

**REMOÇÃO DE CORANTES TÊXTEIS POR ADSORÇÃO: REVISÃO DE
LITERATURA COM ÊNFASE NA QUANTIFICAÇÃO POR ESPECTROFOTOMETRIA
UV-VIS E NA CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS ADSORVENTES
(FTIR/DRX/MEV/BET)**

Luciene Pereira dos Santos*

Alberthmeiry Teixeira de Figueiredo*

Cristiano Morita Barrado*

Resumo: Efluentes da indústria têxtil apresentam elevada carga de cor e matéria orgânica, exigindo tecnologias eficientes para reduzir impactos ambientais. Este trabalho realiza uma revisão de literatura sobre a remoção de corantes têxteis por adsorção, com ênfase na quantificação do residual por espectrofotometria UV-Vis e na caracterização dos materiais adsorventes. A determinação de concentração é discutida a partir da leitura de absorbância no comprimento de onda máximo ($\lambda_{\text{máx}}$) e aplicação da lei de Beer-Lambert, destacando limitações analíticas em matrizes complexas e o uso de técnicas complementares mais seletivas, como HPLC-DAD, quando necessário. São apresentados resultados para adsorventes naturais de baixo custo (biochar, argilas e quitosana) e materiais sintéticos/engenheirados (carvão ativado, zeólitas e compósitos), considerando variáveis de processo (pH, dose, concentração inicial, tempo de contato e temperatura), bem como modelos cinéticos e isotérmicos empregados na interpretação do mecanismo de adsorção. A caracterização por FTIR, DRX, MEV e BET é abordada como suporte à correlação entre estrutura/superfície e desempenho, visando subsidiar a seleção de materiais com melhor relação eficiência-custo para o tratamento de efluentes têxteis.

Palavras-chave: Adsorção; Corantes têxteis; UV-Vis; Caracterização (FTIR/DRX/MEV/BET); Materiais adsorventes.

1 *Instituto de Química – UFCAT: lucypereira_10@hotmail.com

INTRODUÇÃO

A indústria têxtil figura entre os setores industriais de maior consumo hídrico e geração de efluentes, devido ao uso intensivo de corantes sintéticos nos processos de tingimento e acabamento. Uma fração significativa desses corantes não se fixa às fibras e é liberada nos efluentes, conferindo elevada carga cromática às águas residuais (Yaseen; Scholz, 2019). Mesmo em baixas concentrações, esses compostos comprometem a qualidade ambiental ao reduzir a penetração de luz nos corpos hídricos e interferir em processos fotossintéticos.

A elevada estabilidade química e a baixa biodegradabilidade de muitos corantes, especialmente os azo, dificultam sua remoção por métodos convencionais de tratamento, podendo ainda gerar subprodutos tóxicos durante processos de degradação parcial (Benkhaya; M'rabet; El harfi, 2020). Esse cenário reforça a necessidade de tecnologias eficientes e ambientalmente seguras para o tratamento de efluentes têxteis.

Entre as alternativas disponíveis, a adsorção destaca-se por sua elevada eficiência, simplicidade operacional e versatilidade de aplicação (Khan et al., 2023). O desempenho do processo depende tanto das condições operacionais quanto das propriedades estruturais e superficiais dos materiais empregados, cuja caracterização por técnicas como FTIR, DRX, MEV e BET permite correlacionar características físico-químicas com a capacidade adsortiva (Ma et al., 2024).

A quantificação dos corantes remanescentes é majoritariamente realizada por espectrofotometria UV-Vis, amplamente utilizada em estudos de cinética e equilíbrio em função de sua sensibilidade e aplicabilidade analítica (Yaseen; Scholz, 2019).

Nesse contexto, esta revisão analisa a remoção de corantes têxteis por adsorção, com ênfase na quantificação por UV-Vis e na caracterização de materiais adsorventes, discutindo fundamentos, avanços recentes e perspectivas para o tratamento sustentável de efluentes industriais.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Corantes têxteis e desafios ambientais associados aos efluentes industriais

Os corantes têxteis constituem uma classe diversificada de compostos orgânicos sintéticos desenvolvidos para conferir coloração e estabilidade a fibras naturais e

sintéticas. Essa diversidade estrutural resultou na consolidação de diferentes classes, como corantes azo, reativos, dispersos e básicos, sendo os azo os mais representativos em escala industrial, devido à versatilidade sintética e à estabilidade conferida pela ligação $-N=N-$ conjugada a sistemas aromáticos (Benkhaya; M'rabet; El Harfi, 2020; Al-Tohamy et al., 2022).

