

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA

AMANDA CRISTINA FRANKS DE OLIVEIRA

**REMOÇÃO DE CORANTE VERMELHO CONGO DE SOLUÇÕES
AQUOSAS UTILIZANDO CINZAS DE QUEIMA DE BAGAÇO DE CANA**

Buri

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA

AMANDA CRISTINA FRANKS DE OLIVEIRA

**REMOÇÃO DE CORANTE VERMELHO CONGO DE SOLUÇÕES
AQUOSAS UTILIZANDO CINZAS DE QUEIMA DE BAGAÇO DE CANA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como exigência parcial
para a obtenção do grau de Bacharel
em Engenharia Ambiental na
Universidade Federal de São Carlos.

Orientação: Prof. Dr. Ubaldo Martins das
Neves

Coorientador: Prof^a. Dra. Anne
Alessandra Cardoso Neves

Buri
2025

Oliveira, Amanda Cristina Franks de

Remoção de corante vermelho congo de soluções
aquosas utilizando cinzas de queima de bagaço de cana /
Amanda Cristina Franks de Oliveira -- 2025.
44f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos,
campus Lagoa do Sino, Buri

Orientador (a): Ubaldo Martins das Neves

Banca Examinadora: Ubaldo Martins das Neves, Anne
Alessandra Cardoso Neves, Thiago de Oliveira Calsolari
Bibliografia

1. Adsorção. 2. Carvão ativado. 3. Corante vermelho
congo. I. Oliveira, Amanda Cristina Franks de. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática
(SIn)


DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Lissandra Pinhatelli de Britto - CRB/8 7539


UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

Folha de Aprovação


Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Trabalho de Conclusão de Curso da candidata **Amanda Cristina Franks de Oliveira**, realizada em 27/11/2025:

Documento assinado digitalmente
 **UBALDO MARTINS DAS NEVES**
Data: 08/12/2025 12:45:25-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Ubaldo Martins das Neves – Orientador
Centro de Ciências da Natureza – UFSCar – Campus Lagoa do Sino.

Documento assinado digitalmente
 **ANNE ALESSANDRA CARDOSO NEVES**
Data: 08/12/2025 12:39:21-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Anne Alessandra Cardoso Neves
Centro de Ciências da Natureza – UFSCar – Campus Lagoa do Sino

Documento assinado digitalmente
 **THIAGO DE OLIVEIRA CALSOLARI**
Data: 08/12/2025 15:18:50-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Ms. Thiago de Oliveira Calsolari
Centro de Ciências da Natureza – UFSCar – Campus Lagoa do Sino

DEDICATÓRIA

À minha mãe, pelo amor incondicional, pela força e pelo apoio em cada passo da
minha jornada;
Ao meu pai, pela paciência, pelos conselhos e por estar sempre pronto a me ajudar;
Ao meu irmão, pela companhia constante e por estar sempre ao meu lado nos
momentos mais desafiadores;
e ao meu namorado, pelo carinho, compreensão e presença firme que me
sustentaram durante todo este caminho.

AGRADECIMENTO

Expresso, antes de tudo, minha sincera gratidão ao meu professor orientador Dr. Ubaldo Martins das Neves, pela dedicação, paciência e pelas orientações valiosas que conduziram cada fase deste trabalho. Sua disponibilidade e comprometimento foram fundamentais para que esta pesquisa alcançasse qualidade e significado.

Agradeço também ao técnico do laboratório Ms. Thiago de Oliveira Calsolari, pelo apoio constante nas etapas experimentais, pela atenção aos detalhes e pela colaboração indispensável para a realização das análises, a minha coorientadora Dra. Anne Alessandra Cardoso Neves, deixo meus agradecimentos pelas observações sempre assertivas, pelo incentivo e pela confiança em meu trabalho, que contribuíram de maneira decisiva para o aperfeiçoamento deste estudo.

À minha família e aos meus amigos, manifesto meu mais profundo reconhecimento pelo amor, pela compreensão e pelo apoio incondicional em todos os momentos, especialmente nos períodos mais desafiadores. O carinho e a presença de cada um foram essenciais para que eu chegasse até aqui.

Não poderia deixar de expressar agradecimento mais que especial a minha amiga Jenifer Toledo Corrêa sou profundamente grata por cada momento compartilhado pelas longas madrugadas de estudo, pelas risadas que aliviam o cansaço e pelas emoções que vivemos juntas em cada vitória. Sua companhia leal, seu incentivo constante e sua amizade sincera foram fundamentais para que eu mantivesse a força e a esperança, mesmo quando os desafios pareciam intransponíveis, por caminhar ao meu lado e por ser um exemplo de apoio e cumplicidade em todos os momentos.

Por fim, agradeço a todos os professores que, direta ou indiretamente, fizeram parte da minha trajetória acadêmica, compartilhando conhecimentos, experiências e valores que se tornaram fundamentais para a conclusão desta etapa.

OLIVEIRA, Amanda Cristina Franks. **Remoção de corante vermelho congo de soluções aquosas utilizando cinzas de queima de bagaço de cana 2025.** Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de São Carlos, *campus* Lagoa do Sino, Buri, 2025

RESUMO

O descarte de efluentes industriais contendo corantes sintéticos representa um importante problema ambiental, em função da toxicidade, persistência e dos impactos negativos sobre os ecossistemas aquáticos. O corante Vermelho Congo, amplamente utilizado em diferentes setores industriais, destaca-se pela dificuldade de remoção por métodos convencionais, o que reforça a necessidade de alternativas eficientes e sustentáveis para o tratamento desses efluentes. Neste estudo, avaliou-se o potencial das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar, em sua forma bruta e tratada, como biossorvente para a remoção do corante Vermelho Congo em solução aquosa. As amostras de cinzas foram caracterizadas quanto algumas das suas propriedades físicas e aplicadas em testes de adsorção em batelada, variando-se parâmetros como o tempo de contato e a concentração inicial do corante. Os resultados demonstraram que o tratamento químico das cinzas brutas com hidróxido de sódio aumentou significativamente a capacidade de adsorção. As cinéticas de adsorção concordaram melhor ao modelo de pseudo-segunda ordem, sugerindo que o processo é controlado predominantemente por interações químicas entre o adsorvato e a superfície do biossorvente. Os dados de equilíbrio apresentaram bom ajuste ao modelo de Langmuir, indicando adsorção em monocamada. A eficiência de remoção do Vermelho Congo atingiu valores próximos a 80% para baixas concentrações, em torno de 5 mg/L. Isso comprova o potencial das cinzas do bagaço de cana como material alternativo e economicamente viável para o tratamento de efluentes contaminados com esse corante.

Palavras-chave: biossorção, carvão ativado, corantes azo-aromáticos, Vermelho Congo.

ABSTRACT

The discharge of industrial effluents containing synthetic dyes represents an important environmental problem due to their toxicity, persistence, and negative impacts on aquatic ecosystems. Congo Red dye, widely used in different industrial sectors, stands out for its resistance to removal by conventional treatment methods, reinforcing the need for efficient and sustainable alternatives for wastewater treatment. In this study, the potential of sugarcane bagasse ash, in its raw and chemically treated forms, as a biosorbent for the removal of Congo Red dye from aqueous solutions. The ash samples were characterized for their physical and chemical properties and applied in batch adsorption experiments, varying parameters such as contact time and initial dye concentration. The results showed that chemical treatment with NaOH significantly increased the adsorption capacity due to the greater exposure of active functional groups and the increase in specific surface area. The adsorption kinetics were best fitted by the pseudo-second-order model, suggesting that the process is mainly controlled by chemical interactions between the adsorbate and the biosorbent surface. The equilibrium data were better described by the Langmuir model, indicating monolayer adsorption. The maximum dye removal efficiency reached values above 80% under optimized conditions, demonstrating the potential of sugarcane bagasse ash as an alternative and economically viable material for textile effluent treatment.

Keywords: biosorption, activated carbon, azo-aromatic dyes, Congo.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 10 |
| 2. OBJETIVOS..... | 11 |
| 2.1. OBJETIVO GERAL..... | 11 |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 12 |
| 3. REVISÃO DA LITERATURA..... | 12 |
| 3.1 INTRODUÇÃO À BIOSSORÇÃO..... | 12 |
| 3.2 MECANISMOS DE ADSORÇÃO..... | 13 |
| 3.3 MODELOS DE ISOTERMAS DE ADSORÇÃO..... | 13 |
| 3.4 MODELOS DE DINÂMICA DE ADSORÇÃO..... | 15 |
| 3.4.1 Modelo de 1 Ordem (Lagergren)..... | 15 |
| 3.4.2 Modelo de pseudo 2º Ordem..... | 16 |
| 3.5 O CORANTE VERMELHO DO CONGO..... | 16 |
| 3.6 PROPRIEDADES DAS CINZAS DO BAGAÇO DE CANA..... | 17 |
| 3.7 APLICAÇÕES DAS CINZAS DO BAGAÇO DE CANA..... | 19 |
| 3.8 CINZAS DE QUEIMA DE BAGAÇO DE CANA COMO ADSORVENTE..... | 20 |
| 4. MATERIAIS E MÉTODOS..... | 21 |
| 4.1 SOBRE AS AMOSTRAS DE ADSORVENTES UTILIZADAS NESSE TRABALHO.. | 21 |
| 4.2 ESPECTRO DE ABSORÇÃO DE LUZ DO VERMELHO CONGO EM SOLUÇÃO E | |
| OBTENÇÃO DA EQUAÇÃO QUE RELACIONA CONCENTRAÇÃO E ABSORÇÃO | |
| DE LUZ..... | 22 |
| 4.3 EXPERIMENTOS DE ISOTERMAS DE ADSORÇÃO..... | 22 |
| 4.4 MODELO DE LANGMUIR PARA AS ISOTERMAS DE ADSORÇÃO..... | 22 |
| 4.5 PORCENTAGEM DE REMOÇÃO DO CORANTE VERMELHO DO CONGO..... | 24 |
| 4.6 CINÉTICA DE ADSORÇÃO..... | 25 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 25 |
| 5.1 ESPECTRO DE ABSORÇÃO DE LUZ DO VERMELHO CONGO..... | 25 |
| 5.2 EQUAÇÃO PARA A CONCENTRAÇÃO DE VERMELHO DE CONGO EM | |
| FUNÇÃO DA ABSORÇÃO DE LUZ..... | 26 |
| 5.4 PORCENTAGEM DE VERMELHO DE CONGO REMOVIDA EM FUNÇÃO DA | |
| CONCENTRAÇÃO INICIAL DA SOLUÇÃO..... | 31 |
| 5.5 CINÉTICA DE ADSORÇÃO..... | 33 |
| 5.5.1 Quantidade de material adsorvido, por massa de adsorvente, em | |
| função do tempo..... | 33 |
| 5.5.2 Ajustes dos modelos de cinética de pseudo-primeira e | |
| pseudo-segunda ordem..... | 35 |
| 6. CONCLUSÕES..... | 39 |
| 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 40 |

1. INTRODUÇÃO

O uso de corantes em diversos setores industriais tem aumentado consideravelmente nas últimas décadas. Esses corantes, por vezes, podem representar um problema ambiental quando são liberados em efluentes líquidos, uma vez que podem ser tóxicos e persistentes no ambiente aquático. Assim, a remoção eficiente desses corantes tornou-se uma questão de grande importância (XAVIER, 2021).

O impacto ambiental dos corantes representa um problema significativo. Essas substâncias, juntamente com metais pesados e agrotóxicos, podem causar danos ao meio ambiente, aos seres humanos e a outros animais (NARIMATSU et al., 2022). Uma classe específica de corantes, conhecida como corantes azo-aromáticos, é amplamente utilizada na indústria têxtil devido às suas propriedades excepcionais para colorir tecidos em diversas tonalidades (NARIMATSU et al., 2022). No entanto, sua estabilidade química quanto à exposição à luz e ao meio ambiente pode resultar em efeitos prejudiciais à fauna e à flora dos ecossistemas se atingirem os mesmos.

