

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS – *campus* Sorocaba
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PLANEJAMENTO E USO DE
RECURSOS RENOVÁVEIS

RAFAELA DA SILVA RESENDE

**CINZAS DE CALDEIRA: REVISÃO, CARACTERIZAÇÃO E
OPORTUNIDADES DE APROVEITAMENTO**

SOROCABA

2025

RAFAELA DA SILVA RESENDE

**CINZAS DE CALDEIRA: REVISÃO, CARACTERIZAÇÃO E
OPORTUNIDADES DE APROVEITAMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis da Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, como requisito para obtenção do título de Mestre em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis.

Orientação: Prof. Dr Fábio Minoru Yamaji

SOROCABA

2025

Resende., Rafaela da Silva

Cinzas de caldeira: revisão, caracterização e oportunidades de aproveitamento / Rafaela da Silva Resende. -- 2025.
111f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba
Orientador (a): Fábio Minoru Yamaji
Banca Examinadora: João Lúcio de Barros, Diego Aleixo da Silva
Bibliografia

1. Gestão de Resíduos. I. Resende., Rafaela da Silva. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano -
CRB/8 6979



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências e Tecnologias Para a Sustentabilidade
Programa de Pós-Graduação em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Rafaela da Silva Resende, realizada em 10/03/2025.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Fábio Minoru Yamaji (UFSCar)

Prof. Dr. João Lúcio de Barros (IFSP)

Prof. Dr. Diego Aleixo da Silva (ComBio)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis.

À minha família pelo incentivo, à memória de meu tio e de minha avó.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar força nos momentos de dificuldade, paciência nos dias turbulentos e sabedoria para seguir em frente.

Aos meus pais, pelo amor incondicional, pelo suporte em cada passo da minha jornada e por nunca medirem esforços para que eu pudesse alcançar meus sonhos. Sem vocês, nada disso seria possível. Aos meus irmãos, pelo carinho, incentivo e por me lembrarem sempre de onde vim e para onde quero ir.

Aos meus amigos Monique, Ana, Raphael e Caroline, que, mesmo quando a distância se fez presente, continuaram sendo meu suporte e minha base. Nossa amizade é um presente que levo comigo todos os dias. À minha sobrinha Maria Alice e ao meu afilhado Yasuke, que, com sua pureza e alegria, trouxeram leveza aos momentos mais difíceis e me lembraram do valor das pequenas coisas.

Ao meu amor, Luiz, por estar sempre ao meu lado, me apoiar nos momentos difíceis, comemorar comigo as conquistas e, acima de tudo, por me entender e me incentivar a seguir em frente.

Ao Laboratório de Biomassa e Bioenergia e aos amigos que nele encontrei, especialmente Anna Ju e Texugo, por compartilharem comigo não apenas essa jornada acadêmica, mas também conhecimentos, desafios e aprendizados. Obrigada por cada conversa, troca de experiências e apoio ao longo do caminho. A convivência com vocês tornou essa trajetória mais rica e significativa.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fábio Yamaji, por toda a confiança, incentivo e orientação. Sua dedicação e entusiasmo foram fundamentais para que eu encontrasse meu caminho dentro da pesquisa. Obrigada por acreditar em mim e me inspirar a sempre buscar mais.

Este trabalho é fruto de um esforço coletivo, e sou imensamente grata por ter pessoas tão especiais ao meu lado. Obrigada a todos que, de alguma forma, fizeram parte dessa caminhada.

RESUMO

A crescente geração de cinzas derivadas da combustão de biomassa representa um desafio tanto ambiental quanto industrial, demandando estratégias para sua gestão e aproveitamento. Este estudo investigou suas características físico-químicas, fontes de origem e potenciais aplicações, com o objetivo de promover alternativas sustentáveis para seu uso. Para isso, foi conduzida uma revisão da literatura sobre a influência das tecnologias de combustão na composição das cinzas e suas implicações ambientais. Além disso, uma análise bibliométrica foi realizada para mapear o avanço da produção científica na área, identificando tendências, principais pesquisadores e periódicos de destaque. A partir da revisão sistemática, verificou-se que a maior parte dos estudos foca na utilização das cinzas volantes em materiais de construção, enquanto outras possibilidades, como sua aplicação agrícola e uso em processos industriais, ainda são menos exploradas. Paralelamente, a caracterização experimental de diferentes tipos de cinzas de biomassa permitiu avaliar suas propriedades físicas e químicas, diferenciando-as entre cinzas volantes e de fundo. Os resultados mostraram uma grande variabilidade nos parâmetros analisados, com as cinzas volantes apresentando menor densidade (435,9 kg/m³) e umidade (6%, base úmida), enquanto as cinzas de fundo apresentaram maior teor de carbono residual (41,23%), sugerindo combustão incompleta. A composição química revelou concentrações significativas de sílica, fósforo e potássio, destacando seu potencial para usos agrícolas e industriais, embora a presença de metais pesados (Mn e Zn) possa representar um risco ambiental. A análise bibliométrica indicou um crescimento significativo da pesquisa sobre cinzas nos últimos anos, com maior concentração de estudos voltados para a engenharia e ciências dos materiais, enquanto temas como impacto ambiental, viabilidade econômica e regulamentação ainda carecem de maior aprofundamento. Além disso, verificou-se que a maioria dos experimentos é conduzida em escala laboratorial, sem considerar desafios operacionais para sua implementação em larga escala. Concluiu-se que, apesar do avanço no conhecimento sobre as cinzas de biomassa, ainda há lacunas que precisam ser exploradas para garantir sua utilização segura e eficiente. Investimentos em pesquisas voltadas para a normatização, análise de ciclo de vida e impactos ambientais são fundamentais para ampliar suas possibilidades de reaproveitamento e reduzir os danos causados pelo descarte inadequado.

Palavras-chave: Gestão Ambiental; Economia Circular; Sustentabilidade Industrial; Valorização de Resíduos.

