mesmas condições experimentais estabelecidas anteriormente, onde em cada frasco foi adicionado uma alíquota de 5 mL da mistura e 10 mg de algodão. Após 24h, a solução remanescente de cada adsorvato foi quantificada por espectrofotometria UV-Vis.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CARACTERIZAÇÕES

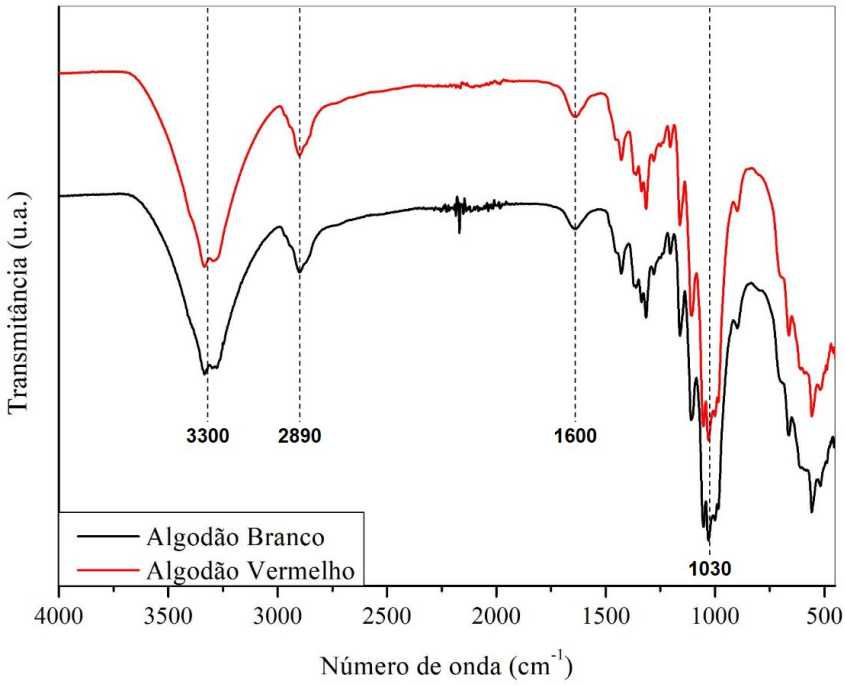
A caracterização de uma amostra trata-se de uma etapa fundamental em uma pesquisa, visto que fornece informações essenciais acerca da natureza física, química

e estrutural do substrato. Sob essa perspectiva, os subtópicos a seguir apresentam os resultados da caracterização dos algodões vermelho e branco.

5.1.1 Caracterização do material por Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier por Refletância Total Atenuada (ATR-IR)

A caracterização química, realizada via Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier por Refletância Total Atenuada (ATR-FTIR), permitiu identificar os principais grupos funcionais presentes nas amostras de algodão, fornecendo informações acerca dos possíveis sítios ativos envolvidos nas interações entre adsorvente e adsorvato. Os espectros obtidos são apresentados na Figura 7.

Figura 7: Espectros de infravermelho das amostras de algodões



Fonte: Elaborado pela Autora, 2026.

Os espectros ATR-FTIR obtidos para as duas amostras apresentaram perfis semelhantes, com bandas de absorção sobreponíveis. Dessa forma, destaca-se banda intensa observada em 3300 cm^{-1}, característico dos grupos hidroxila (OH) da celulose (Chung; Lee; Choe, 2004); a banda em 2890 cm^{-1} é característico da vibração de estiramento de C-H; a banda em 1600 cm^{-1} pode estar relacionada à presença de celulose hidratada (De Rosa *et al*., 2010); vibrações inferiores a 1500 cm^{-1} consistem

na impressão digital do composto, onde destaca-se a banda intensa em 1030 cm^{-1}, relacionado às vibrações de estiramento entre carbono e oxigênio do polissacarídeo na celulose (Portella *et al*., 2016).

5.1.2 Determinação do ponto de carga zero

As propriedades eletrostáticas superficiais das fibras de algodão foram investigadas por meio da determinação do ponto de carga zero (pH_{PZC}), parâmetro que exprime o valor de pH onde a carga líquida da matriz é eletricamente nula. Dessa forma, constatou-se que o AV possui pH_{PZC} de 6,52 e AB pH_{PZC} de 6,13. Os resultados encontram-se próximos aos valores reportados por Bouatay *et al*. (2014), ao avaliarem diferentes fibras de celulósicas, determinaram pH_{PZC} de 5,4 para o algodão branqueado.

Para a indústria têxtil, o pH_{PZC} das fibras é um fator importante para estabelecer as condições de processamento e parâmetros operacionais das etapas de beneficiamento, uma vez que a carga da superfície determina a natureza das interações da matéria prima com os produtos químicos auxiliares. Segundo Carrión-Fité (2015), modificações físico-químicas na estrutura da fibra podem alterar a carga superficial. O autor enfatiza que o processo de branqueamento, onde o material é oxidado em meio alcalino, confere ao algodão maior número de grupos hidroxilas que, por consequência, aumentam a carga negativa da fibra e diminuem o pH_{PZC}.

Nesse contexto, o menor valor de pH_{PZC} observado em AB pode indicar uma superfície mais negativamente carregada em comparação ao AV. Todavia, a diferença entre os resultados de potencial foi pequena e, considerando a metodologia empregada, não é possível afirmar que há uma distinção significativa entre as superfícies dos materiais em relação ao pH_{PZC}.

Por fim, destaca-se que intervalos onde o pH do meio está acima do pH_{PZC}, a superfície do material está carregada negativamente, ao passo que em intervalos de pH inferiores ao pH_{PZC}, a superfície apresenta cargas positivas (Pusic *et al*., 1999). Assim, o pH do sistema experimental pode influenciar nos resultados da adsorção, uma vez que a carga superficial determina as interações do sistema.

5.1.3 Caracterização textural via isoterma de adsorção ajustada ao modelo de Brunauer-Emmett-Teller (BET)

A avaliação da estrutura textual e a quantificação da área superficial específica das matrizes foram realizadas por meio da isoterma de adsorção ajustada ao modelo de Brunauer-Emmett-Teller (BET). Os resultados obtidos revelaram que o AV apresenta uma área de 9,36 $m^2 g^{-1}$, ao passo em que AB possui uma área superficial de 13,23 $m^2 g^{-1}$. A variação nos resultados indica que o processo de beneficiamento têxtil sofrido pela fibra branca conferiu à fibra maior área superficial.

Em um estudo realizado por Chaiya e Kampeerapappun (2025), o algodão carbonizado a partir de retalhos de tecido apresentou área superficial de 15,88 $m^2 g^{-1}$, enquanto Zhu *et al*. (2011) citam uma área de 11,87 $m^2 g^{-1}$ para a celulose comercial, ambos os resultados ajustados ao modelo de BET. Sob essa perspectiva, os resultados das amostras de AV e AB estão de acordo com a literatura.

5.1.4 Estudo da condutividade

A condutimetria consiste em um método de análise que se fundamenta na medida da condutividade elétrica de um sistema aquoso; variações na condutividade indicam a presença de íons na solução (Skoog; Holler; Crouch, 2009). Na região de interface entre o adsorvente e o meio de dispersão manifestam-se uma série de fenômenos de superfície característicos. Quando em contato com um meio aquoso, a maior parte das substâncias sólidas adquire uma carga elétrica superficial, capaz de influenciar nas interações das espécies próximas à superfície: atração ou repulsão eletrostática de íons dispersos no meio (Shaw, 1975).

Nesse contexto, a aplicação da técnica foi adaptada para avaliar o comportamento do adsorvente quando em contato com a fase líquida e verificar a presença de cargas na superfície do material. A Tabela 6 indica os resultados de condutividade de 10 mg, 25 mg e 50 mg dos resíduos de algodão em 10 e 20 mL de água deionizada, cujos resultados correspondem ao módulo da variação de condutividade em relação ao solvente. Partindo de tais resultados, é evidenciado comportamentos distintos entre AV e AB em meio aquoso, indicando a presença de cargas superficiais.

Tabela 6: Variação de condutividade de 10, 25 e 50 mg

Massa de algodão (mg)	**Condutividade em 10 mL (μS cm^{-1})**		**Condutividade em 20 mL (μS cm^{-1})**	
	AV	AB	AV	AB
10	0,0	4,1	12,4	1,8
25	3,0	5,8	23,9	2,9
50	18,7	7,2	43,8	6,2

Fonte: Elaborado pela Autora, 2026.

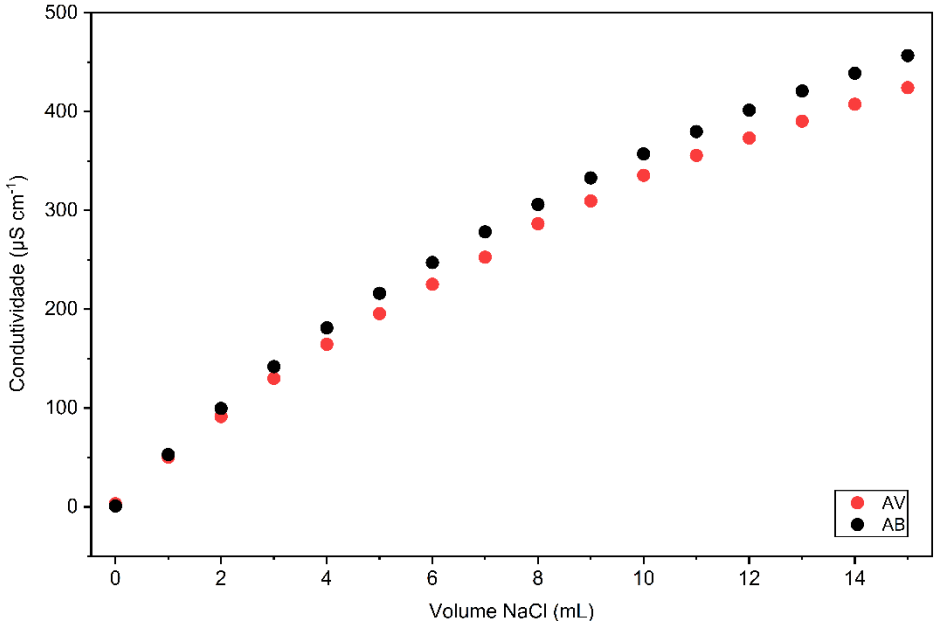
Ao avaliar o sistema com 10 mL de água, é constatado que a condutividade elétrica do AV sobe de 3,0 a 18,7 μS cm^{-1} conforme a massa de algodão aumenta; o acréscimo na condutividade sugere a presença de espécies condutoras na superfície do material que, ao entrarem em contato com água, são liberadas para o meio aquoso. Em contrapartida, para o AB observou-se um decréscimo nas medidas de condutividade em relação à medida inicial da *baseline*, cuja variação é de 4,1 a 7,2 μS cm^{-1}. Assim, quanto maior a massa do material, menor foi a condutividade observada em relação à da água pura, indicando que os algodões possuem sítios ativos que interagem com os íons do próprio solvente.