Os corantes azo-aromáticos sozinhos representam uma parcela substancial, aproximadamente de 60 a 70%, do total de corantes produzidos anualmente em todo o mundo. Consequentemente, encontrar métodos eficazes para removê-los de corpos hídricos, como águas residuárias industriais ou ambientes naturais, é de grande importância (SOBRINHO; DA, 2019). O Vermelho Congo é um exemplo de corante azo sintético. Tem aplicações na indústria de borracha, plástico, têxtil e papel (Mandal et al., 2021) e tem efeito tóxico para animais aquáticos, terrestres e para o ser humano (YAKUPOVA, 2019).

As cinzas provenientes da queima do bagaço de cana-de-açúcar surgem como uma solução viável, apresentam características que as tornam promissoras como materiais adsorventes pois são ricas em componentes químicos que podem facilitar a adsorção de poluentes (ALMEIDA et al., 2021). As cinzas geradas pelo processo de queima possuem uma composição química complexa, que pode incluir metais pesados e nutrientes, afetando a qualidade do solo e por isso é tão preocupante a forma como são dispostas. (MARTINS et al., 2019). Além disso, a disposição inadequada das cinzas pode resultar em contaminação de recursos hídricos (SILVA et al., 2020).

A conversão de um resíduo agroindustrial em um material com potencial para tratamento de efluentes não apenas promove a sustentabilidade, mas também contribui para a redução da quantidade de resíduos sólidos gerados. A utilização das cinzas como adsorventes não apenas ajuda a mitigar os problemas ambientais, mas também oferece uma solução sustentável para a gestão de resíduos (PEREIRA et al., 2019).

As cinzas geradas pela queima do bagaço de cana-de-açúcar representam um desafio ambiental significativo. Com o aumento da produção de etanol e açúcar, a quantidade de resíduos gerados também cresce, levando a preocupações sobre a disposição inadequada dessas cinzas. Apesar dos problemas ambientais, essas cinzas de cana apresentam um grande potencial como material adsorvente. Estudos demonstram que as cinzas possuem propriedades físicas e químicas que as tornam eficazes na remoção de poluentes, como corantes e metais pesados, de efluentes líquidos (MARTINS et al., 2021). A alta área de superfície e a presença de grupos funcionais na superfície das cinzas favorecem a adsorção, tornando-as uma alternativa viável e sustentável para o tratamento de águas residuais.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste estudo é avaliar a eficácia das cinzas de queima de bagaço de cana como um material base de adsorvente para a remoção do corante vermelho congo de soluções aquosas. A pesquisa busca contribuir para o desenvolvimento de métodos sustentáveis e de baixo custo para o tratamento de efluentes industriais, promovendo a reutilização de resíduos agroindustriais.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar o desempenho das cinzas brutas obtidas da queima de bagaço de cana e das mesmas cinzas tratadas com hidróxido de sódio como material para adsorver o corante vermelho congo de soluções aquosas.

- Discutir os resultados obtidos em relação à eficiência do processo de adsorção, sustentabilidade e viabilidade econômica do uso de cinzas de bagaço de cana como uma alternativa para o tratamento de efluentes contendo esse corante.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Introdução à Biossorção

A biossorção é um processo que utiliza materiais de origem biológica para remover poluentes de soluções aquosas. Esse método tem se destacado como uma alternativa sustentável, de baixo custo e ambientalmente correta para o tratamento de efluentes, principalmente na remoção de corantes, metais pesados e outros compostos orgânicos e inorgânicos (VASCONCELOS; LIMA; SILVA, 2021).

Diversos materiais vêm sendo estudados como bioadsorventes devido à sua ampla disponibilidade, baixo custo e elevada capacidade de adsorção. Entre eles, destacam-se resíduos agroindustriais como bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz, casca de coco, casca de banana, casca de laranja, sabugo de milho, sementes de tamarindo, fibra de sisal, farelo de trigo e resíduos de café (SANTOS et al., 2020; SILVA et al., 2022).

Além desses, biomassas microbianas como fungos, bactérias e algas também têm sido amplamente estudadas, uma vez que suas paredes celulares apresentam grupos funcionais (como carboxilas, hidroxilas e aminas) capazes de interagir com diferentes poluentes (VASCONCELOS; LIMA; SILVA, 2021). Outros materiais naturais, como turfa, serragem, algas marinhas secas, quitina, quitosana, casca de camarão e musgos, também apresentam elevado potencial de adsorção (OLIVEIRA; ROCHA; COSTA, 2021).

A escolha do bioadsorvente depende das características do poluente, das condições do meio (pH, temperatura e concentração) e da composição química do material utilizado. Assim, a biossorção se mostra um processo versátil para a descontaminação de águas residuais, contribuindo tanto para a valorização de resíduos orgânicos quanto para a redução do impacto ambiental associado ao descarte inadequado de efluentes industriais (GONÇALVES; MENDES, 2022)

Como a casca da cana de açúcar, tem se mostrado promissor nesse contexto apresentando alta capacidade de adsorção devido à sua estrutura porosa e grupos funcionais (SILVA et al., 2020)

3.2 Mecanismos de Adsorção

Os mecanismos de adsorção do corante vermelho congo nas cinzas incluem interações físicas, como forças de Van der Waals, e interações químicas, como ligações de hidrogênio e interações eletrostáticas. A eficiência do processo de adsorção pode ser influenciada por fatores como pH, temperatura e concentração do corante (COSTA et al., 2021). A caracterização das cinzas, incluindo a análise de sua composição química e estrutura porosa, é fundamental para compreensão desses mecanismos é crucial para otimizar as condições de operação e maximizar a remoção do corante.

3.3 Modelos de Isotermas de Adsorção

Para descrever o comportamento de adsorção do corante vermelho congo no cinzas, os modelos de isotermas, como Langmuir e Freundlich, são frequentemente utilizados. O modelo de Langmuir, em particular, assume uma adsorção em uma superfície homogênea e tem sido aplicado com sucesso em diversos estudos (MARTINS et al., 2022). As seguintes equações descrevem o modelo das isotermas de Langmuir:

Modelo de Langmuir

$$q_e = \frac{K_L C_e}{(1 + K_L C_e)} q_{max} \quad (1)$$

Forma linear (mais usada para obter parâmetros)

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{max}} C_e + \frac{1}{q_{max} K_L} \quad (2)$$

Parâmetros e significados

- q_e : quantidade de adsorbato adsorvida no equilíbrio por grama de adsorvente ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$).
- C_e : concentração do soluto no equilíbrio ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$).
- $q_{\text{máx}}$: capacidade máxima de adsorção monomolecular ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$).
- K_L : constante de afinidade de Langmuir ($\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$).

Fator de separação (RL) — indica favorabilidade:

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0} \quad (3)$$

- C_0 : concentração inicial ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

Tabela 1: Classificação do processo de adsorção segundo o fator de separação (RL)

| Valor de R_L | Tipos de adsorção |
|----------------|-----------------------|
| $R_L > 1$ | Adsorção desfavorável |
| $R_L < 1$ | Adsorção linear |
| $0 < R_L < 1$ | Adsorção favorável |
| $R_L = 0$ | Adsorção irreversível |

Fonte: Adaptado de FOO e HAMEED (2010).

3.4 Modelos de Dinâmica de Adsorção

Os modelos cinéticos de adsorção são utilizados para descrever a taxa temporal de remoção de solutos de uma solução aquosa e fornecer informações sobre o mecanismo que rege o processo, seja ele físico ou químico. A análise cinética permite compreender o tempo necessário para atingir o equilíbrio e o tipo de interação entre o adsorvente e o adsorbato (AL-GHOUTI; DA'ANA, 2020).

Entre os modelos mais utilizados destacam-se o modelo de primeira ordem, proposto por Lagergren, e o modelo de pseudo-segunda ordem, desenvolvido por Ho e McKay. Esses modelos permitem ajustar os dados experimentais e estimar os parâmetros cinéticos, como as constantes de velocidade e a capacidade de adsorção em equilíbrio.

3.4.1 Modelo de pseudo 1º (Lagergren)

O modelo de pseudo-primeira ordem assume que a taxa de ocupação dos sítios de adsorção é proporcional ao número de sítios ainda disponíveis. É descrito pela seguinte equação diferencial:

$$\frac{dq(t)}{dt} = k_1[q_e - q(t)] \quad (4)$$

Sua solução tem a seguinte forma linearizada:

$$\ln[q_e - q(t)] = \ln q_e - k_1 t \quad (5)$$

em que:

- qt é a quantidade adsorvida no tempo t ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$);
- q_e é a quantidade adsorvida do adsorbato por grama do adsorvente no equilíbrio ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$);
- k_1 é a constante de velocidade da pseudo-primeira ordem (min^{-1}).

A constante k_1 e o valor de q_e podem ser determinados a partir da inclinação e do intercepto da reta obtida pelo gráfico de $\ln[q_e - q(t)]$ em função de t .

3.4.2 Modelo de pseudo 2º Ordem

O modelo de segunda ordem considera que o processo de adsorção ocorre predominantemente por interações químicas. A quimissorção ocorre quando a adsorção envolve ligações químicas entre adsorvente e adsorbato, com troca ou compartilhamento de elétrons, resultando em interações fortes. Em contraste, a

fisissorção é caracterizada por interações físicas fracas, como as forças de Van der Waals, sendo geralmente reversível. (HO; MCKAY, 1999; FOO; HAMEED, 2010).. A equação do modelo é a seguinte:

$$\frac{dq(t)}{dt} = k_2[q_e - q(t)]^2 \quad (6)$$

cuja solução pode ser escrita como:

$$\frac{t}{q(t)} = \frac{1}{q_e}t + \frac{1}{k_2q_e^2} \quad (7)$$

onde k_2 é a constante de velocidade da segunda ordem ($\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$). Quando o modelo se ajusta muito bem (R^2 próximo de 1) costuma indicar que a etapa limitante envolve interações químicas (quimissorção).

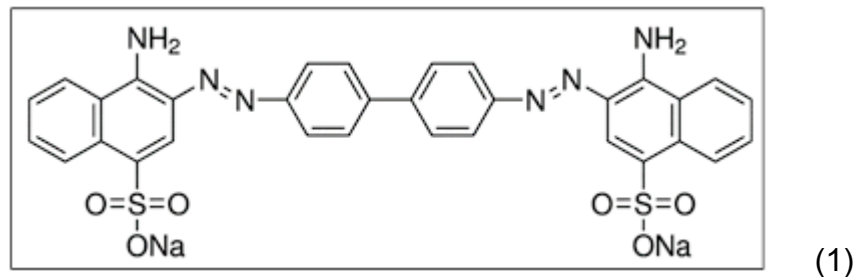
A partir do gráfico de $t/q(t)$ versus t pode-se obter q_e (a partir da inclinação) e k_2 (a partir do intercepto). A escolha do modelo que melhor representa os dados experimentais é feita comparando os coeficientes de determinação (R^2) e os valores experimentais e teóricos de q_e . Em geral, o modelo que apresenta o maior valor de R^2 e menor diferença entre q_e experimental e o calculado é considerado o mais adequado para descrever o sistema estudado.

Além disso, o ajuste ao modelo de pseudo-segunda ordem geralmente indica que o processo é controlado por interações químicas entre o adsorvato e o adsorvente, enquanto o ajuste ao modelo de pseudo-primeira ordem está mais relacionado à adsorção física e à difusão superficial (HO; MCKAY, 1999).

