



CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E AVALIAÇÃO PRELIMINAR DO POTENCIAL ADSORVENTE DE FRAÇÕES PROVENIENTES DA COMBUSTÃO DE BIOMASSA

Vilma S. Sousa¹; Michele S. Silva²; Evandro Balestrin¹

¹ Universidade do Oeste de Santa Catarina (UNOESC).

² Centro Universitário Tabosa de Almeida (Asces Unita).
vilmasousa559@gmail.com

Palavras-Chave: Cinzas de caldeira, adsorção, tratamento de efluentes.

Introdução

O cenário energético brasileiro destaca-se pela participação expressiva de fontes renováveis. De acordo com o Balanço Energético Nacional 2025, elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), as fontes renováveis corresponderam a 50,0% da Oferta Interna de Energia em 2024. No mesmo ano, a participação das fontes renováveis na matriz elétrica brasileira atingiu 88,2%. Entre as fontes que compõem a matriz elétrica, a biomassa representou aproximadamente 8,1%, evidenciando sua relevância na geração de eletricidade no país (EPE, 2025). A biomassa também se destaca por sua versatilidade, podendo ser convertida em combustíveis sólidos, líquidos e gasosos, além de possibilitar a produção integrada de energia térmica e elétrica (ALTOÉ, 2024).

A biomassa florestal é amplamente reconhecida como uma alternativa energética sustentável. Nesse contexto, o eucalipto destaca-se como uma das espécies florestais mais cultivadas no mundo, em razão de sua elevada produtividade e capacidade de adaptação a diferentes condições ambientais (ALTOÉ, 2024). No Brasil, as florestas plantadas atingiram aproximadamente 10,5 milhões de hectares em 2024, sendo o eucalipto a espécie predominante, com cerca de 8,1 milhões de hectares. Desse total, aproximadamente 38% das áreas pertencem ao setor de papel e celulose (IBÁ, 2025).

Durante o processo produtivo da indústria de papel e celulose, resíduos como cascas, galhos e folhas são gerados. Parte desses materiais é utilizada como fonte energética nas caldeiras de vapor, contribuindo para a geração de energia na própria fábrica (ALTOÉ, 2024). Esse aproveitamento é favorecido pelas características físico-químicas da biomassa, como elevados teores de celulose e lignina e alto poder calorífico (ALVES et al., 2025; SOUZA et al., 2012). Entretanto, como consequência da combustão, ocorre a geração de cinzas, um resíduo sólido abundante que ainda apresenta desafios relacionados ao seu reaproveitamento e destinação ambientalmente adequada (ALTOÉ, 2024).

As cinzas avaliadas neste estudo são provenientes da combustão de biomassa em uma caldeira de uma indústria do setor de papel e celulose. Devido à diversidade de materiais utilizados na alimentação da caldeira, esses resíduos apresentam composição heterogênea, tornando necessária sua caracterização para avaliar possibilidades de reaproveitamento sustentável.



Atualmente, as cinzas de biomassa possuem aplicações em diferentes setores, como agricultura, construção civil e produção de adsorventes. A adsorção é um processo de transferência de massa em que moléculas são retidas na superfície de um material sólido, podendo ocorrer por fisissorção ou quimissorção, conforme o tipo de interação entre o adsorbato e o adsorvente (AKHTAR et al., 2024; KAUSAR et al., 2018). Ngernyen et al. (2016) avaliaram o potencial da cinza volante de eucalipto como adsorvente no tratamento de efluentes da indústria de papel e celulose, verificando elevada eficiência na remoção de cor e odor, demonstrando seu potencial como alternativa sustentável e de baixo custo.

Nesse contexto, a caracterização físico-química das cinzas torna-se fundamental para compreender suas propriedades e identificar seu potencial de aplicação como material adsorvente. A presente pesquisa tem como objetivo caracterizar físico-quimicamente as frações oriundas da queima de biomassa em uma caldeira industrial de uma indústria de papel e celulose, bem como avaliar preliminarmente seu potencial adsorvente visando à aplicação no tratamento de efluentes. A realização deste estudo justifica-se pela crescente geração desse resíduo industrial e pela necessidade de alternativas ambientalmente sustentáveis para seu reaproveitamento e valorização.