ABSTRACT

The increasing generation of ashes derived from biomass combustion presents both environmental and industrial challenges, requiring strategies for their management and reuse. This study investigated their physicochemical characteristics, sources, and potential applications to promote sustainable alternatives. A literature review was conducted on the influence of combustion technologies on ash composition and its environmental implications. Additionally, a bibliometric analysis was performed to map the progress of scientific production in the field, identifying trends, leading researchers, and prominent journals. The systematic review revealed that most studies focus on the use of fly ash in construction materials, while other possibilities, such as agricultural applications and industrial processes, remain less explored. Simultaneously, the experimental characterization of different types of biomass ashes enabled the assessment of their physical and chemical properties, distinguishing between fly ash and bottom ash. The results showed significant variability in the analyzed parameters, with fly ash exhibiting lower density (435.9 kg/m^3) and moisture content (6%, wet basis), while bottom ash had a higher residual carbon content (41.23%), suggesting incomplete combustion. The chemical composition revealed significant concentrations of silica, phosphorus, and potassium, highlighting their potential for agricultural and industrial applications, although the presence of heavy metals (Mn and Zn) may pose environmental risks. The bibliometric analysis indicated significant growth in research on ashes in recent years, with a higher concentration of studies focused on engineering and materials science, while topics such as environmental impact, economic feasibility, and regulation still require further exploration. Moreover, most experiments are conducted on a laboratory scale, without considering operational challenges for large-scale implementation. In conclusion, despite advancements in knowledge about biomass ashes, gaps remain that need to be addressed to ensure their safe and efficient use. Investments in research focused on standardization, life cycle analysis, and environmental impacts are essential to expand reuse possibilities and mitigate the damages caused by improper disposal.

Keywords: Environmental Management; Circular Economy; Industrial Sustainability; Waste Valorization.

APRESENTAÇÃO DOS CAPÍTULOS

Este estudo foi estruturado em três capítulos para abordar diferentes aspectos das cinzas, desde a revisão teórica até a caracterização experimental.

O Capítulo I explorou os fundamentos sobre biomassa, a importância de sua utilização como fonte de energia renovável e os impactos ambientais associados à geração de cinzas. Além disso, foram discutidas as tecnologias de combustão que influenciam suas propriedades e as possibilidades de reaproveitamento dentro do conceito de economia circular. Aplicações potenciais foram identificadas, incluindo o uso das cinzas na construção civil, agricultura e indústria de materiais.

O Capítulo II apresentou uma análise bibliométrica e sistemática sobre o tema, avaliando a produção científica global. A revisão bibliométrica identificou tendências, autores e publicações mais relevantes, revelando um crescimento expressivo das pesquisas entre 2016 e 2022, com um foco predominante nas aplicações das cinzas na construção civil. A análise sistemática complementou esses achados, destacando o uso das cinzas como adsorventes na remoção de poluentes e na produção de geopolímeros. Os resultados indicam que a pesquisa sobre cinzas tem caráter multidisciplinar e crescente relevância, sendo essencial para o desenvolvimento de novas aplicações sustentáveis.

O Capítulo III abordou a caracterização experimental de oito tipos de cinzas, divididas entre cinzas volantes e cinzas de fundo, com o objetivo de avaliar seu potencial de reaproveitamento. Foram analisadas suas propriedades físicas e químicas, evidenciando que as cinzas volantes apresentam partículas finas, baixa umidade e maior teor de voláteis, enquanto as cinzas de fundo possuem partículas maiores, maior umidade e elevado teor de carbono fixo, indicando combustão incompleta. A análise química revelou altas concentrações de sílica, fósforo e potássio, sugerindo potencial uso agrícola. O estudo também indicou que algumas amostras possuem poder calorífico significativo, reforçando o potencial energético das cinzas. Esses resultados confirmam a viabilidade do reaproveitamento das cinzas em setores industriais e agrícolas, alinhando-se aos princípios da economia circular.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Classificação da biomassa.....	19
Figura 2. Configurações de combustão em leito fluidizado	21
Figura 3. Configurações de combustão em leito fixo.....	22
Figura 4. Diagrama esquemático da combustão em leito fluidizado pressurizado	23
Figura 5. Palavras-chave mais citadas e suas conexões	39
Figura 6. Quantidade de Publicação por ano dos últimos 30 anos	40
Figura 7. Colaboração entre os países	41
Figura 8. Principais autores	45
Figura 9. Trabalhos mais citados entre 1995 e 2025	46
Figura 10. Cinzas das caldeiras	73
Figura 11. Granulometria das cinzas	80
Figura 12. Imagens de MEV das amostras	82
Figura 13. EDS das cinzas.....	89
Figura 14. EDS das cinzas da análise imediata	89
Figura 15. Espectroscopia de infravermelho	92

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1. Composição química comuns em cinzas	26
Tabela 2 Critérios para busca sistematizada.	37
Tabela 3. Porcentagem de publicação por área de pesquisa	42
Tabela 4. Porcentagem de publicação por revista.....	44
Tabela 5. Teor de umidade das cinzas	83
Tabela 6. Densidade a granel das cinzas seguido do desvio absoluto da mediana e do teste de Kruskal-Wallis	84
Tabela 7. Valores médios seguido do desvio absoluto da mediana e do teste de Kruskal-Wallis.....	85
Tabela 8. Poder calorífico superior das cinzas seguido do desvio absoluto da mediana e do teste de Kruskal-Wallis.....	88
Tabela 9. pH das cinzas seguido do desvio absoluto da mediana e do teste de Kruskal-Wallis.....	93
Quadro 1. Trabalhos mais relevantes.....	47
Quadro 2. Artigos mais relevantes e sua categoria segundo a Web of Science.....	48
Quadro 3. Aspectos abordados nos artigos selecionados para a revisão sistemática	50
Quadro 4. Agrupamento dos trabalhos para revisão sistemática	52
Quadro 5. Metodologia aplicada nos trabalhos	60
Quadro 6. Metodologia aplicada nos trabalhos	62
Quadro 7. Tipo de cinzas utilizadas por Tran et al. (2021).....	63
Quadro 8. Identificação das cinzas	73
Quadro 9. Sugestões de aplicação das cinzas de acordo com suas características.....	97

SUMÁRIO

1. CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
1.1 INTRODUÇÃO.....	17
1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
1.2.1 Energia da biomassa.....	18
1.2.2 Tecnologias de sistemas de combustão.....	20
1.2.3 Tipos e classificações de cinzas.....	23
1.2.4 Propriedades físicas e químicas.....	25
1.2.5 Desafios e Oportunidades.....	27
1.3 CONCLUSÃO.....	29
1.4 REFERÊNCIAS.....	29
2. CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOMÉTRICA E SISTEMÁTICA.....	34
2.1 INTRODUÇÃO.....	36
2.2 METODOLOGIA.....	37
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
2.3.1 Revisão Bibliométrica.....	38
2.3.1.1 Palavras-chave.....	38
2.3.1.2 Quantidade de publicações por ano.....	40
2.3.1.3 Quantidade de publicação por país.....	41
2.3.1.4 Principais áreas de pesquisa.....	42
2.3.1.5 Principais Revistas.....	43
2.3.1.6 Principais autores, coautores e cocitações.....	44
2.3.2 Revisão Sistemática.....	48
2.3.2.1 Engenharia e Sustentabilidade.....	53
2.3.2.1.1 Filtro de Elementos.....	53
2.3.2.1.2 Engenharia Civil e Materiais de Construção.....	54

