



TRANSFORMANDO RESÍDUOS EM RECURSOS: POTENCIAL DE VALORIZAÇÃO DE CINZAS DA QUEIMA DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

WALLAS DOUGLAS DE MACÊDO SOUZA

RESUMO

A queima de bagaço de cana-de-açúcar em caldeiras gera cinzas que, frequentemente, são tratados como resíduos indesejados. No entanto, mesmo diante de certos desafios, esse subproduto tem um potencial significativo para valorização, oferecendo alternativas sustentáveis para a gestão de resíduos e contribuindo para a economia circular. O objetivo deste estudo é compilar e analisar as abordagens mais recentes para a valorização de cinzas geradas pela queima de bagaço de cana-de-açúcar. Buscamos identificar as tecnologias emergentes, avaliar suas aplicações práticas e discutir os desafios e oportunidades associados à sua implementação. A revisão foi conduzida por meio de uma análise sistemática da literatura científica revisada por pares dos últimos 5 anos (2020-2024), utilizando bancos de dados como Scopus, Web of Science e Google Scholar. A revisão focou na geração e caracterização das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, suas aplicações na agricultura e construção civil, e outras alternativas para esses resíduos. Também foram examinados os desafios econômicos, técnicos e ambientais associados à valorização das cinzas. O estudo identificou lacunas no conhecimento e sugeriu direções futuras para otimizar a gestão sustentável e promover a economia circular. Os resultados indicam que as cinzas podem ser eficazmente utilizadas em aplicações agrícolas, como fertilizantes e em materiais de construção, como cimento e tijolos. No entanto, a variabilidade na composição dos resíduos e ampliação de escalas ainda são desafios significativos, tendo em vista que existem barreiras econômicas e ambientais. A valorização de cinzas da queima de bagaço de cana-de-açúcar oferece oportunidades valiosas para a indústria sucroalcooleira, contribuindo para uma economia circular. Futuras pesquisas devem focar em otimizar as tecnologias existentes e avaliar os impactos a longo prazo dessas práticas.

Palavras-chave: Subprodutos de biomassa; Aplicações agrícolas; Gestão sustentável; Impactos ambientais; Economia circular.

1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma cultura perene cultivada globalmente, sendo o Brasil e a Índia os maiores produtores mundiais. A Índia ocupa a segunda posição tanto no cultivo da cana-de-açúcar quanto na produção de açúcar (Palaskar; Vasmawala, 2024). Após a extração do caldo para a produção de açúcar, parte do bagaço da cana-de-açúcar é encaminhado para a produção de energia em caldeiras de cogeração, onde sofre combustão e, são geradas as cinzas. Em seguida, as cinzas removidas do fundo do forno utilizado na conversão de resíduos em energia, podem ser combinadas com partículas conhecidas como cinzas volantes, que são arrastadas pelos gases de exaustão e ficam retidas em equipamentos como precipitadores eletrostáticos e filtros de tecido (Gbadeyan *et al.*, 2024). Enormes quantidades de cinzas são geradas e, um exemplo disso é a China, que produz de 1,2 a 2 milhões toneladas de cinzas anualmente (Jittin; Bahurudeen, 2024). Todavia, há benefícios ambientais do uso do bagaço para a cogeração devido a redução nas emissões de CO₂ e SO₂, quando comparado ao carvão e outros combustíveis fósseis, passando a ser promovida por meio de projetos qualificados para o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) no âmbito do Protocolo de Kyoto (Abdalla *et*

al., 2024).

A cinza do bagaço de cana-de-açúcar (SCBA) é um dos resíduos agroindustriais emergentes que vem atraindo crescente atenção por parte dos pesquisadores (Palaskar; Vesmawala, 2024). Com isso, o objetivo deste artigo é sintetizar e apresentar de forma abrangente os dados mais recentes e relevantes sobre a valorização de cinzas gerados pela queima de bagaço de cana-de-açúcar em caldeiras da indústria sucroalcooleira. Ao reunir e analisar as diversas abordagens e tecnologias emergentes, este estudo visa destacar a importância de transformar resíduos industriais em recursos valiosos, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e a economia circular, além de identificar lacunas de conhecimento e oportunidades para futuras pesquisas e inovações no setor.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O presente artigo de revisão é baseado em uma análise detalhada de artigos revisados por pares ao longo dos últimos 5 anos (2020-2024). Para garantir a inclusão apenas de estudos de alta qualidade, a busca foi restrita a bancos de dados como Scopus, Web of Science e Google Scholar.