Material e Métodos

As amostras de cinza fina e fração carbonácea utilizadas neste estudo são provenientes do sistema de tratamento dos gases de combustão da caldeira industrial de uma empresa do setor de papel e celulose. A biomassa utilizada na geração de energia da indústria é composta principalmente por biomassa florestal, incluindo toras de eucalipto, cascas de pinus, resíduos da classificação granulométrica dos cavacos (overs), resíduos florestais, como folhas e galhos, e cavacos adquiridos de terceiros, constituídos por uma mistura de eucalipto e pinus.

Durante o processo de combustão, os gases gerados são submetidos a um sistema de tratamento, no qual ocorre a lavagem dos gases e a separação das partículas sólidas, originando as frações de cinza fina e carbonácea avaliadas neste estudo. As amostras foram coletadas em caçambas de armazenamento temporário, onde permanecem antes de sua destinação final.

As análises de caracterização físico-química foram realizadas no laboratório químico da própria empresa, enquanto os ensaios de adsorção foram conduzidos no Laboratório de Biotecnologia da Universidade do Oeste de Santa Catarina (UNOESC). Todos os ensaios foram realizados em duplicata, sendo os resultados apresentados como a média das determinações.

A caracterização físico-química compreendeu a determinação dos teores de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, seguindo as normas ASTM D3173, ASTM D3175, ASTM D3174 e ASTM D3172, respectivamente. A granulometria foi determinada conforme a ABNT NBR NM 248. O pH foi determinado segundo as recomendações da *International Biochar Initiative* (IBI – *Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar*), enquanto a condutividade elétrica foi obtida utilizando o mesmo procedimento de preparo da IBI e leitura conforme o método 2510 B do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*.



A avaliação do potencial adsorvente das frações provenientes da combustão da biomassa foi realizada por meio de ensaios de adsorção de azul de metileno, com determinação da concentração residual por espectrofotometria UV-Vis.

Para cada ensaio, foram adicionados 0,05 g de adsorvente a 50 mL de solução de azul de metileno a 100 mg L⁻¹ (100 ppm). As amostras foram submetidas à agitação orbital a 150 rpm, em temperatura ambiente, durante 15, 30 e 60 minutos. Após cada período de contato, as suspensões foram filtradas em papel de filtro, e os filtrados foram analisados em espectrofotômetro UV-Vis a 664 nm, comprimento de onda de máxima absorbância do azul de metileno.

A concentração residual foi determinada por meio de uma curva analítica de azul de metileno contendo os pontos de 0,5; 1; 2; 5; 10; 15; 20 e 25 mg L⁻¹, com R² = 0,9964. Para a amostra da fração carbonácea em 15 minutos, cuja absorbância excedeu a faixa da curva, realizou-se diluição antes da leitura, aplicando-se posteriormente o respectivo fator de diluição.

Resultados e Discussão

A caracterização físico-química das frações de cinza fina e carbonácea permitiu avaliar as diferenças entre os materiais provenientes do processo de combustão da biomassa. Os parâmetros analisados e os respectivos resultados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização físico-química das frações de cinza fina e fração carbonácea

Parâmetro	Unidade	Cinza fina	Fração carbonácea
Umidade (base úmida)	%	53,26	83,05
Materiais voláteis (base seca)	%	17,31	7,98
Resíduo mineral (base seca)	%	63,74	4,84
Carbono fixo (base seca)	%	18,95	87,18
pH	-	10,05	9,06
Condutividade elétrica	µS/cm	1.925	1.933

Fonte: Autores (2026).

A caracterização físico-química evidenciou diferenças significativas entre a cinza fina e a fração carbonácea provenientes da combustão de biomassa. Embora ambas sejam originadas do mesmo processo industrial, a composição das frações mostrou-se bastante distinta, refletindo o grau de combustão e a natureza dos materiais presentes em cada uma delas.

A cinza fina apresentou elevado teor de resíduo mineral (63,74%), enquanto a fração carbonácea apresentou apenas 4,84%, acompanhada de elevado teor de carbono fixo (87,18%). Esse comportamento indica que a cinza fina é constituída predominantemente por resíduos inorgânicos provenientes da combustão completa da biomassa, enquanto a fração carbonácea contém partículas parcialmente carbonizadas, preservando grande parte da estrutura rica em carbono. Segundo Ahmad et al. (2014), materiais carbonáceos obtidos a partir da biomassa apresentam potencial para aplicações ambientais devido às suas características físico-químicas, especialmente quando apresentam elevado conteúdo de carbono e estrutura porosa.