2.3.2.1.3 Zeolitização	56
2.3.2.2 Tecnologia de Construção	57
2.3.2.2.1 Propriedades e Aplicação de Geopolímeros.....	57
2.3.2.2.2 Influência das Cinzas em Materiais de Construção	59
2.3.2 Lacunas de pesquisa.....	64
2.3.2.1 Revisão bibliométrica.....	64
2.3.2.2 Revisão sistemática	65
2.4 CONCLUSÃO	66
2.5 REFERÊNCIAS.....	67
3. CAPÍTULO III – CARACTERIZAÇÃO DAS CINZAS E INDICAÇÕES DE USO	70
3.1 INTRODUÇÃO	72
3.2 METODOLOGIA	73
3.2.1 Distribuição granulométrica.....	74
3.2.2 Teor de umidade	74
3.2.3 Densidade a granel	75
3.2.4 Análise imediata	75
3.2.5 Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX)	77
3.2.6 MEV/EDS.....	77
3.2.7 FTIR.....	77
3.2.8 Poder calorífico superior	78
3.2.9 Determinação do pH.....	78
3.2.10 Análise estatística	79
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	79
3.3.1 Distribuição granulométrica.....	79
3.3.2 Teor de umidade	83
3.3.3 Densidade a granel	84

3.3.4 Análise imediata e poder calorífico superior.....	85
3.3.6 EDS e FRX.....	88
3.3.7 FTIR.....	92
3.3.8 Determinação do pH.....	93
3.3.9 Aplicações potenciais.....	95
3.4 CONCLUSÃO.....	98
3.5 REFERÊNCIAS.....	99
4. CONCLUSÃO FINAL.....	105
5. APÊNDICES.....	106

1. CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

RESUMO

A geração de cinzas resultantes da combustão de biomassa tem sido um desafio ambiental e industrial, devido ao grande volume produzido e à necessidade de gestão adequada. O presente estudo abordou a composição, classificação e as propriedades físico-químicas das cinzas, bem como as oportunidades de aproveitamento alinhadas aos princípios da economia circular. A revisão bibliográfica explorou a importância da biomassa como fonte de energia renovável, o impacto ambiental das cinzas e as tecnologias de combustão que influenciam suas características. A compreensão dessas cinzas permitiu identificar aplicações sustentáveis, como na construção civil, agricultura e indústria de materiais, reduzindo a disposição inadequada e os efeitos negativos ao meio ambiente. Dessa forma, este capítulo contribuiu para a ampliação do conhecimento sobre a utilização das cinzas.

Palavras-chave: Bioenergia; Biomassa; Gestão de Resíduos.

ABSTRACT

The generation of ash resulting from biomass combustion has posed both environmental and industrial challenges due to the large volume produced and the need for proper management. This study addressed the composition, classification, and physicochemical properties of ash, as well as utilization opportunities aligned with the principles of the circular economy. The literature review explored the importance of biomass as a renewable energy source, the environmental impact of ash, and the combustion technologies that influence its characteristics. Understanding these ashes enabled the identification of sustainable applications, such as in civil construction, agriculture, and the materials industry, reducing improper disposal and negative environmental impacts. Thus, this chapter contributed to expanding knowledge on ash utilization.

Keywords: Bioenergy; Biomass; Waste Management.

1.1 INTRODUÇÃO

Os problemas associados às cinzas começaram a surgir com o aumento da industrialização e da queima de combustíveis fósseis, como carvão mineral e petróleo, durante o século XIX. À medida que a demanda por energia crescia, especialmente com a Revolução Industrial, as usinas termelétricas e outras instalações industriais passaram a gerar grandes volumes de cinzas como subproduto da combustão (Gabrielli *et al.*, 2020; Životić *et al.*, 2012).

Essas cinzas, muitas vezes consideradas resíduos indesejáveis, foram inicialmente descartadas de maneira inadequada, lançadas em rios, lagos, e em áreas de terra desocupada. Esse descarte indiscriminado resultou em sérios problemas ambientais, como a contaminação do solo, da água e do ar, além de impactos negativos na saúde humana e na vida selvagem (Gabrielli *et al.*, 2020; Životić *et al.*, 2012).

Desde então, a conscientização sobre os impactos ambientais negativos das cinzas aumentou, levando a regulamentação mais rígida e esforços para desenvolver métodos de gerenciamento mais sustentáveis. No entanto, os problemas relacionados às cinzas continuam a ser uma preocupação, especialmente com o crescente volume de resíduos gerados pela expansão das indústrias de energia e manufatura (Yin *et al.*, 2018).

Devido à grande produção de cinzas no setor energético, a ideia de aproveitamento dessas cinzas na indústria está em constante aperfeiçoamento. O desenvolvimento das cinzas como matéria-prima é limitado pelas restrições e regulamentações, por isso elas são descartadas em grandes quantidades em aterros (Baran *et al.*, 2023). Portanto, é crucial estudar as melhores maneiras de utilizar cinzas de forma eficiente, não só para mitigar os impactos ambientais negativos, mas também para aproveitar seu potencial como recurso valioso.

A sustentabilidade e a ideia de uma economia circular visam reduzir ao máximo a quantidade de recursos naturais utilizados, substituindo-os por resíduos (Baran *et al.*, 2023). Compreender como aproveitar as cinzas pode contribuir significativamente para a gestão de resíduos, redução de impacto ambiental e até mesmo para a inovação tecnológica e científica em diversas áreas. Isso pode incluir pesquisas sobre novas aplicações, técnicas de tratamento e purificação, bem como a determinação das

propriedades físicas, químicas e biológicas das cinzas para direcionar seu uso de forma mais eficaz e sustentável.

Este capítulo teve como objetivo fornecer uma introdução ao tema das cinzas resultantes da combustão de biomassa, destacando seu impacto ambiental, desafios na gestão e oportunidades para aproveitamento. Através de uma revisão bibliográfica, buscou-se compreender os conceitos fundamentais relacionados às cinzas, suas propriedades químicas e biológicas, bem como explorar abordagens ecológicas para sua utilização, alinhados aos princípios da economia circular.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.2.1 Energia da biomassa

No incessante panorama da necessidade energética global, a presença de energia é tão onipresente quanto essencial. Ela permeia todas as facetas significativas da vida moderna, impulsionando a indústria, o transporte e uma infinidade de outras esferas. O desenvolvimento econômico de uma nação está intrinsecamente ligado ao seu consumo de energia, uma correlação direta evidenciada pela reação entre a renda per capita nacional e a demanda energética (Yadav *et al.*, 2022).