Todavia, o volume de 10 mL de água trouxe algumas limitações metodológicas, uma vez que os resultados baixos ou inferiores à *baseline* podem mascarar as possibilidades de trocas iônicas do sistema. A restrição experimental foi superada ao replicar os ensaios com 20 mL de solução, cujos resultados de condutividade se manifestam de forma clara para os dois adsorventes.

Assim, nos sistemas com 20 mL, o aumento de 10 para 50 mg de AV resultou em um salto de condutividade de 12,4 para 43,8 μS cm^{-1}, um aumento percentual expressivo de aproximadamente 250%; o acréscimo na medida indica a dissociação de espécies iônicas da superfície do material para o seio da solução. No caso do AB, a condutividade aumentou mais de 240%, assumindo valores 1,8 a 6,2 μS cm^{-1}; esse resultado sugere que, devido à maior disponibilidade de solvente, as fibras do AB tornaram-se propensas a liberar íons para o sistema.

De maneira complementar, realizou-se uma titulação condutimétrica com NaCl para avaliar o comportamento da condutividade do sistema aquoso quando posto em contato com um sal, cujos resultados estão apresentados na Figura 8.

Figura 8: Perfil condutométrico de AV e AB obtido por titulação com NaCl



Fonte: Elaborado pela Autora, 2026.

O gráfico da Figura 8 demonstra que há um aumento progressivo nos valores de condutividade em função do volume adicionado de NaCl para ambos os materiais, em decorrência ao incremento de íons Na^+ e Cl^-. No decorrer da titulação, é possível observar que o perfil da curva de AV é menor AB, sugerindo que os materiais possuem diferentes densidades de cargas superficiais.

Dessa forma, propõem-se que a superfície de AV apresenta uma maior capacidade de interações eletrostáticas, quando comparada à AB, de modo a reduzir a mobilidade dos íons em solução. Os resultados da Tabela 6 corroboram com essa hipótese uma vez que, quando em contato com o meio aquoso, o material vermelho apresenta maior condutividade elétrica, indicando que há liberação de espécies iônicas. Uma vez que há a presença de portadores de carga, os íons cloreto e sódio adicionados no sistema interagem com os contra-íons liberados pelo algodão.

Portanto, os ensaios mostraram-se ideais para discriminar, em caráter qualitativo, a atividade eletrostática das superfícies dos algodões, comprovando que ambos os resíduos têxteis possuem cargas superficiais ativas e passíveis de interações iônicas. Os resultados revelam que as cargas superficiais do material são diferentes, fator que pode estar associado às remanescentes do seu processo de beneficiamento têxtil.

5.2 CURVAS DE CALIBRAÇÃO

As curvas de calibração dos corantes foram obtidas por espectrofotometria UV-Vis a partir da análise de soluções de corantes em diferentes concentrações. Ao realizar o espectro de varredura das soluções iniciais, foi determinado que o AM possui comprimento de onda máximo de 665 nm e o ALM 474 nm. De modo similar, estudos indicam uma faixa de absorção máxima varia de 675 e 464 para AM e ALM respectivamente (Vukčević *et al*., 2024).

A relação linear entre absorbância e concentração foi determinada por regressão linear. Os resultados, apresentados na Tabela 7, foram utilizados para quantificar as concentrações residuais dos corantes após os ensaios de adsorção, seguindo a Lei de Lambert-Beer. Os gráficos do ajuste linear das curvas de calibração estão apresentados no Apêndice A.

Tabela 7: Comprimento de onda de máxima absorção e equação linear da curva de calibração dos corantes AM e ALM

Corante	Comprimento de onda máximo (nm)	Equação linear
Azul de metileno	665,0	y = 0,01532 + 127,58749x
Alaranjado de metila	474,5	y = -0,03845 + 752,7467x

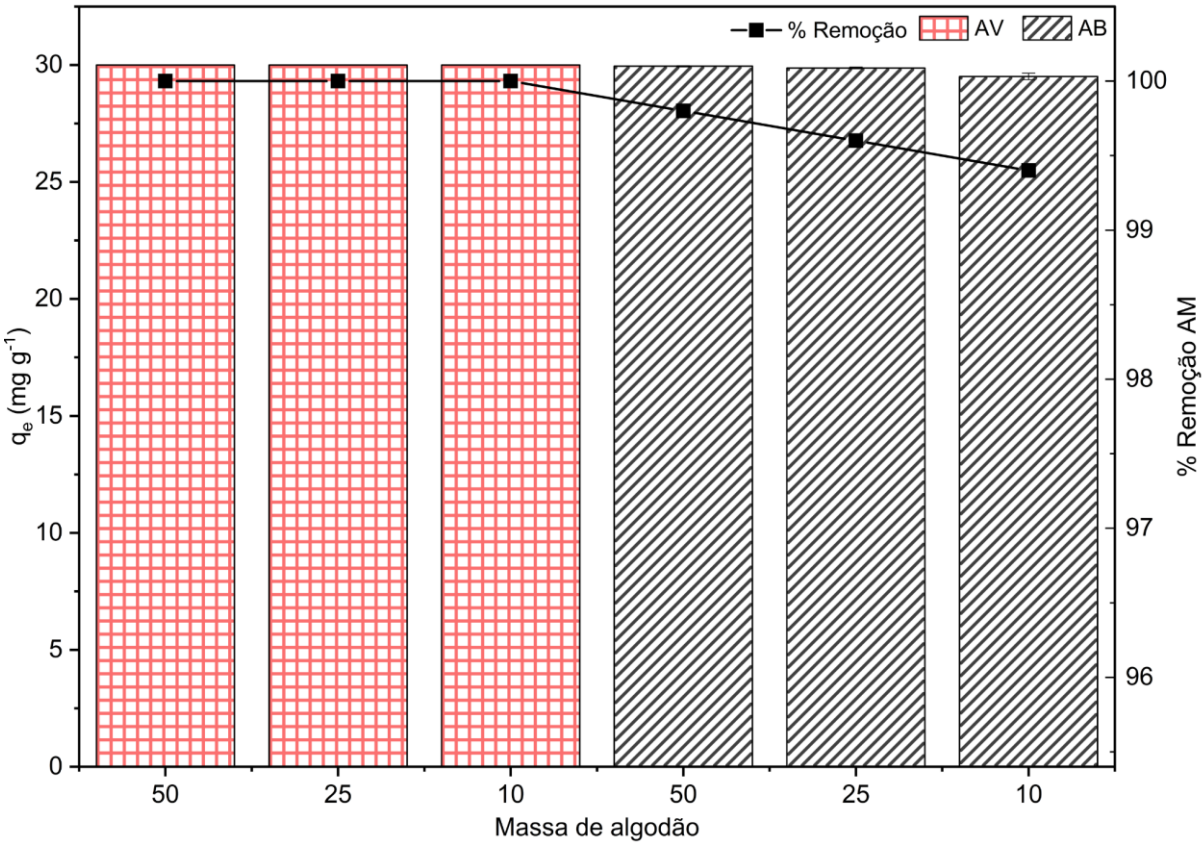
Fonte: Elaborado pela Autora, 2026.

5.3 ENSAIOS PRELIMINARES DE ADSORÇÃO

A eficiência na remoção dos corantes foi realizada como um estudo inicial para avaliar a influência da quantidade de adsorvente no sistema de adsorção. Convém destacar que, inicialmente, a metodologia foi planejada para ser executada com as soluções de corante a partir da concentração de 0,01 g L^{-1}. Contudo, nesta condição, os testes com o AV indicaram 100% da remoção do corante AM em apenas 2 h de ensaio. Desse modo, a metodologia foi adaptada aumentando a concentração de AM para 0,1 g L^{-1}, com o objetivo de melhor avaliar os limites de saturação dos adsorventes.

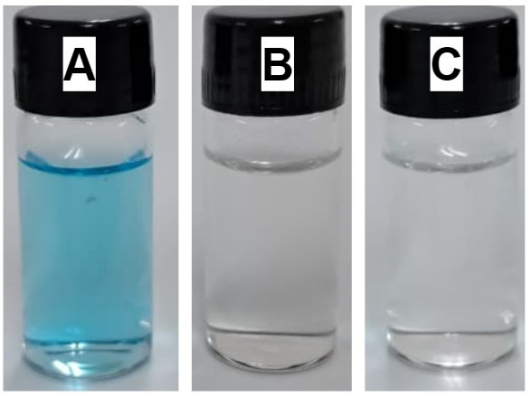
A Figura 9 relaciona a quantidade adsorvida (q_e) e o percentual de remoção do corante AM após 24 h, enquanto a Figura 10 ilustra as soluções antes e após a adsorção empregando as massas de 50, 25 e 10 mg de cada algodão.

Figura 9: Comparação de adsorção de diferentes massas de AV e AB para remoção de AM



Fonte: Elaborado pela Autora, 2026.