Observou-se ainda que a fração carbonácea apresentou menor teor de materiais voláteis (7,98%) em comparação à cinza fina (17,31%). A redução dos compostos voláteis durante o processo de carbonização promove o enriquecimento da fase sólida em carbono, aumentando a estabilidade química do material. De acordo com Lehmann e Joseph (2015), a perda de compostos voláteis durante o tratamento térmico está diretamente relacionada ao aumento do grau de carbonização dos materiais carbonáceos, favorecendo sua estabilidade e ampliando as possibilidades de aplicação como adsorventes.

Apesar do elevado teor de carbono fixo representar uma característica desejável para materiais adsorventes, essa propriedade, isoladamente, não é suficiente para determinar a eficiência do processo de adsorção. O desempenho adsorptivo também depende de fatores como área superficial específica, distribuição do tamanho de poros, volume de microporos e grupos funcionais presentes na superfície do material (Ahmad et al., 2014). Dessa forma, o elevado teor de carbono fixo indica características promissoras da fração carbonácea, que devem ser consideradas em conjunto com seu desempenho nos ensaios de adsorção.

Os valores de pH obtidos para ambas as frações indicaram caráter alcalino, sendo 10,05 para a cinza fina e 9,06 para a fração carbonácea. Esse comportamento é esperado para resíduos provenientes da combustão de biomassa, devido à concentração de óxidos, hidróxidos e carbonatos de metais alcalinos e alcalino-terrosos presentes nas cinzas após o processo térmico (Lehmann; Joseph, 2015). Os valores de condutividade elétrica foram semelhantes entre as frações (1.925 e $1.933 \mu\text{S cm}^{-1}$), indicando concentrações próximas de espécies iônicas solúveis presentes nas suspensões preparadas para análise.

A análise granulométrica permitiu avaliar a distribuição do tamanho das partículas presentes nas frações de cinza fina e fração carbonácea, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Distribuição granulométrica das frações de cinza fina e fração carbonácea

Fração	Faixa de partículas (mm)	Retido (%)
Cinza fina	2,80–0,180	28,81
	0,180–0,150	3,11
	<0,150	68,08
Fração carbonácea	>2,80	7,79
	2,80–0,180	86,96
	0,180–0,150	2,58
	<0,150	2,67

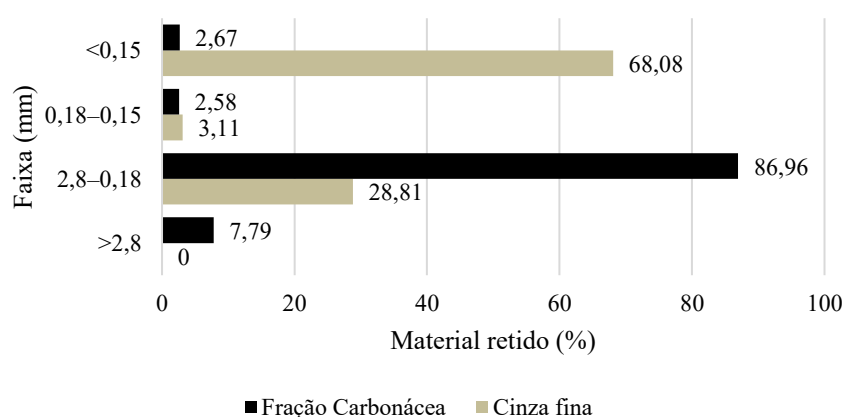
Fonte: Autores (2026).

A análise granulométrica demonstrou diferenças importantes entre as frações. A cinza fina apresentou predominância de partículas inferiores a $0,150 \text{ mm}$ (68,08%), enquanto a fração carbonácea concentrou a maior parte do material entre $0,180$ e $2,80 \text{ mm}$ (86,96%). A distribuição granulométrica das duas frações pode ser visualizada na Figura 1. A redução da granulometria do adsorvente pode aumentar a área superficial disponível para interação com a solução, favorecendo a transferência de massa e a velocidade inicial de adsorção. Entretanto, o



desempenho do processo também depende da estrutura porosa e das características superficiais do material, que influenciam a disponibilidade de sítios ativos para interação com o adsorbato (FEI; HU, 2022).