A presença desses compostos em efluentes industriais representa um desafio ambiental relevante, mesmo em baixas concentrações. Pequenas quantidades são suficientes para alterar significativamente a coloração de corpos hídricos, reduzindo a penetração de luz e interferindo em processos fotossintéticos, com impactos sobre a dinâmica ecológica aquática (Yaseen; Scholz, 2019). Além do impacto visual, diversos corantes e seus subprodutos apresentam potencial toxicidade, o que reforça a necessidade de estratégias de tratamento eficazes (Al-Tohamy et al., 2022).

A persistência ambiental desses compostos está associada à sua complexidade estrutural e à baixa biodegradabilidade observada em sistemas convencionais de tratamento. Em particular, a clivagem parcial da ligação azo pode resultar na formação de aminas aromáticas potencialmente mais tóxicas, ampliando a preocupação ambiental relacionada ao descarte inadequado (Muniasamy et al., 2020).

Diante dessas limitações, diferentes rotas de tratamento têm sido investigadas ao longo das últimas décadas. Processos físico-químicos, biológicos e tecnologias avançadas apresentam níveis variados de eficiência, mas frequentemente enfrentam desafios associados a custo, consumo energético e geração de subprodutos (Khan et al., 2023; Ma et al., 2024).

Nesse cenário, a adsorção consolidou-se como uma das abordagens mais versáteis para remoção de corantes, em razão da elevada eficiência, simplicidade operacional e possibilidade de utilização de materiais naturais ou sintéticos (Kuyucu et al., 2025). O avanço no desenvolvimento de novos adsorventes, incluindo biocarvões, argilas modificadas e compósitos, tem sido acompanhado pela aplicação de técnicas de caracterização físico-química, como FTIR, DRX, MEV e BET, que permitem correlacionar propriedades estruturais com desempenho adsorptivo (Nizam et al., 2021; Zhang et al., 2021).

A quantificação dos corantes remanescentes é majoritariamente realizada por espectrofotometria UV-Vis, técnica amplamente empregada em estudos de cinética e equilíbrio. Em matrizes complexas, métodos cromatográficos podem ser utilizados para aumentar a seletividade analítica (Yaseen; Scholz, 2019).

Assim, a compreensão dos desafios associados aos corantes têxteis exige abordagem integrada que considere simultaneamente a natureza química dos compostos, a complexidade dos efluentes industriais e as estratégias tecnológicas e analíticas aplicadas ao seu tratamento.

Adsorção como tecnologia para remoção de corantes têxteis

A adsorção consolidou-se como uma das tecnologias mais investigadas para a remoção de corantes têxteis, especialmente diante da elevada estabilidade química e baixa biodegradabilidade desses compostos, que limitam a eficiência de tratamentos convencionais (Kuyucu et al., 2025; Al-Tohamy et al., 2022). A estrutura aromática conjugada de muitos corantes sintéticos, particularmente os da classe azo, exige processos capazes de atuar de forma eficaz sobre moléculas recalcitrantes em matrizes complexas (Zhang et al., 2021).

Do ponto de vista conceitual, a adsorção consiste na retenção de espécies da fase líquida na superfície de um sólido por interações físico-químicas entre adsorvato e adsorvente (Foo; Hameed, 2010). Essas interações podem envolver forças físicas, como interações de van der Waals e eletrostáticas, ou mecanismos mais específicos, como troca iônica e complexação, influenciando diretamente a reversibilidade e a intensidade energética do processo (Ho; McKay, 1999). A distinção entre esses mecanismos é essencial para a interpretação dos modelos cinéticos e isotérmicos aplicados aos sistemas de remoção de corantes.

Entre as principais vantagens da adsorção destacam-se a elevada eficiência mesmo em baixas concentrações, a simplicidade operacional e a possibilidade de regeneração do material adsorvente (Zhang et al., 2021). Além disso, o processo pode ser integrado a outras tecnologias, como tratamentos oxidativos ou sistemas de membranas, ampliando a eficiência global do tratamento de efluentes (Ma et al., 2024).

A eficiência adsortiva é fortemente influenciada por variáveis operacionais, como pH, concentração inicial do corante, dose de adsorvente, tempo de contato e temperatura. O pH, em particular, controla a ionização dos grupos funcionais e, conseqüentemente, as interações eletrostáticas entre superfície e corante, enquanto a concentração inicial e a quantidade do adsorvente afetam o gradiente de concentração e a disponibilidade de sítios ativos (Zhang et al., 2021).

As propriedades físico-químicas do adsorvente também são determinantes para o desempenho do processo. Materiais com elevada área superficial, distribuição

adequada de poros e presença de grupos funcionais ativos tendem a apresentar maior capacidade adsorptiva. Estratégias de modificação superficial e ativação têm sido amplamente empregadas para aumentar a afinidade por corantes específicos e melhorar a seletividade do sistema (Zhang et al., 2021).