À medida que a globalização avança, surge a necessidade premente de satisfazer a crescente demanda por energia, impulsionada pelo aumento populacional e a expansão de setores como agricultura e transporte (Yadav *et al.*, 2022). Nesse cenário, a bioenergia surge como uma alternativa para atender a essa demanda crescente de forma mais sustentável. A biomassa, principal fonte de bioenergia, tem ganhado destaque como um recurso renovável capaz de reduzir a dependência de combustíveis fósseis e mitigar impactos ambientais. No entanto, seu aproveitamento eficiente depende de fatores como disponibilidade de matéria-prima, infraestrutura de conversão e impactos na cadeia produtiva (Alves *et al.*, 2019).

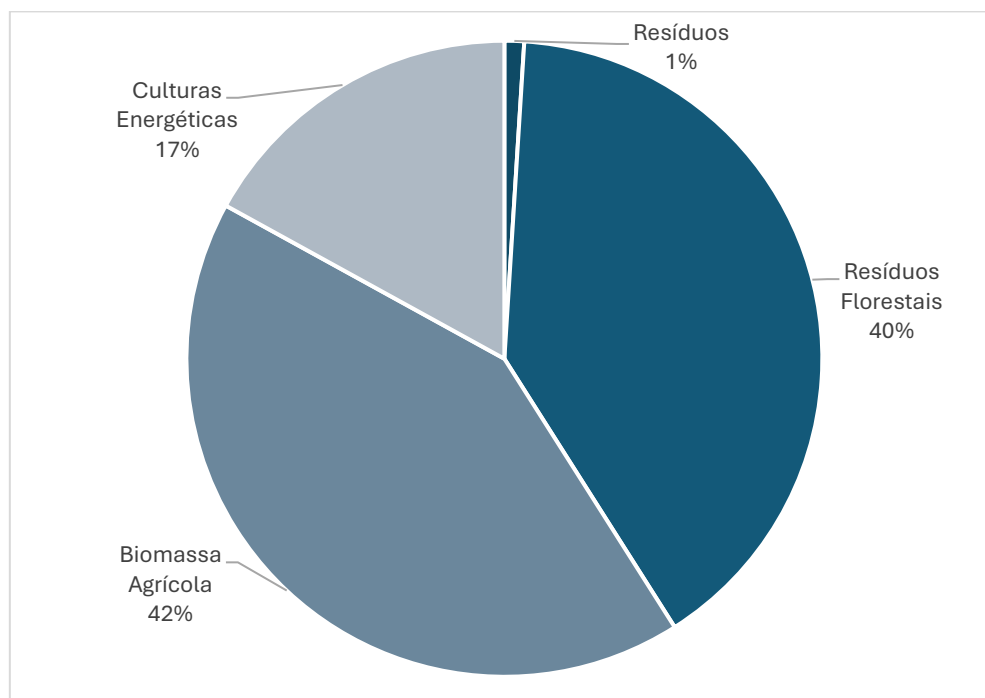
Conforme a produção, coleta, colheita e mobilização de recursos para a bioenergia se expandem, os riscos de impactos negativos à sustentabilidade tendem a aumentar. Esse desafio se agrava especialmente em regiões onde a demanda por biomassa é elevada, mas a disponibilidade de recursos é limitada (Welfle, 2017).

A sustentabilidade da bioenergia envolve um equilíbrio entre riscos e benefícios, sendo um processo contínuo de compensações. Todo projeto de bioenergia traz impactos positivos e desafios, e analisá-los em diferentes escalas ajuda a otimizar seus benefícios e mitigar possíveis riscos. Explorar essas relações pode fortalecer seu papel como uma estratégia global prioritária para promover o desenvolvimento sustentável (Welfle e Röder, 2022).

A biomassa desempenha um papel significativo na matriz energética global. Atualmente, as fontes renováveis representam aproximadamente 14% da matriz energética mundial, com a biomassa contribuindo com cerca de 9,73% (Empresa de Pesquisa Energética, 2025). No Brasil, em 2023, a geração de energia a partir da biomassa atingiu um recorde, correspondendo a 4,6% de toda a demanda de energia consumida no país (Agência GOV, 2025). Atualmente, o Brasil possui cerca de 630 usinas que utilizam biomassa, totalizando uma capacidade instalada de 16,7 gigawatts (Ministério de Minas e Energia, 2025).

A biomassa, excluindo os resíduos, pode ser classificada em três grupos principais, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1. Classificação da biomassa



Fonte: adaptado de Grau *et al.* (2015)

O primeiro grupo consiste em resíduos florestais e de madeira, representando aproximadamente um terço das árvores e 40% da biomassa total disponível. O segundo grupo abrange a biomassa agrícola e resíduos, compostos por plantas e materiais residuais de origem animal. Por fim, as culturas energéticas de biomassa, que são dedicadas exclusivamente à produção de energia, apresentando 17% da biomassa total (Grau *et al.*, 2015).

As caldeiras de biomassas surgem como um meio eficiente de aproveitar a energia contida nesses recursos naturais, proporcionando um aumento significativo na eficiência energética, especialmente em operações de grande escala. No entanto, a queima da biomassa nessas caldeiras resulta na produção de grandes volumes de cinzas (James *et al.*, 2012a). Estima-se que cerca de 3 Gt/ano de biomassa seja usada globalmente para produção de energia (menos do que a estimativa anterior de 7 Gt/ano), e a maioria (>90%) é usada como combustível sólido, gerando ~170 Mt de cinzas a cada ano (Zhai, Burke e Stewart, 2021a).

Com o crescente interesse na produção de bioenergia, antecipa-se um aumento proporcional nos volumes desses subprodutos, apresentando desafios significativos em sua gestão eficiente. O contínuo aumento desses volumes não só implica na redução de espaço disponível para o armazenamento das cinzas, mas também acarreta custos elevados associados ao seu manuseio, transporte e distribuição (James *et al.*, 2012a).