Figura 1 – Distribuição granulométrica das frações de cinza fina e fração carbonácea



Fonte: Autores (2026).

Os ensaios de adsorção demonstraram que ambas as frações apresentaram potencial para remoção de azul de metileno. A curva analítica, composta pelos pontos de 0,5; 1; 2; 5; 10; 15; 20 e 25 mg L⁻¹, apresentou R² = 0,9964, permitindo a determinação das concentrações residuais. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Concentração residual e porcentagem de remoção de azul de metileno em função do tempo de contato

Tempo de contato	Cinza fina		Fração carbonácea	
	Conc. (ppm)	% Remoção	Conc. (ppm)	% Remoção
15 min	15,3	84,7	27,9	72,1
30 min	14,5	85,5	23,7	76,3
60 min	11,7	88,3	22,0	78,0

Fonte: Autores (2026).

A cinza fina apresentou maior eficiência de remoção em todos os tempos avaliados, atingindo 88,3% após 60 minutos, enquanto a fração carbonácea alcançou 78,0%. A diferença pode estar relacionada à granulometria dos materiais, visto que 68,08% da cinza fina apresenta partículas inferiores a 0,150 mm, enquanto 86,96% da fração carbonácea está entre 0,180 e 2,80 mm. A maior proporção de partículas finas pode favorecer a disponibilidade de superfície externa e a transferência de massa, enquanto a maior granulometria da fração carbonácea pode contribuir para uma transferência mais gradual do adsorbato para regiões internas das partículas.

As características químicas também podem influenciar o comportamento observado. A cinza fina apresentou 63,74% de resíduo mineral e 18,95% de carbono fixo, enquanto a fração



carbonácea apresentou 4,84% e 87,18%, respectivamente. Embora o elevado teor de carbono fixo seja uma característica favorável da fração carbonácea, a eficiência de adsorção também depende da área superficial, estrutura dos poros e propriedades da superfície. Além disso, os valores de pH de 10,05 para a cinza fina e 9,06 para a fração carbonácea indicam caráter alcalino, que pode influenciar as interações entre os materiais e o azul de metileno. A influência da carga superficial, entretanto, deverá ser confirmada pela determinação do PCZ.

Nas condições avaliadas, as capacidades de adsorção estimadas após 60 minutos foram de 88,3 mg g⁻¹ para a cinza fina e 78,0 mg g⁻¹ para a fração carbonácea, indicando maior retenção do corante pela primeira. Dessa forma, ambas as frações demonstraram potencial como adsorventes, com destaque para a cinza fina.

Para o aprofundamento do estudo, propõe-se avaliar a influência do pH, temperatura, tempo de contato e dosagem do adsorvente, bem como determinar o ponto de carga zero (PCZ). Recomenda-se a aplicação de Planejamento Fatorial e Metodologia de Superfície de Resposta (RSM) para otimização das condições experimentais. Adicionalmente, Redes Neurais Artificiais (ANN) e técnicas de Machine Learning poderão ser empregadas para modelar e prever a capacidade de adsorção das frações em diferentes condições operacionais, contribuindo para a otimização do processo e sua aplicação no tratamento de efluentes.

Conclusões

A caracterização físico-química evidenciou diferenças marcantes entre a cinza fina e a fração carbonácea provenientes da combustão de biomassa em caldeira industrial. A cinza fina apresentou maior teor de resíduo mineral (63,74%) e predominância de partículas inferiores a 0,150 mm (68,08%), enquanto a fração carbonácea apresentou maior teor de carbono fixo (87,18%) e concentração predominante de partículas entre 0,180 e 2,80 mm (86,96%). Ambas as frações apresentaram caráter alcalino e valores semelhantes de condutividade elétrica nas condições avaliadas.