Figura 10: Amostras das soluções de corante AM antes da adsorção (A) e após a adsorção com o algodão AV (B) e AB (C) após 24h

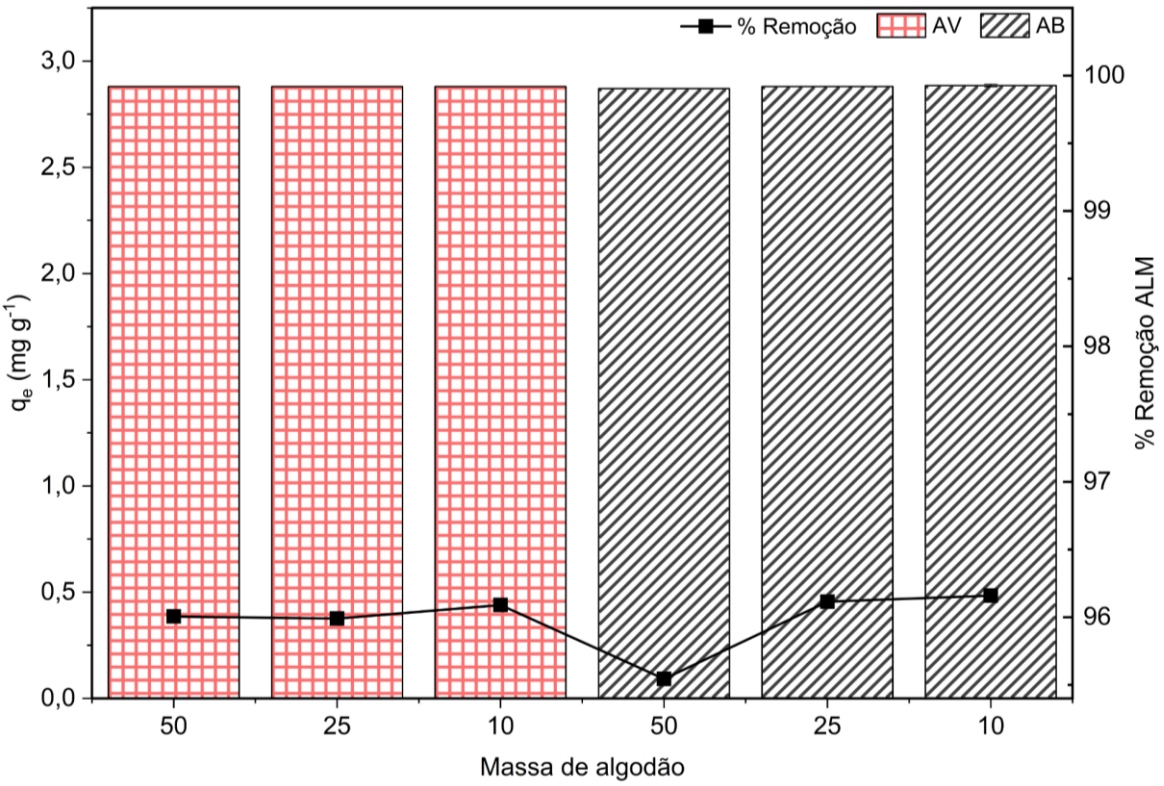


Fonte: Elaborado pela Autora, 2026.

De acordo com os resultados apresentados nas Figuras 9 e 10, observa-se que ambos os algodões se mostraram eficientes no ensaio de adsorção, com uma taxa de remoção de corante superior a 96%. As amostras de AV removeram 100% do corante, independentemente da massa empregada, resultando em capacidade de adsorção de 30 mg de corante por grama de adsorvente. As amostras de AB, por sua vez, ainda apresentaram resultados satisfatórios, cujo menor desempenho foi de 98,4%. Os resultados também podem ser observados na Figura 10, onde há uma diminuição significativa na coloração da solução após o contato com ambos os tipos de algodão, sendo que a solução tratada com algodão vermelho se torna incolor.

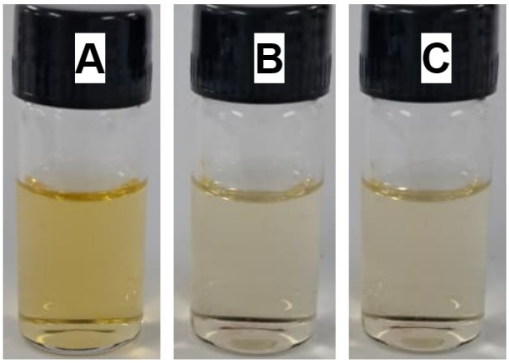
De maneira análoga, as Figuras 11 e 12 apresentam, respectivamente, a relação de q_e e o percentual de remoção do corante ALM após 24 h e as soluções antes e após a adsorção com diferentes massas dos algodões.

Figura 11: Comparação de adsorção de diferentes massas de AV e AB para remoção de ALM



Fonte: Elaborado pela Autora, 2026.

Figura 12: Amostras das soluções de corante AM antes da adsorção (A) e após a adsorção com o algodão AV (B) e AB (C) após 24h



Fonte: Elaborado pela Autora, 2026.

Quanto ao ALM, por sua vez, os percentuais de remoção do corante permaneceram na faixa de 95,6% a 96,2% para AV e AB respectivamente, desempenho inferior quando comparado aos resultados do AM. Além disso, a variação de massa não alterou significativamente a capacidade de adsorção. Ao observar a Figura 12, embora haja uma diminuição na intensidade da coloração da solução inicial, a descoloração é menos acentuada, o que indica uma menor afinidade entre esse corante e as fibras de algodão.

Partindo dos testes de otimização, foi estabelecido utilizar 10 mg de massa de adsorvente para os ensaios de adsorção que construíram as isotermas, uma vez que essa condição apresentou resultados satisfatórios.

5.4 ISOTERMAS DE ADSORÇÃO

As isotermas de adsorção relacionam a quantidade de adsorvato adsorvida pelo adsorvente e a concentração remanescente da espécie de interesse na solução após o sistema atingir o equilíbrio. Os modelos de Langmuir e Freundlich, ambos utilizados neste estudo, permitiram determinar informações importantes acerca da afinidade entre o adsorvato e a capacidade máxima de adsorção dos corantes AM e ALM empregando o uso de resíduos de algodão têxteis como adsorvente.

5.4.1 Adsorção do corante azul de metileno

A Tabela 8 apresenta os resultados da adsorção do corante AM para os adsorventes AV e AB, aplicando os modelos de Langmuir e Freundlich. De modo complementar, os respectivos gráficos com os ajustes linearizados das isotermas estão apresentados no Apêndice B.

Tabela 8: Parâmetros das isotermas de adsorção dos modelos linearizados de Langmuir e Freundlich do corante AM com AV e AB

Adsorvente	Langmuir				Freundlich		
	q_{max} (mg g^{-1})	K_L (L mg^{-1})	R_L	R^2	K_F (mg g^{-1})(L mg^{-1})	1/n	R^2
AV	43,290	2,898	0,008	0,999	26,915	0,230	0,912
AB	62,500	1,019	0,015	0,961	28,840	0,531	0,990

Fonte: Elaborado pela Autora, 2026.

O modelo de Langmuir parte do princípio de que a superfície do adsorvente é completamente homogênea, onde um número limitado de sítios são preenchidos pelo soluto e formam uma monocamada, enquanto Freundlich sugere a formação de uma camada heterogênea, com diferentes energias (Shaw, 1975). Com base na Tabela 8, na medida em que AV ajustou-se melhor à isoterma de Langmuir, o AB ajustou-se ao modelo de Freundlich, conforme o coeficiente de determinação (R^2) apresentado.

Os resultados da capacidade máxima de adsorção (q_{max}) indicam que AB possui maior potencial adsortivo, alcançando 62,500 mg g^{-1}, enquanto AV apresentou q_{max} de 43,500 mg g^{-1}. A diferença entre os parâmetros pode estar relacionada à área superficial dos algodões, o que favorece a disponibilidade de sítios ativos (Debnath; Das, 2023). Uma vez que AB possui maior área de superfície, conforme determinado por BET, é possível que existam mais sítios disponíveis para a adsorção, justificando a diferença entre os resultados.

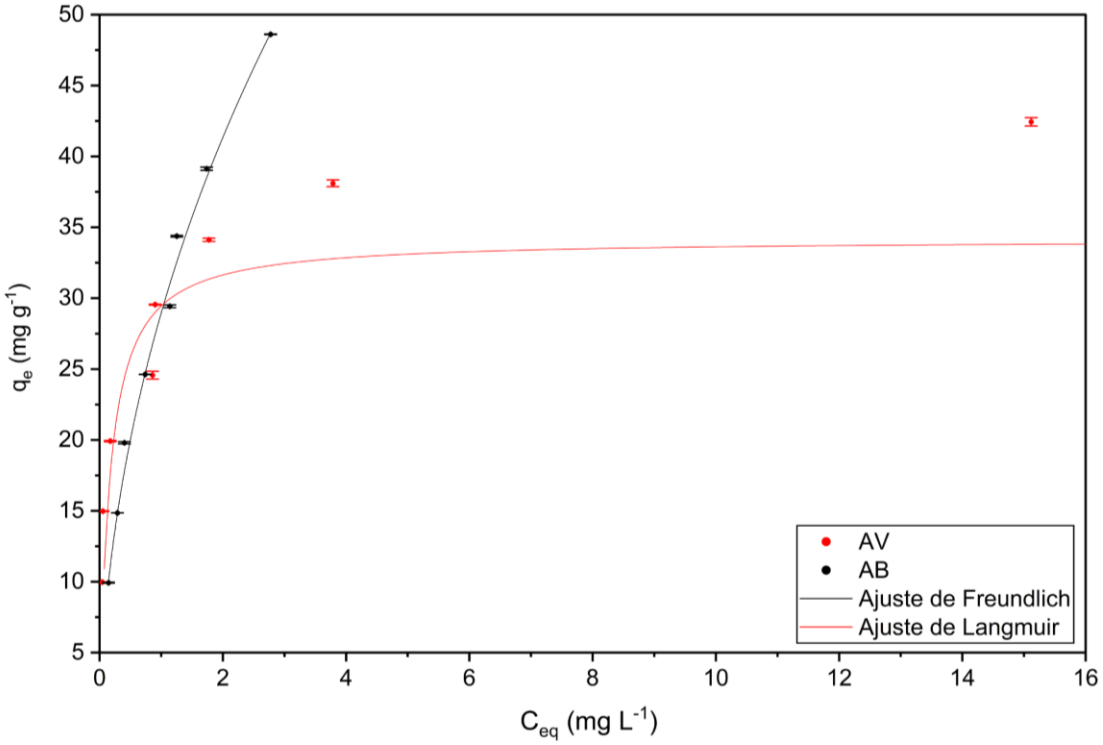
A constante de Langmuir (K_L), por sua vez, expressa a afinidade entre adsorvente e adsorvato. Com valores de K_L de 2,898 e 1,019 L mg^{-1} para AV e AB repectivamente, os resultados revelam que o AV apresenta maior afinidade com o corante AM, indicando que existem interações fortemente favoráveis neste sistema. McCabe *et al*. (1993) reforça que resultados próximos a 1, como o caso do AB,

correspondem à sistemas lineares, cuja fração adsorvida é proporcional à concentração na fase líquida.