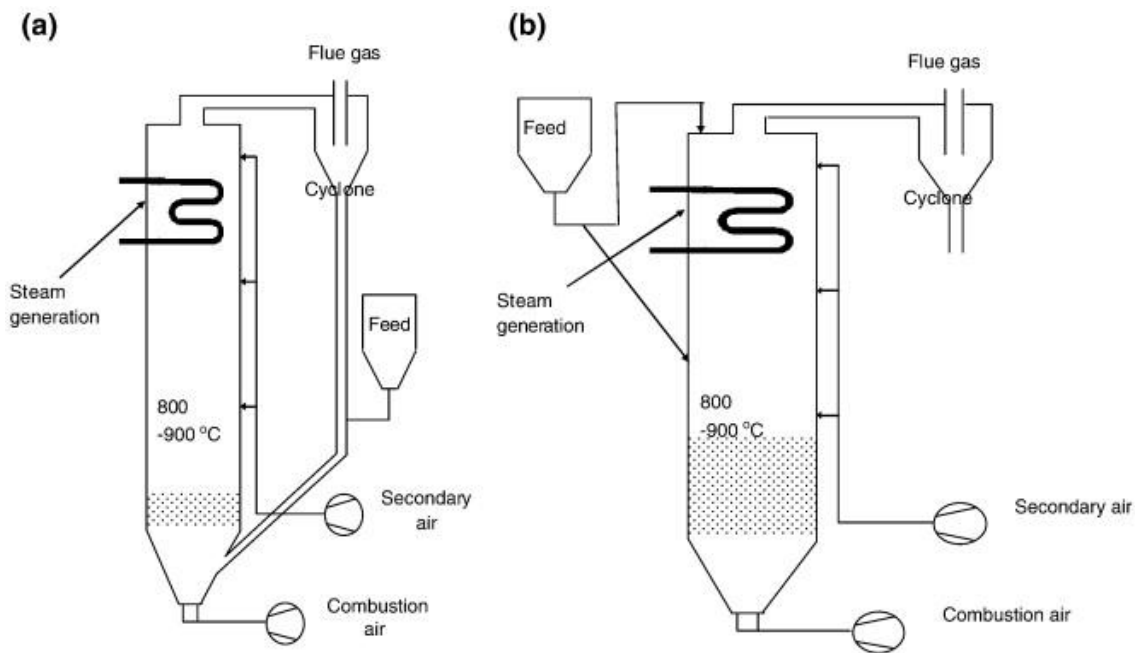
1.2.2 Tecnologias de sistemas de combustão

Existem diversas tecnologias de sistemas de combustão, cada uma baseada em diferentes características de projeto e configuração do queimador, como a capacidade da unidade, a temperatura do leito, a densidade do leito, o tipo de material utilizado no leito, entre outros (Munawar *et al.*, 2021).

Dentre as tecnologias de combustão disponíveis, destaca-se a combustão em leito fluidizado, reconhecida por sua capacidade de lidar com uma variedade de combustíveis, incluindo aqueles com alto teor de cinzas e poder calorífico útil mais baixo (James *et al.*, 2012a). Nessa tecnologia (Figura 2), o leito usa um material inerte (geralmente, areia, calcário), que está movendo o fluxo de ar para cima. Esse movimento de ar ascendente

faz com que as partículas do leito se movam de forma caótica, criando uma mistura que facilita a troca de calor e promove a combustão eficiente da biomassa (Munawar *et al.*, 2021).

Figura 2. Configurações de combustão em leito fluidizado



(a) Caldeira de leito fluidizado circulante (b) Caldeira de leito fluidizado borbulhante

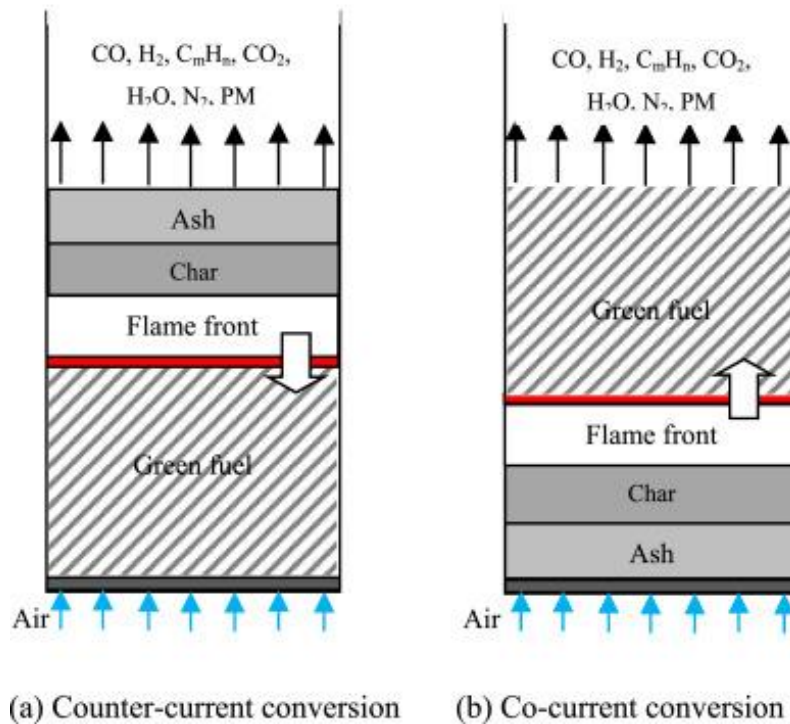
Fonte: (Khan *et al.*, 2009)

Existem diferentes configurações de leito fluidizado, sendo as mais comuns o leito circulante (Figura 2a) e o leito fluidizado borbulhante (Figura 2b), que são usados dependendo das necessidades do processo e das características do combustível. As cinzas nos sistemas de leito fluidizado saem principalmente por meio dos gases de combustão, sendo capturadas por ciclones e outros dispositivos de separação. As cinzas mais pesadas permanecem no leito (Khan *et al.*, 2009; Munawar *et al.*, 2021).

Na tecnologia de combustão em leito fixo, as técnicas de grelha fixa e móvel são mais comuns, o combustível sólido é queimado sobre a grelha sem a fluidização do material. As extensões co-corrente e contracorrente são praticadas conforme apresentado na Figura 3. Na configuração contracorrente (Figura 3a) a combustão começa de cima e se propaga para baixo, resultando em temperaturas mais elevadas e menor formação de

alcatrão. Na configuração co-corrente (Figura 3b) a chama e os gases se movem para cima enquanto a combustão começa de baixo. Essa configuração tende a gerar mais alcatrão devido às temperaturas mais baixas (Khodaei *et al.*, 2015; Munawar *et al.*, 2021)

