



## ANÁLISE DA REMOÇÃO DE AZUL DE METILENO UTILIZANDO COMO ADSORVENTE CINZAS PROVENIENTES DE CALDEIRA INDUSTRIAL

Helena M. Souza<sup>1</sup>; Carlos E. Accorsi<sup>2</sup>; Luiz E. Bergamaski<sup>3</sup>; Milena V. Schneider<sup>4</sup>; Bethania Brochier<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup> Curso de engenharia química – Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS)  
helenametz@edu.unisinos.br

**Palavras-Chave:** Adsorção, resíduo, indústria têxtil

### Introdução

O rápido e contínuo crescimento da indústria, em especial do setor têxtil, resulta na geração de grandes volumes de efluentes líquidos, cuja composição é complexa e altamente variável (CASTILLO-SUÁREZ *et al.*, 2023). Entre as principais preocupações ambientais associadas a esses efluentes, destaca-se a presença de corantes orgânicos sintéticos. Estima-se que 10-15% dos corantes empregados nos processos de tingimento não se fixem às fibras e sejam descartados em corpos hídricos, conferindo coloração intensa mesmo em concentrações baixas (KAVITHA *et al.*, 2025).

A presença desses contaminantes em corpos aquosos gera impactos negativos severos, como o bloqueio da penetração da luz solar, inibindo o processo de fotossíntese e afetando o equilíbrio de ecossistemas inteiros (BORA *et al.*, 2026). Além disso, diversas classes de corantes, como os azo-corantes, e seus subprodutos são resistentes aos métodos de tratamento convencionais, podendo apresentar potencial tóxico para a vida aquática e saúde humana (KOLYA; KANG, 2024). Dessa forma, o desenvolvimento de processos eficientes para a remoção da cor e da carga orgânica é uma prioridade ambiental e tecnológica.

Dentre as tecnologias de tratamento disponíveis para efluentes do setor têxtil, a adsorção tem se destacado como uma das abordagens mais promissoras, devido à sua alta eficiência de separação, simplicidade operacional, baixo consumo energético e possibilidade de recuperação do material (MOHAMMAD *et al.*, 2024). Nesse sentido, o carvão ativado é reconhecido mundialmente como o adsorvente para a remoção de poluentes orgânicos, incluindo corantes. Sua eficácia é atribuída à sua estrutura porosa altamente desenvolvida, que confere uma elevada área superficial específica e uma química de superfície versátil, permitindo interações físico-químicas com uma ampla gama de adsorvatos (SERBAN *et al.*, 2023).

No entanto, o alto custo de produção e regeneração do carvão ativado comercial tem motivado a busca por bioadsorventes alternativos. Neste contexto, diversos estudos estão investigando o uso de resíduos agroindustriais como adsorventes de baixo custo para a remoção



de corantes em efluentes aquosos (LERMEN *et al.*, 2021). Conforme destacado por Athira e Sumi (2024), essa abordagem não apenas oferece uma solução econômica para o tratamento de efluentes, mas também representa uma estratégia sustentável de economia circular para a valorização de resíduos industriais e a mitigação de passivos ambientais.

Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a eficiência das cinzas de caldeira industrial (provenientes da combustão de cavaco de eucalipto e de casca de arroz) na adsorção do corante azul de metileno, visando determinar a aplicabilidade deste resíduo como adsorvente alternativo.

## Material e Métodos

Os reagentes utilizados foram de grau analítico. Como adsorvente, utilizaram-se amostras de cinzas sem ativação prévia, cedidas por uma indústria do Rio Grande do Sul cuja caldeira de geração de vapor é alimentada por 75% de cavaco de eucalipto e 25% de casca de arroz. As condições de operação da caldeira no momento da coleta eram de 900 °C e 6,7 MPa. As cinzas foram secas em estufa a 105 °C por 7 h e resfriadas em dessecador até massa constante.

