



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

QUÍMICA CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

NATHALIA CECILIA DO REGO LEMOS

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DA CAPACIDADE ADSORTIVA DE TRÊS
CARVÕES ATIVADOS COMERCIAIS NA REMOÇÃO DO CORANTE
REMAZOL AMARELO BTE.3R: estudos de equilíbrio e cinética de adsorção**

Recife

2025

NATHALIA CECILIA DO REGO LEMOS

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DA CAPACIDADE ADSORTIVA DE TRÊS
CARVÕES ATIVADOS COMERCIAIS NA REMOÇÃO DO CORANTE
REMAZOL AMARELO BTE.3R: estudos de equilíbrio e cinética de adsorção**

TCC apresentado ao Curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociência, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador(a): Prof. Dr Nelson Medeiros de Lima Filho

Recife

2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Lemos, Nathália Cecília do Rego.

Avaliação comparativa da capacidade adsortiva de três carvões ativados comerciais na remoção do corante remazol amarelo BTE.3R: estudos de equilíbrio e cinética de adsorção / Nathália Cecília do Rego Lemos. - Recife, 2025.

47: il., tab.

Orientador(a): Nelson Medeiros de Lima Filho

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Química - Bacharelado, 2025.

1. Adsorção. 2. Carvão ativado. 3. Cinética. 4. Equilíbrio. 5. Remazol Amarelo BTE.3R. I. Lima Filho, Nelson Medeiros de. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

NATHALIA CECILIA DO REGO LEMOS

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DA CAPACIDADE ADSORTIVA DE TRÊS
CARVÕES ATIVADOS COMERCIAIS NA REMOÇÃO DO CORANTE
REMAZOL AMARELO BTE.3R: estudos de equilíbrio e cinética de adsorção**

TCC apresentado ao Curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociência, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Aprovado em: 14/04/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr Nelson Medeiros de Lima Filho (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Profª. Dra. Eliane Bezerra de Moraes Medeiros (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Dr. Chesque Cavassano Galvão (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTO

A realização deste trabalho só foi possível graças ao apoio e incentivo de muitas pessoas especiais, às quais sou profundamente grata.

Agradeço, primeiramente, aos meus pais, ao meu irmão e ao meu namorado, por estarem sempre ao meu lado, oferecendo amor, força e apoio incondicional em cada etapa dessa jornada.

Aos professores e colegas do Departamento de Engenharia Química, minha gratidão pelo conhecimento compartilhado e pelas conversas ao longo da graduação. Em especial, ao Professor Nelson Medeiros e à Professora Eliane Bezerra, pelo direcionamento, paciência e confiança que foram fundamentais para a concretização deste trabalho.

A Família do Laboratório de Processos Catalíticos (LPC) – Paulo, Dayane, Chesque e Rafael – meu muito obrigada por estarem sempre dispostos a ajudar, dividir aprendizados e celebrar cada pequena conquista como se fosse de todos. Ter vocês por perto fez toda a diferença.

E um agradecimento especial a Michael, por todos esses anos de amizade, apoio e parceria dentro e fora da sala de aula. Obrigada por caminhar comigo durante essa trajetória com lealdade, companheirismo e tantos momentos compartilhados.

A todos, meu sincero agradecimento por fazerem parte dessa conquista.

RESUMO

A adsorção em carvão ativado é uma das técnicas mais utilizadas para a remoção de corantes sintéticos em meio aquoso, devido à sua eficiência, simplicidade e baixo custo operacional. Neste estudo, avaliou-se a capacidade adsortiva de três carvões ativados comerciais (Vetec, Proc9 e Carbomafra) na remoção do corante reativo Remazol Amarelo BTE.3R, por meio de experimentos em batelada, com análises de equilíbrio e cinética. A massa ideal do adsorvente foi determinada como 0,04 g, sendo o carvão ativado da marca Vetec o que apresentou melhor desempenho, atingindo 84,56% de remoção com concentração inicial de 50 mg/L. Os modelos de Langmuir e Freundlich foram ajustados aos dados experimentais, com melhor ajuste ao modelo de Langmuir ($R^2 = 0,98$), indicando adsorção em monocamada sobre superfície homogênea. Já na avaliação cinética, o modelo de pseudo-segunda ordem apresentou melhor ajuste com os dados experimentais ($R^2 = 0,9966$), sugerindo a predominância de interações químicas no processo. Os resultados demonstram a eficiência do carvão ativado Vetec na remoção do corante, com desempenho compatível com dados da literatura, evidenciando seu potencial para aplicação em sistemas de tratamento de soluções contaminadas por corantes.

Palavras-chave: adsorção; carvão ativado; cinética; equilíbrio; Remazol Amarelo BTE.3R.

ABSTRACT

Adsorption on activated carbon is one of the most widely used techniques for the removal of synthetic dyes in aqueous media, due to its efficiency, simplicity and low operational cost. In this study, the adsorptive capacity of three commercial activated carbons (Vetec, Proc9 and Carbomafra) in the removal of the reactive dye Remazol Yellow BTE.3R was evaluated, through batch experiments, with equilibrium and kinetic analyses. The ideal mass of the adsorbent was determined as 0,04 g, with Vetec activated carbon presenting the best performance, reaching 84.56% removal with an initial concentration of 50 mg/L. The Langmuir and Freundlich models were adjusted to the experimental data, with the best fit to the Langmuir model ($R^2 = 0,98$), indicating monolayer adsorption on a homogeneous surface. In the kinetic evaluation, the pseudo-second-order model presented a better fit with the experimental data ($R^2 = 0,9966$), suggesting the predominance of chemical interactions in the process. The results demonstrate the efficiency of Vetec activated carbon in removing dye, with performance compatible with literature data, evidencing its potential for application in treatment systems of solutions contaminated by dyes.

Keywords: adsorption; activated carbon; kinetics; equilibrium; Remazol Yellow BTE.3R.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura química do corante Remazol Amarelo	17
Figura 2: Tipos de adsorção.....	18
Figura 3: Isoterma de adsorção.....	21
Figura 4: Perfis de isotermas de adsorção	23
Figura 5: Incubadora Shaker	30
Figura 6: Instalação experimental dos testes de adsorção.	32
Figura 7: Espectrofotômetro UV-Vis.....	32
Figura 8: Varredura do corante amarelo Remazol BTE.3R.....	34
Figura 9: Curva Analítica	35
Figura 10: Efeito do tipo do carvão vs a eficiência de remoção do corante.....	37
Figura 11: Isotermas de adsorção do Remazol Amarelo BTE 3R frente a carvão VETEC	38
Figura 12: Cinética de adsorção do amarelo Remazol.	41
Figura 13: Modelos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem para o Remazol Amarelo BTE.3R.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Materiais utilizados no experimento	26
Tabela 2: Modelos não lineares de cinética de adsorção.	33
Tabela 3: Dados de equilíbrio	38
Tabela 4: Parâmetros de equilíbrio de adsorção	39
Tabela 5: Dados da cinética da adsorção no reator.....	40
Tabela 6: Parâmetros cinéticos da adsorção	41
Tabela 7: Parâmetros Cinéticos	43

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1 INDÚSTRIA TÊXTIL	14
2.2 CORANTES SINTÉTICOS	15
2.3 ADSORÇÃO	17
2.3.1 Parâmetros que influenciam na adsorção	19
2.3.2 Equilíbrio.....	21
2.3.3 Modelos de isothermas de adsorção	23
2.3.4 Adsorventes	24
3. METODOLOGIA.....	26
3.1 MATERIAIS E REAGENTES	26
3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	27
3.2.1 Preparação do corante sintético	27
3.2.2 Determinação da curva analítica	27
3.3 ENSAIOS DE ADSORÇÃO	29
3.3.1 Massa do adsorvente	29
3.3.2 Comparativo dos Carvões Ativados	29
3.3.3 Equilíbrio de Adsorção.....	30
3.3.4 Estudo cinético adsorativo em batelada	31
3.4 TRATAMENTO DE DADOS	33
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1 ANÁLISE DO CORANTE	34
4.1.1 Preparação da solução.....	34
4.2 ESTUDO DE ADSORÇÃO	36

4.2.1	Efeito da dosagem de adsorvente	36
4.2.2	Isotermas de adsorção	37
4.2.3	Estudo cinético da adsorção	39
5.	Conclusão	44
REFERÊNCIA		45

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, o controle da qualidade da água potável sempre teve como foco principal a eliminação de micro-organismos patogênicos. No entanto, a contaminação dos recursos hídricos vai além da presença biológica, ocorrendo também por fontes naturais — como o intemperismo de rochas e a erosão do solo — e, principalmente, por ações antrópicas, como o descarte inadequado de efluentes domésticos, industriais e resíduos da mineração (Rocha, 2024). Esses poluentes apresentam diferentes naturezas, incluindo compostos orgânicos de difícil degradação, substâncias químicas tóxicas e excesso de nutrientes.

Dentre os poluentes químicos, os corantes utilizados nas indústrias têxtil, alimentícia, cosmética e automotiva destacam-se pela persistência no meio ambiente e pelos potenciais efeitos tóxicos à saúde humana e aos ecossistemas (Penha, 2021). A indústria têxtil, uma das maiores consumidoras de corantes sintéticos, é também uma das principais fontes de lançamento desses compostos nos corpos hídricos, utilizando grandes volumes de água nos processos de tingimento e gerando efluentes com alta carga poluidora (Da Silva, 2022; Júnior, 2024).

Os corantes sintéticos, apesar da eficiência em conferir coloração intensa e estável aos produtos, apresentam alta solubilidade em água e resistência à degradação, o que dificulta sua remoção por métodos convencionais de tratamento de efluentes (Galvão, 2020). Além disso, sua toxicidade e persistência contribuem para impactos como a redução da penetração de luz na água, prejudicando a fotossíntese, e a diminuição dos níveis de oxigênio dissolvido, afetando a fauna aquática. A bioacumulação desses compostos representa risco ao equilíbrio ecológico.