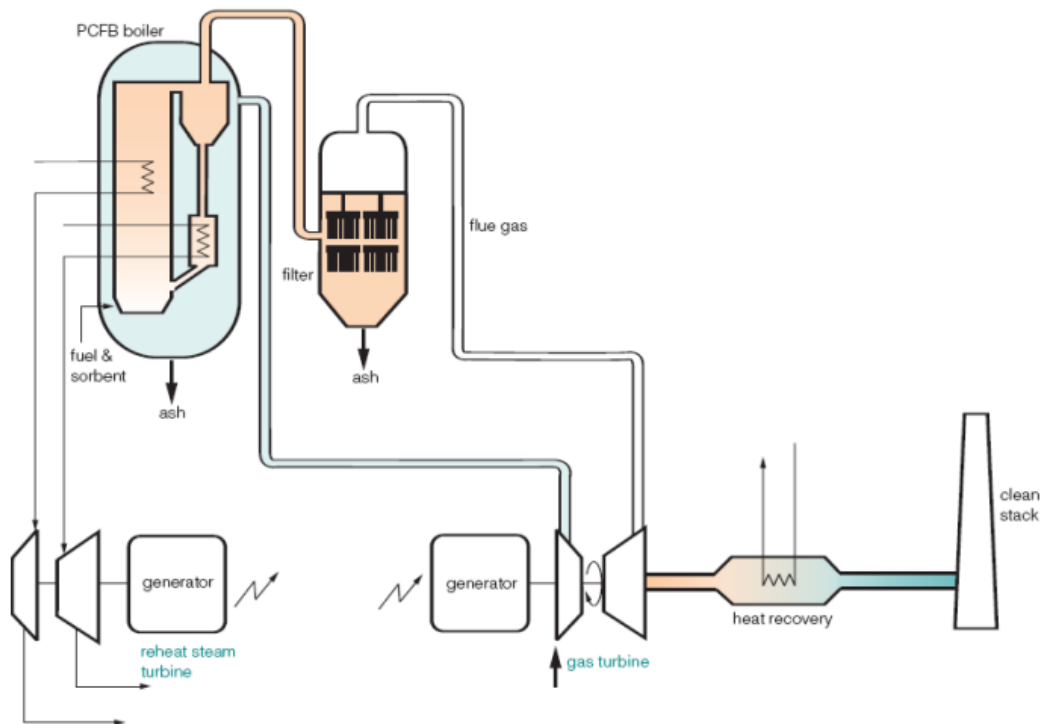
Figura 3. Configurações de combustão em leito fixo



Fonte: (Khodaei *et al.*, 2015)

A combustão em leito fluidizado pressurizado (Figura 4) utiliza um ciclo combinado que integra turbinas a gás e a vapor para maior eficiência energética, podendo atingir até 42%. O combustor e os ciclones de gás quente estão contidos em um vaso de pressão, exigindo alimentação pressurizada de carvão, calcário e ar, bem como um sistema específico para remoção de cinzas. As cinzas resultantes do processo são removidas em dois pontos: uma parte desce diretamente pela base da caldeira, enquanto outra fração é transportada junto com os gases de combustão até o filtro, onde mais cinzas são separadas e descartadas (Munawar *et al.*, 2021; Papaioannou *et al.*, 2012).

Figura 4. Diagrama esquemático da combustão em leito fluidizado pressurizado



Fonte: (Papaioannou *et al.*, 2012)

1.2.3 Tipos e classificações de cinzas

A cinza, resultante da queima completa do combustível, é a fração inorgânica que retém a maior parte dos minerais da biomassa original. Presente de forma integral na estrutura das plantas, a cinza é composta por uma ampla variedade de elementos. Enquanto na madeira ela representa menos de 2%, em materiais agrícolas pode variar de 5% a 10%, chegando a até 30% e 40% em casca de arroz. Produtos derivados de biomassa geram cinzas residuais sólidas, de fundo ou volantes, que apresentam propriedades diversas influenciadas pelo tipo de biomassa, condições de operação e sistema utilizado (James *et al.*, 2012a).

As cinzas de fundo e as cinzas volantes são geralmente os dois tipos de cinzas produzidos e podem variar em propriedades devido aos diferentes tipos de biomassa disponíveis, às condições de operação e ao tipo de sistema utilizado. Altos teores de cinzas reduzem significativamente a produção de energia derivada de uma fonte específica de biomassa (James *et al.*, 2012a).

As cinzas volantes são finas e capturadas no ar durante a queima do combustível, enquanto as cinzas de fundo são densas e formadas na grelha da caldeira. Enquanto as cinzas volantes são esféricas e alcalinas, as cinzas de fundo são maiores e tem propriedades que as tornam úteis em construção civil, como estradas e aterros (Fidanchevski *et al.*, 2021).

Em relação a classificação das cinzas, o Brasil segue regulamentações ambientais e técnicas condicionais da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), além de serem enquadradas na legislação de resíduos sólidos.

A norma ABNT NBR 10004:2004 da classificação de resíduos sólidos categoriza os resíduos, incluindo cinzas, conforme sua periculosidade:

- Classe I – Resíduos Perigosos: Cinzas que contêm metais pesados (como chumbo, cádmio, arsênio, mercúrio), com pH extremo (acima de 12,5 ou abaixo de 2,5) ou substâncias tóxicas que podem representar riscos à saúde e ao meio ambiente. Essas cinzas são desativadas, tratamento específico antes do descarte ou reaproveitamento.
- Classe II-A – Resíduos Não Inertes: Cinzas que podem sofrer reações químicas ou biodegradação, apresentando características como solubilidade ou volatilização. Alguns tipos de cinzas de biomassa podem ser incluídos nessa categoria.
- Classe II-B – Resíduos Inertes: Cinzas que não sofrem reações químicas significativas, não liberam substâncias nocivas e podem ser aproveitadas na construção civil, por exemplo.

As cinzas, principalmente as volantes, são amplamente utilizadas como material de cimento suplementar na produção de concreto e cimento. No Brasil, a principal norma que regulamenta esse uso é a ABNT NBR 12653:2015 de materiais pozolânicos e define os requisitos técnicos para cinzas volantes e outras pozolanas utilizadas na produção de cimento e concreto. A norma especifica critérios físicos e químicos para garantir a reatividade das cinzas e sua adequação como material cimentício.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estabelece diretrizes para a destinação e reaproveitamento de resíduos industriais, incluindo cinzas. Algumas resoluções importantes são:

- CONAMA 313/2002: Regulamenta a utilização de resíduos sólidos industriais como insumos para processos produtivos, incluindo cinzas na fabricação de materiais de construção.
- CONAMA 498/2020: Estabelece critérios para a aplicação de resíduos, como cinzas, na agricultura, considerando sua composição química e possíveis impactos ambientais.

A classificação internacional das cinzas segue diferentes normas, dependendo da região e do setor de aplicação. Nos Estados Unidos, a ASTM C618 define dois tipos principais de cinzas volantes: a Classe F, com baixo teor de cálcio ($\text{CaO} < 10\%$) e alto teor de sílica e alumina, conferindo boas propriedades pozolânicas; e a Classe C, com maior concentração de cálcio ($\text{CaO} > 10\%$), apresentando tantas propriedades pozolânicas quanto cimentícias.

A nível global, a ISO 1171 estabelece métodos para determinação do teor de cinzas em combustíveis sólidos, enquanto a ISO 10694 regula a análise da composição elementar das cinzas, incluindo teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio.