Na literatura, a maioria das pesquisas relacionadas a adsorção do corante AM com algodão empregam adsorventes quimicamente modificados, a fim de intensificar capacidade adsortiva (Santos Junior *et al*., 2025). Toy, *et al*. (2025), ao avaliarem celulose sulfonada para a adsorção de AM, reportaram q_{max} de 37,65 mg g^{-1} e K_L de 0,054 L mg^{-1}, resultados inferiores aos determinados neste trabalho. Por sua vez Mohammed *et al*. (2021), ao prepararem hidrogéis de celulose regenerada a partir de retalhos de algodão, obtiveram q_{max} 174,71 mg g^{-1}. Dessa forma, a natureza dos grupos funcionais presentes na superfície do adsorvente mostra ter grande influência nos parâmetros de interação.

De modo complementar, os parâmetros de Freundlich fornecem informações importantes acerca das interações envolvidas, cujo termo que apresenta maior destaque, para esse sistema, é o fator de heterogeneidade (1/n). Uma vez que os valores estão compreendidos na faixa de 0 a 1, conclui-se que a retenção de AM é favorável. Ademais, a afinidade entre as espécies pode ser reforçada através do perfil das curvas de adsorção (Majd *et al*., 2022), conforme apresentado no gráfico da Figura 13, que relaciona a quantidade de sólidos adsorvidos (C_{eq}) em equilíbrio com a fase fluida (q_e).

Figura 13: Isotermas de adsorção de AV e AB para o corante AM



Fonte: Elaborado pela Autora, 2026.

Para Moreno-Castilla (2004), o formato das isotermas consiste em uma ferramenta experimental útil para determinar a natureza de um fenômeno de adsorção específico, sendo conveniente a sua classificação através do seu perfil. Sob essa perspectiva, a subida inicial, seguida por um platô, reforça uma adsorção de alta afinidade para o AV, característico do modelo de Langmuir; o caráter crescente para AB, por sua vez, reforça a natureza do modelo de Freundlich.

5.4.2 Isotermas de adsorção do corante alaranjado de metila

A Tabela 9 exprime os resultados da adsorção do corante ALM para os algodões AV e AB. O perfil de adsorção se ajustou somente ao modelo de Freundlich. Os gráficos com os ajustes das isotermas linearizados estão apresentados no Apêndice C.

Tabela 9: Parâmetros das isotermas de adsorção dos modelos linearizados de Langmuir e Freundlich do corante ALM com AV e AB

Adsorvente	Langmuir				Freundlich		
	q_{max} (mg g^{-1})	K_L (L mg^{-1})	R_L	R^2	K_F (mg g^{-1})(L mg^{-1})	1/n	R^2
AV	-	-	-	-	32,359	0,820	0,761
AB	-	-	-	-	8,995	2,080	0,853

Fonte: Elaborado pela Autora, 2026.

Uma vez que os resultados experimentais com o corante ALM não se ajustaram ao modelo de Langmuir, há indícios de que a superfície do adsorvente possui sítios ativos distintos, justificando o ajuste à Freundlich. Para esse modelo, a constante de Freundlich (K_F) está relacionada com a capacidade adsortiva do material. Com base na Tabela 9, o AV apresentou K_F de 32,359 mg g^{-1} L mg^{-1}, enquanto AB apresentou um valor de 8,995 mg g^{-1} L mg^{-1}. A diferença entre os resultados indica que AV possui maior capacidade de adsorção do ALM, indicando uma interação maior entre o corante e a superfície adsorvente quando comparado a AB.

Maletić *et al*. (2024), ao avaliarem a adsorção do ALM por adsorventes obtidos a partir da carbonização e ativação química de fios de algodão, relataram K_F variando de 0,042 a 24,5 mg g^{-1} L mg^{-1}. Apesar de o valor de K_F obtido para o AV exceder a faixa reportada pelos autores, o resultado pode ser considerado consistente com a literatura, uma vez que encontram-se na mesma ordem de grandeza. A diferença entre os resultados pode se dar devido às condições experimentais distintas, tais como pH, temperatura e concentração do corante.

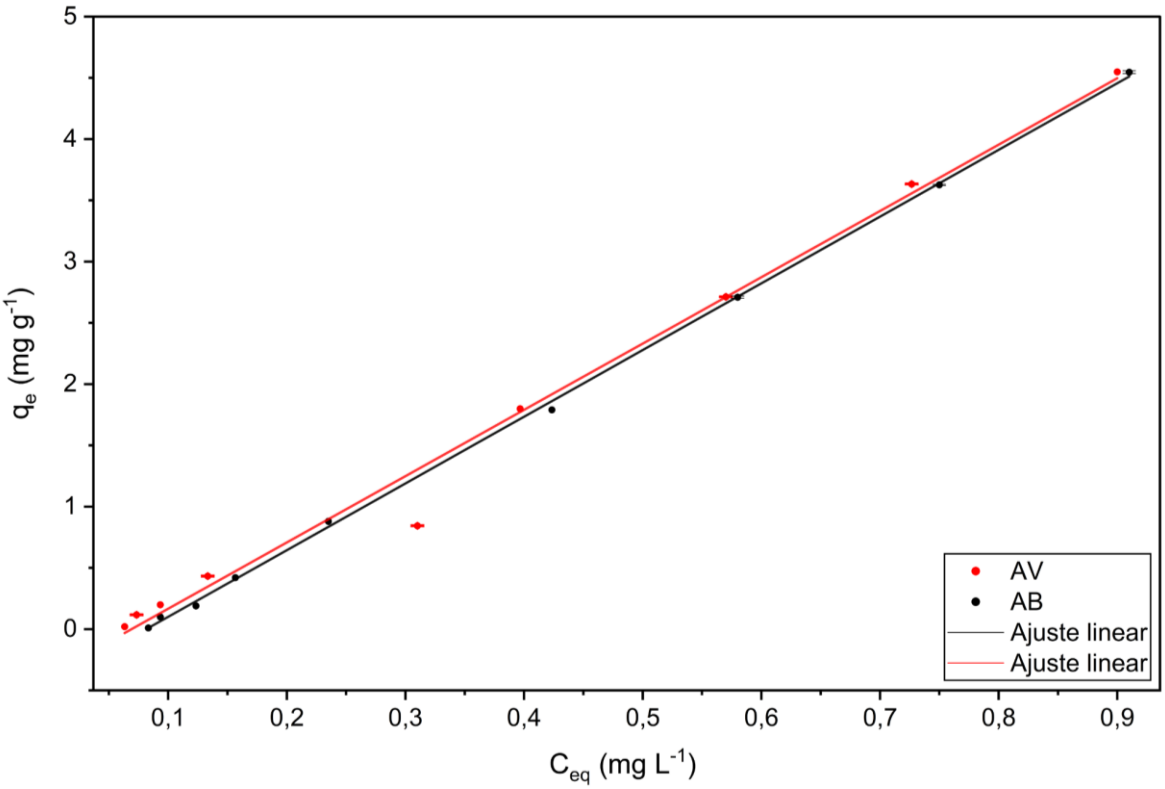
A tendência de adsorção pode ser explicada pela magnitude do termo 1/n onde, de forma geral, quando este compreende valores de 0 a 1 há indícios de que a adsorção é favorável, enquanto valores superiores a 1 sugerem que o processo é desfavorável. Para o AV, foi obtido valor de 1/n igual a 0,820, caracterizando um processo favorável de adsorção; em contrapartida, AB apresentou valor de 1/n igual a 2,080, indicando que o processo não é favorável e sugerindo interações menos intensas entre o corante e a superfície do material.

Hameed *et al*. (2006) propuseram que em perfis de adsorção ajustados pela Isoterma de Freundlich, valores de 1/n são comumente próximos à 1 devido a presença de sítios ativos com energias diferentes de ligação. Valores maiores do que

1 também podem indicar uma adsorção competitiva, onde a interação entre as moléculas de adsorvato é mais forte que a interação entre adsorvato e adsorvente (Carvalho; Fungaro; Izidoro, 2010).

Por fim, é possível estabelecer que existe uma relação linear entre C_{eq} em função de q_e, conforme a Figura 14, destacando que quantidade adsorvida é proporcional à sua concentração em equilíbrio. Além disso, a ausência de uma curva convexa enfatiza que, para o corante ALM, o perfil é menos favorável para ambos os algodões.