Um exemplo significativo é o corante reativo Amarelo Remazol BTE.3R, amplamente utilizado na indústria têxtil. Sua estrutura permite ligações químicas com fibras têxteis, garantindo cores vibrantes e duradouras. Contudo, essas mesmas características tornam o corante altamente resistente à degradação e difícil de remover dos efluentes. Assim, sua presença nos corpos hídricos configura um grave problema ambiental.

Diante desse cenário, a busca por alternativas eficientes de tratamento se torna essencial. Entre as tecnologias mais promissoras está a adsorção com carvão ativado, um método amplamente utilizado devido à sua estrutura porosa e alta área superficial, que conferem excelente capacidade adsorptiva (Galvão, 2020). A eficiência desse adsorvente está relacionada à matéria-prima empregada, ao processo de ativação e à forma de aplicação — sendo o carvão ativado granular vantajoso por permitir fácil separação e possibilidade de regeneração.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo geral avaliar a eficiência do processo de adsorção para a remoção do corante Amarelo Remazol BTE.3R utilizando carvão ativado comercial. Para isso, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Testar três tipos diferentes de carvões ativados comerciais, comparando sua capacidade adsorptiva e identificando o material mais eficaz para aplicações no tratamento de efluentes;
- Obter dados de equilíbrio e curvas cinéticas de adsorção;
- Ajustar os modelos cinéticos e de equilíbrio mais adequados aos dados experimentais, a fim de validar a aplicabilidade do processo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 INDÚSTRIA TÊXTIL

A poluição ambiental causada pelo descarte inadequado de efluentes pelas indústrias têxteis é uma preocupação crescente em escala global, especialmente devido ao impacto na qualidade da água, um dos maiores problemas ambientais do mundo. (Sudarshan et al., 2023) Durante o processo de tingimento, cerca de 10 a 15% dos corantes aplicados não se fixam nas fibras têxteis, sendo liberados diretamente nos efluentes. Como resultado, até 20% desses corantes acabam sendo despejados em corpos d'água. Devido ao seu elevado poder tintorial, mesmo concentrações inferiores a 1 mg/L podem causar coloração visível na água, tornando-a imprópria para o consumo humano (Braz, 2023).

A indústria têxtil, que utiliza aproximadamente 20% dos 10 mil corantes conhecidos (Braz, 2023), destaca-se como uma das principais responsáveis pela contaminação dos corpos hídricos, não apenas pelo volume de efluentes líquidos gerados, mas também pelo elevado consumo de água em seus processos produtivos. O descarte inadequado desses resíduos sólidos e líquidos afeta gravemente a fauna e a flora aquática, comprometendo a qualidade ambiental e o equilíbrio dos ecossistemas. Assim, o tratamento e a gestão adequados dos efluentes são fundamentais para mitigar esses impactos e preservar os recursos hídricos.

O descarte inadequado de resíduos sólidos e líquidos, provenientes de diversos setores industriais, é um dos principais responsáveis pela contaminação de corpos hídricos, causando sérios danos à fauna e à flora aquática. Entre os setores que mais contribuem para essa poluição, a indústria têxtil se destaca como uma das mais impactantes, devido ao grande volume de água consumido em seus processos produtivos e à elevada geração de efluentes líquidos, especialmente durante o tingimento de tecidos. Estima-se que, dos cerca de 10 mil corantes existentes, aproximadamente 20% sejam empregados pela indústria têxtil, e uma parte significativa desses corantes acaba sendo descartada nos efluentes, gerando graves consequências ambientais (De Matos, 2020).

A maioria desses corantes é composta por substâncias sintéticas com estruturas químicas complexas, o que dificulta sua degradação (Sudarshan et al., 2023). Esses compostos são, em grande parte, não-biodegradáveis e apresentam alta estabilidade frente à luz e ao calor, tornando-os persistentes no meio ambiente. Como resultado, a presença desses corantes nos corpos d'água pode levar à poluição severa, afetando a qualidade da água e colocando em risco a vida aquática. Isso destaca a necessidade de desenvolver métodos eficazes para o tratamento de efluentes que contenham corantes, visando minimizar seu impacto ambiental.

2.2 CORANTES SINTÉTICOS

As moléculas que compõem os corantes são formadas por dois elementos principais: o cromóforo, que é o grupo responsável pela coloração, e o auxocromo, que desempenha um papel fundamental em potencializar a intensidade da cor (Sudarshan et al., 2023). O cromóforo é caracterizado pela presença de ligações duplas conjugadas, que permitem a absorção de radiação eletromagnética em uma faixa específica do espectro visível. Por outro lado, o auxocromo é um grupo funcional composto por átomos que se ligam ao cromóforo, alterando suas propriedades e, consequentemente, sua capacidade de absorver luz. Essa modificação pode influenciar tanto o comprimento de onda quanto a intensidade da absorção da luz.

Os corantes apresentam uma vasta diversidade estrutural, o que possibilita sua classificação de várias formas. Uma das maneiras de categorizá-los é com base em suas origens: corantes naturais, que são extraídos de fontes biológicas, e corantes sintéticos, que são produzidos quimicamente em laboratórios. Além dessa classificação, os corantes também podem ser organizados segundo a natureza do grupo cromóforo, permitindo uma compreensão mais aprofundada de suas características e aplicações. Essa ampla variedade estrutural e funcional dos corantes é um fator crucial na escolha de seus usos em diferentes indústrias, incluindo a têxtil, alimentícia e cosmética (Nasar, 2019).

Os corantes são amplamente utilizados para conferir coloração a uma vasta gama de materiais e substratos. Eles são aplicados em fibras têxteis como algodão, lã, seda, náilon, poliéster e fibra acrílica, além de serem utilizados em produtos de papel, tintas e artigos de couro. A versatilidade dos corantes se estende também a produtos alimentícios e cosméticos, onde são empregados para melhorar a estética e a aparência dos itens. Além

disso, eles são usados em plásticos, gasolina, lubrificantes, óleos e ceras, bem como em madeira, sabões e detergentes. Essa ampla aplicação em diferentes setores industriais demonstra a relevância dos corantes, que são utilizados em processos de fabricação de tintas, cartuchos de impressora, produtos químicos e outros materiais. Devido à sua extensa gama de aplicações, grandes quantidades de corantes são consumidas globalmente, refletindo a demanda contínua por esses compostos na indústria moderna. Essa utilização em larga escala, no entanto, também levanta preocupações ambientais, especialmente quando se trata do descarte inadequado dos efluentes que contêm esses produtos químicos (Júnior et al. 2024).

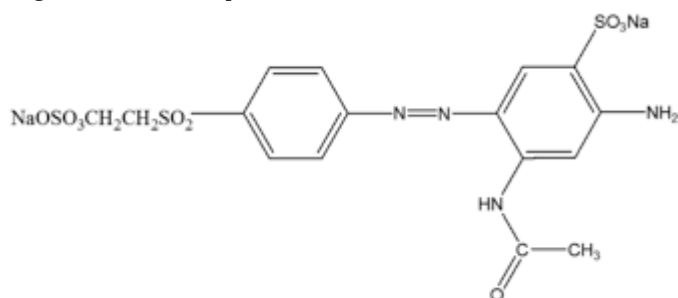
O elevado consumo de tintas em diversas indústrias, como a têxtil, de tinturaria, de papel e de curtume, resulta na liberação significativa de efluentes que contêm corantes. Um volume considerável de água residual, carregada com esses corantes, é gerado e, em muitos casos, é lançado diretamente nos sistemas de água doce sem o tratamento adequado. Esses compostos químicos são tóxicos e podem provocar uma série de problemas de saúde, como irritação na pele, doenças respiratórias, distúrbios mentais e náuseas. Em situações mais graves, alguns desses corantes têm o potencial de serem cancerígenos e mutagênicos, o que agrava ainda mais as preocupações relacionadas ao seu descarte (Júnior et al. 2024). Além disso, os corantes afetam a transmissão da luz e prejudicam os processos metabólicos biológicos, representando uma séria ameaça à vida aquática dos ecossistemas. Dessa forma, a remoção de corantes das águas residuais é uma preocupação significativa tanto do ponto de vista humano quanto ecológico (Nasar, 2019).

O Remazol Amarelo, também conhecido como Remazol amarelo, é um corante reativo amplamente utilizado na indústria têxtil e em diversas outras aplicações. Pertencente à classe dos corantes reativos, ele se destaca por sua capacidade de formar ligações químicas com as fibras têxteis, resultando em colorações duráveis e vibrantes. Sua fórmula molecular é $C_{14}H_{10}N_4NaO_3S$, e apresenta um comprimento de onda máximo de absorção em torno de 410 nm, o que indica que absorve luz na faixa do azul e reflete uma coloração amarela. O Remazol Amarelo tem alta solubilidade em água, facilitando sua aplicação em processos de tingimento (Haque, 2015).

Na indústria têxtil, o corante é amplamente utilizado para tingir fibras celulósicas, como algodão e viscose, além de outras fibras, como poliéster e lã. Sua capacidade de se ligar quimicamente às fibras garante que as cores sejam duráveis e resistentes à lavagem

Cézar, 2020). Além disso, o Remazol Amarelo pode ser encontrado em produtos alimentícios, onde é adicionado para conferir coloração, embora seu uso seja regulamentado em muitos países. O corante também é utilizado em cosméticos, plásticos e papéis, proporcionando tonalidade amarela em uma variedade de produtos. A Figura 1 apresenta sua estrutura molecular (Quirino, et al., 2018).