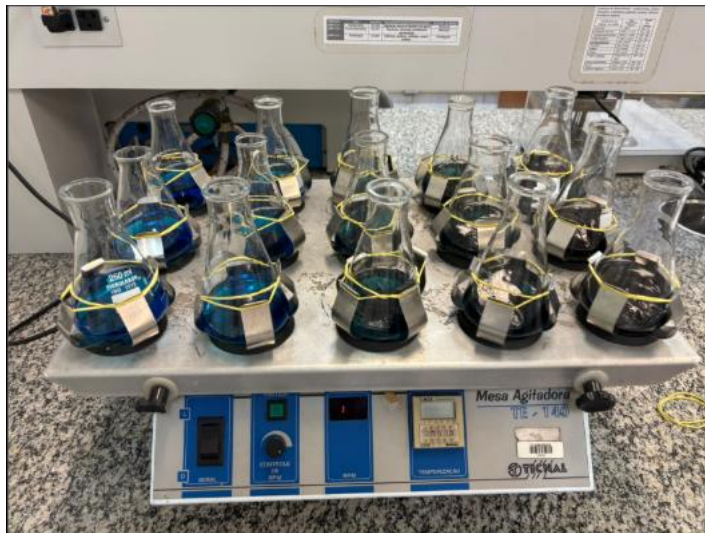
A distribuição granulométrica foi determinada por peneiramento a seco (aberturas de 2 a 0,45 mm), utilizando agitador de peneiras Bertel® em triplicata. A fração retida na peneira de 1,18 mm foi descartada, empregando-se nos ensaios subsequentes apenas a fração passante (finos).

Para a determinação do comprimento de onda de máxima absorbância, realizou-se uma varredura (300 a 700 nm) em espectrofotômetro SP-220 (Biospectro) utilizando água deionizada como branco. A curva de calibração foi construída a partir de soluções-padrão de azul de metileno (0,5; 1; 3; 5 e 10 mg.L<sup>-1</sup>) a partir da diluição da solução-problema (com concentração de 10 mg.L<sup>-1</sup>). As soluções foram aferidas no espectrofotômetro no comprimento de onda ótimo determinado na varredura.

Os ensaios de adsorção foram realizados por processo descontínuo. Assim, alíquotas de 100 mL da solução-problema com concentração conhecida de 10 mg.L<sup>-1</sup> foram colocadas em erlenmeyer com diferentes massas de adsorvente (0,05; 0,1; 0,3; 0,5 e 1,0 g). O sistema foi agitado em mesa agitadora orbital marca Tecnal a 120 rpm por 60 min, conforme demonstrado na Figura 1.



**Figura 1 - Ensaio de adsorção**



Fonte: Os autores (2026)

Após o tempo de contato de 60 min, o sobrenadante foi separado por centrifugação (2500 rpm, 2 min). A concentração final de equilíbrio foi determinada por leitura em espectrofotômetro. O percentual de remoção e a capacidade de adsorção no equilíbrio ( $q_e$ , expressa em  $\text{mg.g}^{-1}$ ) foram calculadas pelas Equações 1 e 2:

$$\text{Remoção (\%)} = \frac{(C_{A,0} - C_{A,E})}{C_{A,0}} \times 100 \quad \text{Equação 1}$$

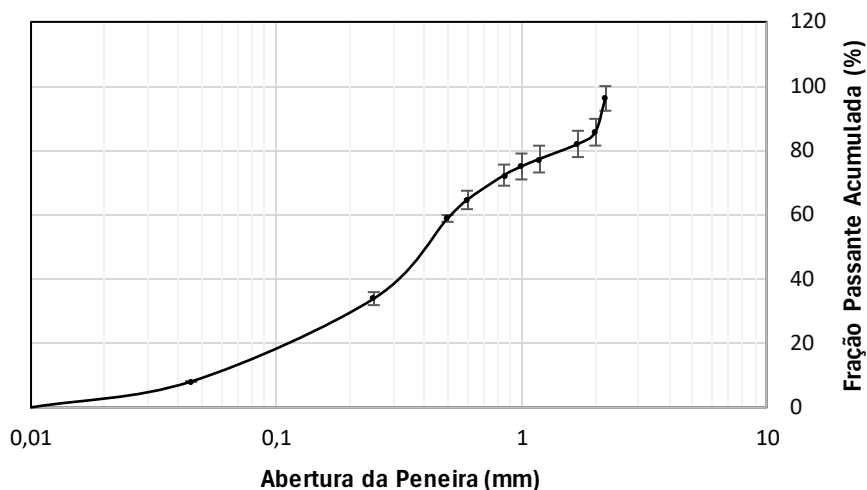
$$q_e = \frac{(C_{A,0} - C_{A,E})V}{m} \quad \text{Equação 2}$$