3.5 O corante Vermelho do Congo

A figura 1 abaixo mostra a estrutura química do corante Vermelho do Congo, que também pode ser representada pela seguinte fórmula estrutural: $\text{C}_{32}\text{H}_{22}\text{N}_6\text{Na}_2\text{O}_6\text{S}_2$ (Silva et al., 2021).

Figura 1: Estrutura química do corante Vermelho do Congo.



Sua estrutura é caracterizada pela presença de dois grupos azo ($-N = N-$) que se ligam a anéis aromáticos que contribui para sua solubilidade e estabilidade em meio aquoso. Esses grupos são responsáveis pela intensa coloração e pelas propriedades químicas do corante. A presença dos grupos funcionais como sulfonatos ($-\text{SO}_3\text{Na}$) que estão presentes, aumenta a solubilidade do corante em água, tornando-o adequado para diversas aplicações. O corante vermelho congo é um corante azóico amplamente utilizado em diversas indústrias. Sua estrutura química complexa e alta solubilidade em água dificultam sua remoção por métodos convencionais de tratamento de água (COSTA et al., 2020). Estudos mostram que a presença desse corante em efluentes pode causar toxicidade em organismos aquáticos e afetar a qualidade da água potável (MARTINS et al., 2022).

3.6 Propriedades das Cinzas do Bagaço de Cana

As cinzas do bagaço de cana apresentam uma composição química rica, que inclui sílica, alumina, óxido de cálcio, óxido de magnésio e outros elementos em menor quantidade. Geralmente, esses resíduos contêm uma alta porcentagem de sílica (SiO_2), que pode chegar a 60% (SILVA et al., 2020) e são encontradas na forma cristalina e amorfa. A parte amorfa da sílica contida nas cinzas conferem a esse material características de adsorção e reatividade química. Outro componente muito importante das cinzas, principalmente para aplicações de adsorção é o carbono contido nas mesmas, que pode chegar a valores próximos de 30%, dependendo das condições de queima. Esse carbono não queimado, possui estrutura porosa que o torna eficaz na adsorção de poluentes, como metais pesados e corantes, em efluentes líquidos. A área de superfície elevada e a presença de

grupos funcionais na superfície são os motivos dessa capacidade de adsorção. As cinzas do bagaço de cana, especialmente quando contêm carbono residual, apresentam elevado potencial de aplicação como adsorventes. Esse carbono não completamente queimado mantém uma estrutura porosa e grupos funcionais ativos, como hidroxilas e carboxilas, que favorecem a interação com moléculas poluentes. Estudos recentes demonstram que o carbono presente nas cinzas (“*sugarcane bagasse fly ash carbon*”) atua de maneira semelhante ao carvão ativado, adsorvendo eficientemente compostos orgânicos e íons metálicos de soluções aquosas (KAKOM et al., 2023; WANG et al., 2022).

A presença simultânea de sílica e carbono no material confere às cinzas uma dupla funcionalidade: a sílica contribui para a estabilidade estrutural e a formação de poros, enquanto o carbono aumenta a capacidade de adsorção e o caráter hidrofílico da superfície (BARBOSA et al., 2023). Essa combinação tem sido apontada como responsável pelo bom desempenho das cinzas na remoção de corantes e pesticidas, bem como de metais pesados como chumbo e cromo (IRON-MODIFIED, 2023).

De acordo com estudos recentes, o processo de modificação térmica e química do material pode aumentar ainda mais sua eficiência, formando compósitos híbridos, como o biochar-hidroxiapatita derivado do bagaço de cana, que mostrou desempenho significativo na remoção de corantes de soluções aquosas (WANG et al., 2022). Assim, o uso do carbono residual presente nas cinzas de bagaço de cana representa uma alternativa sustentável e promissora na área de tratamento de efluentes, contribuindo para a valorização de resíduos agroindustriais e redução de impactos ambientais (FRONTIERS, 2022).

3.7 Aplicações das Cinzas do Bagaço de Cana

As cinzas do bagaço de cana-de-açúcar (SCBA – *sugarcane bagasse ash*) apresentam diversas possibilidades de aplicação que contribuem para a sustentabilidade e valorização de resíduos agroindustriais.

Dentre as aplicações, podemos citar o uso como fertilizante ou corretivo de solo. Devido à presença de nutrientes como cálcio, magnésio, potássio, fósforo e micronutrientes, as cinzas podem atuar como fonte de nutrientes e melhorar a estrutura do solo. Pesquisas demonstram que a aplicação de SCBA pode aumentar

a disponibilidade de fósforo para culturas agrícolas, especialmente quando o material é previamente tratado ou combinado com outros resíduos alcalinos, o que eleva a solubilidade dos nutrientes (DOMBINOV et al., 2022). Resultados semelhantes foram observados por Raniro et al. (2022), que destacam o potencial de fertilizantes obtidos de resíduos como alternativa viável aos fosfatos minerais convencionais.

Outro uso relevante das cinzas é na remoção de poluentes de efluentes líquidos, incluindo metais pesados e corantes industriais. A presença de sílica, alumina e carbono residual fornece à SCBA-*Sugarcane Bagasse Ash* uma estrutura altamente porosa e funcionalizada, capaz de atuar como adsorvente em processos físico-químicos. Estudos recentes evidenciam que as cinzas, especialmente quando modificadas com óxidos metálicos ou tratadas termicamente, podem apresentar elevadas taxas de remoção de contaminantes, ajustando-se bem aos modelos de Langmuir e Freundlich (PRAIPIPAT et al., 2023; SHARMA, 2024). Além disso, a aplicação de SCBA na adsorção de compostos orgânicos em efluentes industriais, como a vinhaça, tem mostrado remoções de até 70% da carga orgânica, com comportamento cinético compatível com o modelo de pseudo-segunda ordem (HO; MCKAY, 1999).

A SCBA (*Sugarcane Bagasse Ash*) também tem sido amplamente utilizada como aditivo mineral em materiais de construção, em especial na produção de cimentos e concretos. Sua incorporação, como substituto parcial do cimento, proporciona melhora na resistência mecânica e redução da pegada de carbono dos compósitos (MEMON et al., 2022). Estudos mais recentes indicam que a substituição de até 15% do cimento por cinza de bagaço de cana processada mantém a durabilidade e aumenta a densidade do concreto (BHARDWAJ; KASILINGAM, 2025). Essa aplicação reforça o potencial da SCBA como material pozolânico, contribuindo para a economia circular e para práticas construtivas ambientalmente responsáveis.

Em síntese, as aplicações das cinzas do bagaço de cana são amplas e variam conforme suas propriedades químicas e o tratamento empregado. Seja na agricultura, no tratamento de efluentes ou na construção civil, o reaproveitamento desse resíduo representa uma estratégia promissora para o desenvolvimento sustentável (KUMARA et al., 2023; SUTTHASUPA et al., 2023).

3.8 Cinzas de Queima de Bagaço de Cana como Adsorvente

As cinzas de bagaço de cana, resultantes da queima desse resíduo agroindustrial, têm se mostrado materiais promissores para aplicação como adsorventes devido à sua composição rica em sílica e outros minerais. A utilização dessas cinzas contribui não apenas para a redução de resíduos e para o reaproveitamento de subprodutos da agroindústria, mas também representa uma alternativa econômica e ambientalmente sustentável para o tratamento de efluentes (SOUZA et al., 2021). Estudos indicam que essas cinzas apresentam área superficial considerável e estrutura porosa, características que favorecem a remoção de contaminantes (OLIVEIRA et al., 2023).

Diversas pesquisas relatam o potencial das cinzas de bagaço de cana na remoção de diferentes poluentes orgânicos e inorgânicos, incluindo corantes, metais pesados e compostos fenólicos presentes em águas residuais. Por exemplo, a modificação de cinzas de bagaço de cana combinadas com bentonita apresentou elevada capacidade de remoção de corante Vermelho Congo (≈ 96 mg/g) e de azul de metileno (≈ 420 mg/g) em solução aquosa (EL-AZIZ et al., 2025). De modo semelhante, o uso de biochar de bagaço de cana impregnado com quitosana mostrou desempenho expressivo na remoção do corante Vermelho Congo, alcançando capacidade máxima próxima de 170 mg/g (AKL & SERAGE, 2024).

A principal vantagem da utilização das cinzas está em sua disponibilidade abundante nas regiões produtoras de cana-de-açúcar, o que reduz custos em comparação a materiais adsorventes comerciais, como o carvão ativado, e favorece práticas de economia circular (SANTOS et al., 2022). Além disso, a alta concentração de sílica amorfa presente nessas cinzas reforça seu potencial de aproveitamento industrial, permitindo sua aplicação tanto como material adsorvente quanto como matéria-prima para síntese de sílica mesoporosa ou zeólitas (KEAWKUMAY et al., 2024; HABTE et al., 2025).

Dessa forma, o uso das cinzas de bagaço de cana configura-se como uma solução viável, sustentável e de baixo custo para o tratamento de efluentes coloridos e outros tipos de contaminantes, promovendo o reaproveitamento de resíduos agroindustriais e contribuindo para a sustentabilidade ambiental no setor produtivo.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Aqui são descritos os métodos para a avaliação das propriedades de adsorção de vermelho congo pelas amostras de cinzas utilizadas neste estudo. A saber, cinzas brutas e as cinzas tratadas com NaOH.

4.1 Sobre as amostras de adsorventes utilizadas nesse trabalho

As amostras de adsorventes utilizadas nesse trabalho foram produzidas pelo professor orientador da pesquisa. Uma das amostras consta simplesmente das cinzas de material produzido pela queima de bagaço de cana apenas moída em moinho de bolas, denominada aqui de cinzas brutas. A segunda amostra foi obtida da primeira através de reação química com hidróxido de sódio. Os procedimentos e métodos usados para obtenção desses dados poderão ser encontrados no trabalho de conclusão de curso da estudante Jenifer Toledo Corrêa. A tabela abaixo mostra as propriedades de interesse quanto à adsorção avaliadas nesses dois tipos de adsorventes.

Tabela 2: Propriedades físicas das amostras de cinzas de bagaço de cana utilizadas como adsorventes.

| | cinzas brutas | cinzas tratadas |
|---|---------------|-----------------|
| teor de cinzas (% em peso) | 73 | 39 |
| área superficial (m ² /g) | 275 | 387 |
| volume dos microporos (cm ³ /g) | 0,06 | 0,10 |
| volume total (cm ³ /g) | 0,19 | 0,26 |

Fonte: TCC Jenifer Toledo Corrêa, 2025.

Pode-se observar que o tratamento alcalino aumentou a área superficial e volume dos poros das cinzas brutas.

4.2 Espectro de absorção de luz do Vermelho Congo em solução e obtenção da equação que relaciona concentração e absorção de luz

O espectro de absorção da solução de Vermelho Congo foi medido utilizando a varredura da absorção do corante na área de comprimentos de onda do visível, isto é, entre 380 e 700 nm. O equipamento utilizado foi um espectrofotômetro UV-VIS (190- 1100nm) Nova Instruments, modelo NI 1600UV. Deste espectro será escolhido um determinado comprimento de onda para construir a reta de calibração da concentração em função da absorção de luz, segundo a lei de Beer (ATKINS; DE PAULA, 2014). Obtido esse comprimento de onda, amostras de concentrações conhecidas são produzidas e sua absorção no referido comprimento de onda é medido.

4.3 Experimentos de isotermas de adsorção

Os ensaios de isotermas de adsorção foram realizados colocando soluções de diferentes concentrações de Vermelho Congo, 5, 10, 15, 20, 25 e 30 mg/L em contato com 0,04 g de material adsorvente. As amostras foram colocadas para agitar a 130 rpm, durante 24 horas, em mesa agitadora orbital na temperatura de 30°C. As concentrações remanescentes de Vermelho Congo, no equilíbrio, foram avaliadas medindo a absorção de luz das soluções em comprimento de onda específico. Os resultados dos experimentos de adsorção foram interpretados segundo modelo de Langmuir (FOO; HAMEED, 2010). Todos os ensaios foram realizados em pH neutro.