Figura 1: Estrutura química do corante Remazol Amarelo



Fonte: Quirino, et al., 2018

2.3 ADSORÇÃO

A adsorção é um processo de transferência de massa que investiga a capacidade de determinados sólidos em concentrar na sua superfície substâncias específicas presentes em fluidos, sejam eles líquidos ou gasosos, possibilitando a separação dos componentes desses fluidos (Nascimento, 2020). O sólido que realiza essa função é denominado adsorvente, enquanto a fase líquida (geralmente água) contém um ou mais compostos que serão adsorvidos, conhecidos como adsorvatos. Devido ao desequilíbrio das forças, o adsorvato é atraído para a superfície do adsorvente, resultando na redução dos graus de liberdade e da energia livre da superfície. O processo de transferência do adsorvato da fase líquida para a fase sólida prossegue até que se alcance um equilíbrio entre a quantidade de adsorvato fixada no adsorvente e a quantidade remanescente na solução. O grau de afinidade entre o adsorvente e o adsorvato é o que determina essa distribuição nas fases líquida e sólida.

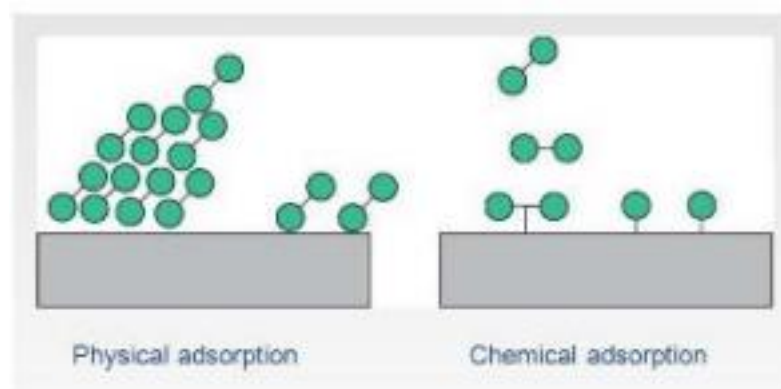
Os processos de separação por adsorção fundamentam-se em três mecanismos distintos: o estérico, os mecanismos de equilíbrio e os mecanismos cinéticos. No mecanismo estérico, os poros do material adsorvente apresentam dimensões

características que permitem a entrada de determinadas moléculas, excluindo outras. Quanto aos mecanismos de equilíbrio, eles se referem à capacidade dos diferentes sólidos de acomodar diferentes espécies de adsorvatos, que são preferencialmente adsorvidos em relação a outros compostos. Por fim, o mecanismo cinético é baseado na difusividade das espécies dentro dos poros dos adsorventes (Nascimento, 2020).

De maneira geral, a adsorção pode ser classificada com base no tipo de interação que ocorre entre o adsorvente e o adsorvato, de acordo com a Figura 2. Quando há transferência de elétrons entre os dois, o processo é denominado adsorção química ou quimissorção. Nesse caso, a adsorção envolve a transferência de elétrons, sendo de alta energia, variando entre 40 e 800 kJ/mol, tornando a dessorção difícil e resultando em um processo irreversível, no qual apenas uma monocamada é observada. Na adsorção química, as interações podem ocorrer principalmente através de ligações iônicas ou covalentes (Galvão, 2020).

Por outro lado, se não houver troca de elétrons, o processo é classificado como adsorção física ou fisissorção. Neste caso, as energias de adsorção são mais baixas, variando de 5 a 40 kJ/mol, permitindo que a dessorção seja possível, o que implica que a adsorção pode ser reversível e ocorrer em multicamadas (Bonilla-Petriciolet, Mendoza-Castillo, Reynel-Ávila, 2017).

Figura 2: Tipos de adsorção



Fonte: Galvão, 2020.

Os processos de adsorção são amplamente utilizados em diversas aplicações para o tratamento de águas residuais, águas subterrâneas e efluentes industriais, sendo também uma técnica importante na produção de água potável. Esse método de purificação de água

oferece uma série de vantagens significativas. Entre elas, destaca-se a sua capacidade de ser adaptado a diferentes cenários, permitindo sua implementação em uma variedade de contextos, desde pequenas estações de tratamento até grandes instalações industriais (Júnior, 2024).

Além de sua versatilidade, a adsorção se caracteriza por sua facilidade de operação, o que a torna acessível mesmo para aqueles que não possuem um conhecimento técnico avançado. Outro aspecto relevante é o seu design flexível, que pode ser ajustado de acordo com as necessidades específicas de cada aplicação. Em termos de eficiência energética, os processos de adsorção são atrativos, pois requerem um baixo consumo de energia, o que contribui para a sustentabilidade econômica e ambiental das operações de tratamento.

No entanto, a viabilidade técnica e econômica da adsorção depende de diversos fatores críticos. O tipo de adsorvente utilizado desempenha um papel fundamental na eficácia do processo, assim como as propriedades dos fluidos e dos poluentes que precisam ser removidos. Além disso, as condições operacionais, como temperatura e pressão, influenciam diretamente os resultados do tratamento. A configuração do processo também é um fator determinante, uma vez que diferentes arranjos podem levar a desempenhos variados. Por último, a regeneração do adsorvente e a gestão adequada dos resíduos gerados são aspectos que não podem ser negligenciados, pois impactam tanto a eficiência do sistema quanto a sua sustentabilidade a longo prazo (Millani, et al., 2024)

2.3.1 Parâmetros que influenciam na adsorção

O processo de adsorção é influenciado por uma série de forças, que envolvem tanto a adsorção física quanto a química. Diversos fatores afetam esse fenômeno, como a área de superfície disponível, as características do adsorvente e do adsorvato, além de variáveis como a temperatura do sistema, o tipo de solvente e o pH da solução. A adsorção é, portanto, influenciada por diversos aspectos, como as propriedades do adsorvente, do adsorvato e as condições de operação. Entre as principais características do adsorvente estão: sua área de superfície, o tamanho dos poros, densidade, grupos funcionais presentes na superfície e a hidrofobicidade do material. Em relação ao adsorvato, suas propriedades incluem polaridade, tamanho molecular, solubilidade e comportamento ácido ou básico. As condições de operação, como temperatura, pH e tipo de solvente, também desempenham um papel essencial no processo (Nascimento, 2020).

A adsorção é diretamente influenciada pela área superficial do adsorvente, já que esse processo ocorre predominantemente na superfície do material. Quanto maior a área disponível, maior será a quantidade de adsorbato que pode se fixar na superfície. Além disso, as propriedades físico-químicas do adsorvente são cruciais para determinar a eficiência e a velocidade do processo. A capacidade de adsorção é impactada por fatores como a porosidade do material, o volume específico de seus poros, a distribuição de tamanho dos poros e a presença de grupos funcionais na superfície. Esses grupos funcionais desempenham um papel importante nas interações químicas com as moléculas do adsorbato, facilitando a captura e retenção das substâncias. A natureza do material adsorvente também é decisiva, pois materiais com diferentes composições e estruturas moleculares podem apresentar diferentes comportamentos de adsorção, tanto em termos de eficiência quanto de seletividade. Assim, a escolha adequada do adsorvente, com propriedades otimizadas para um determinado tipo de adsorbato, pode aumentar significativamente a eficácia do processo, especialmente em soluções aquosas ou em ambientes de difícil tratamento (Rocha, 2024).

O processo de adsorção também é afetado pelo tamanho das partículas do adsorbato, já que a taxa de adsorção está diretamente relacionada ao transporte dessas partículas. Outro fator relevante é a polaridade do adsorbato, que pode influenciar a afinidade do adsorbato tanto pelo solvente quanto pelo adsorvente, dependendo de sua própria polaridade (Galvão, 2020).

A interferência do pH no processo de adsorção varia conforme o adsorvente utilizado, já que as cargas presentes na sua superfície dependem da sua composição (Oliveira et al., 2020). Um indicador útil para entender a tendência de uma superfície se tornar positiva ou negativa em função do pH é o ponto de carga zero (pcz), que representa o pH no qual a carga líquida do adsorvente é neutra. Quando o pH da solução é menor que o pcz, a superfície do adsorvente tende a ter carga positiva, favorecendo a adsorção de ânions. Já quando o pH é superior ao pcz, a superfície adquire carga negativa, o que favorece a adsorção de cátions (Nascimento, 2020).

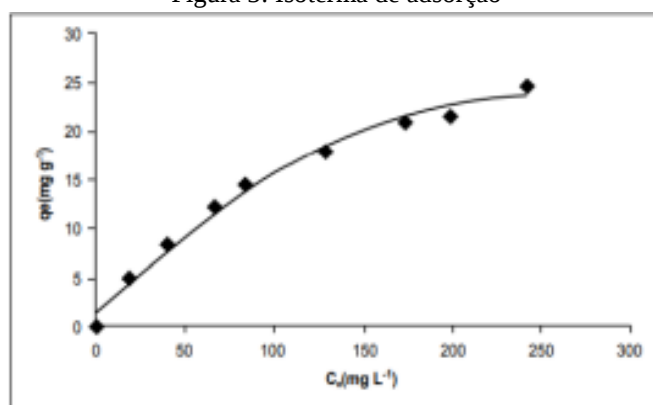
A teoria por trás da determinação do ponto de carga zero sugere que os íons H^+ e OH^- são fundamentais nesse processo, sendo que o adsorvente em solução aquosa pode captar ou liberar esses íons. A carga da superfície do adsorvente, portanto, depende diretamente do pH da solução. Os grupos superficiais nos sítios ativos podem ganhar ou perder prótons da solução, o que resulta em cargas positivas sob condições ácidas, ou

negativas em soluções alcalinas (Cerovic et al., 2007). O pH do ponto de carga zero delimita a polaridade da superfície do adsorvente, sendo positiva quando o pH está abaixo do pcz e negativa quando está acima. Essa variável é crucial, pois a interação eletrostática entre adsorvato e adsorvente é maximizada quando suas cargas são opostas. Caso suas cargas sejam iguais, a repulsão eletrostática prejudicará o processo de adsorção (Toledo et al., 2005).