Dessa forma, a adsorção se estabelece como um processo central no tratamento de efluentes têxteis, fornecendo base conceitual sólida para a análise dos materiais adsorventes, dos modelos cinéticos e isotérmicos e das técnicas analíticas discutidas nas seções subsequentes.

Materiais adsorventes aplicados à remoção de corantes têxteis

Materiais adsorventes naturais

A literatura recente registra crescimento consistente no uso de adsorventes naturais e de origem residual para remoção de corantes têxteis, impulsionado pela busca por soluções de menor custo e maior sustentabilidade (Kuyucu et al., 2025; El Meziani et al., 2025). Biomassas, biopolímeros e minerais naturais têm demonstrado desempenho relevante, especialmente quando submetidos a processos de ativação ou funcionalização que ampliam área superficial e densidade de sítios ativos.

Argilas naturais, como montmorilonita e bentonita, permanecem amplamente investigadas devido à abundância e à capacidade de troca iônica (Zhang et al., 2021). Entretanto, a eficiência adsorptiva depende fortemente de características mineralógicas e do grau de caracterização do material, o que exige cautela na comparação entre estudos. Estratégias como ativação ácida, organofilização e formação de nanocompósitos têm sido empregadas para melhorar seletividade e capacidade de adsorção (Zhang et al., 2021).

No caso de resíduos agroindustriais, a conversão termoquímica em biochar tem se mostrado particularmente promissora. A pirólise promove desenvolvimento de porosidade e estabilidade estrutural, favorecendo mecanismos como preenchimento de poros, interações eletrostáticas e interações π - π entre superfícies carbonáceas e corantes aromáticos (El Meziani et al., 2025). A ativação química pode elevar significativamente área superficial e volume de poros, aproximando o desempenho ao de carvões ativados comerciais.

Entre os biopolímeros, a quitosana destaca-se pela presença de grupos amina, que favorecem a remoção de corantes aniônicos por interação eletrostática.

Modificações estruturais, como reticulação e formação de compósitos híbridos, têm sido empregadas para aumentar estabilidade mecânica e eficiência operacional (Elgarahy et al., 2021).

Apesar das vantagens associadas à sustentabilidade e ao baixo custo, adsorventes naturais ainda enfrentam desafios relacionados à reprodutibilidade, controle fino da porosidade e estabilidade ao longo de ciclos de regeneração. Esses aspectos explicam o interesse crescente em materiais sintéticos e engenheirados, discutidos na seção subsequente.

Materiais adsorventes sintéticos e engenheirados

Os adsorventes sintéticos abrangem desde materiais tradicionais, como carvão ativado comercial e zeólitas, até classes emergentes, incluindo materiais à base de grafeno, compósitos magnéticos e estruturas metal–orgânicas (MOFs). Esses materiais são desenvolvidos com o objetivo de maximizar área superficial acessível, controlar micro e mesoporosidade e ajustar a química superficial para aumentar seletividade em sistemas multicomponentes, típicos de efluentes têxteis (Hu et al., 2022; Kuyucu et al., 2025).

O carvão ativado permanece como referência industrial devido à elevada área superficial e ao desempenho robusto frente a compostos orgânicos aromáticos. Sua eficiência decorre da combinação entre microporosidade, presença de grupos oxigenados superficiais e interações π – π com corantes aromáticos. Contudo, desafios relacionados ao custo e à regeneração têm estimulado o desenvolvimento de rotas de otimização estrutural e produção a partir de precursores alternativos (Hu et al., 2022).

As zeólitas, naturais ou sintéticas, apresentam estruturas cristalinas com canais e cavidades que favorecem mecanismos de troca iônica e seletividade por tamanho molecular. Modificações superficiais podem ampliar afinidade por corantes aniônicos e melhorar desempenho em matrizes complexas (Zhang et al., 2021).

Materiais à base de grafeno e óxido de grafeno destacam-se pela elevada área específica e pela possibilidade de funcionalização química, permitindo explorar interações eletrostáticas, ligações de hidrogênio e interações π – π com corantes conjugados. A engenharia de grupos funcionais modifica significativamente capacidade adsortiva e cinética do processo (Hu et al., 2022).

Entre os materiais mais recentes, os MOFs apresentam elevada porosidade e

modularidade estrutural, possibilitando incorporação de grupos funcionais específicos e ajuste fino de propriedades químicas. Apesar do elevado potencial, questões relacionadas à estabilidade em meio aquoso, custo e escalabilidade ainda demandam avaliação criteriosa para aplicação industrial (Kuyucu et al., 2025).

Compósitos magnéticos e nanocompósitos vêm sendo explorados como estratégia para facilitar separação e regeneração do adsorvente, combinando propriedades estruturais com funcionalidade operacional aprimorada.