Nos ensaios com azul de metileno, as duas frações demonstraram potencial de remoção, com aumento da eficiência ao longo do tempo de contato. Após 60 minutos, a cinza fina alcançou 88,3% de remoção, correspondente à capacidade de adsorção estimada de 88,3 mg g⁻¹, enquanto a fração carbonácea atingiu 78,0% de remoção e 78,0 mg g⁻¹. Dessa forma, a cinza fina apresentou o melhor desempenho entre os materiais avaliados nas condições experimentais utilizadas.

Os resultados indicam que esses resíduos podem constituir alternativas de baixo custo para o desenvolvimento de materiais adsorventes, contribuindo para seu reaproveitamento e valorização. Entretanto, a avaliação foi preliminar e utilizou azul de metileno como composto-modelo; portanto, ainda são necessários estudos com efluentes reais, determinação da área superficial e da estrutura porosa, avaliação do ponto de carga zero, investigação da influência do pH e da dosagem, além de ensaios de regeneração e segurança ambiental. Assim, conclui-se que a cinza fina apresenta maior potencial inicial para aplicação adsorvente, enquanto a fração carbonácea também é promissora, mas requer otimização e caracterização complementar antes de uma aplicação prática.



Referências

- AHMAD, M. et al. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. **Chemosphere**, v. 99, p. 19–33, 2014.
- AKHTAR, M. S.; ALI, S.; ZAMAN, W. Innovative adsorbents for pollutant removal: Exploring the latest research and applications. **Molecules**, v. 29, n. 18, p. 4317, 2024.
- ALTOÉ, J. A. F. **Métodos de mitigação dos problemas operacionais associados às cinzas da combustão de cascas de eucalipto**. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2024.
- ALVES, N. E. M.; GONÇALVES, J. E.; URBANO, E.; SILVA, R. F.; GARCIA, N. F. L.; OLIVEIRA, M. G. Composição química e potencial de aplicação do Eucalyptus urograndis na indústria de celulose e bioenergia. **Revista Caderno Pedagógico**, 22(5), 1–19, 2025.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA); AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA); WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Method 2510 B – Conductivity. 23rd ed. Washington, DC: **APHA**, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: **ABNT**, 2003.
- ASTM INTERNATIONAL. ASTM D3172-13: Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke. **ASTM International**, West Conshohocken, PA, 2013.
- ASTM INTERNATIONAL. ASTM D3173/D3173M-17a: Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke. **ASTM International**, West Conshohocken, PA, 2017.
- ASTM INTERNATIONAL. ASTM D3174-12(2018): Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke. **ASTM International**, West Conshohocken, PA, 2018.
- ASTM INTERNATIONAL. ASTM D3175-20: Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke. **ASTM International**, West Conshohocken, PA, 2020.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA — EPE**. *Balanco Energético Nacional 2025: Relatório Síntese — ano-base 2024*. Rio de Janeiro: EPE, 2025.
- FEI, Y.; HU, Y. H. Design, synthesis, and performance of adsorbents for heavy metal removal from wastewater: a review. **Journal of Materials Chemistry A**, v. 10, p. 1047, 2022.
- INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório Anual 2025**. Indústria Brasileira de Árvores, São Paulo, SP, 2025.
- INTERNATIONAL BIOCHAR INITIATIVE (IBI). Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar That Is Used in Soil. **International Biochar Initiative**, Canandaigua, NY, 2015.
- KAUSAR, A.; IQBAL, M.; JAVED, A.; AFTAB, K.; NAZLI, Z.; BHATTI, H. N.; NOUREN, S. Dyes adsorption using clay and modified clay: A review. **Journal of Molecular Liquids**, v. 256, p. 395–407, 2018.
- LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation. 2. ed. **London: Routledge**, 2015.
- NGERNYEN, Y.; LAUNGPHAIROJANA, A.; NIKRONSANGKHAPHINIT, T.; KAEWKETKAM, S. The utilization of boiler fly ash for treatment of wastewater color by adsorption process: case study for pulp and paper industry. **Key Engineering Materials**, v. 718, p. 87–94, 2016.
- SOUZA, M. M. de; SILVA, D. A. da; ROCHADELLI, R.; SANTOS, R. C. dos. Estimativa de poder calorífico e caracterização para uso energético de resíduos da colheita e do processamento de *Pinus taeda*. **FLORESTA**, 42(2), 325–334, 2012.