2.3.2 Equilíbrio

A análise do equilíbrio de adsorção é fundamental para obter informações essenciais sobre um processo de separação por adsorção. Quando uma quantidade específica de adsorvente é colocada em contato com um volume de solução contendo o adsorvato, o processo de adsorção ocorre até que o equilíbrio seja atingido. Isso significa que as moléculas ou íons do adsorvato se movem do meio aquoso para a superfície do adsorvente, até que um equilíbrio seja estabelecido, fazendo com que a concentração do soluto na fase líquida (C_e) permaneça constante. Nesse momento, diz-se que o sistema alcançou o equilíbrio, e a capacidade de adsorção do adsorvente (q_e) é determinada. Para isso, utiliza-se uma massa fixa de adsorvente e diferentes concentrações iniciais de adsorvato. A Figura 3 mostra o gráfico da capacidade de adsorção (q_e) em relação a C_e , baseado em dados experimentais. Utilizando modelagem com equações de isoterma, a relação entre q_e e C_e pode ser expressa, e a capacidade máxima de adsorção (q_{max}) é obtida experimentalmente (Nascimento, 2020).

Figura 3: Isoterma de adsorção



Fonte: Nascimento (2020)

A isoterma de adsorção é um procedimento que consiste na adição de uma quantidade conhecida de adsorvente em um volume específico (V) de várias soluções com concentrações iniciais (C_0) distintas e previamente determinadas. Ao se alcançar o

equilíbrio de adsorção, obtemos a concentração final do soluto na solução em equilíbrio (C_e) e a capacidade de adsorção do adsorvente (q). Dessa forma, podemos traçar um gráfico de q em função de C_e . No entanto, é necessário entender como determinar os valores de C_e e q . Para calcular C_e , uma vez que o equilíbrio é alcançado, o adsorvente é separado da solução usando um filtro de membrana, papel de filtro ou centrifugação, e a solução sobrenadante é analisada para quantificar a concentração residual do adsorvato (C_e). Essa concentração pode ser mensurada por métodos analíticos apropriados, dependendo do adsorvato em questão, como cromatografia gasosa ou líquida, espectrometria na faixa ultravioleta ou visível, e espectrometria de absorção ou emissão atômica. Para calcular os valores de q , é necessário realizar um balanço de massa, onde a quantidade de adsorvato que se fixa no adsorvente deve corresponder à quantidade de adsorvato que foi removida da solução, conforme indicado na Equação 1:

$$q = \frac{(C_o - C_e) \times V}{m} \quad (1)$$

Em que:

q : Capacidade de adsorção

C_o : Concentração inicial do adsorvato

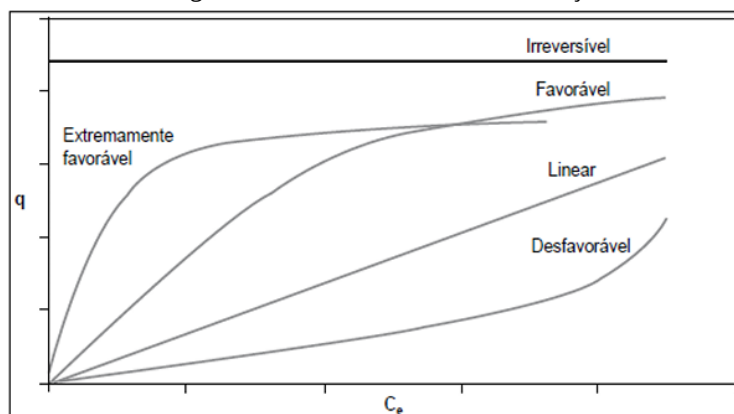
C_e : Concentração do adsorvato no equilíbrio

V : Volume de adsorção

m : massa do adsorvente

Após a determinação de q e C_e , é possível elaborar um gráfico que relaciona os valores de q em função de C_e (com q no eixo vertical e C_e no eixo horizontal), resultando em um gráfico que representa uma isoterma de adsorção. Em termos gerais, as isotermas são representações que ilustram a variação da concentração em equilíbrio no sólido adsorvente a uma temperatura específica. Os gráficos obtidos podem assumir diferentes formatos, fornecendo informações relevantes sobre o mecanismo de adsorção, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4: Perfis de isotermas de adsorção



Fonte: Santos, 2023.

Examinando as diferentes formas de isotermas, é possível obter informações extremamente significativas sobre o processo de adsorção. Por exemplo, a isoterma linear indica que a quantidade de adsorvato retida por unidade de massa do adsorvente é diretamente proporcional à concentração de equilíbrio do adsorvato na fase líquida. Em contraste, a isoterma irreversível afirma que a quantidade de adsorvato mantida por massa de adsorvente não depende da concentração de equilíbrio do adsorvato na fase líquida. Por outro lado, a isoterma desfavorável demonstra que a quantidade de adsorvente é baixa, mesmo em condições de alta concentração de equilíbrio do adsorvato na fase líquida (Santos, 2023, Dos Santos, 2019).

2.3.3 Modelos de isotermas de adsorção

As isotermas de adsorção obtidas experimentalmente podem ser descritas por diversos modelos matemáticos. Para representar a taxa global de adsorção, é essencial compreender o processo de transferência de massa, assim como o comportamento de equilíbrio dos sistemas envolvidos. O modelo de Langmuir é uma das equações mais amplamente empregadas para descrever processos de adsorção, e apresenta as seguintes condições:

- Há uma quantidade específica de sítios disponíveis;
- Os sítios possuem energia uniforme, e as moléculas adsorvidas não interagem entre si;
- A adsorção ocorre em uma única camada;
- Cada sítio pode acomodar apenas uma molécula adsorvida.

É importante destacar duas questões sobre esse ponto. Primeiro, o modelo de Freundlich não impõe nenhuma condição de que a cobertura deva se aproximar de um valor fixo, correspondente à formação de uma monocamada completa, à medida que a concentração de equilíbrio (C_e) aumenta. Outro ponto relevante é que a equação indica que o valor de q pode crescer conforme C_e aumenta, mas, ao analisar o processo de adsorção, percebe-se que isso é fisicamente inviável. Assim, pode-se concluir que dados experimentais com valores elevados de C_e não são bem representados pela equação de Freundlich (Nascimento, 2020).

De maneira geral, uma adsorção considerada favorável ocorre quando o valor de n (constante de Freundlich) está entre 1 e 10. Quanto maior for o valor de n , mais forte será a interação entre o adsorvente e o adsorvato. Por outro lado, para $n = 1$, isso indica uma adsorção linear, ou seja, com energias idênticas para todos os sítios de adsorção. Vale ressaltar que a equação de Freundlich não é adequada para prever dados de equilíbrio de adsorção quando são utilizadas concentrações extremamente altas. Além disso, essa equação não se reduz à forma de adsorção linear em concentrações muito baixas. No entanto, em muitos estudos, as concentrações estão dentro de uma faixa moderada, permitindo o uso da equação para ajuste dos dados (Galvão, 2020).

Em síntese, cada modelo faz suas suposições, e é essencial escolher aquele que melhor se adapta aos dados experimentais para que possa ser aplicado corretamente (Galvão, 2020).

2.3.4 Adsorventes

A adsorção é amplamente reconhecida como uma das técnicas mais eficientes no tratamento de efluentes, sendo capaz de remover poluentes tanto orgânicos quanto inorgânicos de maneira rápida e eficaz. Esse processo se destaca por ser econômico, de fácil implementação, altamente eficiente e gerar subprodutos não tóxicos, além de possuir uma operação simples (Nasar, 2019). Para que um material seja considerado um bom adsorvente na remoção de corantes, ele deve apresentar características como alta área superficial, boa porosidade, grande capacidade de adsorção, fácil acesso, estabilidade mecânica, viabilidade econômica, facilidade de regeneração e compatibilidade ambiental.

Essas propriedades permitem a remoção eficaz de uma ampla gama de corantes presentes em soluções aquosas (Nasar, 2019).

Dentre os diversos adsorventes disponíveis, o carvão ativado é o mais amplamente utilizado devido à sua elevada eficiência na remoção de poluentes. O carvão ativado possui uma área superficial muito grande, alta porosidade e forte capacidade de adsorção, tornando-o ideal para tratar águas contaminadas. No entanto, ele também apresenta desvantagens, como seu custo operacional elevado, dificuldades na regeneração e complicações na separação do solvente após o processo de adsorção. Mesmo assim, continua sendo um dos adsorventes mais eficazes e amplamente aplicados no tratamento de efluentes, especialmente devido à sua alta seletividade e versatilidade em relação a diferentes tipos de poluentes (Silvana, 2019).

3. METODOLOGIA

Neste tópico serão descritos os procedimentos utilizados nas análises conduzidas para o progresso desta pesquisa. Os experimentos foram executados no Laboratório de Processos Catalíticos (LPC), pertencente ao Departamento de Engenharia Química (DEQ) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

3.1 MATERIAIS E REAGENTES

Na Tabela 1, estão descritos os reagentes e os materiais empregados no procedimento experimental utilizados durante a pesquisa.

Tabela 1: Materiais utilizados no experimento

Material	Quantidade
Corante Amarelo Remazol	01
Carvão Ativado Vetec	01
Carvão Ativado 141-S	01
Carvão Ativado Proc9	01
Balão volumétrico de 100 mL	08
Erlenmeyer de 250mL	08
Pipeta volumétrica 10 mL	01
Cronômetro	01
Espectrômetro UV-Vis	01
Reator agitado	01
Seringa	01
Filtro poroso	01

Fonte: Autora, 2025

3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.2.1 Preparação do corante sintético

Inicialmente, foi preparada uma solução mãe com concentração de 500 mg/L pesando 0,5 g de amarelo Remazol BTE.3R em uma balança analítica, o qual foi posteriormente diluído em água destilada completando o volume até aferição em um balão volumétrico de 1000 mL. A partir dessa solução, foram realizadas diluições sucessivas para obtenção das concentrações desejadas nos experimentos.