Figura 14: Isotermas de adsorção de AV e AB para o corante ALM



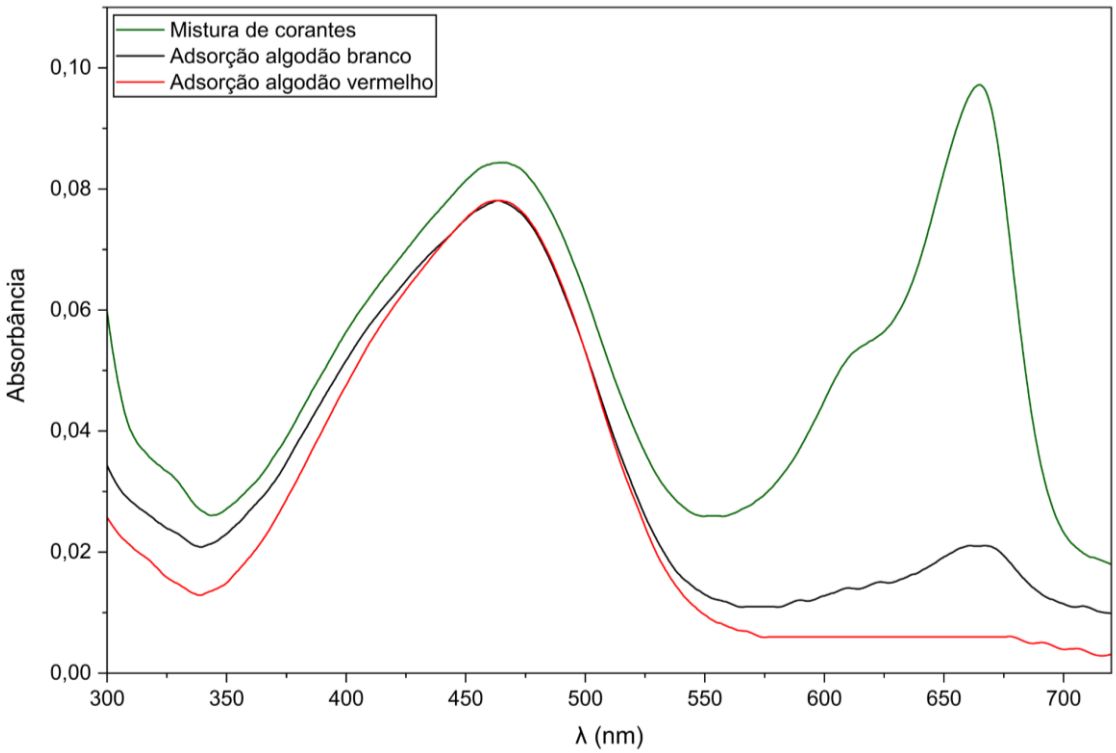
Fonte: Elaborado pela Autora, 2026.

5.4.3 Adsorção de uma mistura de corantes

A fim de determinar a afinidade e a seletividade das amostras de algodão com os corantes, foi avaliada a adsorção em um sistema binário. Tal abordagem é relevante para este trabalho uma vez que simula a complexidade do tratamento de efluentes têxteis reais, onde há competição simultânea entre os solutos pelos sítios ativos disponíveis na superfície do adsorvente. Partindo de uma solução preparada

com a mistura dos corantes AM e ALM, foram realizados ensaios de adsorção para os AV e AB. Na Figura 15, são apresentados os espectros de absorção da mistura binária inicial e após o processo de adsorção.

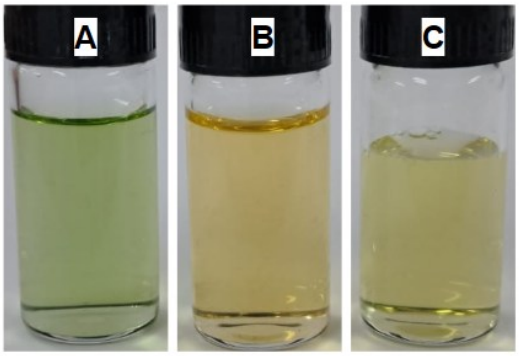
Figura 15: Espectros de absorção eletrônica da mistura inicial dos corantes azul de metileno e alaranjado de metila e após o processo de adsorção dos algodões



Fonte: Elaborado pela Autora, 2026.

A mistura dos corantes apresenta, inicialmente, as bandas de absorção características de cada corante nas regiões de 465 e 665 nm, atribuídas ao ALM e AM, respectivamente. A redução da absorbância mais significativa deve-se ao AM, com uma redução de 94% na intensidade de absorção para o AV e 78% para o AB. O comportamento também pode ser observado na Figura 16, onde ilustra-se a mistura inicial dos corantes e as soluções após a adsorção com cada algodão.

Figura 16: Amostras da mistura inicial de corantes (A) e após a adsorção com o algodão vermelho (B) e branco (C)



Fonte: Elaborado pela Autora, 2026.

Os resultados indicam um comportamento seletivo na adsorção, uma vez que os algodões priorizam a retenção do AM em detrimento ao ALM, indicando que possuem maior afinidade com esse corante, possivelmente por apresentarem carga oposta na superfície. Ademais, o uso do AV na mistura apresentou os menores valores de absorbância residual em todo o espectro, evidenciando um desempenho superior na remoção dos corantes da mistura.

5.5 INTERAÇÕES ENVOLVIDAS NA ADSORÇÃO

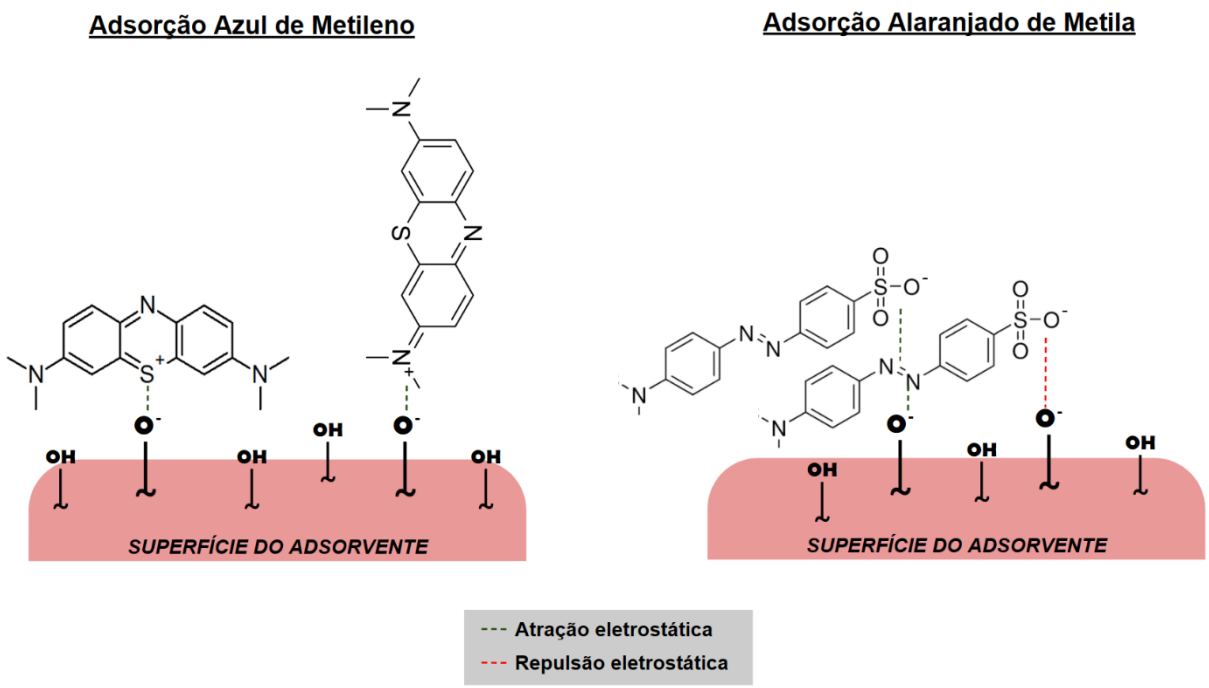
Em um processo de adsorção, o adsorvato interage com o adsorvente por meio de interações entre os grupos funcionais superficiais, ligações de hidrogênio e interações eletrostáticas (Hu *et al*., 2013). A literatura reporta que o AM e o ALM, por tratarem-se de corantes catiônico e aniônico respectivamente, tendem a apresentar interações mais favoráveis com superfícies que possuem grupos cargas opostas, promovendo atração eletrostática (Vukčević *et al*., 2024).

Carrión-Fité (2015) afirma que a maioria dos substratos têxteis celulósicos, quando em meio aquoso, apresentam caráter negativo. Os autores comprovaram essa característica por meio do monitoramento do potencial zeta em função do pH, atribuindo o surgimento das cargas superficiais à dissociação química dos grupos hidroxílicos e carboxílicos expostos na interface da fibra.

Com base nos resultados obtidos na caracterização por FTIR-ATR, a superfície das amostras de algodão dispõe de grupos hidroxilas que, em meio aquoso, podem

dissociar-se e apresentar carga parcial negativa. Nesse contexto, sugere-se que as interações de superfície entre os algodões e corantes ocorrem via interações eletrostáticas, conforme proposto na Figura 17.

Figura 17: Interações entre os corantes AM e ALM com a superfície do adsorvente



Fonte: Elaborado pela Autora, 2026.

Tendo em vista os resultados satisfatórios de adsorção do corante AM, sugere-se que a superfície dos adsorventes apresente potencial negativo nas condições experimentais adotadas. Considerando que o pH_{PZC} das amostras foram de 6,52 para AV e 6,13 para AB, supõe-se que a superfície dos algodões assuma caráter negativo em valores de pH superiores a esse limite. No presente trabalho, o pH das soluções de corante não foram ajustados com solução tampão ao longo dos ensaios. Estes, foram conduzidos em água deionizada que apresentava pH de 6,82, condição favorece o surgimento de cargas superficiais negativas nos adsorventes.

Nessa condição, os grupos hidroxila, identificados na caracterização por FTIR-ATR, podem sofrer desprotonação. Tal resultado fortalece a hipótese de que superfície de AV e AB estão carregadas negativamente em meio aquoso, fenômeno que justifica a melhor adsorção do corante AM em detrimento ao ALM. O surgimento

dessas cargas favorece a interação do sistema com corantes catiônicos, processo que tende a ocorrer por meio de interações eletrostáticas atrativas.