De modo geral, materiais sintéticos e engenheirados oferecem maior reprodutibilidade e controle estrutural quando comparados aos naturais. Entretanto, sua viabilidade deve ser analisada à luz de custo, regeneração e aplicabilidade em escala real, exigindo correlação sistemática entre caracterização físico-química e desempenho adsorativo.

Modelagem cinética, isotérmica e termodinâmica da adsorção de corantes têxteis

A modelagem cinética, isotérmica e termodinâmica constitui ferramenta essencial para interpretar o desempenho de sistemas adsorvativos aplicados à remoção de corantes têxteis. Esses modelos permitem descrever a velocidade de remoção, estimar a capacidade de adsorção em equilíbrio e avaliar a natureza energética das interações adsorvente–adsorvato (Foo; Hameed, 2010). Em sistemas reais, o comportamento observado resulta da combinação entre transporte externo, difusão intrapartícula e ocupação de sítios ativos com diferentes energias, o que exige interpretação criteriosa dos ajustes matemáticos (Kuyucu et al., 2025).

Modelos cinéticos

Entre os modelos cinéticos mais empregados, destacam-se o modelo de pseudo-primeira ordem (PFO) e o modelo de pseudo-segunda ordem (PSO). O PFO descreve a taxa de adsorção como proporcional à diferença entre a quantidade adsorvida no equilíbrio e no tempo t , sendo frequentemente utilizado como aproximação inicial (Foo; Hameed, 2010). No entanto, sua aplicação pode ser limitada em sistemas heterogêneos ou governados por múltiplas etapas de transporte.

O modelo de pseudo-segunda ordem (Ho; McKay, 1999) é amplamente aplicado em estudos com corantes, muitas vezes apresentando melhor ajuste empírico. Contudo, o bom ajuste estatístico não implica, por si só, que o mecanismo envolva

quimissorção. Trabalhos recentes reforçam que o PSO deve ser interpretado com cautela, uma vez que diferentes mecanismos podem gerar ajustes matematicamente satisfatórios (Azizian; Eris, 2021; Vareda, 2023).

Para avaliar limitações difusivas, o modelo de difusão intrapartícula de Weber–Morris é frequentemente empregado. Entretanto, sua interpretação requer atenção à presença de múltiplos trechos lineares e ao intercepto relacionado à resistência da camada limite, evitando conclusões simplificadas sobre a etapa controladora do processo (Chu et al., 2025).

Modelos isotérmicos: homogeneidade, heterogeneidade e escolha crítica

A isoterma de Langmuir é tradicionalmente aplicada sob a hipótese de adsorção em monocamada sobre sítios energeticamente equivalentes, permitindo estimar a capacidade máxima de adsorção ($q_{\max}$), parâmetro amplamente utilizado para comparação entre diferentes materiais adsorventes (Foo; Hameed, 2010). Contudo, sua aplicação a superfícies heterogêneas, como argilas, biomassas e biocarvões, deve ser interpretada com cautela, uma vez que ajustes matemáticos satisfatórios não garantem homogeneidade real da superfície (Azizian; Eris, 2021).

A isoterma de Freundlich, por sua vez, assume distribuição heterogênea de energias de adsorção e não impõe limite de monocamada, sendo frequentemente mais adequada para materiais naturais e modificados (Foo; Hameed, 2010). Em sistemas com comportamento intermediário, o modelo de Sips (Langmuir–Freundlich) tem sido empregado para descrever superfícies heterogêneas que apresentam tendência à saturação em concentrações elevadas, mantendo caráter empírico mais flexível.

No que se refere à análise termodinâmica, os parâmetros ΔG° , ΔH° e ΔS° são utilizados para avaliar espontaneidade e natureza endotérmica ou exotérmica do processo. Entretanto, sua interpretação depende diretamente da definição adequada da constante de equilíbrio e da consistência das expressões utilizadas no cálculo (Foo; Hameed, 2010). Discussões recentes reforçam que erros na escolha ou linearização da constante podem comprometer conclusões sobre espontaneidade e natureza energética da adsorção, exigindo transparência metodológica na apresentação dos resultados (Zhou et al., 2024; Girish, 2025).

De modo geral, modelos isotérmicos e parâmetros termodinâmicos constituem ferramentas indispensáveis para comparação entre adsorventes e compreensão do

comportamento em equilíbrio. Contudo, sua aplicação deve ser acompanhada de interpretação crítica, evitando inferências mecánísticas automáticas baseadas exclusivamente em ajuste estatístico.