Em que  $C_{A,0}$  é a concentração inicial da solução ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) e  $C_{A,E}$  a concentração de equilíbrio do soluto na fase líquida ( $\text{mg.L}^{-1}$ ).  $V$  representa o volume da solução (L) e  $m$  a massa de cinzas utilizada (g).

## Resultados e Discussão

Na Figura 2 é apresentada a distribuição granulométrica das cinzas. Observa-se que a cinza analisada possui maior parte de sua fração com granulometria inferior a 1 mm. Ainda, possui como diâmetros característicos D10 (0,065 mm) e D50 (0,39 mm). O processo de adsorção tem forte influência no tamanho da partícula adsorvente, nesse sentido estudos como Kieling *et al.* (2016), relatam maiores eficiências na remoção de contaminantes com materiais com menores granulometrias.

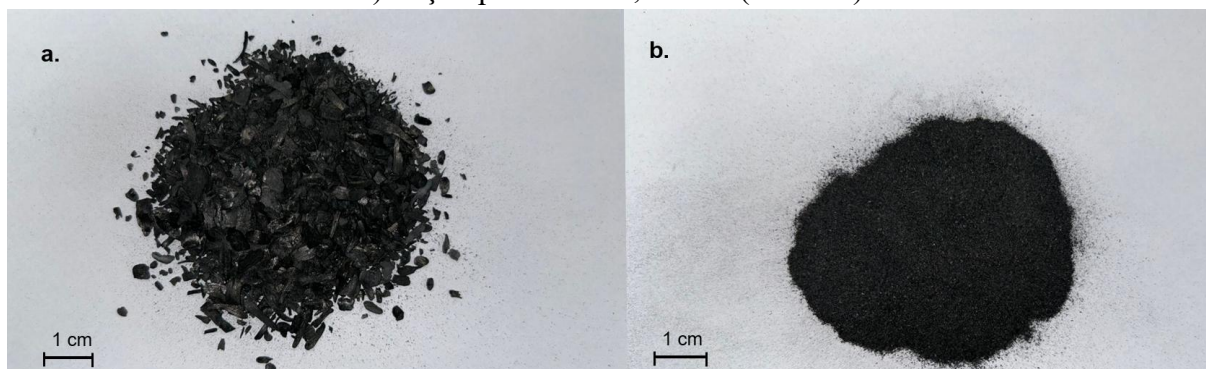
**Figura 2** - Curva de distribuição granulométrica das cinzas expressa em fração passante acumulada.



Fonte: Os autores (2026)

Visando maiores eficiências de remoção, seguiu-se a metodologia de segregação descrita por Kieling *et al.* (2016) e usou-se somente a fração de finos na adsorção. O processo de segregação resultou na retirada de  $22,7 \pm 4,2\%$  de material grosseiro (frações maiores que 1,18 mm) conforme indicado na Figura 3. Para essa fração de grossos, sugere-se processos de moagem para atingir granulometrias inferiores ou a sua utilização para outros fins.