Em contrapartida, espécies aniônicas tendem a sofrer repulsão eletrostática em relação à superfície do adsorvente. Uma vez que o ALM apresenta grupos sulfonato carregados negativamente, as interações com o algodão tornam-se desfavoráveis, de modo que as interações entre as moléculas de soluto sejam predominantes, conforme evidenciado nos resultados de adsorção.

Convém destacar que, com base nos parâmetros inferidos a parir das isotermas, AV apresenta os melhores resultados de adsorção para os dois corantes empregados, embora sejam de natureza distinta. Tal comportamento pode acontecer pois, além das interações eletroestáticas, podem existir outros fatores relacionado à disponibilidade dos sítios ativos de AV, promovendo uma diversidade de interações específicas no sistema.

6 CONCLUSÕES

Os resíduos sólidos AV e AB, provenientes da etapa de felpagem do beneficiamento têxtil, mostraram-se uma bons adsorventes alternativos, sustentáveis e uma opção de baixo custo para a remoção de corantes em meio aquoso e aplicação no tratamento de efluentes da indústria têxtil.

Os ensaios de caracterização dos materiais forneceram informações importantes acerca da estrutura química dos adsorventes e indicaram a natureza das interações envolvidas na adsorção. Através dos espectros de ATR-IR, foi possível observar os sinais correspondentes à estrutura celulósica clássica do algodão em cada um dos adsorventes utilizados, enquanto avaliação textural indicou que AB apresenta maior área superficial. O ponto de carga zero, por sua vez, revelou pH_{PZC} de 6,52 e 6,13 para AV e AB e, de modo complementar, os ensaios de condutividade confirmaram a presença de cargas superficiais disponíveis, sugerindo que as interações de adsorção ocorrem via atração ou repulsão eletrostática. Nos ensaios de otimização, os materiais apresentaram boa eficiência na remoção dos corantes AM e ALM, empregando apenas 10 mg de algodão, alcançando percentuais de remoção de 96,2 a 100%.

Ao avaliar os modelos de adsorção, constatou-se comportamentos distintos entre os sistemas analisados. A adsorção do AM pelos algodões apresentou ajustes

satisfatórios aos modelos de Langmuir e de Freundlich, obtendo q_{max} de 43,29 mg g^{-1} para AV e de 62,50 mg g^{-1} para AB. Apesar de AB apresentar maior valor de q_{max}, AV apresentou maior afinidade com o corante, com perfil de adsorção extremamente favorável. Além disso, as isotermas indicaram que AV é melhor descrito por Langmuir, indicando formação de uma monocamada, enquanto AB é descrito por Freundlich, sugerindo que, com esse corante, adsorção ocorre em sítios com diferentes energias de interação.

Por outro lado, os resultados da adsorção do ALM, ajustaram-se somente ao modelo de Freundlich, onde AV apresentou K_F de 32,359 mg g $^{-1}$ L mg^{-1}, enquanto o AB apresentou um valor de 8,995 mg g $^{-1}$ L mg^{-1}. A diferença entre os resultados indica que AV possui maior capacidade de adsorção do ALM, indicando uma interação maior entre o corante e a superfície.

Por fim, o ensaio de adsorção da mistura de corantes corroborou os resultados obtidos nas isotermas, reafirmando a maior afinidade dos adsorventes pelo AM em detrimento ao ALM. Dessa forma, os resultados indicam que as características superficiais dos resíduos de algodão favorecem a adsorção de espécies catiônicas, mesmo na presença simultânea de outros contaminantes, uma abordagem relevante dada a complexidade do tratamento de efluentes têxteis reais.

Como perspectivas futuras, recomenda-se a ampliação dos estudos avaliando a adsorção variando os parâmetros de temperatura, pH e tempo de contato, visando ampliar a compreensão do sistema. Além disso, o acompanhamento da cinética do processo permitirá identificar o modelo cinético que melhor descreve as interações. Ademais, também cabe avaliar o potencial de dessorção do material, investigando a viabilidade de reutilização do resíduo de algodão em ciclos sucessivos de adsorção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFADZI, Prince. Adsorption of methyl orange on activated carbon. 2025. Desertion (Master of Science) – Department of Chemical and Petroleum Engineering, University of Calgary, Calgary, 2025.

AMRUTHA et al. Multi-component Adsorption Isotherms: Review and Modeling Studies. *Environmental Processes*, Basel, v. 10, art. 38, 2023.

SANTOS JUNIOR, Edson Castro dos; BELARMINO, Gabrielly Carvalho; SILVA, Ana Claudia Pedrozo da; SCACCHETTI, Fábio Alexandre Pereira; TESSARO, André Luiz; SAMULEWSKI, Rafael Block. Thermodynamic and kinetic analysis of methylene blue adsorption onto chemically modified cotton. *Revista Principia*, v. 62, 2025. DOI: 10.18265/2447-9187a2025id8887.

BASTIAN, E. Y. O. *Guia técnico ambiental da indústria têxtil*. São Paulo: CETESB; SINDITEXTIL, 2009.

BOLLINGER, Jean-Claude; LIMA, Eder C.; MOUNI, Lotfi; SALVESTRINI, Stefano; TRAN, Hai Nguyen. Molecular properties of methylene blue, a common probe in sorption and degradation studies: a review. *Environmental Chemistry Letters*, v. 23, p. 1403–1424, 2025. DOI: 10.1007/s10311-025-01856-1.

BOUATAY, Feriel; MEKSI, Nizar; SLAH, Fatma; MOHAMED, Fathi M. Chemical modification of cellulosic fibers using eco-friendly compounds to improve dyeing with cationic dyes. *Journal of Textile Science & Engineering*, v. 4, n. 2, p. 1–8, 2014. DOI: 10.4172/2165-8064.1000153.

CARRIÓN-FITÉ, Francisco Javier. Electrokinetic potentials of cotton fabrics dyed and finished in presence of LAS and alkyl polyglucosides and dye transfer inhibitor. *Tenside Surfactants Detergents*, v. 52, n. 2, p. 142–147, 2015. DOI: 10.3139/113.110359.

CHAIYA, Chaiyan; KAMPEERAPAPPUN, Piyaporn. Enhancing the sustainability of cotton spinning mill waste through thermochemical processes: converting waste into carbon materials. *ACS Omega*, v. 10, p. 40119–40132, 2025. DOI: 10.1021/acsomega.5c05007.

CHEQUER, Farah Maria Drumond; LIZIER, Thiago Mescoloto; DE FELÍCIO, Rafael; ZANONI, Maria Valnice Boldrin; DEBONSI, Hosana Maria; LOPES, Norberto Peporine; MARCOS, Ricard; DE OLIVEIRA, Danielle Palma. Analyses of the genotoxic and mutagenic potential of the products formed after the biotransformation of the azo dye Disperse Red 1. *Toxicology In Vitro*, Oxford, v. 25, n. 8, p. 2054–2063, 2011. DOI: 10.1016/j.tiv.2011.05.033.

CHICATTO, Juliane Andressa; GONÇALVES, Marcel Jefferson; ALTMAJER-VAZ, Deisi; TAVARES, Lorena Benathar Ballod. Tratamento das águas residuais têxteis com fungos. *Sustentabilidade em Debate*, Brasília, v. 9, n. 1, p. 198–213, 30 abr. 2018. DOI: 10.18472/sustdeb.v9n1.2018.26460.

CHUNG, Chinkap; LEE, Myunghee; CHOE, Eun Kyung. Characterization of cotton fabric scouring by FT-IR ATR spectroscopy. *Carbohydrate Polymers*, Oxford, v. 58, n. 4, p. 417–420, 2004. DOI: 10.1016/j.carbpol.2004.08.005.

DE ROSA, Igor Maria; KENNY, José Maria; PUGLIA, Debora; SANTULLI, Carlo; SARASINI, Fabrizio. Morphological, thermal and mechanical characterization of okra (Abelmoschus esculentus) fibres as potential reinforcement in polymer composites. *Composites Science and Technology*, v. 70, n. 1, p. 116–122, 2010. DOI: 10.1016/j.compscitech.2009.09.013.

DEBNATH, Simi; DAS, Ratan. Strong adsorption of CV dye by Ni ferrite nanoparticles for waste water purification: fits well the pseudo second order kinetic and Freundlich isotherm model. *Ceramics International*, v. 49, n. 11, p. 16199–16215, 2023. DOI: 10.1016/j.ceramint.2023.01.218.

FERNANDEZ-STARK, Karina; BAMBER, Penny; COUTO, Vivian. *Analysis of the Textile and Clothing Industry Global Value Chains*. Washington, D.C.: Inter-American Development Bank (IDB), 2022. DOI: 10.18235/0004638.

FOO, K. Y.; HAMEED, B. H. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, v. 156, n. 1, p. 2–10, 2010. DOI: 10.1016/j.cej.2009.09.013.

GARCIA, Solimar; NÄÄS, Irenilza de Alencar; VENDRAMETTO, Oduvaldo; OLIVEIRA, Daniel de. Reverse logistics and waste in the textile and clothing production chain in Brazil. In: AMARO, G.; XU, X.; HAMZEI, M.; MOURTZIS, D. (ed.). *Advances in Production Management Systems. Towards Smart and Digital Manufacturing*. Cham: Springer, 2019. p. 173–179. (IFIP Advances in Information and Communication Technology, v. 566). DOI: 10.1007/978-3-030-30000-5_23.

HAI, Faisal I.; YAMAMOTO, Kazuhiro; FUKUSHI, Kensuke. Hybrid Treatment Systems for Dye Wastewater. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, [S.l.], v. 37, n. 4, p. 315–377, 2007. DOI: 10.1080/10643380601174723.

HO, Y. S.; McKAY, G. Pseudo-Second Order Model for Sorption Processes. *Process Biochemistry*, Oxford, v. 34, n. 5, p. 451–465, 1999. DOI: 10.1016/S0032-9592(98)00112-5.