Técnicas analíticas e de caracterização aplicadas à adsorção de corantes têxteis

Quantificação de corantes em solução: espectrofotometria UV–Vis e métodos analíticos complementares

A quantificação do corante remanescente em solução após a adsorção constitui etapa metodológica central, uma vez que os valores obtidos subsidiam o cálculo da capacidade adsortiva e a aplicação de modelos cinéticos, isotérmicos e termodinâmicos (Zhou et al., 2024). A confiabilidade dessas interpretações depende diretamente da robustez do método analítico empregado.

A espectrofotometria UV–Vis permanece como a técnica mais utilizada na determinação de corantes têxteis, em razão da elevada sensibilidade associada a seus sistemas cromóforos conjugados, como grupos azo e estruturas aromáticas (Muniyasamy et al., 2020). A quantificação baseia-se na medição da absorbância no comprimento de onda de máxima absorção (λ_{max}) e na aplicação da lei de Beer–Lambert, que estabelece relação linear entre absorbância e concentração em soluções diluídas.

Entretanto, fatores como pH, força iônica e composição da matriz podem alterar o comportamento espectral do corante, promovendo deslocamentos batocrômicos ou variações de intensidade, o que exige controle rigoroso das condições experimentais (Dutta et al., 2021). Além disso, agregação molecular e interações intermoleculares podem comprometer a linearidade da curva analítica, reforçando a necessidade de validação do intervalo linear e verificação de parâmetros como coeficiente de determinação, limite de detecção e precisão analítica.

Em efluentes têxteis reais, a presença de sólidos suspensos, matéria orgânica dissolvida e múltiplos corantes pode gerar interferências espectrais e distorções na linha de base, limitando a seletividade da técnica (Ríos-Reina; Azcarate, 2023). Nesses casos, a cromatografia líquida de alta eficiência acoplada a detector de arranjo de diodos (HPLC-DAD) é empregada como método confirmatório, permitindo separação e

quantificação individual de corantes estruturalmente semelhantes e aumentando a confiabilidade analítica (Dutta et al., 2021).

Técnicas complementares, como espectroscopia Raman intensificada por superfície e métodos eletroquímicos, têm sido exploradas em estudos específicos, sobretudo para detecção em níveis traço; contudo, seu uso ainda é menos frequente em estudos aplicados de adsorção, principalmente devido à complexidade instrumental (Ríos-Reina; Azcarate, 2023).

De modo geral, a literatura aponta que a integração entre UV–Vis para monitoramento rotineiro e métodos cromatográficos para validação aumenta a robustez dos dados e reduz incertezas associadas à interpretação mecanística dos modelos de adsorção (Zhou et al., 2024).

Caracterização físico-química de materiais adsorventes

A compreensão mecanística da adsorção de corantes têxteis exige a correlação entre desempenho adsorativo e propriedades estruturais do material. A caracterização físico-química do adsorvente é, portanto, indispensável para interpretar a natureza das interações envolvidas e evitar conclusões baseadas apenas em eficiência percentual de remoção (Zhang et al., 2021).

A espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) é amplamente empregada para identificar grupos funcionais superficiais e verificar alterações após a adsorção. Mudanças em bandas associadas a grupos hidroxila, amino ou carboxila podem indicar interações eletrostáticas e ligações de hidrogênio, enquanto variações em regiões aromáticas sugerem interações π – π entre o adsorvente e o corante (El Meziani et al., 2025).

A difração de raios X (DRX) fornece informações sobre estrutura cristalina e possíveis modificações estruturais após o processo adsorativo, sendo especialmente relevante para argilas e materiais híbridos (Zhang et al., 2021). Complementarmente, a microscopia eletrônica de varredura (MEV) permite avaliar morfologia e textura superficial, auxiliando na correlação entre acessibilidade de sítios ativos e desempenho cinético.

A análise textural pelo método BET possibilita determinar área superficial específica e distribuição de poros, parâmetros diretamente associados à capacidade máxima de adsorção e à difusão intrapartícula (Al-Tohamy et al., 2022).

De forma integrada, essas técnicas permitem estabelecer relações consistentes entre estrutura, química superficial e eficiência adsorptiva, fornecendo base sólida para a interpretação dos modelos cinéticos e isotérmicos discutidos nesta revisão.

MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa consiste em uma revisão de literatura de caráter crítico e integrativo, com o objetivo de reunir e analisar os avanços científicos relacionados à remoção de corantes têxteis por adsorção. O enfoque metodológico priorizou a correlação entre eficiência adsorptiva, métodos analíticos de quantificação, com destaque para a espectrofotometria UV-Vis, e a caracterização físico-química dos materiais adsorventes por FTIR, DRX, MEV e BET, permitindo uma interpretação mecanística consistente do processo.