A revisão enfocou três aspectos principais: a geração e caracterização das cinzas de bagaço, suas potenciais aplicações na agricultura, na construção civil e demais alternativas para esse subproduto. Além disso, analisou-se os desafios econômicos, técnicos e ambientais provenientes da valorização das cinzas, bem como, identificou-se lacunas e desafios no conhecimento atual, sugerindo direcionamentos para futuras pesquisas e desenvolvimento tecnológico.

Finalmente, conclusões foram elaboradas com base nos achados da revisão, oferecendo *insights* sobre o caminho para uma gestão mais sustentável dos resíduos da indústria sucroalcooleira e o papel das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar na economia circular.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Características das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar e aplicações agrícolas

O uso de cinzas na agricultura possui elevado potencial para melhorar a fertilidade do solo e a produção agrícola devido a presença de altas concentrações de elementos como potássio (K), sódio (Na), zinco (Zn), cálcio (Ca), Mg e ferro (Fe), bem como, outras vantagens que propiciam melhorias termos de: aeração, textura, capacidade de retenção de água, aumento da condutividade elétrica, redução da densidade aparente e atuação (Ishaq *et al.*, 2024). Os elementos fornecidos via irrigação se acumulam tanto no caule quanto nas folhas da planta (Bayapureddy; Muniraj; Mutukuru, 2024).

As cinzas possuem formato irregular, baixa densidade e elevada porosidade (Abdalla *et al.*, 2024). Mais detalhes acerca de suas propriedades são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1- Propriedades físico-químicas das cinzas voláteis do bagaço da cana-de-açúcar.

Parâmetros	Valores
pH	8,9
Condutividade elétrica (dS m ⁻¹)	0,65
Carbono orgânico Total (%)	1,8
Densidade aparente (g cm ⁻³)	0,92
Porosidade (%)	40,7

Matéria volátil (%)	16,8
Acidez (mmol g ⁻¹)	2,3
Basicidade (mmol g ⁻¹)	3,1

Fonte: Ishaq *et al.* (2024).

A cinza do bagaço é orgânica por natureza e quimicamente rica em SiO₂ (~73%) (Jha; Sachan; Singh, 2021; Mamidi; Katakajwala; Mohan, 2024), trazendo uma segurança contra insetos devido à presença de sílica abrasiva (Ishaq *et al.*, 2024). Apesar de ser alcalino e contribuir para a redução da acidez dos solos, uma de suas limitações é o seu baixo teor de N e P, além da presença de elementos traço como Cu, Cr, Ni, Pb e Cd (Ishaq *et al.*, 2024).

Cada tonelada de bagaço gera uma média de 24 kg de cinzas residuais (Antonio; Faez, 2024), o que seria uma elevada quantidade de resíduos, caso fossem destinados para aterros sanitários, tendo em vista a grande quantidade de bagaço processado em países como Brasil (safra de cana-de-açúcar superior 500 milhões de toneladas anuais) e Índia (Amin *et al.*, 2022; Antonio; Faez, 2024; Bayapureddy; Muniraj; Mutukuru, 2024).

3.2 Uso das cinzas na construção civil

Baseada na tendência seguida por outros setores, a indústria da construção, impulsionada pelos conceitos de transformação verde e economia circular, tem se debruçado para encontrar alternativas que permitam a substituição de suas matérias-primas em termos de qualidade, permitindo a renovação natural desses recursos (areia e cascalho, por exemplo) e indo de encontro aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas que preveem a redução de resíduos por meio da reciclagem e reutilização (França *et al.*, 2023; Wang; Dong, 2024).

Nesse sentido, a incorporação de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar na produção de ligantes ativados por álcalis (AABs) utilizados na indústria cimenteira tem demonstrado potencial para aumentar a resistência à compressão dos materiais produzidos (Santhosh; Subhani; Baturudeen, 2024), que representa a sua capacidade para suportar cargas de compressão antes de ocorrer a falha. Adicionalmente, a substituição parcial do cimento por SCBA, devido às suas boas propriedades pozolânicas, também tem resultado em melhorias na trabalhabilidade e na resistência à tração por fissura dos materiais (Jha; Sachan; Singh, 2021). A substituição da argila por uma mistura de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar e pó de resíduos plásticos na fabricação de tijolos demonstrou um aumento significativo na resistência à compressão, além de uma menor absorção de água em comparação com tijolos convencionais (Kalpana; Venkatesan; Padma, 2024), o que é relevante, uma vez que o aumento da umidade em edificações pode comprometer a sua resistência estrutural (Long; Zhang; Zhang, 2024).