4.4 Modelo de Langmuir para as isotermas de adsorção

O modelo de Langmuir, representado na Eq. 1, é um dos mais utilizados para interpretar a adsorção de solutos em superfícies sólidas, sendo especialmente relevante no estudo da remoção de corantes, como o vermelho congo. Este modelo assume que a adsorção ocorre em uma superfície homogênea, onde cada sítio de adsorção pode ser ocupado por apenas uma molécula do soluto e que não há interação entre as moléculas adsorvidas. A equação não linear do modelo é dada por:

$$q_e = \frac{K_L C_e}{(1 + K_L C_e)} q_{max} \quad (1)$$

onde q_e é a quantidade de adsorbato adsorvido por massa de adsorvente, mg/g, C_e é a concentração de equilíbrio, mg/L e $q_{m\acute{a}x}$ é a quantidade máxima de adsorbato adsorvido por massa de adsorvente, mg/g. K_L é a constante de Langmuir, que está relacionada à afinidade do adsorbato pelo adsorvente (L/mg ou L/mol)

A forma linear do modelo, Eq. 2, mais conveniente para ajustes aos dados experimentais, é dada por:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{max}} C_e + \frac{1}{q_{max} K_L} \quad (2)$$

O parâmetro K_L representa a constante de equilíbrio da adsorção, estando diretamente relacionada à afinidade entre o adsorbato (corante) e a superfície do adsorvente. Valores elevados de K_L indicam maior energia de ligação e forte interação entre o corante e os sítios ativos do material, enquanto valores baixos sugerem interações mais fracas e menor afinidade (FOO; HAMEED, 2010).

Existe também o parâmetro R_L é relacionado a afinidade entre adsorbato e adsorvente e pode ser calculado pela seguinte equação:

$$R_L = \frac{1}{1 + q_{max} K_L} \quad (8)$$

Valores de R_L entre 0 e 1 indicam que a interação entre adsorvente e adsorbato é favorável. Quando R_L vale 1, a interação é linear. Quando $R_L > 1$ a interação não é favorável. $R_L = 0$ indica irreversibilidade.

Assim, de acordo com a Eq. 10, o gráfico da melhor reta que passa pelos pontos C_e/q_e em função de C_e , permite obter os parâmetros $q_{m\acute{a}x}$, K_L e R_L (Al-Ghouti, M. A., & Da'ana, D. A. (2020).

Nos experimentos, a quantidade q_e , é calculada através da seguinte equação:

$$q_e = \left[\frac{C_0 - C_e}{W} \right] V(l) \quad (9)$$

Onde W é a massa em gramas de adsorvente utilizado no frasco de agitação na solução cujo volume total é V(L)- volume em litros. No nosso caso os volumes de todas as soluções colocadas para agitar foram de 50 mL, ou 0,05L. Co é a concentração inicial dos corantes colocados para agitar com o adsorvente e Ce é a concentração dos mesmos no equilíbrio, ou seja, após 24 horas de agitação a 130 rpm por 24 horas.

4.5 Porcentagem de Remoção do Corante Vermelho do Congo

A porcentagem de remoção do corante vermelho do Congo é um parâmetro utilizado para avaliar a eficiência do processo de adsorção. Esse valor indica o quanto do corante foi efetivamente removido da solução após o contato com o material adsorvente, refletindo a capacidade do adsorvente em reter moléculas do corante.

A remoção foi calculada com base nas concentrações inicial (C_0) e final (C_e) do corante após o equilíbrio sob agitação a 30°C por 24 horas foram determinadas por espectrofotometria utilizando o equipamento Espectrofotômetro UV-VIS (190-1100nm) Nova Instruments, modelo NI 1600UV; . A equação que mostra essa remoção é a seguinte:

$$\%removido = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (10)$$

4.6 Cinética de adsorção

Para os experimentos sobre a cinética, doze amostras de 50 mL de solução de vermelho congo, 10 mg/L, foram preparadas em erlenmeyer e colocados para atingir equilíbrio térmico, a 30 °C dentro de sistema de agitação orbital. Depois de 30 min, na metade dos frascos foram adicionados 0,05 g de cinzas brutas e na outra metade 0,05 g de cinzas tratadas. As amostras foram colocadas então mantidas em agitação a 130 rpm a 30°C. Nos instantes 0, 5, 10, 20, 40, 60, 80 e 100 min, uma amostra com adsorvente bruto e outra com

adsorvente tratado foi retirada, submetida à centrifugação e sua absorção de luz, no comprimento 496 nm foi medida.

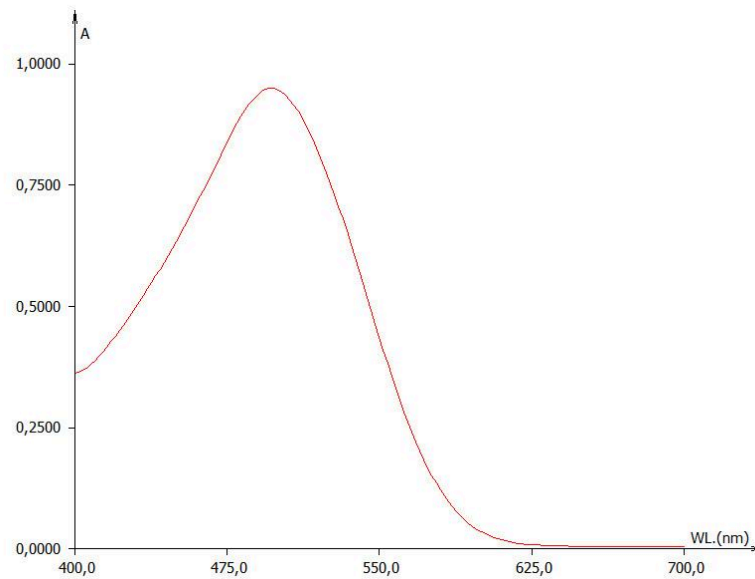
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados e interpretados os resultados obtidos nas análises realizadas com as cinzas de bagaço de cana, tanto em sua forma bruta quanto após o tratamento com hidróxido de sódio. São discutidas a eficiência na adsorção do corante Vermelho Congo pelos materiais adsorventes usados e os parâmetros determinados a partir dos modelos de isotermas de adsorção, com ênfase no modelo de Langmuir e a dinâmica utilizando os modelos dinâmicos de primeira ordem e o modelo pseudo-segunda ordem.

A partir dos dados experimentais, buscou-se compreender como o tratamento químico influenciou as características superficiais das cinzas e, conseqüentemente, sua capacidade de remoção do corante em solução aquosa. Além disso, os resultados foram analisados comparativamente entre as amostras e confrontados com estudos reportados na literatura, permitindo avaliar o desempenho e o potencial das cinzas de bagaço de cana como adsorventes alternativos, de baixo custo e ambientalmente sustentáveis para o tratamento de efluentes coloridos.

5.1 Espectro de absorção de luz do Vermelho Congo

O gráfico abaixo apresenta o espectro de absorção de luz do corante vermelho Congo, evidenciando seu comportamento em diferentes comprimentos de onda. A partir da análise deste espectro, pode-se observar que o pico máximo de absorção ocorre para comprimento de onda de aproximadamente 496 nm. Dessa forma, esse comprimento de onda, correspondente ao máximo de absorção, foi selecionado para a realização das medidas de absorção em todos os experimentos subsequentes.

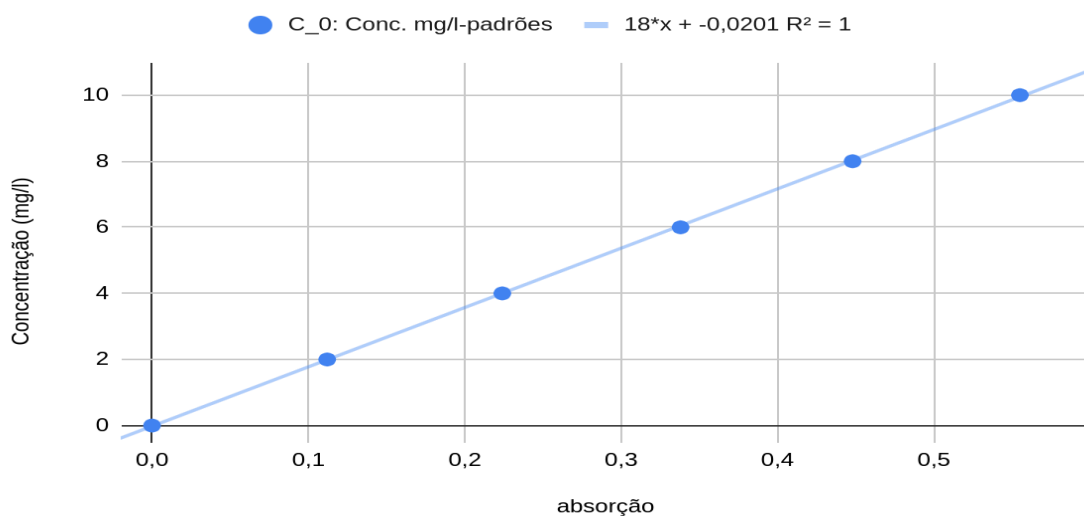
Gráfico 1: Espectro de absorção de luz vermelho Congo

Fonte: Autoria própria, 2024

5.2 Equação para a concentração de Vermelho de Congo em função da absorção de luz

O gráfico abaixo apresenta a relação entre a concentração de soluções padrões de vermelho do Congo em função da absorção de luz de comprimento de onda 496 nm.

Gráfico 2 : Concentração de vermelho do Congo (mg/L) em função da absorção de luz.



Fonte: Autoria própria, 2024.

A seguinte equação experimental, foi obtida através do ajuste de uma reta aos pontos experimentais. Essa equação nos permite estimar a concentração das soluções do corante a partir da medida da absorção de luz das mesmas no comprimento de onda selecionado, 496 nm.

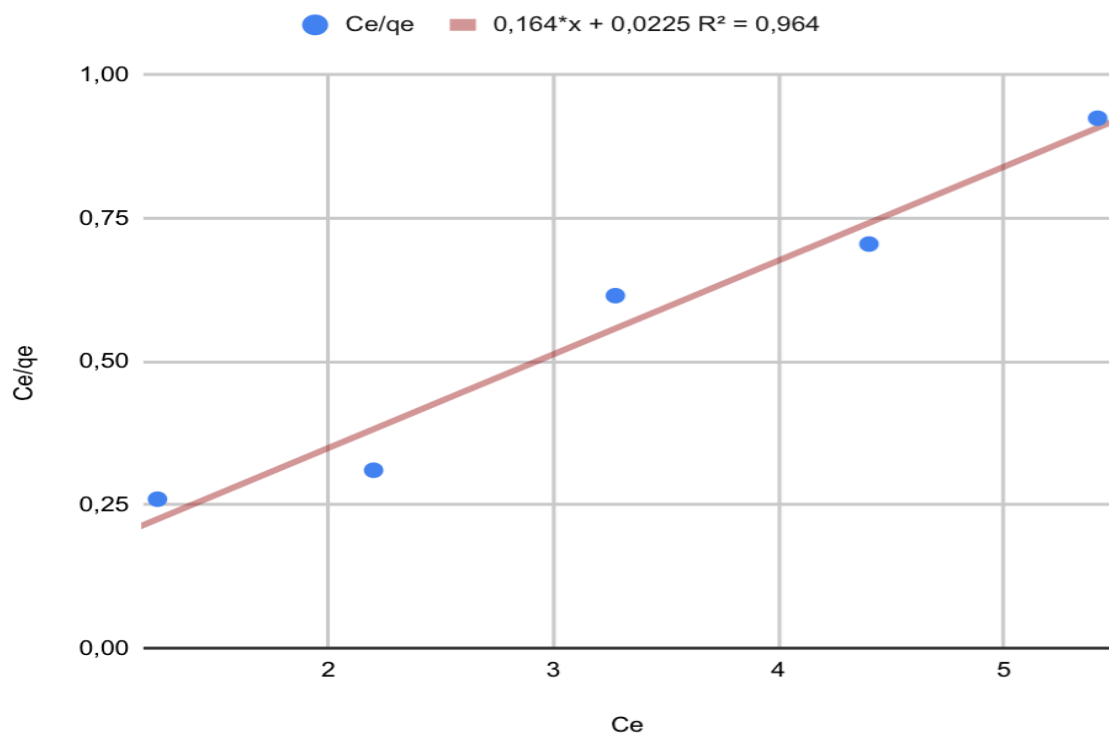
$$C(\text{mg/l}) = 18(\text{Abs}) - 0,0201 \quad (11)$$

5.3 Isotermas de Langmuir

A seguir são mostrados os gráficos das isotermas de Langmuir. Os valores de C_e/q_e , foram colocados nas ordenadas em função de C_e , nas abscissas. O modelo da isoterma de Langmuir, Eq. 2, reescrita abaixo, foi ajustado aos pontos experimentais. O gráfico 5 mostra o comportamento das cinzas brutas.