3.2.2 Determinação da curva analítica

As análises do corante foram realizadas por um espectrofotômetro UV-Vis Varian, modelo Cary 50 Bio, na função de absorbância, utilizando cubetas de quartzo com caminho óptico de 10,0 mm, sendo necessária, para isso, a construção de uma curva analítica específica para o Remazol Amarelo BTE.3R. Tal procedimento possibilita a determinação das concentrações das amostras com base na relação entre absorbância e concentração, conforme descrito pela Lei de Beer-Lambert. Essa lei, válida para soluções diluídas, estabelece uma relação direta entre a absorbância (A) e a concentração da solução (C), expressa pela equação 2:

$$A = a \cdot b \cdot C \quad (2)$$

onde:

- A é a absorbância,
- a é a absortividade molar ($\text{L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$),
- b é o caminho óptico da cubeta (cm),
- C é a concentração (mol/L).

Em condições de caminho óptico constante, a relação entre A e C é linear, sendo o coeficiente angular da reta (α) representativo da sensibilidade do método.

Para definir o comprimento de onda ideal de leitura, foi realizada inicialmente uma varredura espectral no espectrofotômetro, identificando o comprimento de onda onde se tem o pico de máximo de absorção do corante. Em seguida, foram analisadas, em triplicata, soluções padrão com concentrações conhecidas na faixa de 25 a 200 mg/L. A

partir desses dados, foi construído o gráfico de Absorbância vs Concentração, permitindo o ajuste de uma equação linear para a curva de calibração.

3.3 ENSAIOS DE ADSORÇÃO

3.3.1 Massa do adsorvente

Para o estudo da influência da massa do adsorvente, foram realizados ensaios variando a quantidade de adsorvente de 0,01g – 0,04 g em 100 ml de solução. Para cada ensaio a concentração inicial do corante foi fixada em 50 mg/L, a temperatura utilizada foi a ambiente e o tempo de adsorção foi fixado em 120 min.

3.3.2 Comparativo dos Carvões Ativados

Antes da realização do estudo de equilíbrio adsorptivo, foi conduzido um ensaio preliminar com o objetivo de comparar a eficiência de adsorção dos carvões ativados testados. Esse comparativo permitiu identificar qual dos materiais apresentava melhor desempenho na remoção do corante Remazol Amarelo BTE.3R em solução, sendo, portanto, o mais adequado para ser utilizado nas etapas seguintes do estudo.

Foram avaliados três tipos de carvão ativado, comercializados pelas marcas **Carbomafra, Proc9 e Vetec**, utilizando uma solução de corante com concentração de 50 mg/L. O procedimento experimental seguiu os mesmos parâmetros definidos para os ensaios de equilíbrio.

A massa ideal de adsorvente, previamente determinada, foi pesada e adicionada em três frascos Erlenmeyer — um para cada tipo de carvão. Em seguida, foram adicionados 100 mL da solução de corante em cada frasco. Os sistemas foram submetidos à agitação em uma incubadora tipo shaker por 1 hora e 30 minutos, promovendo a homogeneização e o contato entre adsorvente e adsorvato. Após esse período, os frascos permaneceram em repouso por 30 minutos, totalizando 2 horas de tempo de contato, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5: Incubadora Shaker



Fonte: A autora, 2025

Finalizado o ensaio, retirou-se uma alíquota de cada sistema, que foi filtrada para separação do carvão ativado e analisada em espectrofotômetro UV-Vis. A partir dessa análise, foi possível determinar a concentração residual do corante e, conseqüentemente, calcular a eficiência de adsorção de cada tipo de carvão.

3.3.3 Equilíbrio de Adsorção

O equilíbrio adsorptivo é atingido quando a quantidade de corante adsorvida pelo carvão ativado se estabiliza, ou seja, quando as taxas de adsorção e dessorção se igualam. A determinação desse ponto é essencial para avaliar a capacidade máxima de adsorção do material e gerar dados para a construção das isoterms de adsorção.

O experimento para avaliar o equilíbrio adsorptivo foi conduzido com base no mesmo procedimento adotado no teste comparativo entre os carvões ativados. Foram utilizados 8 frascos Erlenmeyer, cada um contendo a massa ideal de carvão ativado e 100 mL de solução do corante Remazol Amarelo BTE.3R, em concentrações conhecidas variando de 25 a 200 mg/L, com intervalos de 25 mg/L.

3.3.3.1 Definições

Nesta seção, serão definidas as variáveis essenciais para a avaliação dos processos adsorptivos. Para isso, serão consideradas a massa do adsorvato (corante) presente na

solução, sua concentração e a relação matemática que descreve esse processo (Conforme a Equação 3).

$$Ci = \frac{mi}{V} \quad (3)$$

Onde:

mi: Massa do adsorvato e

V: Volume da solução.

Para avaliação da eficiência de remoção foi utilizada a Equação 4.

$$\%R = \frac{(Co - Ce)}{Co} \times 100 \quad (4)$$

Onde %R representa a eficiência de remoção, Co é a concentração inicial do corante na solução, expressa em mg/L, e Ce corresponde à concentração do corante no equilíbrio, também em mg/L.

Para determinar a quantidade de corante adsorvida por unidade de massa do adsorvente, aplicou-se a Equação 5

$$q = \frac{(Co - C)}{m} \times V \quad (5)$$

Onde:

q - Quantidade adsorvida no tempo t, em mg adsorvato/g adsorvente,

Co - Concentração inicial da solução de corante, em mg/L,

C - Concentração da solução de corante no tempo t, em mg/L,

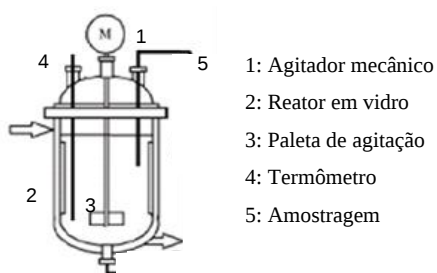
V - Volume da solução, em L,

m - Massa do adsorvente, em g.

3.3.4 Estudo cinético adsorptivo em batelada

A cinética de adsorção foi avaliada em um sistema de batelada, utilizando um reator agitado, conforme ilustrado na Figura 6. Para o experimento, foi adicionada uma solução do adsorvato Remazol Amarelo BTE.3R com concentração de 50 mg/L, juntamente com carvão ativado previamente selecionado.

Figura 6: Instalação experimental dos testes de adsorção.



Fonte: A autora, 2025.

O sistema permaneceu sob agitação constante para garantir o contato eficiente entre o adsorvente e o adsorvato. Nos seguintes intervalos de tempo: 1, 5, 10, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120 min, as alíquotas foram retiradas, filtradas para remoção do carvão ativado e analisadas por espectrofotometria UV-Vis, permitindo o acompanhamento da variação da concentração residual ao longo do tempo, conforme ilustrado na Figura 7. Após 2 horas de experimento, foi feita a coleta da amostra final, que também foi analisada.

Esse procedimento possibilita avaliar a taxa de adsorção e ajustar os dados obtidos a modelos cinéticos adequados, contribuindo para a compreensão do mecanismo envolvido na remoção do adsorvato.

Figura 7: Espectrofotômetro UV-Vis



Fonte: A autora (2025).

3.4 TRATAMENTO DE DADOS

Com base nos dados experimentais obtidos, foram realizados ajustes aos modelos de isotermas de adsorção de Langmuir e Freundlich, bem como aos modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem. Para a análise matemática dos dados de equilíbrio e cinética, foi empregada a ferramenta Solver do Microsoft Excel, permitindo a otimização dos parâmetros dos modelos, como a capacidade adsorptiva teórica (q_{as}), a constante de Langmuir (K_a) e o expoente de Freundlich (n), a fim de identificar o modelo que melhor representa o comportamento do sistema estudado.

A Tabela 2 apresenta os modelos utilizados na determinação das constantes de taxa associadas à cinética do processo de adsorção.

Tabela 2: Modelos não lineares de cinética de adsorção.

Modelo	Equação
Pseudo – Primeira Ordem	$qt = qe \times (1 - e^{-k_1 \times t})$
Pseudo – Segunda Ordem	$qt = \frac{k_2 \times q_e^2 \times t}{1 + k_2 \times qe \times t}$

Fonte: A autora, 2025

Para identificar o modelo cinético que melhor representa os dados de adsorção, foram aplicados dois indicadores estatísticos: o qui-quadrado (χ^2) e o coeficiente de determinação (R^2), cujas fórmulas estão descritas nas Equações 6 e 7, respectivamente.

O teste do qui-quadrado (χ^2), conforme apresentado na Equação 6, avalia o grau de concordância entre os valores experimentais (x_i) e os valores estimados pelo modelo (y_i). Esse teste é utilizado para verificar se as diferenças entre os dados observados e os calculados são estatisticamente significativas (Soares, 2023).

$$\chi^2 = \sum \frac{(x_i - y_i)^2}{y_i}, \text{ com } k = i \quad (6)$$

Já o coeficiente de determinação (R^2), indicado na Equação 7, corresponde ao quadrado do coeficiente de correlação de Pearson. Esse parâmetro mede o quanto da variação da variável dependente pode ser explicada pela variação da variável independente, indicando o grau de ajuste do modelo aos dados (Soares, 2023).

$$R^2 = \frac{\sum ((x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}))^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (7)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

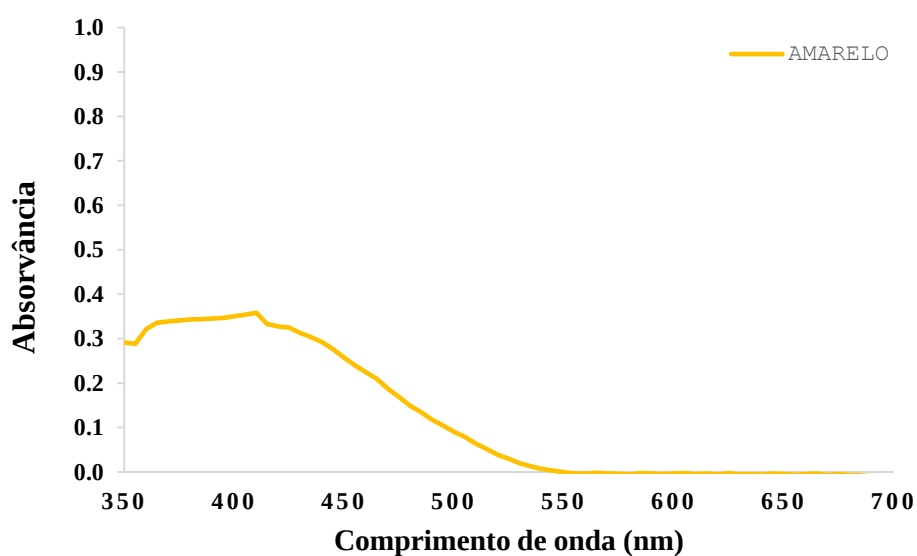
4.1 ANÁLISE DO CORANTE

A solução do corante foi preparada conforme os procedimentos descritos na metodologia. Na sequência, foi identificada a faixa de maior absorção do corante (comprimento de onda ideal) por meio de varredura espectrofotométrica, e então construída a curva analítica para quantificação nas análises posteriores.