O aproveitamento das cinzas geradas na fabricação de materiais para essa indústria pode contribuir para a redução dos custos de produção, uma vez que estudos têm demonstrado o potencial de realizar misturas binárias ou ternárias constituídas por SCBA, escória de alto-forno granulada moída e cinza volante, com ativador derivado das cinzas da casca de arroz para a produção de argamassas, alcançando resistências superiores às aquelas ativadas com silicato de sódio comercial e hidróxido de sódio (Jittin; Baturudeen, 2024).

A incorporação das cinzas como matéria-prima para o setor da construção civil depende da granulometria final obtida (que está relacionada com a cinética reativa) e das quantidades de sílica e alumina presentes. Logo, para se alcançar partículas finas (0,1-150 μ m) aplica-se métodos mais estabelecidos como os tratamentos mecânicos (como a moagem em moinho de bolas e peneiramento) e térmicos (incenaração sob temperaturas controladas) (Abdalla *et al.*, 2024; Bayapureddy; Muniraj; Mutukuru, 2024).

3.3 Aplicações alternativas

3.3.1 Adsorventes

A adsorção tem se mostrado extremamente eficaz na remoção de diversos contaminantes, como corantes, metais, produtos farmacêuticos, herbicidas, inseticidas, além de compostos químicos que afetam DQO, DBO, cor e outros poluentes, tanto em soluções sintéticas quanto em águas residuais industriais reais (Patel, 2020; Antonio; Faez, 2024).

As cinzas foram aplicadas para adsorção de Pb (II) e Cd (II) como uma alternativa para tratamento de águas residuárias, demonstrando elevada capacidade na remoção desses metais (>99% para ambos), até mesmo quando confrontada ao carvão ativado e ao bagaço advindos da cana (Getuno; Mbuvi; Changamu, 2021).

3.3.2 Síntese de zeólitas

A extração de SiO₂ a partir das cinzas do bagaço da cana também foi testada por Keawkumay *et al.* (2024) para a obtenção da zeólita 4A visando sua posterior aplicação na adsorção de CO₂, na qual percebeu-se que a capacidade de adsorção de CO₂ da zeólita obtida foi elevada, quando comparada a valores reportados em literatura relevante, confirmando-o como um método prático, acessível e ambientalmente sustentável, com potencial para expansão de escala no futuro.

3.4 Lacunas, Oportunidades e Desafios Lacunas na pesquisa:

3.4.1 Estudos de impacto ambiental de longo prazo

Há necessidade de mais pesquisas sobre os impactos ambientais de longo prazo do uso de cinzas em aplicações agrícolas, particularmente em relação à saúde do solo (desequilíbrio de nutrientes e aumento da alcalinidade) e ao acúmulo de metais traço (Abdalla *et al.*, 2024; Rihan *et al.*, 2024), o que pode tornar o solo inapto ao uso agrícola, já que esses metais podem ser bioacumulados, apresentando sérios riscos aos animais e ao ser humano. Além disso, solos contaminados são um resíduo de difícil aplicação, já que ao incinera-los para a obtenção de sólidos mais estáveis que preveem aplicação na área da construção, metais sob tratamento térmico podem ser volatilizados (Jian *et al.*, 2022; Gao *et al.*, 2023; Wang; Dong, 2024).

3.4.2 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

São necessários estudos abrangentes de ACV para avaliar o impacto ambiental geral de diferentes estratégias de valorização, que aborde aspectos até o fim de sua vida útil (Allende; Tuladhar; Jacob, 2024). Nesse aspecto, a literatura sugere que a circularidade e a compatibilidade ambiental podem aumentar mesmo após a perda da capacidade de adsorção, uma vez que ao produzir e aplicar carvões ativados oriundos das cinzas (descoloração de xarope de cana-de-açúcar), o material com baixa atividade pode ser empregue na recuperação de energia, alcançando elevada capacidade de aquecimento, seguida da possibilidade de aplicação para captura de CO₂ e, por fim, utilização na fabricação de geopolímeros (Wibowo *et al.*, 2024).

Oportunidades de Inovação:

3.4.3 Desenvolvimento de novos materiais:

Existe um potencial significativo para o desenvolvimento de materiais inovadores na construção civil que incorporem cinzas, especialmente em aplicações que exigem misturas de baixa umidade, como gesso, tijolos, telhas, asfalto, blocos de pavimentação, subleito de

rodovias e materiais secundários à base de cimento (Abdalla *et al.*, 2024; Kishor, 2024; Khandelwal; Kishor, Singh, 2023).