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{max}} C_e + \frac{1}{K_L \cdot q_{max}} \quad (2)$$

Gráfico 3: C_e/q_e X C_e cinzas puras.

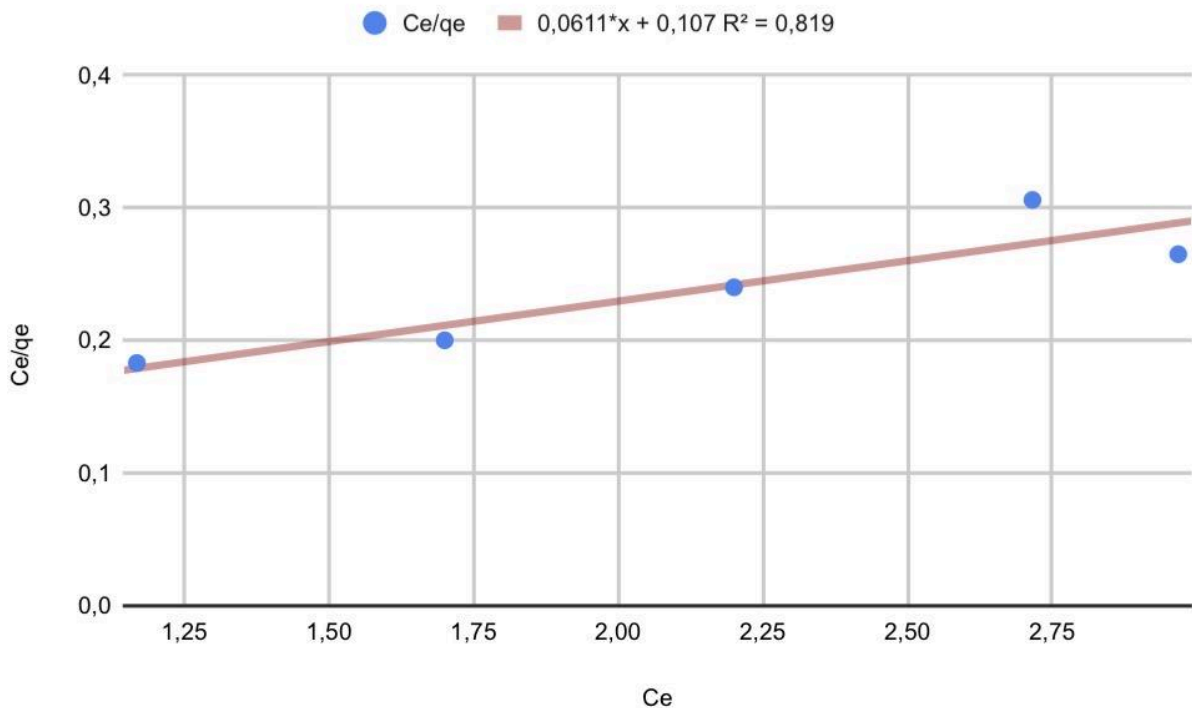


Fonte: Autoria própria, 2024

A partir dos dados, foi adicionada uma linha de tendência linear, cuja equação obtida foi $y = 0,164x + 0,0225$, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,964$. Esse valor de R^2 indica um bom ajuste ao modelo de Langmuir. Pela inclinação e pelo intercepto da reta, determinaram-se os parâmetros da isoterma: $1/q_{max} = 0,164$, resultando em $q_{max} = 6,1$ mg/g. O gráfico ainda mostra que o parâmetro $1/(K_L \cdot q_{max}) = 0,0225$, de onde se obtém $K_L = 7,3$ L/mg. Com esses valores, calculou-se, da Eq. 3 da seção 3.3, o fator de separação $R_L = 0,022$ o que demonstra que o processo de adsorção foi favorável.

O gráfico 4 mostra procedimento análogo realizado para a amostra do adsorvente tratada com NaOH:

Gráfico 4: C_e/q_e versus C_e cinzas tratadas.



Fonte: Autoria própria, 2024

A partir do gráfico C_e/q_e versus C_e , foi ajustada a equação da reta, A inclinação da reta, cujo valor é de 0,0611 corresponde a $1/q_{max}$, O intercepto, de valor 0,107, representa $1/(K_L \cdot q_{max})$. Esses resultados levam aos seguintes valores: $q_{max} = 16,4$ mg/g, $K_L = 0,57$ e $R_L = 0,10$.

A tabela 3 mostra os resultados dos parâmetros acima calculados para os dois adsorventes.

Tabela 3: Capacidade Máxima de Adsorção de Vermelho Congo (q_{max}) e Coeficiente de Regressão (R_L) para Cinzas Moída e Tratada.

| | cinzas moída | cinzas tratada |
|-----------------|--------------|----------------|
| q máximo (mg/g) | 6,1 | 16,4 |
| K_L (L/mg) | 7,3 | 0,57 |
| R_L | 0,022 | 0,10 |

Fonte: Autoria própria, 2024

Os resultados obtidos indicam que o valor de q_{max} para as cinzas tratadas, 16,4 mg/g, é quase três vezes maior que o valor para as cinzas brutas, 6,1 mg/g, demonstrando que o tratamento aplicado aumentou de forma expressiva a capacidade de adsorção do material. Esse aumento sugere que o processo de modificação química proporcionou maior disponibilidade de sítios ativos na superfície do adsorvente. No entanto, a constante de Langmuir é menor para a amostra de adsorvente tratado, indicando uma menor força de interação do corante com a superfície do adsorvente. Por fim, os valores do coeficiente de regressão R_L , que variam entre 0,02 e 0,10, indicam que a adsorção foi favorável em ambos os casos, conforme previsto pelo modelo de Langmuir.

Quando comparados com outros estudos envolvendo bioadsorventes aplicados à remoção do Vermelho Congo, observa-se que o desempenho das cinzas de bagaço de cana tratadas com NaOH é compatível ou superior. Por exemplo, Souza et al. (2020) reportaram valores de q_{max} de 10,2 mg·g⁻¹ para a casca de arroz carbonizada, enquanto Silva et al. (2021) encontraram 12,5 mg·g⁻¹ para o bagaço de cana in natura. Em contrapartida, Oliveira et al. (2022) verificaram uma capacidade de 18,0 mg·g⁻¹ para a serragem modificada quimicamente, resultado próximo ao obtido neste trabalho.

Essas comparações indicam que o material desenvolvido neste estudo apresenta desempenho competitivo em relação a outros bioadsorventes de

origem lignocelulósica, destacando-se pela simplicidade do preparo e pela viabilidade de aplicação em sistemas de tratamento de efluentes.

Assim, pode-se inferir que as cinzas tratadas apresentaram valores de K_L superiores aos das cinzas brutas, evidenciando que o tratamento alcalino com NaOH aumentou a afinidade da superfície pelo Vermelho Congo. Esse resultado pode estar associado à presença de novos grupos funcionais ionizáveis, como $-OH$ e $-O^-$, que intensificam as interações eletrostáticas e químicas entre o adsorvente e o corante (RUTHVEN, 1984; SHARMA, 2024).

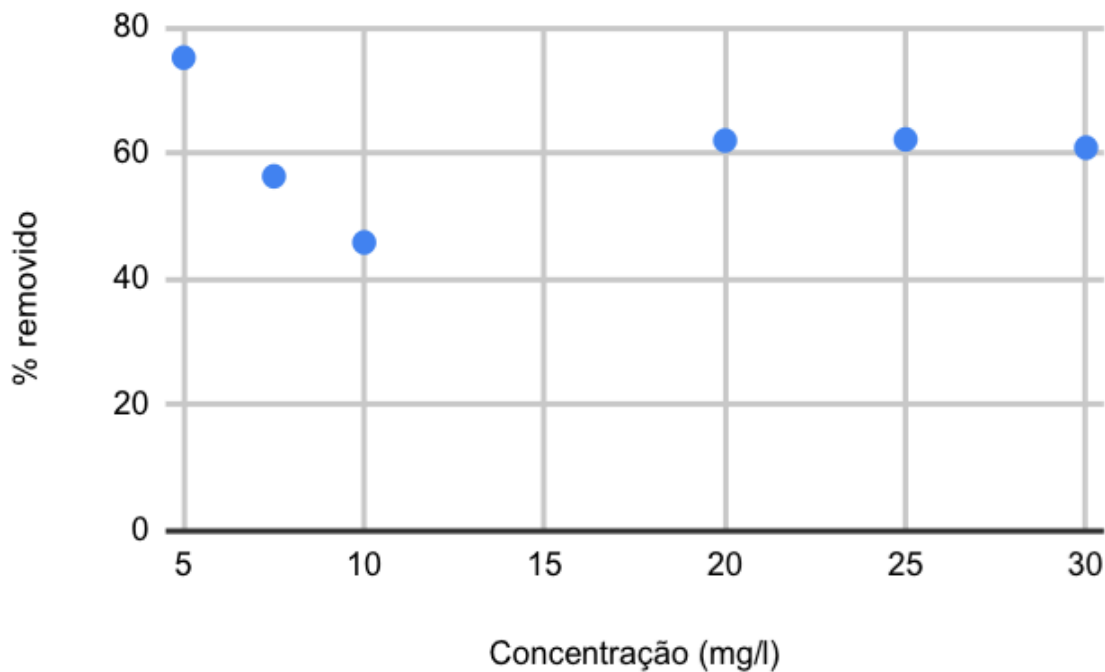
Dessa forma, a análise conjunta de q_{max} , R_L e K_L confirma que o tratamento químico promoveu um ganho expressivo na capacidade e na intensidade da adsorção, tornando as cinzas tratadas um material mais eficiente e promissor para o tratamento de efluentes contendo corantes sintéticos.

5.4 Porcentagem de Vermelho de Congo removida em função da concentração inicial da solução.

O percentual de remoção de Vermelho de Congo (% remoção), calculado utilizando a fórmula da equação (10) da seção 4.5, reescrita abaixo, estão mostradas no gráfico 5 e 6, respectivamente para as cinzas brutas e tratadas.