**Figura 3** - Frações das cinzas. a) fração acima de 1,18 mm (descartada).  
b) Fração passante à 1,18 mm (mantida).

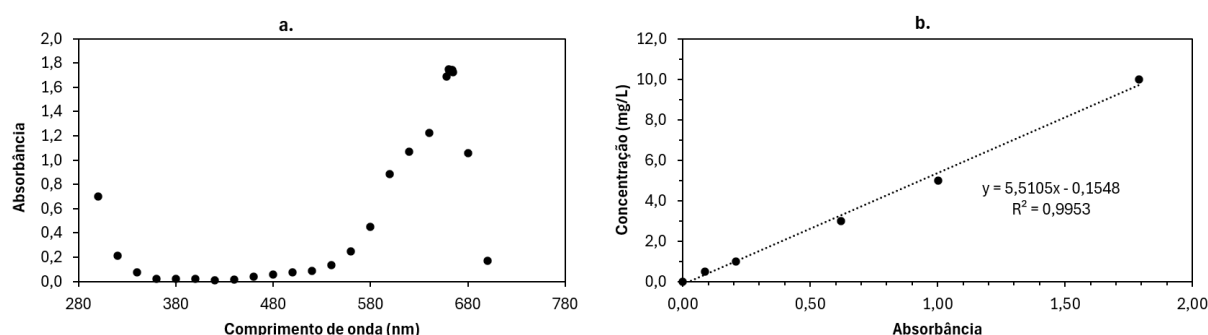


Fonte: Os autores (2026)

A Figura 4a apresenta as respostas da varredura realizada no espectrofotômetro, em que se determinou o comprimento de onda ótimo como 660 nm, uma vez que esse apresentou a maior absorbância, valor corroborado pela literatura (SILVA, 2023). A curva de calibração preparada no espectômetro obteve  $R^2 = 0,9953$ , conforme demonstrado na Figura 4b. A

literatura indica como confiável para curvas de calibração em espectrofotometria valores de correlação superiores a 0,9900 (ARAÚJO, 2021), indicando que a curva de calibração obtida é adequada para o experimento.

**Figura 4** - Definição do comprimento de onda ótimo (a) e curva de calibração a 660 nm (b)



Fonte: Os autores (2026)

A partir das absorbâncias lidas foi possível calcular a concentração da solução no momento de equilíbrio e a massa de adsorvato aderido ao adsorvente. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1** - Resultados obtidos a partir da leitura da absorbância para os diferentes ensaios de adsorção

| Teste | Dosagem de adsorvente (g) | Absorbância lida | Concentração de equilíbrio (mg.L <sup>-1</sup> ) | Massa de adsorvato aderido ( $q_e$ )(mg.g <sup>-1</sup> ) |
|-------|---------------------------|------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 1     | 0,05                      | 0,571 ± 0,088    | 2,99 ± 0,48                                      | 13,73 ± 1,06                                              |
| 2     | 0,10                      | 0,144 ± 0,026    | 0,64 ± 0,14                                      | 9,24 ± 0,08                                               |
| 3     | 0,30                      | 0,020 ± 0,006    | < L.D.                                           | 3,28 ± 0,02                                               |
| 4     | 0,50                      | 0,018 ± 0,007    | < L.D.                                           | 1,97 ± 0,01                                               |
| 5     | 1,00                      | 0,017 ± 0,003    | < L.D.                                           | 1,00 ± 0,00                                               |

< L.D.: concentração inferior ao limite de detecção do método analítico.

Fonte: Os autores (2026)

A partir da concentração de equilíbrio e da concentração inicial de 0,01 g.L<sup>-1</sup> de azul de metileno foi possível calcular o percentual de remoção do corante pela ação das cinzas. Assim, a adição de, aproximadamente, 0,05 g de cinzas promoveu a remoção de 70,10% do corante, enquanto o uso de 0,10 g elevou a remoção para 93,63%. Para valores mais elevados de cinza adicionada (0,30 g, 0,50 g e 1,00 g) a remoção foi de 100%.

A análise do parâmetro  $q_e$  corrobora com o observado, visto que a menor massa testada (0,05 g) promoveu o carregamento máximo da superfície do material (13,73 ± 1,06 mg.g<sup>-1</sup>), indicando alta eficiência por grama de adsorvente, porém com desempenho global



insatisfatório. Por outro lado, dosagens excessivas geraram alta disponibilidade de sítios ativos ociosos, diminuindo o valor de  $q_e$  (1 mg.g<sup>-1</sup> na dosagem de 1,0 g). Sob a óptica de engenharia de processos, o uso desnecessário de adsorvente eleva os custos de operação. Portanto, a dosagem de 0,3 g por 100 mL de solução representa a condição ótima de operação para este sistema, equilibrando eficiência de remoção total com uso racional da capacidade adsortiva do material.