Na Europa, a norma EN 450-1 define critérios de qualidade para a utilização de cinzas volantes na produção de concreto, garantindo desempenho adequado. Além disso, o Regulamento Europeu 2019/1009 estabelece diretrizes para o uso de cinzas na agricultura, avaliando sua composição química e impactos ambientais antes de seu aproveitamento como fertilizante.

1.2.4 Propriedades físicas e químicas

O principal fator que determina a composição físico-química das cinzas é a composição da matéria-prima utilizada no processo de combustão (Bošnjak et al., 2022; Zhai, Burke e Stewart, 2021), as condições operacionais e o tipo de sistema utilizado (James *et al.*, 2012b). Isso implica que o conhecimento detalhado da composição da biomassa e da tecnologia de combustão são necessários para prever com segurança as características das cinzas. Os principais elementos que compõem a cinza (Tabela 1) devem se originar dos elementos presentes na biomassa. Apesar da perda de matéria orgânica, das mudanças de fase no processo de combustão e do fracionamento de

constituintes voláteis entre diferentes frações de cinza, a composição da cinza, em termos de massa, tende a estar diretamente relacionada à composição da biomassa original (Zhai *et al.*, 2021).

Tabela 1. Composição química comuns em cinzas

Tipo de Cinzas	CFA	RP	PA	PT	PM	RH	CA	US	LE	RSU
Na ₂ O	-	0,44	0,14	0,8	-	0,03	5,6	1,92	0,36-5	2,8-31
MgO	1-18	1,6	1,64	1,82	9,1	0,5	6,1	4,06	1,1-3,9	1,5-3,7
Al ₂ O ₃	8-24	1,96	0,09	0,77	2,8	0,37	10,71	9,7	6,1-19	4,2-26
SiO ₂	28-38	11,84	75,38	57,47	44,7	63,77	43,13	40,37	20-41	7-54
K ₂ O	-	1,32	11,95	16,55	19	1,42	9,61	4,17	0,84-3,4	0,88-16
CaO	30-56	35,88	1,6	2,8	13,5	0,44	10,81	23,25	4,7-22	9,1-51
MnO	0,5-2	-	0,27	0,07	-	0,05	-	-	-	-
FeOx	0,5-1	2,94	0,1	0,39	2,4	2,65	3,96	11,85	-	-

CFA: cinzas de forno alto; RP: resíduos de pinheiro; PA: Palha de arroz; PT: palha de trigo; PM: palha de milho; RH: casca de arroz; CA: casca de amendoim, US: cinzas de usina de biomassa, LE: lodo de esgoto; RSU: resíduos sólidos urbanos.

Fonte: adaptado de Yin *et al.* (2021) e Zhai *et al.* (2021)

A densidade das cinzas de biomassa varia entre 150-1300 kg/m³, mas geralmente está na faixa de 230-770 kg/m³. O tamanho das partículas varia entre 150-250 µm. A condutividade elétrica das cinzas varia de 17,4 a 50,3 mS/cm. A velocidade de liberação de nutrientes depende do tamanho das partículas, com cinzas de madeira de granulometria mais fina liberando nutrientes mais rapidamente. O pH das cinzas pode variar de 9 a 13,5, devido principalmente aos óxidos e carbonatos de Ca e K (Bošnjak *et al.*, 2022).

As cinzas resultantes da queima de biomassa geralmente contêm elementos como silício, potássio, cálcio, fósforo, magnésio, entre outros, o que as torna potencialmente úteis para recuperação de nutrientes ou aplicação diretas em solos agrícolas ou florestais. Por outro lado, o gerenciamento das cinzas provenientes da combustão de resíduos sólidos urbanos ou lodo de esgoto, pode ser mais complexo devido à presença de concentrações elevadas de metais vestigiais contaminantes. A Tabela 1 mostra que a

queima da biomassa geralmente resulta em cinzas compostas principalmente por SiO_2 (dióxido de silício), CaO (óxido de cálcio) ou K_2O (óxido de potássio), representando mais de 60% do total (Yin et al., 2021).

As cinzas de carvão vegetal são compostas principalmente por sílica (20-60% SiO_2), alumina (5-35% Al_2O_3), óxido férrico (10-40% Fe_2O_3) e óxido de cálcio (2-10% CaO) (Flues *et al.*, 2013). Sua composição química rica em sílica, alumina e magnetita permite sua utilização na síntese de materiais como zeólita e alúmen. São caracterizadas por serem cinzentas, abrasivas e alcalina. Suas propriedades geotécnicas as tornam úteis na construção de estradas, aterros e preenchimento estrutural. Suas características físico-químicas, como densidade, tamanho de partícula, porosidade e capacidade de retenção de água, as tornam adequadas para o uso como adsorventes (Ahmaruzzaman, 2010).

1.2.5 Desafios e Oportunidades

Em usinas elétricas convencionais, o manuseio e a utilização de cinzas de biomassa são um grande desafio (Munawar *et al.*, 2021). O processamento das cinzas apresenta desafios tecnológicos que precisam ser abordados para garantir sua viabilidade econômica. Durante a combustão, a interação entre os compostos orgânicos e a biomassa gera cinzas com propriedades específicas, como seu ponto de fusão e comportamento corrosivo. Compreender esses aspectos é essencial para evitar problema como formação de incrustações nos equipamentos (James *et al.*, 2012a).

Muitos métodos de descarte de cinzas acabam resultando na sua deposição em áreas abertas (Yao *et al.*, 2015). Uma parte significativa das cinzas não encontra uso comercial, resultando em seu armazenamento em pilhas próximas às usinas ou em galerias de minas de carvão, o que pode levar à contaminação ambiental, afetando o ar, água e solo (Flues *et al.*, 2013).

O descarte inadequado de cinzas pode levar à poluição do solo e representar riscos à saúde humana e ao meio ambiente. As partículas finas de cinzas, que podem escapar do sistema de controle de emissões, contribuem significativamente para a poluição do ar. A exposição repetida às cinzas pode causar irritações e até envenenamento por arsênico.

Além disso, as cinzas podem infiltrar-se no solo, causar obstruções nos sistemas de drenagem e contaminar as águas subterrâneas com metais pesados (Yao *et al.*, 2015).

A presença de metais nas cinzas provenientes da combustão de biomassa, por exemplo, apresenta uma série de desafios ambientais significativos. A presença de metais pesados voláteis nas cinzas pode resultar em impactos ambientais adversos se não forem adequadamente gerenciados e descartados, com o potencial de lixiviação para águas subterrâneas e superficiais (James *et al.*, 2012a). Vários fatores, incluindo tamanho das partículas e condições ambientais, afetam a mobilidade de oligoelementos presentes em cinzas volantes em ambientes aquosos. Sob certas condições favoráveis, uma quantidade significativa desses oligoelementos poder ser facilmente lixiviada das cinzas (Yao *et al.*, 2015).