A busca bibliográfica foi realizada em bases de dados científicas de ampla relevância internacional e nacional, incluindo Web of Science, Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, ACS Publications, Wiley Online Library, Taylor & Francis, SciELO e Portal de Periódicos CAPES. Foram priorizados artigos publicados entre 2010 e 2025, com ênfase especial em estudos recentes entre 2019–2025 (Tabela 1), a fim de contemplar tanto os fundamentos clássicos da modelagem cinética e isotérmica quanto os avanços contemporâneos na área.

As estratégias de busca utilizaram combinações de descritores em português e inglês relacionados à adsorção de corantes têxteis, técnicas de quantificação analítica e métodos de caracterização de materiais adsorventes. Foram incluídos estudos experimentais e revisões críticas que apresentassem descrição metodológica clara e correlação entre resultados estruturais e desempenho adsorptivo. Trabalhos com escopo não relacionado à adsorção ou com detalhamento metodológico insuficiente foram excluídos.

Os artigos selecionados foram organizados de acordo com os principais eixos temáticos da revisão: natureza química dos corantes, fundamentos da adsorção, materiais adsorventes naturais e sintéticos, modelagem cinética e isotérmica, métodos analíticos e técnicas de caracterização. Durante a síntese, foram extraídas informações relativas às condições experimentais, parâmetros cinéticos e isotérmicos, propriedades estruturais dos adsorventes e desempenho adsorptivo, permitindo análise comparativa e

identificação de convergências e limitações metodológicas.

Os estudos considerados mais representativos e metodologicamente consistentes foram sistematizados na Tabela 1, apresentada a seguir.

TABELA 1 – Principais artigos utilizados na composição da revisão de literatura.

AUTOR(ES)	ANO	CONTRIBUIÇÃO
Yaseen; Scholz	2019	Caracterização dos efluentes têxteis, composição química e complexidade ambiental dos despejos industriais.
Benkhaya; M'rabet; El Harfi	2020	Classificação estrutural dos corantes têxteis, com ênfase nos azo e sua estabilidade química.
Al-Tohamy et al.	2022	Revisão crítica sobre riscos ecotoxicológicos dos corantes e necessidade de tecnologias eficientes de tratamento.
Zhang et al.	2021	Discussão sobre adsorventes à base de argilas e compósitos, correlacionando estrutura e desempenho adsorativo.
El Meziani et al.	2025	Avanços em adsorção sustentável com biochars e materiais derivados de biomassa.
Ho; McKay	1999	Fundamentação do modelo cinético de pseudo-segunda ordem amplamente aplicado em adsorção.
Foo; Hameed	2010	Base teórica para interpretação de isothermas (Langmuir e Freundlich) em sistemas adsorativos.
Zhou et al.	2024	Discussão crítica sobre cálculo e interpretação de parâmetros termodinâmicos em adsorção.
Ríos-Reina; Azcárate	2023	Limitações e potencial da espectrofotometria UV–Vis na quantificação de corantes.
Pieczkolan	2025	Integração entre caracterização físico-química, modelagem e desempenho de adsorção em biochar.

Fonte: Elaborado pela autora.

A inclusão da Tabela 1 permite evidenciar de forma objetiva os trabalhos que fundamentam esta revisão, bem como os critérios científicos que justificam sua seleção, reforçando a rastreabilidade e a consistência do *corpus* bibliográfico analisado.

Por se tratar de uma revisão de literatura, não foram realizados experimentos laboratoriais. No entanto, o delineamento metodológico adotado assegura que a

discussão apresentada ao longo do trabalho seja sustentada por evidências científicas sólidas, refletindo de maneira abrangente e atualizada os avanços e desafios associados à remoção de corantes têxteis por adsorção e às técnicas analíticas e de caracterização envolvidas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da literatura recente (2019–2025) evidencia avanços consistentes no desenvolvimento de materiais adsorventes e na compreensão dos mecanismos envolvidos na remoção de corantes têxteis por adsorção. De modo geral, a eficiência do processo resulta da interação entre a estrutura química do corante, as propriedades superficiais do adsorvente e as condições operacionais do sistema (Kuyucu et al., 2025).

Corantes das classes azo, reativos e catiônicos permanecem como os mais investigados, em função de sua ampla aplicação industrial e elevada estabilidade estrutural. A presença de sistemas aromáticos conjugados e grupos cromóforos favorece interações como forças eletrostáticas, ligações de hidrogênio e empilhamento π – π com superfícies adsorventes (Muniasamy et al., 2020; Al-Tohamy et al., 2022).

Quanto aos materiais adsorventes, observa-se valorização crescente de adsorventes naturais modificados, especialmente biocarvões ativados e argilas funcionalizadas, cujo desempenho está associado ao aumento de área superficial, porosidade e densidade de grupos ativos (Hu et al., 2022; Kuyucu et al., 2025). Paralelamente, materiais sintéticos e engenheirados, como nanocompósitos e materiais funcionalizados, destacam-se pela maior reprodutibilidade e possibilidade de controle das propriedades superficiais (Zhang et al., 2021).