4.1.1 Preparação da solução

Após preparar a solução mãe com o corante Amarelo Remazol BTE.3R, foi feita a varredura de uma amostra diluída para obtenção de um comprimento de onda adequado para as análises. A varredura da solução, feita de 200 nm até 800 nm, pode ser observada na Figura 8.

Figura 8: Varredura do corante amarelo Remazol BTE.3R

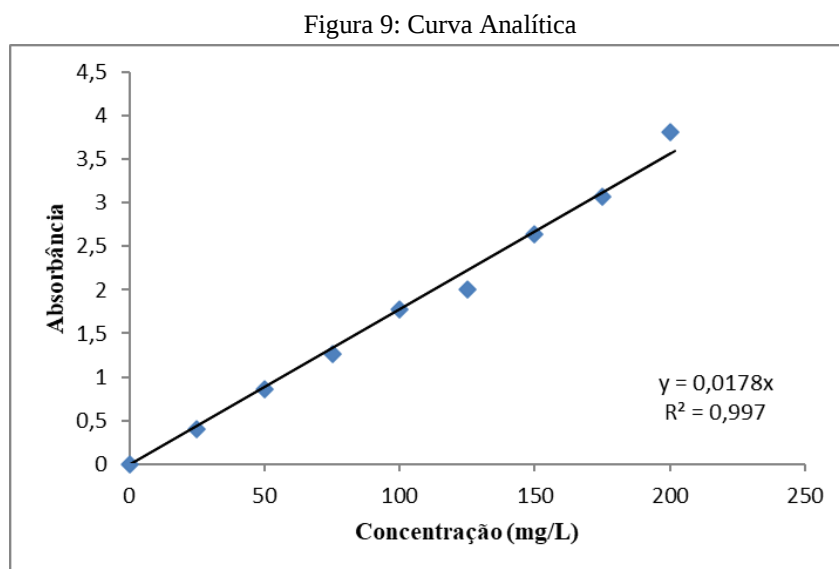


Fonte: A autora, 2025

Após a definição do comprimento de onda com maior absorção ($\lambda = 410$ nm), foi construída a curva analítica necessária para a determinação das concentrações finais nos ensaios de adsorção. As amostras foram analisadas em ordem crescente de concentração (da mais diluída para a mais concentrada), a fim de evitar possíveis erros sistemáticos.

A curva analítica obtida, Figura 9 apresentou um comportamento linear, conforme previsto pela Lei de Beer-Lambert, o que confirma a confiabilidade das leituras de absorbância para estimar as concentrações das soluções desconhecidas nos experimentos.

Conforme pode ser observado, o coeficiente de determinação (R^2) apresentou um valor bastante próximo de 1 ($R^2 = 0,997$), indicando um bom ajuste e a confiabilidade do modelo.



Fonte: A autora, 2025

A partir da curva analítica pode-se calcular, por regressão linear, a relação entre absorbância e concentração do Remazol Amarelo BTE.3R em uma solução (α) e com isso calcular as concentrações finais seguindo a equação 2, explicitada na metodologia.

4.2 ESTUDO DE ADSORÇÃO

Neste estudo, o corante sintético Remazol Amarelo BTE.3R foi utilizado como adsorvato para avaliar a capacidade adsortiva de diferentes tipos de carvão ativado. Foram investigadas variáveis importantes que influenciam o processo de adsorção, como a natureza do adsorvente (diferentes marcas de carvão ativado) e a massa utilizada em cada ensaio. Além disso, foram conduzidos estudos de cinética e de equilíbrio adsortivo, com o objetivo de compreender o comportamento do sistema ao longo do tempo e em condições de saturação, permitindo uma análise mais aprofundada da eficiência do processo e do desempenho dos materiais testados.

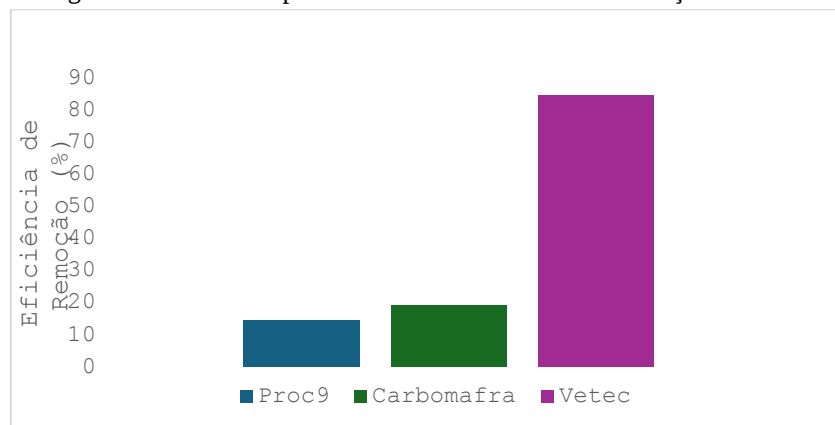
4.2.1 Efeito da dosagem de adsorvente

Com o objetivo de selecionar o material adsorvente mais eficiente para os ensaios posteriores, foi realizado um estudo comparativo entre três marcas comerciais de carvão ativado: Carbomafra, Proc9 e Vetec. Para esse ensaio preliminar, foram utilizadas massas de adsorvente variando de 0,01 g a 0,04 g, adicionadas a frascos Erlenmeyer contendo 100 mL de solução do corante Remazol Amarelo BTE.3R, na concentração fixa de 50 mg/L. As condições experimentais foram padronizadas, com tempo de contato total de 120 minutos e temperatura ambiente de aproximadamente 30 °C.

O objetivo deste experimento foi identificar a massa de carvão ativado que proporcionasse a maior eficiência de remoção do corante, bem como verificar qual das três marcas apresentava o melhor desempenho adsortivo. Após análise em espectrofotômetro UV-Vis, observou-se que a massa de 0,04 g foi a que resultou na maior remoção de corante em todos os casos. Entre os três carvões testados, o carvão ativado da VETEC apresentou a maior eficiência de adsorção, sendo, portanto, selecionado para os estudos subsequentes de equilíbrio e cinética adsortiva.

Os resultados detalhados desse ensaio comparativo podem ser visualizados na Figura 10, onde é possível observar o desempenho de cada marca de carvão ativado em termos de eficiência de adsorção, considerando a melhor quantidade de adsorvente encontrada.

Figura 10: Efeito do tipo do carvão vs a eficiência de remoção do corante.



Fonte: A autora, 2025.

Conforme apresentado na Figura 10, o carvão ativado da marca Vetec demonstrou o melhor desempenho adsorptivo entre as três marcas avaliadas, atingindo uma eficiência de remoção de 84,56% do corante Remazol Amarelo BTE.3R. Em comparação, os carvões das marcas Carbomafra e Proc9 apresentaram eficiências significativamente inferiores, de 19,15% e 14,55%, respectivamente. Esses resultados evidenciam a superioridade do carvão da Vetec na capacidade de adsorção do corante sob as condições experimentais utilizadas.

Bueno (2023) estudou a remoção de um corante disperso utilizando carvão ativado, alcançando uma taxa de remoção de 95%. Esses resultados reforçam a eficiência do carvão ativado como material adsorvente, estando de acordo com os dados obtidos neste trabalho para a remoção do corante Remazol Amarelo BTE.3R. Dessa forma, os resultados encontrados mostram-se compatíveis com os da literatura, evidenciando o potencial do carvão ativado na remoção de corantes sintéticos.

Diante desse desempenho, e considerando também que a massa de 0,04 g foi identificada como o melhor ponto de adsorvente testado, optou-se por utilizar o carvão ativado da Vetec, nesta mesma massa, nos ensaios subsequentes de equilíbrio adsorptivo e cinética de adsorção.

4.2.2 Isotermas de adsorção

As isotermas de adsorção são ferramentas essenciais para compreender o desempenho de um adsorvente frente a diferentes concentrações de uma substância em solução (Silva, 2024). Com base nas considerações anteriores, os dados experimentais

foram ajustados utilizando dois modelos clássicos de isotermas de adsorção: **Langmuir** e **Freundlich**.

Para esse estudo, foram utilizadas soluções do corante Remazol Amarelo BTE.3R com concentrações variando de 25 a 200 mg/L, sob as mesmas condições experimentais utilizadas na avaliação do efeito da massa do adsorvente, descritas na Seção 3.3.2. Os dados obtidos para o estudo do equilíbrio se encontram na Tabela 3.