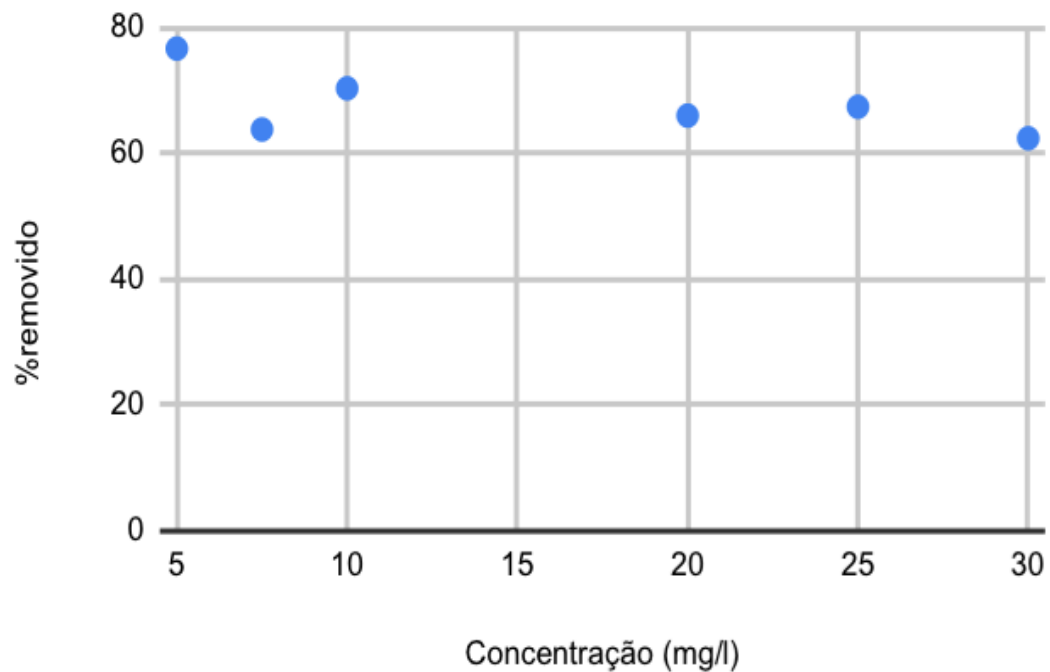
$$\%removido = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (10)$$

O comportamento apresentado no Gráfico 5, referente às cinzas brutas, indica uma boa eficiência de remoção do corante Vermelho Congo, especialmente nas menores concentrações iniciais. Observa-se que, até cerca de 5 mg L^{-1} , o material atinge valores próximos de 75–80 % de remoção, evidenciando a presença de sítios ativos disponíveis e boa interação inicial entre o adsorvente e o corante. À medida que a concentração do soluto aumenta, há uma redução gradual na porcentagem de remoção, estabilizando em torno de 60 % nas concentrações mais elevadas. Essa tendência pode ser explicada pela saturação dos sítios ativos da superfície e pela competição entre as moléculas do corante por locais de adsorção limitados, comportamento típico em sistemas de monocamada descritos pelo modelo de Langmuir.

Gráfico 5: % removida no equilíbrio-cinzas puras.

Fonte: Autoria própria, 2024

No Gráfico 6, obtido com as cinzas tratadas com NaOH, verifica-se um desempenho ligeiramente superior ao das cinzas brutas, com valores de remoção bastante altos para baixas concentrações e que se mantêm consistentemente acima de 60 % em todo o intervalo de concentração analisado. Essa melhoria, embora discreta, pode estar relacionada às alterações estruturais e químicas promovidas pelo tratamento alcalino, como a remoção de impurezas minerais, o aumento da porosidade e a formação de grupos funcionais ativos ($-OH$ e $-O^-$) na superfície. Tais modificações favorecem as interações eletrostáticas entre o corante aniônico e os sítios de carga positiva do adsorvente, resultando em uma adsorção mais eficiente.

Gráfico 6: % removida no equilíbrio-cinzas tratadas.

Fonte: Autoria própria, 2024

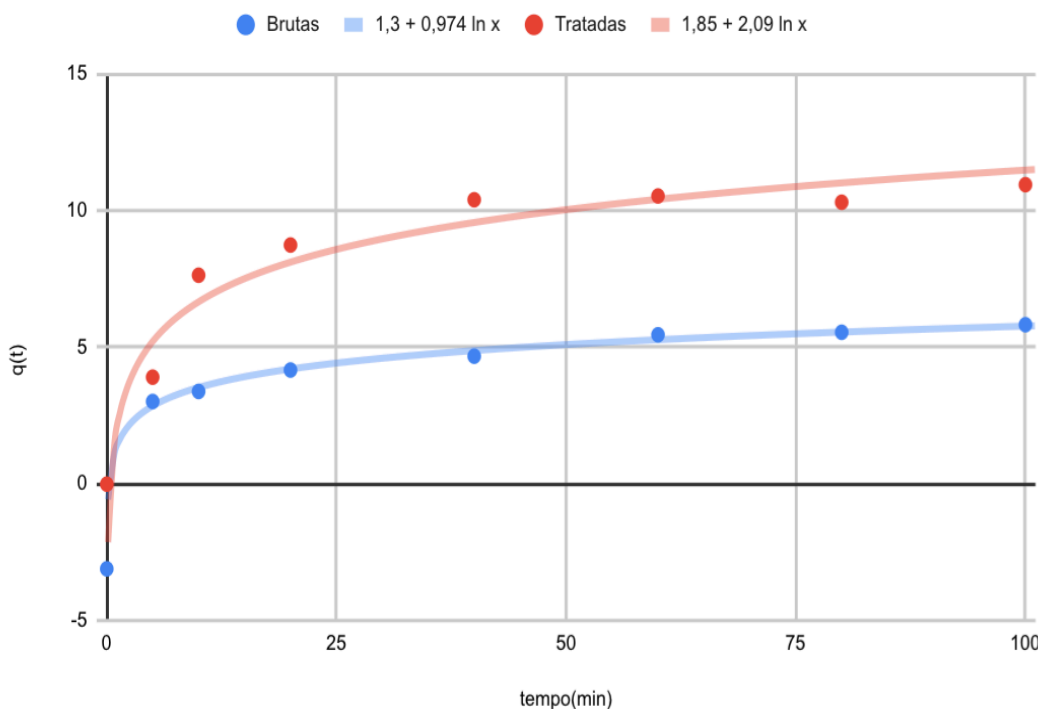
5.5 Cinética de adsorção

Aqui são mostradas as variações da quantidade de adsorbato adsorvida, em mg, por grama de adsorvente, $q(t)$, em função do tempo de contato entre adsorvente e adsorbato para os dois adsorventes estudados.

5.5.1 Quantidade de material adsorvido, por massa de adsorvente, em função do tempo.

A variação da quantidade de corante adsorvido por massa de adsorvente, $q(t)$, em função do tempo, está apresentada no gráfico 9, para as amostras de cinzas brutas e tratadas com NaOH. Observa-se que, em ambos os casos, a adsorção ocorre de forma rápida nos primeiros minutos de contato, indicando uma elevada disponibilidade de sítios ativos na superfície do material. Após aproximadamente 60 a 80 minutos, o sistema atinge o equilíbrio, momento em que a quantidade de corante removida pela superfície se estabiliza.

Gráfico 7: Variação da quantidade adsorvida ($q(t)$) em função do tempo para as cinzas brutas e tratadas com NaOH.



Fonte: Autoria própria, 2024

O aumento inicial de $q(t)$ reflete a grande afinidade entre o adsorvente e o corante Vermelho Congo nas fases iniciais do processo. À medida que os sítios ativos vão sendo ocupados, ocorre uma redução na taxa de adsorção, até que se estabelece o equilíbrio dinâmico entre as moléculas adsorvidas e aquelas ainda em solução.

Ao comparar os dois materiais, nota-se que as cinzas tratadas apresentaram valores de $q(t)$ sistematicamente superiores em todo o período experimental, demonstrando maior capacidade de adsorção e afinidade mais intensa pelo corante. No final do tempo analisado, 100 min, as amostras tratadas apresentaram o dobro de material adsorvido por massa de adsorvente. Esse resultado confirma que o tratamento químico com NaOH foi eficaz na modificação da superfície do material, aumentando a área ativa que pode ser devida à introdução de novos grupos funcionais, como hidroxila ($-OH$) e óxido ($-O^-$), os quais favorecem as interações eletrostáticas e químicas entre o adsorvente e as moléculas aniônicas do Vermelho Congo (FOO; HAMEED, 2010; SHARMA, 2024).

Dessa forma, a análise cinética evidencia que o material tratado apresenta desempenho adsorptivo superior, atingindo o equilíbrio mais rapidamente e com maior capacidade total de remoção do corante. Esses resultados reforçam o potencial de aplicação das cinzas tratadas em sistemas reais de tratamento de efluentes contendo corantes aniônicos, como o Vermelho Congo.

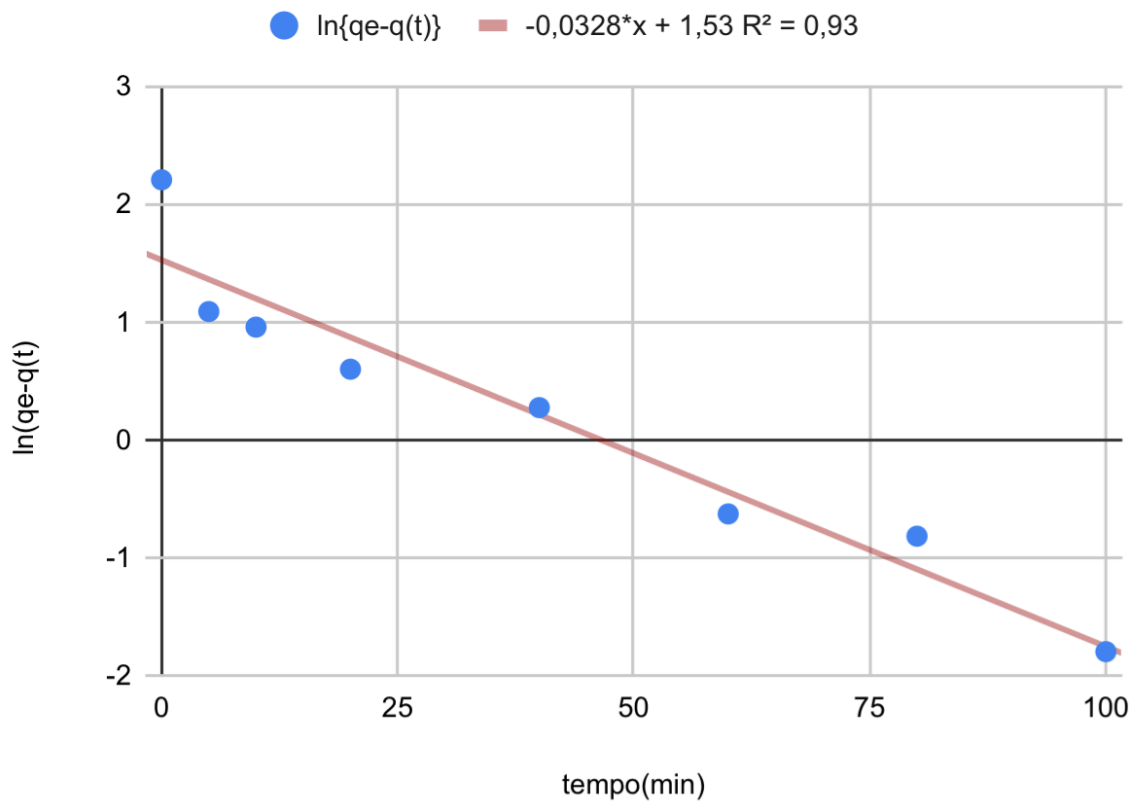
5.5.2 Ajustes dos modelos de cinética de pseudo-primeira e pseudo-segunda ordem.