A Tabela 2 apresenta a comparação da capacidade de adsorção obtida experimentalmente com valores relatados na literatura para o mesmo contaminante com adsorventes de baixo custo.

**Tabela 2** - Comparação da capacidade de adsorção com valores reportados pela literatura

| Tipo de adsorvente                         | Tratamento prévio                                  | Capacidade de adsorção $q_e$ (mg.g <sup>-1</sup> ) | Referência                     |
|--------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------|
| Madeira de <i>Eucalyptus dunnii</i>        | Tratamento hidrotérmico                            | 293,30                                             | MORAIS <i>et al.</i> (2019)    |
| Serragem de eucalipto                      | Ativação química (K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ) | 81,00                                              | COUTO <i>et al.</i> (2012)     |
| Casca de arroz (Zeólita ZG17)              | Tratamento hidrotérmico                            | 20,67                                              | SCHMITZ (2019)                 |
| Cinzas mistas (eucalipto e casca de arroz) | Nenhum                                             | 13,73                                              | Presente estudo                |
| Serragem teca                              | Ativação térmica                                   | 13,48                                              | SURIADI <i>et al.</i> , (2024) |
| Biocarvão de endocarpo de Cansanção        | Pirólise                                           | 11,41                                              | VIEIRA <i>et al.</i> , (2024)  |
| Cascas de fruto de angico vermelho         | <i>In natura</i> e com tratamento de NaOH          | 7,45 ( <i>in natura</i> )<br>7,44 (NaOH)           | GUTERRES <i>et al.</i> (2018)  |

Fonte: Os autores (2026)

Embora materiais submetidos a tratamentos prévios rigorosos, como a modificação hidrotérmica da madeira ou a ativação química (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) da serragem, alcancem capacidades de adsorção consideravelmente maiores (293,30 mg.g<sup>-1</sup> e 81,00 mg.g<sup>-1</sup>, respectivamente), o adsorvente avaliado no presente estudo sem nenhum tratamento obteve um desempenho superior ou semelhante a materiais que exigiram processos energéticos. Isso demonstra a viabilidade técnica das cinzas mistas, garantindo uma capacidade adsortiva satisfatória de



forma direta, sem a necessidade de etapas onerosas ou geradoras de passivos ambientais para sua ativação.

## Conclusões

As cinzas residuais provenientes da combustão industrial de cavacos de eucalipto e casca de arroz apresentaram bom desempenho como adsorventes alternativos para a descoloração de soluções aquosas contendo azul de metileno. A fração bruta do material, sem a necessidade de etapas onerosas de ativação química, obteve 100% de remoção do corante nas dosagens a partir de 0,3 g por 100 mL. A análise das capacidades no equilíbrio sugere que o tempo de contato de 60 minutos foi suficiente para garantir o desempenho máximo do sistema, apontando para a possibilidade de futuras otimizações operacionais. O adsorvente teve como capacidade de adsorção  $13,73 \pm 1,06 \text{ mg.g}^{-1}$ , sendo equiparável a adsorventes de baixo custo descritos na literatura. Por fim, o estudo atesta a viabilidade técnica da adsorção utilizando esse subproduto, destacando seu potencial prático como um material alternativo para o tratamento de azul de metileno em soluções aquosas aliado à valorização de um resíduo industrial.

## Agradecimentos

A equipe agradece à Videolar-Innova pela doação de material e apoio, e à disciplina de Práticas em Transferência de Calor e Massa (Eng. Química - Unisinos) por oportunizar o desenvolvimento deste estudo.