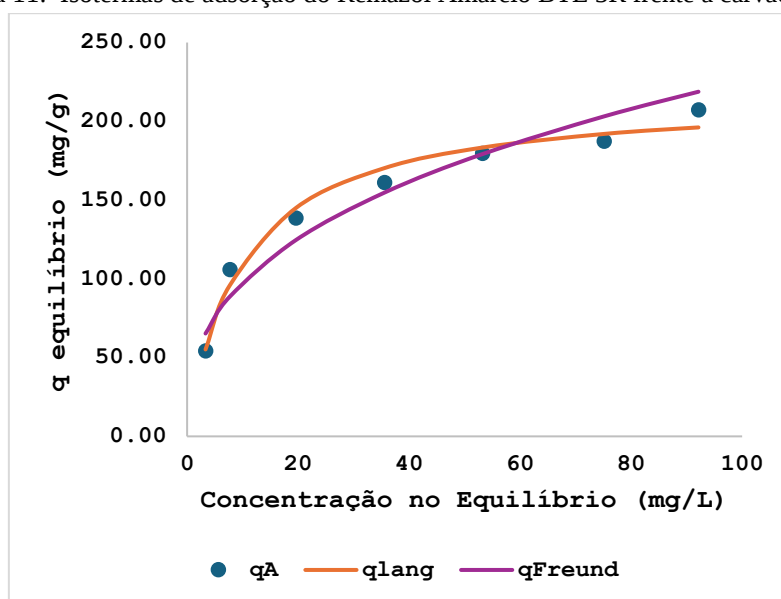
Tabela 3: Dados de equilíbrio

Concentração inicial (mg/L)	Concentração no equilíbrio (mg/L)	q_A (mg de corante/g de carvão)
25	3,315	54,213
50	7,719	105,702
75	22,601	130,997
100	35,545	161,138
125	56,191	172,022
150	75,129	187,177
175	92,135	207,163
200	117,815	205,463

Fonte: A autora, 2025

Os modelos mencionados foram ajustados os valores obtidos experimentalmente, o equilíbrio de concentração (c_{eq}) e capacidade de adsorção (q_{eq}), por meio da ferramenta Solver do Microsoft Excel, e estão apresentados na Figura 11. O procedimento adotado consistiu na minimização do erro quadrático entre os valores experimentais e os valores calculados pelos modelos, seguindo o método dos Mínimos Quadrados.

Figura 11: Isotermas de adsorção do Remazol Amarelo BTE 3R frente a carvão VETEC



Fonte: A autora, 2025.

A partir do ajuste dos modelos utilizando a ferramenta Solver do Microsoft Excel, foi possível determinar os parâmetros de cada isoterma, bem como o coeficiente de correlação (R^2), conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros de equilíbrio de adsorção

Modelo	Parâmetros	R^2
Langmuir	216,792 (mg/g)	0,98
Freundlich	-	0,95

Fonte: A autora, 2025.

Observando a Figura 11 e os dados da Tabela 4, verifica-se que o modelo de Langmuir foi o que melhor representou os dados experimentais, apresentando o maior valor de R^2 entre os modelos avaliados. Esse coeficiente, próximo da unidade, indica um bom ajuste do modelo aos dados obtidos, o que pode ser visualizado também na Figura 11. Esse resultado sugere que a adsorção do corante Remazol Amarelo BTE.3R no carvão ativado Vetec ocorreu de forma homogênea, com formação de uma monocamada sobre a superfície do adsorvente. Tal comportamento é típico de superfícies com sítios de adsorção energeticamente equivalentes.

Barbosa (2021) investigou a remoção do corante Amarelo Ouro utilizando carvão ativado obtendo uma capacidade máxima de adsorção de $119,00 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ nas condições avaliadas. Comparando com os resultados obtidos neste trabalho, observa-se que a capacidade adsorptiva do carvão ativado utilizado foi ainda superior, o que evidencia a eficiência do material testado e reforça o potencial do processo aplicado para a remoção do corante Remazol Amarelo BTE.3R. Esses dados indicam que o adsorvente empregado neste estudo apresenta desempenho competitivo, superando valores reportados na literatura para corantes de estrutura e comportamento semelhantes.

4.2.3 Estudo cinético da adsorção

A análise da cinética de adsorção é fundamental para entender como o sistema se comporta ao longo do tempo, permitindo avaliar a velocidade com que o corante é removido da solução e a eficiência do processo em diferentes momentos (Silva, 2024). Essas informações são essenciais para otimizar as condições operacionais, contribuindo para um controle mais preciso do sistema e garantindo maior eficácia na remoção do contaminante.

Com esse objetivo, foram aplicados modelos cinéticos amplamente utilizados em estudos de adsorção, como o modelo de Langmuir (Equação 8), além dos modelos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem. Esses modelos permitem estimar a taxa de adsorção e analisar a variação da concentração do corante ao longo do tempo na superfície do carvão ativado. Além disso, possibilitam identificar o tipo de interação predominante no processo — se física ou química — e fornecem parâmetros relevantes para prever o desempenho do sistema adsorativo ao longo do tempo.

Para a análise cinética, foi utilizada uma solução com concentração de 50 mg/L do corante, mantendo as condições experimentais descritas na seção 3.3.4.

Na tabela 5, apresenta os dados obtidos experimentalmente para a cinética da reação.

Tabela 5: Dados da cinética da adsorção no reator

Tempo (min)	Concentração (mg/L)
5	17,73
10	13,93
15	9,45
30	4,74
45	3,65
60	2,67
75	2,23
90	1,54
105	1,37
120	0,97

Fonte: A autora, 2025

Conforme apresentado na tabela 5, observa-se que em apenas 10 minutos já havia sido removido aproximadamente 72% do corante da solução, evidenciando a rapidez do processo de adsorção. A remoção máxima foi alcançada em 120 minutos, com uma eficiência de 98%, indicando que o equilíbrio foi atingido nesse intervalo de tempo e demonstrando a alta eficiência do carvão ativado Vetec na adsorção do corante Remazol Amarelo BTE.3R.

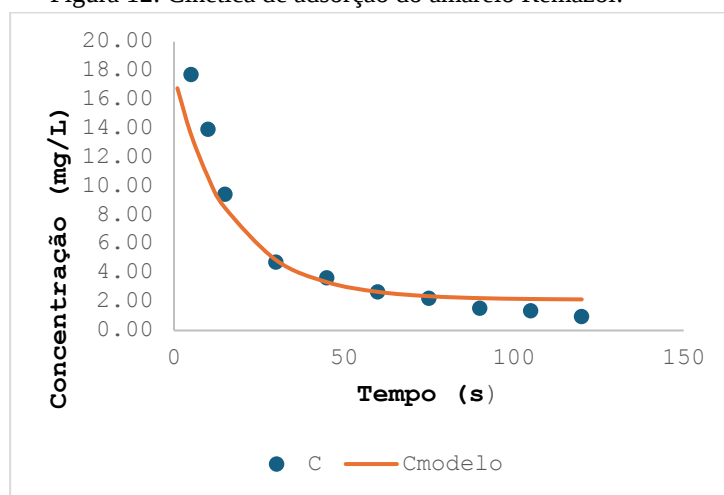
Buscando um modelo que explique a tendência dos dados, foi testado o modelo de Langmuir (equação 8 e 9), que descreve a operação com taxas de adsorção e dessorção, considerando a ordem global $n=1$, permitindo o ajuste dos dados experimentais e a obtenção dos parâmetros característicos do sistema.

$$C_A(t) = \frac{X' - \frac{C_{A0} - X'}{C_{A0} - X''} \exp\left[-\frac{(X' - X'')k_{ad}}{q_{As}} t\right] X''}{1 - \frac{C_{A0} - X'}{C_{A0} - X''} \exp\left[-\frac{(X' - X'')k_{ad}}{q_{As}} t\right]} \quad (8)$$

$$sendo X' e X'' = \frac{1}{2} \left[-\left(\frac{m_{ads} q_{As}}{V_{sol}} + \frac{1}{K_A} - C_{A0} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{m_{ads} q_{As}}{V_{sol}} + \frac{1}{K_A} - C_{A0} \right)^2 + \frac{4C_{A0}}{K_A}} \right] \quad (9)$$

A Figura 12 e a Tabela 6 mostram os resultados do ajuste do modelo cinético da Equação 9 aos dados experimentais.

Figura 12: Cinética de adsorção do amarelo Remazol.



Fonte: A Autora, 2025.

Tabela 6: Parâmetros cinéticos da adsorção

$k_{ads} (L \text{ mg}^{-1} \text{ s}^{-1})$	Erro Médio (%)	R^2
0,1389	21,2	0,93

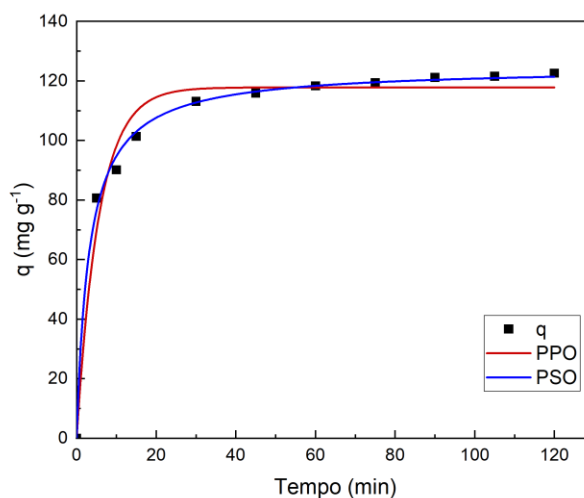
Fonte: A Autora, 2025.

Observando a Figura 13 e os dados apresentados na Tabela 6, nota-se que, visualmente, o gráfico do modelo de ordem 1 aparenta se aproximar dos dados experimentais, acompanhando a tendência de queda da concentração ao longo do tempo. No entanto, ao se analisar os parâmetros obtidos por meio desse ajuste, verifica-se um erro médio de 21,2%, chegando a um erro máximo de 55,3%, o que compromete a confiabilidade do modelo.

Esses resultados indicam que, apesar da boa representação gráfica inicial, o modelo de primeira ordem de Langmuir não descreve adequadamente o comportamento cinético observado experimentalmente. Diante dessa limitação, foram adotados modelos mais consolidados na literatura, como os de pseudo-primeira ordem (PPO) e pseudo-segunda ordem (PSO), os quais apresentam melhor desempenho na interpretação dos dados e maior capacidade de ajuste ao processo de adsorção estudado.