Nessa seção, são mostrados os dados da cinética e ajustes dos modelos de primeira e segunda ordem para os adsorventes. As equações, que são as soluções das equações diferenciais dos modelos de primeiro e segunda ordem, Eq. 5 e 7 são reescritas abaixo:

$$\ln[q_e - q(t)] = \ln(q_e) - k_1 t \quad (5)$$

$$\frac{t}{q(t)} = \frac{1}{q_e} t + \frac{1}{k_2 q_e^2} \quad (7)$$

Os gráficos 8 e 9 mostram, respectivamente, os dados e ajustes dos modelos de primeira e segunda ordem para as cinzas brutas.

Gráfico 8: Cinzas brutas- ordem 1

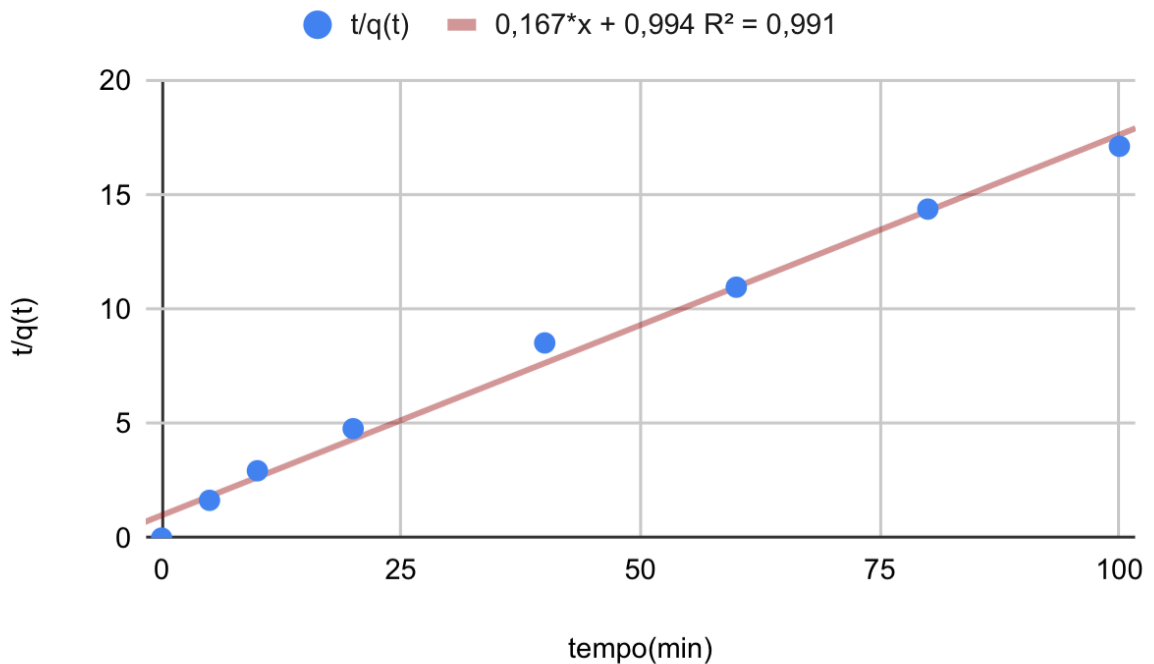
Fonte: Autoria própria, 2024

O Gráfico 8 apresenta a linearização do modelo cinético de pseudo-primeira ordem aplicado aos dados experimentais obtidos para as cinzas brutas. A relação entre $\ln(q_e - q_t)$ e o tempo, t , resultou em uma linha com coeficiente de determinação $R^2 = 0,93$, indicando um bom ajuste do modelo aos dados experimentais.

O valor do coeficiente angular ($-0,0328$) corresponde à constante de velocidade de adsorção (k_1), e o intercepto ($1,53$) está relacionado à capacidade de adsorção no equilíbrio (q_e). O ajuste relativamente alto (R^2 próximo de 1) sugere que, para as cinzas brutas, o processo de adsorção do corante Vermelho Congo pode ser razoavelmente descrito pelo modelo de pseudo-primeira ordem, indicando que a taxa de adsorção depende da diferença entre a quantidade adsorvida no equilíbrio e a quantidade adsorvida no tempo t . Entretanto, observa-se que o modelo pseudo-segunda ordem, mostrado no gráfico 11, descreve melhor o comportamento cinético da adsorção, já que o valor de R^2 para esse caso é muito próximo de 1.

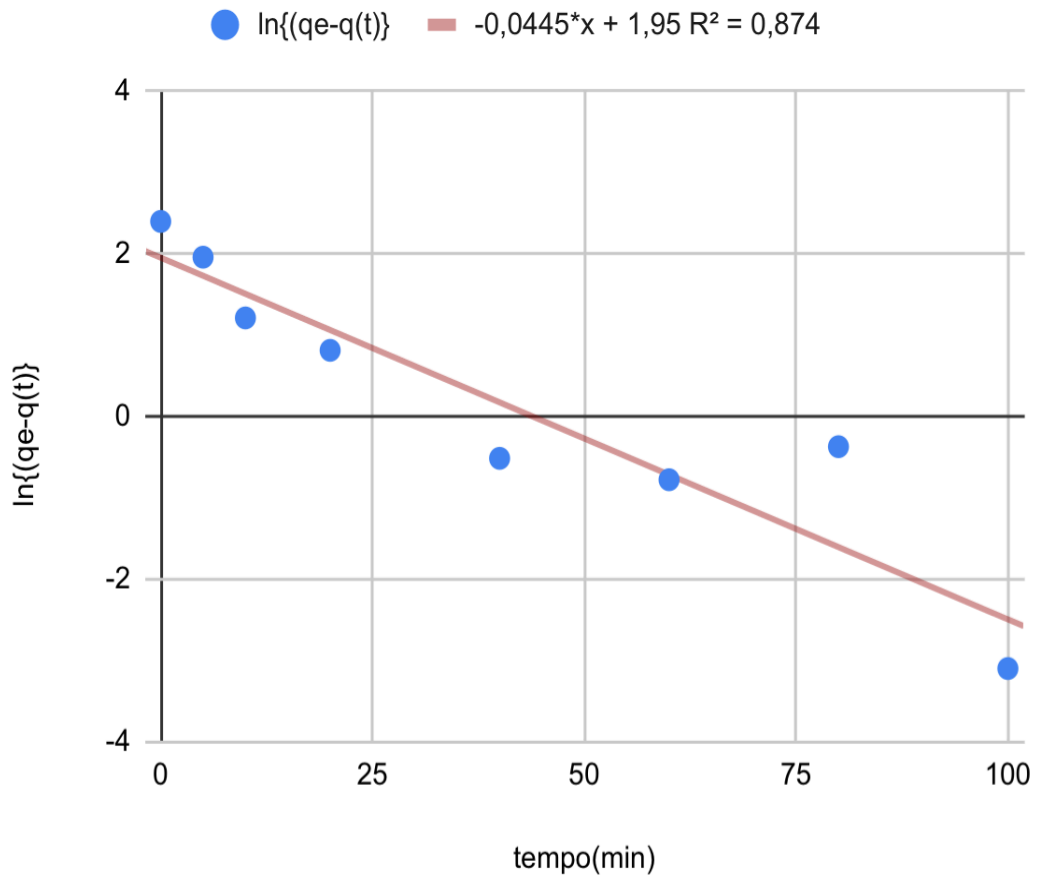
Esse fato indica que o mecanismo predominante de adsorção pode estar associado a interações químicas (quimissorção), envolvendo troca ou compartilhamento de elétrons entre os grupos funcionais da superfície das cinzas e o adsorvato.

Gráfico 9: cinzas brutas- ordem 2



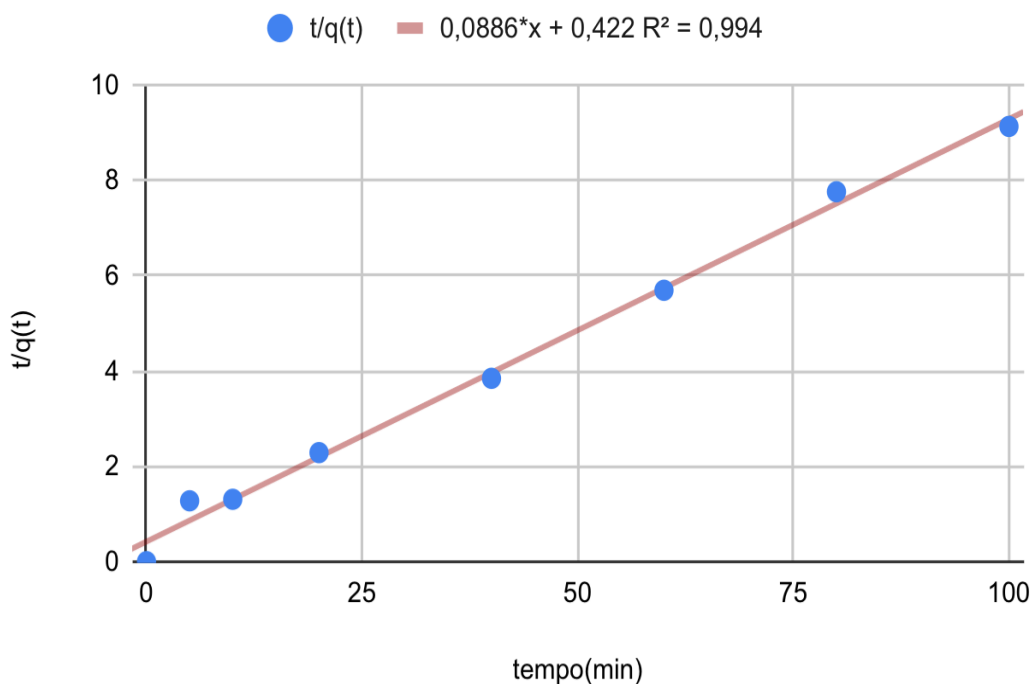
Fonte: Autoria própria, 2024

Os gráficos 8 e 9 referem-se às cinzas tratadas. No modelo de ordem 1, gráfico 12, observa-se uma tendência linear decrescente, com coeficiente angular de $-0,0445$ e coeficiente de determinação $R^2 = 0,874$. Embora o modelo apresente uma correlação razoável, o valor de R^2 indica que o ajuste não é o mais adequado para descrever o comportamento cinético do processo de adsorção das cinzas tratadas. Isso sugere que a cinética de adsorção não segue predominantemente a primeira ordem, podendo estar associada a mecanismos mais complexos de interação entre o adsorvente e o adsorvato.

Gráfico 10: Cinzas tratadas modelos de ordem 1

Fonte: Autoria própria, 2024

O gráfico 10, que mostra o modelo de segunda ordem para as cinzas tratadas a regressão linear apresenta excelente correlação, com coeficiente angular de 0,0886 e coeficiente de determinação $R^2 = 0,994$, indicando um ajuste quase perfeito aos dados experimentais.

Gráfico 11: Cinzas tratadas modelo de ordem 2

Fonte: Autoria própria, 2024

Esse resultado evidencia que o modelo de pseudo-segunda ordem descreve de forma mais adequada a cinética de adsorção para as cinzas tratadas, sugerindo que o processo possivelmente é controlado por interações químicas envolvendo troca eletrônica ou compartilhamento de elétrons entre o adsorvente e o adsorvato (HO, MCKAY, 1999).

6. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos ao longo deste estudo permitiram compreender de forma detalhada o comportamento adsorptivo das cinzas de bagaço de cana, tanto em sua forma bruta quanto após o tratamento químico com NaOH, frente à remoção do corante Vermelho Congo em solução aquosa.

A partir do espectro de absorção do corante, verificou-se que o comprimento de onda de 496 nm corresponde ao máximo de absorção, sendo utilizado como referência para todas as análises espectrofotométricas subsequentes. A curva de calibração obtida nessa faixa apresentou linearidade

adequada, permitindo a determinação precisa das concentrações de corante em solução durante os experimentos.