HU, Qili; LAN, Rui; HE, Liru; LIU, Hengyuan; PEI, Xiangjun. A critical review of adsorption isotherm models for aqueous contaminants: curve characteristics, site energy distribution and common controversies. *Journal of Environmental Management*, v. 329, p. 117104, 2023. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.117104.

HU, Yaoqiang; GUO, Tan; YE, Xiushen; LI, Quan; GUO, Mingming; LIU, Hong; WU, Zili. Dye adsorption by resins: effect of ionic strength on hydrophobic and electrostatic interactions. *Chemical Engineering Journal*, v. 228, p. 392–397, 2013. DOI: 10.1016/j.cej.2013.04.116.

ITO, Shigenori; YAMAMOTO, Daisuke. Structure of the methyl orange-binding site on human serum albumin and its color-change mechanism. *Biomedical Research*, Tokyo, v. 36, n. 4, p. 247–252, 2015. DOI: 10.2220/biomedres.36.247.

KALAM, Shams; ABU-KHAMSIN, Sidqi A.; KAMAL, Muhammad Shahzad; PATIL, Shirish. Surfactant Adsorption Isotherms: A Review. *ACS Omega*, Washington, v. 6, n. 48, p. 32342–32348, 24 nov. 2021. DOI: 10.1021/acsomega.1c04661.

KAMARUDDIN, Mohamad Anuar; YUSOFF, Mohd Suffian; AZIZ, Hamidi Abdul; AKINBILE, Christopher Oluwakunmi. Recent Developments of Textile Waste Water Treatment by Adsorption Process: A Review. *International Journal of Scientific Research in Knowledge*, [S.l.], v. 1, n. 4, p. 60–73, 2013.

KATHERESAN, Vanitha; KANSEDO, Jibrail; LAU, Sie Yon. Efficiency of Various Recent Wastewater Dye Removal Methods: A Review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Oxford, v. 6, n. 4, p. 4676–4697, 2018. DOI: 10.1016/j.jece.2018.06.060.

KDHAR, K. Solid Waste Recycling in Textile Processing Industries: A Case Study of India's Clothing Hubs. *Sustainable Polymer & Energy*, [S.l.], v. 2, n. 2, p. 10006, 2024. DOI: 10.35534/spe.2024.10006.

KHAN, Imran; KHAN, Aftab Ahmad Zafar; SADIQ, Muhammad; KHAN, Muhammad Yousaf; BASHA, Shaik Inayath; KHAN, Aftab Ahmad Zaidi. Review on methylene blue: its properties, uses, toxicity and photodegradation. *Water*, Basel, v. 14, n. 2, art. 242, 2022. DOI: 10.3390/w14020242.

LARGITTE, Lydie; PASQUIER, Régis. A review of the kinetics adsorption models and their application to the adsorption of lead by an activated carbon. *Chemical Engineering Research and Design*, Oxford, v. 109, p. 495–504, 2016. DOI: 10.1016/j.cherd.2016.02.006.

LEE, Young H.; PAVLOSTATHIS, Spyros G. Decolorization and toxicity of reactive anthraquinone textile dyes under methanogenic conditions. *Water Research*, Oxford, v. 38, n. 7, p. 1838–1852, 2004. DOI: 10.1016/j.watres.2003.12.028.

WILLMOTT, Nicola; GUTHRIE, Jim; NELSON, Gordon. The biotechnology approach to colour removal from textile effluent. *Journal of the Society of Dyers and Colourists*, [S.l.], v. 114, n. 2, p. 38–41, fev. 1998. DOI: 10.1111/j.1478-4408.1998.tb01943.x.

LOWELL, S.; SHIELDS, J. E. *Powder Surface Area and Porosity*. 3. ed. New York: Chapman & Hall, 1991.

MAJD, Mohammad Mahdi; WASTI, Sajjad; ALI, Omar; SHIRAZIAN, Saeed. Adsorption isotherm models: a comprehensive and systematic review (2010–2020). *Scientific Reports*, v. 12, art. 17824, 2022. DOI: 10.1038/s41598-022-22289-8.

MALIK, P. K. Use of activated carbons prepared from sawdust and rice-husk for adsorption of acid dyes: a case study of Acid Yellow 36. *Carbon*, Oxford, v. 42, n. 4, p. 755–766, 2004. DOI: 10.1016/j.carbon.2003.09.022.

MATHER, Robert R.; WARDMAN, Roger H.; RANA, Sohel. *The Chemistry of Textile Fibres*. 3. ed. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2024.

MCCABE, Warren Lee; SMITH, Julian Cleveland; HARRIOTT, Peter. *Unit Operations of Chemical Engineering*. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 1993.

MIESSLER, Gary L.; FISCHER, Paul J.; TARR, Donald A. *Química inorgânica*. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2014.

MOHAMMED, Nizar; GRISHKAT, Hiba; BERRY, Rebecca M.; TAM, Kam Chiu. Cellulose nanocrystal aerogels as an effective adsorbent for methylene blue dye removal from aqueous solutions. *ACS Omega*, v. 6, n. 31, p. 20009–20019, 2021. DOI: 10.1021/acsomega.1c04019.

MORENO-CASTILLA, Carlos. Adsorption of organic molecules from aqueous solutions on carbon materials. *Carbon*, v. 42, n. 1, p. 83–94, 2004. DOI: 10.1016/j.carbon.2003.09.022.

PICCIN, Juliana da Silva; GOMES, Caroline da Silva; FÉRIS, Liliane Ávila; GUTTERRES, Mariliz. Kinetics and isotherms of leather dye adsorption by tannery solid waste. *Chemical Engineering Journal*, Amsterdam, v. 183, p. 30–38, 2012. DOI: 10.1016/j.cej.2011.12.013.

PORTELLA, Eduardo Henrique; ROMANZINI, Daniel; ANGRIZANI, Carla Cristina; AMICO, Sandro Campos; ZATTERA, Ademir José. Influence of stacking sequence on the mechanical and dynamic mechanical properties of cotton/glass fiber reinforced polyester composites. *Materials Research*, v. 19, n. 3, p. 542–547, 2016. DOI: 10.1590/1980-5373-MR-2016-0058.

PUŠIĆ, Tajana; GRANCARIĆ, Ana Marija; SOLJAČIĆ, Ivanka; RIBITSCH, Volker. The effect of mercerisation on the electrokinetic potential of cotton. *Coloration Technology*, v. 115, n. 4, p. 121–124, 1999. DOI: 10.1111/j.1478-4408.1999.tb00308.

QUEIROZ, Marluce Teixeira Andrade; QUEIROZ, Carolina Andrade; ALVIM, Lucas Barbosa; SABARÁ, Millor Godoy; LEÃO, Mônica Maria Diniz; AMORIM, Camila Costa de. Reestruturação na forma do tratamento de efluentes têxteis: uma proposta embasada em fundamentos teóricos. *Gestão & Produção*, São Carlos, v. 26, n. 1, e1149, 2019. DOI: 10.1590/0104-530X1149-19.

RAJAHMUNDRY, Ganesh Kumar; GARLAPATI, Chandrasekhar; KUMAR, Ponnusamy Senthil; ALWI, Ratna Surya; VO, Dai-Viet N. Statistical analysis of adsorption isotherm models and its appropriate selection. *Chemosphere*, v. 286, p. 131896, 2022. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.130176.

RAUF, Muhammad A.; ASHRAF, S. Salman. Survey of recent trends in biochemically assisted degradation of dyes. *Chemical Engineering Journal*, Amsterdam, v. 209, p. 520–530, 2012. DOI: 10.1016/j.cej.2012.08.015.

ROY, R.; FAKHRUDDIN, A. N. M.; KHATUN, R.; ISLAM, M. S.; AHSAN, M. A.; NEGER, A. J. M. T. Characterization of textile industrial effluents and its effects on aquatic macrophytes and algae. *Bangladesh Journal of Scientific and Industrial Research*, Dhaka, v. 45, n. 1, p. 79–84, 2010. DOI: 10.3329/bjsir.v45i1.5187.

SAMSAMI, Shakiba; MOHAMADIZANIANI, Maryam; SARRAFZADEH, Mohammad-Hossein; RENE, Eldon R.; FIROOZBAHR, Meysam. Recent advances in the treatment of dye-containing wastewater from textile industries: Overview and perspectives. *Process Safety and Environmental Protection*, Oxford, v. 143, p. 138–163, 2020. DOI: 10.1016/j.psep.2020.05.034.

SHAW, Duncan James. *Introdução à química dos colóides e de superfícies*. Tradução de Juergen Heinrich Maar. São Paulo: Edgard Blücher; Editora da Universidade de São Paulo, 1975.

SKOOG, Douglas A.; HOLLER, F. James; CROUCH, Stanley R. *Princípios de análise instrumental*. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

SU, Claire Xin Hui; LOW, Lingwei; TENG, Tjoon Tow; WONG, Yee Shian. Combination and hybridisation of treatments in dye wastewater treatment: a review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Oxford, v. 4, n. 3, p. 3618–3631, 2016. DOI: 10.1016/j.jece.2016.07.026.

TAKELE, Temesgen; ANGASSA, Kenatu; ABEWAA, Mikiyas; KEBEDE, Ashagrie Mengistu; TESSEMA, Israel. Adsorption of methylene blue from textile industrial wastewater using activated carbon developed from H3PO4-activated khat stem waste. *Biomass Conversion and Biorefinery*, Berlim, v. 15, p. 4085–4108, 2025. DOI: 10.1007/s13399-023-05245-y.

TANG, Kuok Ho Daniel. State of the Art in Textile Waste Management: a review. *Textiles*, Basel, v. 3, n. 4, p. 454–467, 18 dez. 2023. DOI: 10.3390/textiles3040027.

TARI, Shriyasha; VADE, Akshay; ATHALYE, Ashok. Solid Waste Recycling in Textile Processing Industries: a case study of India’s clothing hubs. *Sustainable Polymer & Energy*, [S.l.], v. 2, n. 2, p. 10006–10006, 2024. DOI: 10.35534/spe.2024.10006.