3.4.4 Incentivos de política e mercado

Governos e partes interessadas do setor podem desempenhar um papel fundamental na condução da adoção de práticas de valorização, oferecendo incentivos políticos, subsídios ou criando mercados para produtos derivados de cinzas.

Desafios a superar:

3.4.5 Escalabilidade das técnicas de valorização

Embora os estudos em escala laboratorial sejam promissores, há uma lacuna na pesquisa sobre a escalabilidade e viabilidade comercial das técnicas de valorização de cinzas, já que as cinzas podem ser oriundas da combustão de diferentes matérias-primas, como cascas de arroz, palha de cana e do milho, sabugo de milho, palmiste, casca de semente de nim, madeira, casca de coco, dentre outras (Fadele; Otieno, 2024; Charime *et al.*, 2024), é difícil encontrar condições ideais em termos de percentual de cinzas empregado como substitutos aos ligantes, frente as variações na composição química que se alteram conforme o solo, cultura, região e suas condições climáticas (Amin *et al.*, 2022; Abdalla *et al.*, 2024).

3.4.6 Viabilidade Econômica

A relação custo-benefício dos processos de valorização continua sendo um desafio, especialmente em comparação com os métodos convencionais de descarte. O desenvolvimento de tecnologias competitivas em termos de custo é crucial para uma adoção mais ampla, mas pouco estudos têm se aprofundado nesse ponto. Contudo, dentre os aspectos que necessitam ser ponderados, tem-se: estimativas de eletricidade consumida e a potência do equipamento que irá realizar o tratamento térmico, o tempo requerido de tratamento, além da taxa de manutenção desse equipamento (Allende; Tuladhar; Jacob, 2024).

3.4.7 Percepção e aceitação do público:

Ganhar a aceitação pública de produtos feitos a partir de resíduos industriais é outro desafio significativo, principalmente nos setores agrícola e de construção. Por outro lado, o setor sucroalcooleiro tem deixado uma impressão positiva em termos de empregabilidade e distribuição de energia, dada a geração de novas oportunidades de emprego e a disponibilidade elétrica, especialmente, em áreas rurais onde as usinas se localizam (Abdalla *et al.*, 2024).

4 CONCLUSÃO

A análise revelou que cinzas oriundas da queima de bagaço de cana-de-açúcar têm um potencial considerável para aplicações agrícolas e para a incorporação em materiais de construção, como cimento e tijolos. Contudo, desafios como a variabilidade na composição dos resíduos e questões econômicas e ambientais precisam ser enfrentadas para realizar a maximização de escala na indústria de construção civil. A valorização desses resíduos pode promover uma economia circular mais sustentável para a indústria sucroalcooleira. Todavia, ainda se destaca a necessidade de futuras investigações para otimizar processos e avaliar os efeitos a longo prazo dessas práticas.

REFERÊNCIAS

ABDALLA, T. A. *et al.* Strength, durability, and microstructure properties of concrete containing bagasse ash – A review of 15 years of perspectives, progress and future insights.

Results in Engineering, v. 21, p. 101764, 2024.

ALLENDE, S.; TULADHAR, R.; JACOB, M. V. Sugarcane bagasse-derived carbon for partial replacement of cementitious material in concrete. **Materials Circular Economy**, v. 6, n. 3, 2024.

AMIN, M. N. *et al.* Mechanical and microstructural performance of concrete containing high-volume of bagasse ash and silica fume. **Scientific Reports**, v. 12, p. 5719, 2022.

ANTONIO, M. M.; FAEZ, R. Unlocking agronutrient resources: sorption strategies for sugar-energy industry waste. **Journal of Environmental Management**, v. 356, p. 120634, 2024.

BAYAPUREDDY, Y.; MUNIRAJ, K.; MUTUKURU, M. R. G. Enhancing material properties of agro-industrial waste sugarcane bagasse ash—Way towards sustainable development. **Sustainable Futures**, v. 7, p. 100154, 2024.

CHARIME, R. *et al.* Mechanical, durability and microstructure properties of eco-friendly sand concrete incorporating cane ash. **Journal of Building Engineering**, v. 86, p. 108801, 2024.

FADELE, O.; OTIENO, M. Utilisation of supplementary cementitious materials from agricultural wastes: a review. **Construction Materials**, v. 175, n. 2, p. 65-71, 2022.

FRANÇA, S. *et al.* Feasibility of using sugar cane bagasse ash in partial replacement of portland cement clinker. **Buildings**, v. 13, n. 4, p. 843, 2023.