A análise das isotermas de Langmuir revelou que ambos os materiais se ajustam satisfatoriamente ao modelo teórico de Langmuir, com elevados coeficientes de determinação (R^2 superiores a 0,96), indicando adsorção em monocamada sobre uma superfície homogênea. Os parâmetros calculados evidenciaram que o tratamento alcalino aumentou significativamente a capacidade máxima de adsorção, passando de $6,1 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ para as cinzas brutas para $16,3 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ nas cinzas tratadas, representando um incremento de aproximadamente 167%. Esse aumento pode estar associado à remoção de impurezas minerais e à introdução de novos grupos funcionais hidroxila ($-\text{OH}$) e óxido ($-\text{O}^-$), que ampliam a quantidade e a acessibilidade dos sítios ativos de adsorção.

Os valores do fator de separação (R_L entre 0,02 e 0,10) confirmaram a natureza favorável do processo em ambas as amostras. Comparativamente, as cinzas tratadas apresentaram desempenho semelhante ou superior ao de outros bioadsorventes reportados na literatura, como a casca de arroz carbonizada ($q_{\text{ax}} = 10,2 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$) e o bagaço de cana in natura ($q_{\text{ax}} = 12,5 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$), aproximando-se dos valores obtidos para materiais modificados quimicamente, como a serragem tratada ($q_{\text{ax}} = 18,0 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$) (SOUZA et al., 2020; SILVA et al., 2021)

A avaliação da percentagem de remoção em função da concentração inicial demonstrou eficiências elevadas para ambos os adsorventes, com valores próximos a 70–80% para pequenas concentrações, próximas de 10mg/L e estabilização em torno de 60% para concentrações mais elevadas. A análise cinética evidenciou que a adsorção ocorre rapidamente nos primeiros minutos de contato, atingindo o equilíbrio entre 60 e 80 minutos. O modelo de pseudo-segunda ordem apresentou o melhor ajuste para ambas as amostras (R^2 próximo de 1), sugerindo que o processo é governado por interações químicas (quimissorção), envolvendo troca ou compartilhamento de elétrons entre os grupos funcionais das cinzas e as moléculas do Vermelho Congo. (HO, MCKAY, 1999).

Esse comportamento confirma que o tratamento com NaOH intensificou as interações de natureza química e eletrostática, acelerando o processo e elevando a capacidade de adsorção.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKL, M. A.; SERAGE, A. A. Chitosan impregnated sugarcane bagasse biochar for removal of anionic dyes from wastewater. *Scientific Reports*, v. 14, art. 27097, 2024.

AL-GHOUTI, M. A.; DA'ANA, D. A. Guidelines for the use and interpretation of adsorption isotherm models: a review. *Journal of Hazardous Materials*, v. 393, p. 122383, 2020.

ALMEIDA, R. F. et al. Utilização de cinzas de bagaço de cana como adsorvente para remoção de poluentes. *Revista Brasileira de Engenharia Química*, v. 8, n. 2, p. 45-58, 2021.

ATKINS, P.; DE PAULA, J. *Atkins' physical chemistry*. 10. ed. Londres: Oxford University Press, 2014.

BARBOSA, L. M. S.; BAÊTA, B. E. L.; DE BARROS, A. L. C.; BRAGA ALMEIDA, M. L.; LIBÂNIO, M. Sugarcane bagasse ash for fipronil removal. *Water Practice and Technology*, v. 18, n. 1, p. 231-242, 2023.

BENJELLOUN, M. Recent advances in adsorption kinetic models: their application to dye types. *Arabian Journal of Chemistry*, 2021.

COSTA, A. et al. Estudo do tempo de contato na adsorção de corantes em carvão ativado. *Revista Brasileira de Engenharia Ambiental*, v. 25, n. 3, p. 123-130, 2021.

COSTA, J. A.; ALMEIDA, T. A. Propriedades do carvão ativado de bagaço de cana: potencial de adsorção e aplicações. *Química Nova*, v. 43, n. 3, p. 325-334, 2020. DOI: 10.21577/0100-4042.20190012.

DA SILVA RIES, L.; ALLEBRANDT; SILVEIRA, J. Remoção de Cr(VI) por adsorção empregando carvão ativado comercial e carvão vegetal produzido a partir da casca de arroz. *Brazilian Journal of Development*, n. 6, p. 6477-6494, 2019.

DA SILVA, M. C. F. et al. KOH activated carbons from Brazil nut shell: preparation, characterization, and their application in phenol adsorption. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 187, p. 387-396, 2022.

DAFFALLA, S. et al. Sustainable banana-waste-derived biosorbent for Congo Red removal from aqueous solutions. *Water*, v. 16, n. 10, 2024.

DE SOUZA, T. N. V. et al. H₃PO₄-activated carbons produced from açai stones and Brazil nut shells: removal of basic blue 26 dye from aqueous solutions by adsorption. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 26, p. 28533-28547, 2019.

EL-AZIZ, A. B. et al. Sugarcane bagasse fly ash modified with bentonite as low-cost adsorbents for removal of methylene blue and Congo Red dyes from aqueous solution. *Synthesis & Selective Catalysis*. Wiley, 2025.

FERREIRA, A. et al. Análise da capacidade de adsorção do carvão ativado em soluções aquosas. *Revista Brasileira de Química*, v. 12, n. 3, p. 123-130, 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. DOI: 10.1016/j.cej.2009.09.013.

FRONTIERS. Valorization of sugarcane bagasse for sugar extraction and residue as an adsorbent for pollutant removal. *Bioengineering & Biotechnology*,

2022.

GOMES, A. P.; SILVA, M. R.; OLIVEIRA, T. S. Estudo da reatividade das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar em função da moagem. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 22, n. 6, p. 423-430, 2018.

GONÇALVES, A. R.; SILVA, J. P. Characterization of biomass ash from sugarcane bagasse. *Waste Management*, v. 89, p. 150-158, 2019.

HABTE, G. A.; BULLO, T. A.; AHMED, Y. Statistical optimization, characterizations and eco-friendly synthesis of silica from sugarcane bagasse. *Scientific Reports*, v. 15, art. 8492, 2025.

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

IRON-MODIFIED biochar derived from sugarcane bagasse for adequate removal of aqueous imidacloprid: sorption mechanism study. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 30, p. 4754-4768, 2023.

KAKOM, S. M.; ABDELMONEM, N. M.; ISMAIL, I. M. et al. Activated carbon from sugarcane bagasse pyrolysis for heavy metals adsorption. *Sugar Tech*, v. 25, p. 619-629, 2023.

KUMARA, G. D. et al. Performance evaluation of sugarcane bagasse ash on the mechanical properties of concrete. *Materials Today: Proceedings*, v. 72, p. 34-43, 2023.

LI, H. et al. Anaerobic digestion of rice straw pretreatment liquor without detoxification for continuous biogas production using a 100 L internal circulation reactor. *Journal of Cleaner Production*, v. 349, art. 131450, 2022.

MAJD, M. Adsorption isotherm models: a comprehensive and systematic review (2010–2020). *Science of the Total Environment*, v. 812, 2010.

MANDAL, S. et al. Mesoporous activated carbon as a green adsorbent for the removal of heavy metals and Congo Red: characterization, adsorption kinetics, and isotherm studies. *Journal of Contaminant Hydrology*, v. 243, p. 103869, 2021.

MARTINS, J. P. et al. Impacto ambiental das cinzas provenientes da queima de biomassa. *Ambiente & Sociedade*, v. 22, n. 1, p. 99-112, 2019.

MARTINS, J.; SILVA, L. A. Estudo da adsorção em carvão ativado. *Journal of Environmental Sciences*, v. 15, n. 1, p. 55-62, 2020.

MARTINS, L. et al. Modelos de isotermas de adsorção: uma revisão. *Journal of Environmental Science*, v. 15, n. 2, p. 45-60, 2022.

NARIMATSU, B. M. G. et al. Corantes naturais para fins têxteis: um relato de experiência. *Projética*, v. 13, n. 1, p. 240, 2022.

NUNES, C. A.; MÁRIO, C. Estimation of surface area and pore volume of activated carbons by methylene blue and iodine numbers. *Química Nova*, v. 34, p. 47, 2011.

OLIVEIRA, A. R.; MARTINS, J. M. Análise do bagaço de cana-de-açúcar: potencialidades e usos. *Journal of Cleaner Production*, v. 229, p. 255-263, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.05.124.

OLIVEIRA, J. F.; ROCHA, M. T.; COSTA, D. S. Materiais naturais e resíduos agrícolas como bioadsorventes na remoção de corantes. *Química Nova*, v. 44, n. 7, p. 841-852, 2021.

PEREIRA, A. F.; LIMA, M. A.; SOUZA, R. T. Caracterização e aplicação de resíduos agroindustriais como adsorventes no tratamento de efluentes. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 23, n. 6, p. 430–436, 2019. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v23n6p430-436.

PRAIPIPAT, P. et al. Zeolite A powder and beads from sugarcane bagasse fly ash modified with iron(III) oxide-hydroxide for lead adsorption. *Scientific Reports*, v. 13, art. 10422, 2023.

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

SANTOS, R. A. et al. Avaliação de resíduos agroindustriais como bioadsorventes na remoção de corantes têxteis. *Revista Virtual de Química*, v. 12, n. 5, p. 1180-1192, 2020.

SHARMA, P. Recent advancement of adsorption potential of sugarcane bagasse biochar and derived materials: a review. *Environmental Research*, v. 245, p. 118-129, 2024.

SILVA, F. R.; SOUZA, R. T. Caracterização de resíduos de cana-de-açúcar para aproveitamento energético. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 22, n. 4, p. 245-251, 2018. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v22n4p245-251.

SILVA, G. P. et al. Biossorção de corantes em meio aquoso: uma alternativa sustentável para o tratamento de efluentes. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 29, n. 8, p. 11543-11557, 2022.

SILVA, J. L.; SOUZA, C. M. Aplicações das cinzas na construção civil: uma análise das propriedades. *Journal of Construction and Building Materials*, v. 45, p. 100-107, 2019.

SILVA, M. C. F. Obtenção e caracterização de carvão ativado a partir de resíduos de casca de castanha do Pará (*Bertholletia excelsa*) e sua aplicação na adsorção de fenol. [S.l.: s.n.], 2020.

SILVA, R. S. Chemical composition and properties of ash from burning sugarcane bagasse. *Journal of Cleaner Production*, v. 278, p. 123-130, 2021.

SOUZA, M. et al. Regeneração de carvão ativado: uma abordagem sustentável. *Environmental Technology & Innovation*, v. 20, p. 101-110, 2023.

SOUZA, R. T.; LIMA, M. A.; PEREIRA, A. F. Caracterização e aplicação do carvão ativado de bagaço de cana-de-açúcar no tratamento de efluentes. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 23, n. 6, p. 430-436, 2019. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v23n6p430-436.

VASCONCELOS, T. R.; LIMA, C. A.; SILVA, D. F. Processos de biossorção: fundamentos, aplicações e perspectivas. *Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 26, n. 4, p. 655-670, 2021.

WANG, C. et al. Effective adsorption of colorants from sugarcane juice by bagasse-based biochar-hydroxyapatite composite. *Foods*, v. 11, n. 14, p. 2171, 2022.

XAVIER, C. S. Secagem e avaliação do bagaço de cana de açúcar como adsorvente de corantes têxteis presentes em soluções aquosas. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 26, [s.n.], 2021.

YAKUPOVA, E. I. et al. Congo Red and amyloids: history and relationship. *Bioscience Reports*, v. 39, n. 1, p. BSR20181415, 2019.