Na modelagem cinética, o modelo de pseudo-segunda ordem é frequentemente o que melhor ajusta os dados experimentais, embora sua interpretação deva ser feita com cautela, pois bom ajuste estatístico não implica necessariamente quimissorção como mecanismo dominante (Pieczykolan, 2025). Modelos de difusão intrapartícula também indicam contribuição de resistências difusivas, sobretudo em materiais microporosos.

Em relação ao equilíbrio, os modelos de Langmuir e Freundlich permanecem os mais utilizados. Langmuir é frequentemente associado a superfícies mais homogêneas, enquanto Freundlich descreve melhor sistemas heterogêneos. Modelos híbridos, como

Sips, têm sido aplicados em materiais com comportamento intermediário (Tan et al., 2024).

A interpretação mecanística dos resultados depende diretamente da caracterização físico-química dos adsorventes. Técnicas como FTIR, DRX, MEV e BET são amplamente empregadas para correlacionar grupos funcionais, estrutura cristalina, morfologia e área superficial com a capacidade adsortiva observada (Zhang et al., 2021; Tan et al., 2024).

Do ponto de vista analítico, a espectrofotometria UV–Vis permanece como método predominante para quantificação de corantes, embora limitações relacionadas a interferências de matriz exijam, em alguns casos, o uso complementar de técnicas cromatográficas, como HPLC-DAD, para maior seletividade e confiabilidade (Karlidağ et al., 2024).

De forma integrada, os estudos analisados confirmam que a adsorção continua sendo tecnologia eficiente e versátil para o tratamento de efluentes têxteis, especialmente quando associada a materiais adequadamente caracterizados e a metodologias analíticas rigorosas.

CONCLUSÕES

A análise crítica da literatura recente confirma que a adsorção permanece como uma das tecnologias mais eficientes e consolidadas para a remoção de corantes têxteis de efluentes industriais, especialmente diante da elevada estabilidade química e persistência ambiental desses compostos. Em comparação com métodos convencionais, a adsorção demonstra maior versatilidade e aplicabilidade em sistemas complexos.

Os estudos revisados indicam que tanto adsorventes naturais modificados quanto materiais sintéticos apresentam elevado potencial, sendo a escolha do material condicionada ao equilíbrio entre desempenho adsortivo, viabilidade econômica e sustentabilidade. Estratégias de modificação estrutural e funcionalização têm ampliado significativamente a eficiência e a seletividade dos adsorventes.

A modelagem cinética e isotérmica, aliada à caracterização físico-química por técnicas como FTIR, DRX, MEV e BET, mostrou-se essencial para a compreensão

mecanística do processo, permitindo correlacionar propriedades estruturais e superficiais com o desempenho observado. Do ponto de vista analítico, a espectrofotometria UV–Vis permanece como ferramenta central para quantificação, sendo complementada por métodos cromatográficos em matrizes mais complexas.

De forma integrada, os avanços mais consistentes na área resultam da convergência entre desenvolvimento de materiais, modelagem adequada e rigor analítico. Assim, a adsorção mantém-se como eixo estratégico no desenvolvimento de soluções sustentáveis e tecnicamente robustas para o tratamento de efluentes têxteis.

REFERÊNCIAS

AL-TOHAMY, R.; ALI, S. S.; LI, F.; OKASHA, K. M.; MAHMOUD, Y. A.-G.; ELSAMAHY, T.; JIAO, H.; FU, Y.; SUN, J. **A critical review on the treatment of dye-containing wastewater: Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety.** Ecotoxicology and Environmental Safety, v. 231, p. 113160, 2022.

AZIZIAN, S.; ERIS, S. **Adsorption isotherms and kinetics.** Interface Science and Technology, v. 33, p. 445–509, 2021.

BENKHAYA, S.; M'RABET, S.; EL HARFI, A. **A review on classifications, recent synthesis and applications of textile dyes.** Inorganic Chemistry Communications, v. 115, p. 107891, 2020.

CHU, K. H.; HASHIM, M. A.; ZAWAWI, M. H.; BOLLINGER, J. C. **The Weber–Morris model in water contaminant adsorption: Shattering long-standing misconceptions.** Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 13, 2025.

DUTTA, S.; GUPTA, B.; SRIVASTAVA, S. K.; GUPTA, A. K. **Recent advances on the removal of dyes from wastewater using various adsorbents: a critical review.** Materials Advances, v. 2, n. 14, p. 4497–4516, 2021.