A variação da capacidade adsortiva (q) em função do tempo foi analisada por meio do ajuste dos dados experimentais aos modelos cinéticos mais utilizados na literatura: pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem (E Silva, 2025). Essa modelagem foi realizada com o auxílio do software OriginPro 8.5, com o objetivo de investigar o comportamento cinético do processo de adsorção e compreender a taxa de remoção do corante pela superfície do carvão ativado. Os resultados desses ajustes estão ilustrados na Figura 13.

Figura 13: Modelos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem para o Remazol Amarelo BTE.3R



Fonte: A Autora, 2025.

A partir do ajuste com o software também foi possível obter os parâmetros para os modelos (K e q) e o Coeficiente de Correlação (R^2) e X-quadrado (χ^2), estando estes apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Parâmetros Cinéticos

Modelo	K	Q	R ²	χ ²
Pseudo-primeira	0,178 ± 0,02	114,82 ± 2,25	0,9749	36,28
Ordem	min ⁻¹	mg g ⁻¹		
Pseudo-segunda	0,00255 ± 0,0002	124,56 ± 1,09	0,9966	4,92
ordem	g mg ⁻¹ min ⁻¹	mg g ⁻¹		

Fonte: A autora, 2025

A partir da análise dos modelos cinéticos aplicados, observou-se que o modelo de pseudo-segunda ordem apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais, com menor valor de X-quadrado (χ^2) e maior coeficiente de determinação (R^2), este último mais próximo de 1. Embora ambos os modelos avaliados tenham demonstrado bom desempenho estatístico, a superioridade do modelo de pseudo-segunda ordem ficou evidente.

Um dos principais indicativos dessa superioridade foi a pequena diferença entre o valor de q_e calculado e o valor experimental, de apenas 1,62%, enquanto no modelo de pseudo-primeira ordem essa variação foi de 6,76%. Além disso, o comportamento descrito pelo modelo de pseudo-segunda ordem condiz com o perfil observado nos dados experimentais: a constante de velocidade (K) apresentou uma redução acentuada ao longo do tempo, refletindo a influência de fatores como a concentração do corante e o tamanho das partículas do adsorvente sobre a cinética do processo.

Esses resultados reforçam que o modelo de pseudo-segunda ordem descreve melhor dos dados experimentais.

Segundo Prinz, (2022) realizou um estudo semelhante, onde obteve 90% de remoção de corante em 15 minutos, também descrita com melhor ajuste pelo modelo de pseudo-segunda ordem, com constante de velocidade $K = 0,094$. No presente trabalho, embora a constante de velocidade tenha sido inferior ($K = 0,00255$), ela se manteve dentro dos padrões esperados e em conformidade com a literatura, indicando que a metodologia utilizada é válida, e os resultados são coerentes com outros estudos sobre o tema.

5. CONCLUSÃO

O presente estudo sobre a adsorção do corante Remazol Amarelo BTE.3R utilizando carvões ativados comerciais permitiu avaliar, de forma comparativa, o desempenho de diferentes adsorventes disponíveis no mercado, contribuindo para o entendimento dos mecanismos envolvidos e para a identificação de materiais mais eficientes na remoção de corantes em soluções aquosa.

Os resultados obtidos mostraram que, dentre os carvões testados, o material da marca Vetec apresentou o melhor desempenho adsorativo, atingindo uma eficiência de remoção de 84,56% (0,04 g de adsorvente e concentração inicial de 50 mg/L). A modelagem dos dados de equilíbrio revelou que o modelo de Langmuir foi o que melhor descreveu o processo ($R^2 = 0,98$), indicando a formação de monocamada sobre uma superfície de sítios ativos homogêneos, característica típica de processos de adsorção mais organizados e eficientes.

No estudo cinético, os dados experimentais ajustaram-se com maior precisão ao modelo de pseudo-segunda ordem ($R^2 = 0,9966$; $\chi^2 = 4,92$), sugerindo que o processo de adsorção é controlado principalmente por interações químicas entre o adsorvato e a superfície do adsorvente. A baixa diferença entre o valor de q_e calculado e o valor A baixa diferença entre o valor de q_e calculado e o valor experimental reforça a adequação do modelo aos dados obtidos, os quais estão em concordância com diversos trabalhos já reportados na literatura, que também utilizaram o modelo de pseudo-segunda ordem para descrever sistemas similares de adsorção.

Além disso, a comparação com trabalhos semelhantes reportados na literatura, como o de Prinz (2022), evidencia a coerência dos resultados alcançados neste estudo, mesmo com constantes de velocidade distintas, o que válida a metodologia experimental adotada e reforça a eficiência do carvão ativado, um adsorvente amplamente utilizado, na remoção de corantes reativos em sistemas aquosos.

Dessa forma, conclui-se que a adsorção utilizando carvão ativado comercial é uma técnica eficaz, de fácil aplicação e com bons resultados de desempenho, sendo uma alternativa viável para a mitigação da contaminação por corantes em soluções líquidas, com potencial para aplicação em escalas maiores e em diferentes contextos industriais.

REFERÊNCIA

BARBOSA, A. A., Silva, M. G., da Silva Santana, I. L., de Aquino, R. V. S., Neves, N. S. D. C. S., dos Reis Ferreira, I. H., & da Rocha, O. R. S. (2021). **Adsorption of remazol golden yellow dye from aqueous solution by acerola core: kinetic and equilibrium studies.** *Ciência e Natura*, 43, e74-e74.

BONILLA-PETRICIOLET, Adrián; MENDOZA-CASTILLO, Didilia Ileana; REYNEL-ÁVILA, Hilda Elizabeth (Ed.). **Adsorption processes for water treatment and purification.** Berlin: Springer, 2017.

BRAZ, Ana Kátia de Sousa. **Imobilização de lacase em nanocompósitos magnéticos com potencial aplicação para remoção de corantes em efluente têxtil.** 2023.

BUENO, Luana Maria Moreira Godoy et al. **Carvão ativado a partir de resíduo têxtil: síntese, caracterização e aplicação na remoção de corante reativo e disperso em efluente têxtil.** 2023. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

CÉZAR, Kátiusca Lima et al. **Avaliação da Moringa oleífera Lam na remoção do corante remazol ultra amarelo RGBN.** 2020.

DA SILVA, LETÍCIA FABIANA MOISES. **Gerenciamento de resíduos na indústria têxtil,** 2022.

DE MATOS, Antônio Teixeira. **Poluição ambiental: impactos no meio físico.** Editora UFV, 2020.

DOS SANTOS, B. A. **Compósito de zeólita A magnética sintetizada a partir das cinzas volantes do carvão para adsorção de poluentes metálicos.** 2019. 100 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

GALVÃO, Chesque Cavassano. **Avaliação e validação de modelos de equilíbrio e cinético aplicados a adsorção multicomponentes dos corantes têxteis, azul remazol BTE. RN, amarelo remazol BTE. GL e vermelho remazol 3R por carvão ativado comercial 141-S.** 2020.

HAQUE, Abu Naser Md Ahsanul; HANNAN, M. A.; MASUD RANA, Md.

Compatibility analysis of reactive dyes by exhaustion-fixation and adsorption isotherm on knitted cotton fabric. Fashion and Textiles, v. 2, p. 1-12, 2015.

JÚNIOR, Wanison André Gil Pessoa; DE AZEVEDO, Flávia Regina Porto. **Corantes sintéticos e seus impactos ambientais: desafios, legislação e inovações tecnológicas sustentáveis.** Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação, v. 10, n. 12, p. 3972-3991, 2024.

Millani, E. A., Nascimento, H. C. D., Madaloz, M. Z., & Balestrin, S. F. (2024).

Obtenção de xilitol biotecnológico a partir do resíduo de milho.

NASAR, Abu; MASHKOOR, Fouzia. **Application of polyaniline-based adsorbents for dye removal from water and wastewater**—a review. Environmental Science and Pollution Research, v. 26, n. 6, p. 5333 5356, 2019.

NASAR, Abu; MASHKOOR, Fouzia. **Application of polyaniline-based adsorbents for dye removal from water and wastewater**—a review. Environmental Science and Pollution Research, v. 26, n. 6, p. 5333 5356, 2019.

PENHA, A. V. S.; MOURA, K. O.; PAZ, G. L. Tratamento de Águas Residuais: uma Revisão sobre a Adsorção do Corante Preto de Amido 10B. **Revista Virtual de Química**, v. 13, n. 2, p. 581-592, 2021.

PRINZ, Peterson Filisbino. **Caracterização e aplicação de carvão ativado produzido a partir de resíduos de indústrias madeireiras.** 2022. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

QUIRINO, Max Rocha et al. **CuO rapid synthesis with different morphologies by the microwave hydrothermal method.** Materials Research, v. 21, n. 6, p. e20180227, 2018.

ROCHA, Ana Kelly Simões. **Avaliação da qualidade de águas superficiais: uma abordagem local com proposta de mitigação por adsorção em fase sólida.** 2024.

SANTOS, Jaqueline Ferreira. **Estudo da cinética e equilíbrio de adsorção de corante reativo sobre carvão ativado magnético.** 2022. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

SANTOS, Sarah Emanuelle Moraes. **Avaliação da capacidade de adsorção da casca do ovo para remoção do corante têxtil Amarelo Remazol 3RS**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso.

SILVA, Dayane Caroline Tenório. **Síntese e caracterização de compósito à base de polianilina modificado com quitosana e octacetato de sacarose aplicado à adsorção do corante sintético preto de remazol**. 2022.

SILVA, João Vitor da Silveira. **Processo adsorptivo de azul de metileno em bagaço do sorgo sacarino: estudo cinético e de equilíbrio**. 2024.

SOARES, Dhessyca Maria Vitoria Gonçalves. **Carvão ativado obtido da casca de coco verde para remoção de corante am em meio aquoso: caracterização e cinética de adsorção**. Publicações, 2023.

SUDARSHAN, Shanmugam et al. **Impact of textile dyes on human health and bioremediation of textile industry effluent using microorganisms: current status and future prospects**. Journal of applied microbiology, v. 134, n. 2, p. 1xac064, 2023.