GAO, W. *et al.* Efficient utilization of multi-source solid waste to prepare the novel core-shell structured lightweight aggregates and its immobilization for volatile heavy metals. **Journal of Building Engineering**, v. 71, p. 106549, 2023.

GBADEYAN, O. J. *et al.* Waste-to-energy: the recycling and reuse of sugar industry waste for different value-added products such as bioenergy in selected countries – a critical review. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, 2024, <https://doi.org/10.1002/bbb.2579>.

GETUNO, D. N.; MBUVI, H. M.; CHANGAMU, E. O. Adsorption of Pb^{2+} and Cd^{2+} ions from water by sugarcane bagasse-based adsorbents. **Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology**, v. 15, n. 9, p. 47-59, 2021.

ISHAQ, M. *et al.* Characterization and nutrients status of fly ash produced from rice and sugar industries. **Arbor**, v. 11, n. 3, p. 21-27, 2024.

JHA, P.; SACHAN, A. K.; SINGH, R. P. Agro-waste sugarcane bagasse ash (ScBA) as partial replacement of binder material in concrete. **Materials Today: Proceedings**, v. 44, p. 419-427, 2021.

JIAN, S. *et al.* Investigation of sulfate on the migration/solidification mechanism and control of cadmium during sintering in lightweight aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 352, p. 129041, 2022.

JITTIN, V.; BAHURUDEEN, A. Production of cleaner binders by reusing agricultural by-

products: An approach towards zero cement concrete for sustainable future infrastructure. **Journal of Cleaner Production**, v. 451, p. 141990, 2024.

KALPANA, M.; VENKATESAN, G.; PADMA, S. Analysing the effectiveness of municipal wastewater sludge, bagasse ash, rice husk ash and plastic waste powder for manufacturing bricks. **Asian Journal of Water, Environment and Pollution**, v. 21, n. 1, p. 71-79, 2024.

KEAWKUMAY, C. *et al.* Extraction of silica from sugarcane bagasse ash and its utilization in zeolite 4A synthesis for CO₂ adsorption. **RSC Advances**, v. 14, p. 19472-19482, 2024.

KHANDELWAL, A.; KISHOR, R.; SINGH, V. P. Sustainable utilization of sugarcane bagasse ash in highway subgrade- a critical review. **Materials Today: Proceedings**, v 78, p. 114-119, 2023.

KISHOR, R. Evaluation of amended black cotton soil using bagasse ash with liquid alkaline activator for sustainable pavement subgrade performance. **Sugar Tech**, 2024, <https://doi.org/10.1007/s12355-024-01450-9>.

LONG, Z.; ZHANG, Z.; ZHANG, H. Nondestructive measurement of the capillary water absorption coefficient and water transport behaviors of porous building materials by using single-sided NMR. **Construction and Building Materials**, v. 414, p. 134819, 2024.

MAMIDI, V.; KATAKOJWALA, R.; MOHAN, S. V. Amorphous nano-silica from sugarcane bagasse ash – process optimization, characterization, and sustainability analysis. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 2024, <https://doi.org/10.1007/s13399-024-05548-8>.

PALASKAR, S.; VESMAWALA, M. Effect of agricultural and industrial waste materials on strength and durability of concrete. **Materials Today: Proceedings**, In press, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024.04.019>.

PATEL, H. Environmental valorisation of bagasse fly ash: a review. **RSC Advances**, v. 52, p. 31611-31621, 2020.

RIHAN, M. A. L. *et al.* Effect of sugarcane bagasse ash addition and curing temperature on the mechanical properties and microstructure of fly ash-based geopolymer concrete. **Open Ceramics**, v. 19, p. 100616, 2024.

SANTHOSH, K. G.; SUBHANI, SK. M.; BAHURUDEEN, A. Exploring sustainable alternatives: quarry dust and sugar cane bagasse ash in sodium and potassium-based alkali-activated binders for enhanced mechanical and durability properties. **Journal of Sustainable Cement-Based Materials**, p. 1-14, 2024, <https://doi.org/10.1080/21650373.2024.2389412>.

WANG, J.; DONG, H. Preparation and application of multi-source solid wastes as clean aggregates: A comprehensive review. **Construction and Building Materials**, v. 418, p. 135414, 2024.

WIBOWO, H. *et al.* Application of sugarcane bagasse fly ash for syrup decolorization through activated carbon production and the circular utilization of its waste. **Biomass and Bioenergy**, v. 182, p. 107066, 2024.