EL MEZIANI, S.; AGNAOU, H.; EL HADAJ, H.; BOUMYA, W.; BARKA, N.; ELHALIL, A. **Sustainable adsorption technologies for textile dye removal: advances in biomass-derived and magnetically modified activated carbons.** Cleaner Chemical Engineering, v. 12, p. 100210, 2025.

ELGARAHY, A. M.; ELWAKEEL, K. Z.; MOHAMMAD, S. H.; ELSHOUBAKY, G. A. **A**

critical review of biosorption of dyes, heavy metals and metalloids from wastewater as an efficient and green process. Cleaner Engineering and Technology, v. 4, p. 100209, 2021.

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.

GIRISH, C. R. **Determination of thermodynamic parameters in adsorption studies: a review.** Chemical Papers, v. 79, p. 5687–5706, 2025.

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

HU, X.; LI, Z.; GE, Y.; LIU, S.; SHI, C. **Enhanced π – π stacks of aromatic ring-rich polymer adsorbent for the rapid adsorption of organic dyes.** Colloids and Surfaces A, v. 643, p. 128782, 2022.

KARLIDAĞ, N. E.; BODUR, S. E.; GÜNKARA, Ö. T.; BAKIRDERE, S. **Simultaneous determination of nineteen azo dyes in water samples by gas chromatographymass spectrometry after Fe₃O₄ @ COF based dispersive solid phase extraction.** *Scientific Reports*, n.14, p. 28406, 2024.

KHAN, M. D.; SINGH, A.; KHAN, M. Z.; TABRAIZ, S.; SHEIKH, J. **Current perspectives, recent advancements, and efficiencies of various dye-containing wastewater treatment technologies.** Journal of Water Process Engineering, v. 53, p. 103579, 2023.

KUYUCU, A. E.; SELÇUK, A.; ÖNAL, Y.; ALACABEY, I.; EROL, K. **Effective removal of dyes from aqueous systems by waste-derived carbon adsorbent: physicochemical characterization and adsorption studies.** *Scientific Reports/Nature portfolio*, v.15, p. 28835, 2025.

MA, Z.; CHANG, H.; LIANG, Y.; MENG, Y.; REN, L.; LIANG, H. **Research progress and trends on state-of-the-art membrane technologies in textile wastewater treatment.** Separation and Purification Technology, v. 333, p. 125853, 2024.

MUNIYASAMY, A.; SIVAPORUL, G.; GOPINATH, A.; LAKSHMANAN, R.; ALTAE, A.; ACHARY, A.; CHELLAM, P. V. **Process development for the degradation of textile azo dyes (mono-, di-, poly-) by advanced oxidation process – ozonation: experimental and partial derivative modelling approach.** Journal of Environmental Management, v. 265, p. 110397, 2020.

NIZAM, N. U.; HANAFIAH, M. M.; MAHMOUDI, E.; HALIM, A. A.; MOHAMMAD, A. W.

The removal of anionic and cationic dyes from an aqueous solution using biomass-based activated carbon. Scientific Reports, v. 11, p. 8623, 2021.

PIECZYKOLAN, B. Investigation of adsorption kinetics and isotherms of synthetic dyes on biochar derived from post-coagulation sludge. International Journal of Molecular Sciences, v. 26, n. 16, p. 7912, 2025.

RÍOS-REINA, R.; AZCÁRATE, S. M. How chemometrics revives the UV-Vis spectroscopy applications as an analytical sensor for spectralprint (nontargeted) analysis. Chemosensors, v. 11, p. 8, 2023.

TAN, Z.; DENG, H.; OU, H.; WU, X.; Liao, Z.; Ou, H. Interfacial quantum chemical characterization of aromatic organic matter adsorption on oxidized microplastic surfaces. *Chemosphere*, v. 350, p. 141132, 2024.

VAREDA, J. P. On validity, physical meaning, mechanism insights and regression of adsorption kinetic models. Journal of Molecular Liquids, v. 376, p. 121416, 2023.

YASEEN, D. A.; SCHOLZ, M. Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: a critical review. International Journal of Environmental Science and Technology, v. 16, n. 3, p. 1193–1226, 2019.

ZHANG, T.; WANG, W.; ZHAO, Y.; BAI, H.; WEN, T; KANG, S.; SONG, G.; SONG, S.; KOMARNENI, S. Removal of heavy metals and dyes by clay-based adsorbents: From natural clays to 1D and 2D nano-composites, *Chemical Engineering Journal*, Volume 420, Part 2, p.127574, 2021.

ZHOU, X.; YU, X.; MAIMAITINIYAZI, R.; ZHANG, X.; QU, Q. Discussion on the thermodynamic calculation and adsorption spontaneity re Ofudje et al. (2023). Heliyon, v. 10, n. 8, p. e28188, 2024.