## Referências

- ARAÚJO, Hiram; IRIS, Ademário. E-book - **Análise Instrumental**: Uma Abordagem Prática. Rio de Janeiro: LTC, 2021. E-book. p.173. ISBN 9788521637486.
- ATHIRA, T. M.; SUMI, S. Agro-based adsorbents for dye removal from aqueous solutions: A review. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 235, art. 120, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11270-024-06926-8>.
- BORA, N. et al. Contamination toxicity and remediation of stable dyes and oils in aquatic wastewater systems. **Discover Environment**, v. 4, art. 166, 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s44274-026-00680-w>.
- CASTILLO-SUÁREZ, L.; SIERRA-SÁNCHEZ, A. G.; TEUTLI-SEQUEIRA, E. A. A critical review of textile industry wastewater: green technologies for the removal of indigo dyes. **Desalination and Water Treatment**, v. 300, p. 1-20, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13762-023-04810-2>.
- COUTO, G. M. et al., Use of sawdust *Eucalyptus* sp. in the preparation of activated carbons. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 36, n. 1, p. 69-77, 2012. DOI:10.1590/S1413-70542012000100009.
- GUTERRES, F. P. et al., Adsorção do azul de metileno utilizando resíduos de angico vermelho in natura e tratado quimicamente com NaOH. **Congrega Urcamp**, v. 15, n. 15, p. 130-143, 2018.
- KAVITHA, G. et al. Dye pollution and its implications for human health, aquatic ecosystems, and sustainable wastewater treatment: A comprehensive review. **Journal of Water Process Engineering**, v. 80, art. 109071, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.109071>.



KOLYA, H.; KANG, C.-W. Toxicity of metal oxides, dyes, and dissolved organic matter in water: Implications for the environment and human health. **Toxics**, v. 12, n. 2, art. 111, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/toxics12020111>.

LERMEN, A. M. *et al.* A utilização de resíduos agroindustriais para adsorção do corante azul de metileno: uma breve revisão. **Brazilian Applied Science Review**, v. 5, n. 1, p. 273–288, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.34115/basrv5n1-017>

MOHAMMAD, S. G. *et al.* Low-Cost Adsorbents for Water Treatment: A Sustainable Alternative for Pollutant Removal. **Processes**, v. 13, n. 12, p. 4088, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr13124088>.

MORAIS, R. M. *et al.* Produção de carvão ativado a partir de *Eucalyptus dunnii* para adsorção de corante azul de metileno. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 10, n. 1, p. 78-87, 2019. DOI: 10.12953/2177-6830/rcm.v10n1p78-87.

SCHMITZ, T. **Síntese hidrotérmica de zeólitas sem direcionadores orgânicos de estrutura a partir de cinza de casca de arroz sem pré-tratamento**. 2019. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/196053>.

SERBAN, G. V. *et al.* Removal Efficiency and Adsorption Kinetics of Methyl Orange from Wastewater by Commercial Activated Carbon. **Sustainability**, 2023, 15(17), 12939

SILVA, Francisco Alves da. **Adsorção de azul de metileno utilizando carvão ativado preparado a partir da casca do fruto do tamboril (*Enterolobium contortisiliquum*)**. 2023. 102 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão, Campus São Luís – Monte Castelo, São Luís, 2023.

SURIADI, I. G. A. K. *et al.* The impact of activation heating rate on pore structure in teak sawdust-derived activated carbon and its application in methylene blue adsorption. **Trends in Sciences**, v. 21, n. 9, art. 8110, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.48048/tis.2024.8110>

VIEIRA, Nathália P. A.; VARGAS, Amanda d. S.; VASCONCELOS, Loren C. Estudo de equilíbrio de adsorção do corante azul de metileno em biocarvão de endocarpo de cansanção como adsorvente. In: ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 28., 2024, São José dos Campos. **Anais**. São José dos Campos: UNIVAP, 2024. p. 1-6. Disponível em: [https://www.inicepg.univap.br/cd/INIC\\_2024/anais/arquivos/0936\\_0821\\_01.pdf](https://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2024/anais/arquivos/0936_0821_01.pdf). Acesso em: 4 jul. 2026.