TOY, Mustafa; RECEPOĞLU, Yaşar Kemal; ARAR, Özgür. Sulfonated cellulose: a strategy for effective methylene blue sequestration. *ACS Omega*, Washington, v. 10, n. 8, p. 8696–8708, 2025. DOI: 10.1021/acsomega.5c00179.

VINAYAKA, Kallur Sharanappa; KADKOL, Supreet. Advances in bioremediation of organometallic pollutants. In: *Biological Approaches to Controlling Pollutants*. [S.l.]: [s.n.], 2022. p. 233–239. DOI: 10.1016/B978-0-12-824316-9.00012-4.

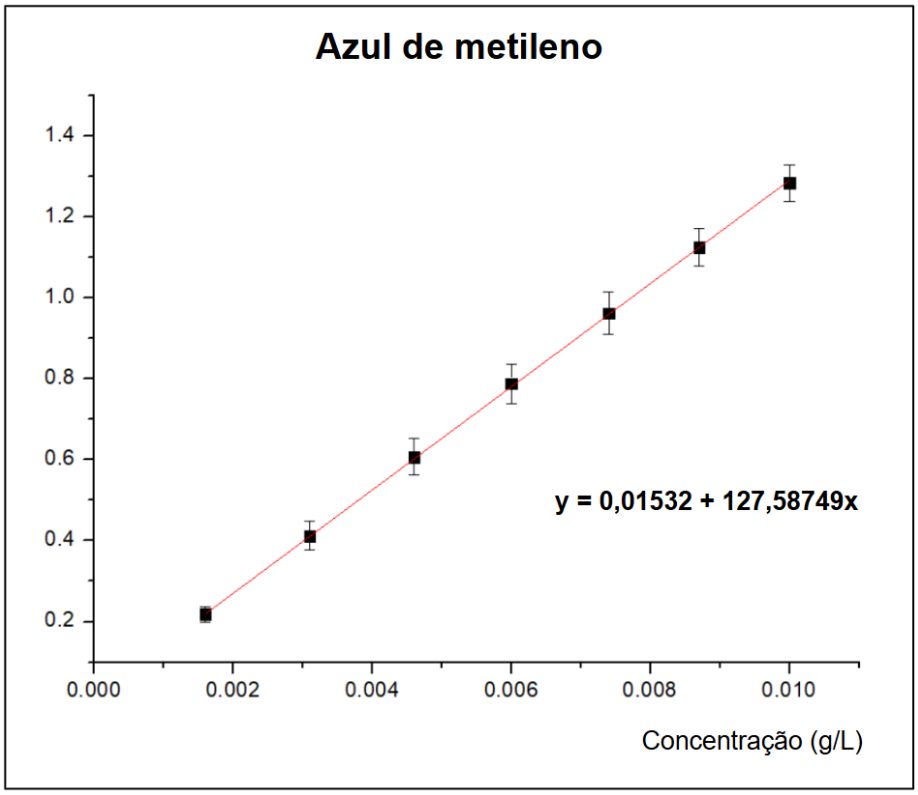
VUKČEVIĆ, Marija; MALETIĆ, Marina; PEJIĆ, Biljana; KALIJADIS, Ana; KOSTIĆ, Mirjana; TRIVUNAC, Katarina; PERIĆ GRUJIĆ, Aleksandra. Cellulose-Based Waste in a Close Loop as an Adsorbent for Removing Dyes from Textile Industry Wastewater. *Sustainability*, v. 16, n. 9, art. 3660, 2024. DOI: 10.3390/su16093660.

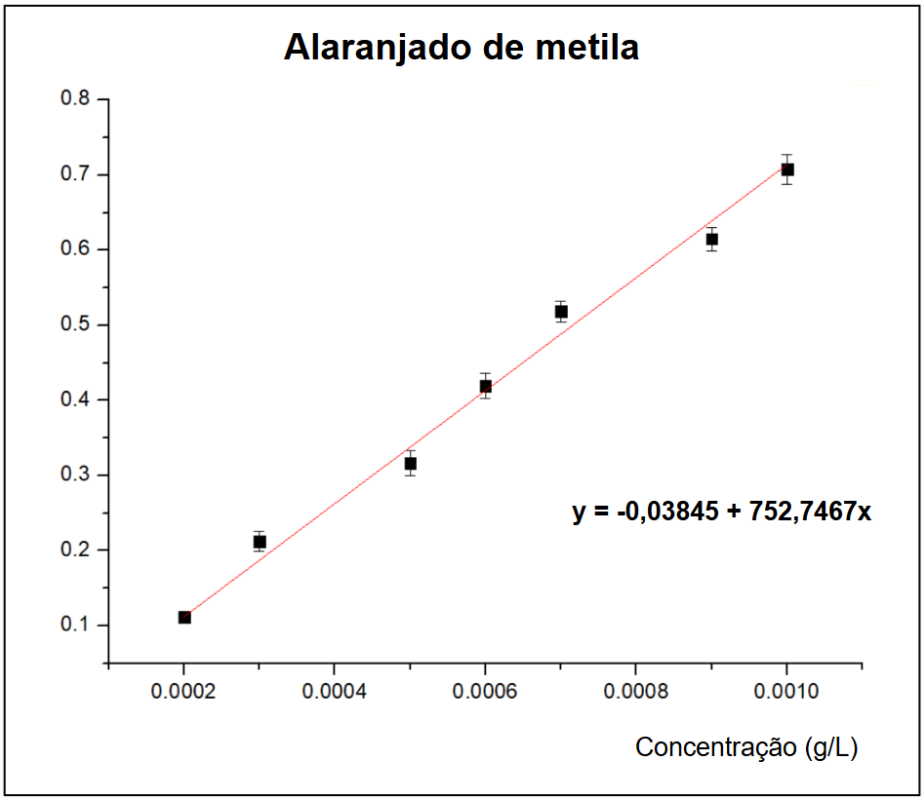
WANG, Li; ZHANG, Jian; ZHAO, Rui; LI, Yuchun; LI, Chun; ZHANG, Chengzhi. Adsorption of Pb(II) on activated carbon prepared from Polygonum orientale Linn.: kinetics, isotherms, pH, and ionic strength studies. *Bioresource Technology*, Oxford, v. 101, n. 15, p. 5808–5814, 2010. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.02.099.

ZHU, Huayue; FU, Y.-Q.; JIANG, Ru; JIANG, J.-H.; XIAO, L.; ZENG, G.-M.; ZHAO, S.-L.; WANG, Y. Adsorption removal of congo red onto magnetic cellulose/Fe_3O_4/activated carbon composite: equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. *Chemical Engineering Journal*, v. 173, n. 2, p. 494–502, 2011. DOI: 10.1016/j.cej.2011.08.020.

APÊNDICE A

Curvas de calibração do azul de metileno e alaranjado de metila

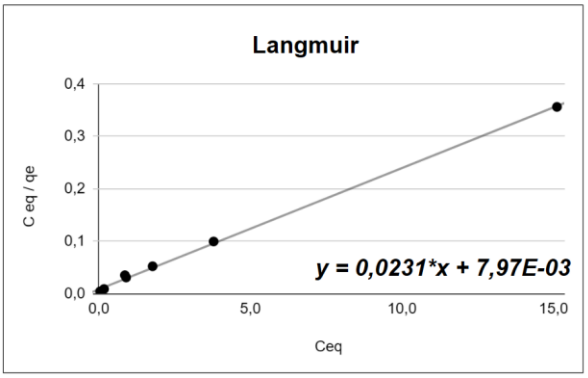


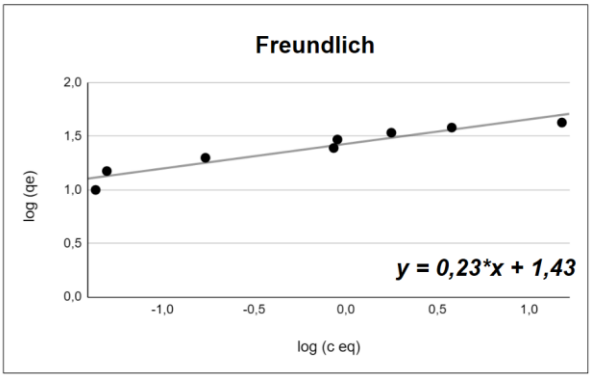


APÊNDICE B

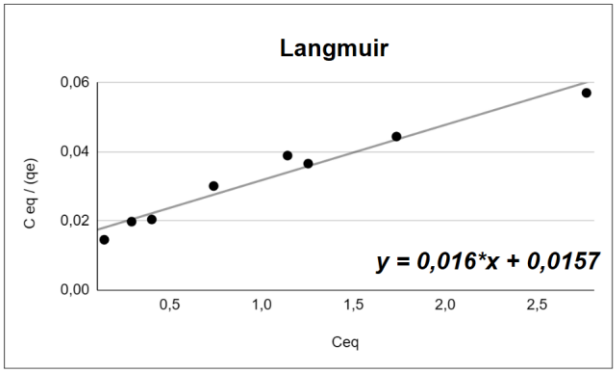
Ajuste linear de Langmuir e Freundlich do corante AM com AV e AB

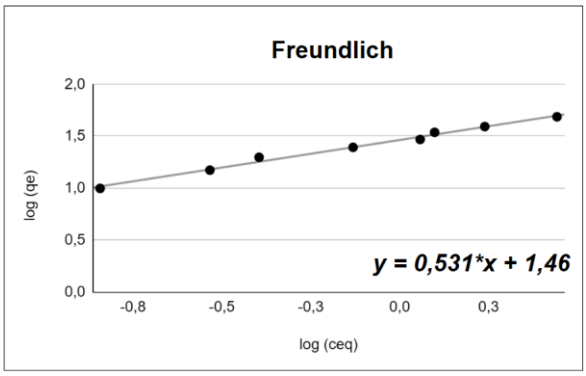
Algodão vermelho





Algodão branco





APÊNDICE C

Ajuste linear de Freundlich do corante ALM com AV e AB