Entretanto o uso de cinzas pode reduzir o uso de recursos naturais escassos ou caros em várias aplicações industriais, como na produção de cimento e concreto, preenchimento estrutural, pavimentação de estradas, essas oportunidades são fundamentais para reduzir o impacto ambiental da sua disposição (Ahmaruzzaman, 2010).

A sazonalidade da biomassa e a segurança de fornecimento também são questões que devem ser consideradas (Valentim Bastos *et al.*, 2022). A combustão comercial de biomassa para geração de energia requer grandes volumes de matéria-prima consistente (Zhai *et al.*, 2021). Além disso, o sistema de fornecimento desta matéria-prima envolve inúmeras operações unitárias, como coleta, pré-processamento, transporte e armazenamento, que apresentam desafios técnicos e logísticos significativos (Leitão, 2016).

Outra dificuldade da utilização de cinzas está na sua heterogeneidade. As características das cinzas dependem da biomassa queimada e do processo de combustão (Bošnjak *et al.*, 2022; Zhai, Burke e Stewart, 2021). Em uma revisão de cinzas de 120 fontes diferentes, Vassilev *et al.* (2013) identificaram 229 fases ou minerais encontrados em cinzas de biomassa, com quartzo (SiO_2), calcita (CaCO_3), silvita (KCl), arcanita (K_2SO_4), anidrita (CaSO_3), carvão, vidro, cal, periclásio e hematita como as fases minerais comuns. Além disso, geralmente há diferenças de composição entre as cinzas volantes e de fundo da mesma matéria-prima (Zhai *et al.*, 2021). Devido à variedade de fontes de combustível de biomassa com diferentes propriedades de cinzas, é improvável encontrar uma aplicação que seja adequada para todas as cinzas (James *et al.*, 2012b).

Existem várias barreiras técnicas, econômicas, institucionais e legais para o uso generalizado de cinzas. Estas incluem custos elevados de transporte, falta de conhecimento sobre seus usos, regulamentações complexas e baixo retorno financeiro para empresas de energia. No entanto, há um grande potencial para as cinzas volantes em diversas aplicações, como tratamento ambiental e produção de materiais de construção (Ahmaruzzaman, 2010). A cinza de fundo, atualmente subutilizada em aterros, tem potencial para ser empregada como agregado em concreto e tijolos, mas sua variabilidade de tamanho, controle de umidade e custos de processamento precisam ser otimizados (Prasittisopin, 2024). Superar essas barreiras requer esforços contínuos em pesquisa, desenvolvimento tecnológico e conscientização sobre seus benefícios (Ahmaruzzaman, 2010).

1.3 CONCLUSÃO

Este estudo evidenciou que a caracterização adequada das cinzas é fundamental para direcionar seu uso de maneira eficiente, reduzindo impactos ambientais e promovendo a economia circular.

As diferentes classificações e normativas demonstraram a necessidade de um gerenciamento criterioso, garantindo que esses materiais possam ser utilizados de forma segura e produtiva. A valorização das cinzas, seja por meio de sua incorporação na construção civil, agricultura ou outros setores industriais, representa uma estratégia promissora para mitigar os desafios associados ao seu descarte.

Assim, avançar no desenvolvimento de tecnologias e políticas públicas para sua utilização se faz necessário, garantindo uma abordagem mais sustentável para a gestão desses resíduos.

1.4 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA GOV. Biomassa quebra recorde de geração de energia em 2023. Disponível em: <https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202402/biomassa-quebra-recorde-de-geracao-de-energia-em-2023>. Acesso em: 30 jan. 2025.

AHMARUZZAMAN, M. **A review on the utilization of fly ash** *Progress in Energy and Combustion Science*, jun. 2010.

ALVES, C. A. *et al.* Mineralogical, chemical and leaching characteristics of ashes from residential biomass combustion. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 22, p. 22688–22703, 1 ago. 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C618 – Especificação padrão para cinzas volantes de carvão e pozolana natural crua ou calcinada para uso em concreto**. West Conshohocken, PA, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653: Materiais pozolânicos – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2015.

BARAN, P. *et al.* **Management of Fly Ash to Synthesise Geopolymers and Zeolites** *Energies* Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), , 1 dez. 2023.

BOŠNJAK, K. *et al.* APPLICATION OF BIOMASS ASH ON GRASSLANDS. **Poljoprivreda**, v. 28, n. 1, p. 85–94, 2022.

COMITÊ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO. **EN 450-1: Cinzas volantes para concreto – Parte 1: Definição, especificações e critérios de conformidade**. Bruxelas, 2012.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 313, de 29 de outubro de 2002**. Dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br>.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020**. Regulamenta o uso de resíduos na agricultura. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br>.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Matriz Energética e Elétrica**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 30 jan. 2025.

FIDANCHEVSKI, E. *et al.* Technical and radiological characterisation of fly ash and bottom ash from thermal power plant. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 330, n. 3, p. 685–694, 1 dez. 2021.

FLUES, M. *et al.* **Toxic elements mobility in coal and ashes of Figueira coal power plant, BrazilFuel. Anais...**jan. 2013

GABRIELLI, P. *et al.* Early atmospheric contamination on the top of the Himalayas since the onset of the European Industrial Revolution. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 117, n. 8, p. 3967–3973, 25 fev. 2020.

GRAU, F. *et al.* Engineering behavior and characteristics of wood ash and sugarcane bagasse ash. **Materials**, v. 8, n. 10, p. 6962–6977, 2015.

JAMES, A. K. *et al.* **Ash management review-applications of biomass bottom ash**EnergiesMDPI AG, , 2012.

KHAN, A. A. *et al.* Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies. **Fuel Processing Technology**, v. 90, n. 1, p. 21–50, jan. 2009.

KHODAEI, H. *et al.* **An overview of processes and considerations in the modelling of fixed-bed biomass combustion**EnergyElsevier Ltd, 1 ago. 2015.

LEITÃO, A. Bioeconomy: The Challenge in the Management of Natural Resources in the 21st Century. **Open Journal of Social Sciences**, v. 04, n. 11, p. 26–42, 2016.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Biomassa: resíduos que são transformados em energia. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/biomassa-residuos-que-sao-transformados-em-energia>. Acesso em: 30 jan. 2025.

MUNAWAR, M. A. *et al.* **Challenges and opportunities in biomass ash management and its utilization in novel applications**Renewable and Sustainable Energy ReviewsElsevier Ltd, 1 out. 2021.

ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DE NORMALIZAÇÃO. **ISO 1171: Combustíveis minerais sólidos – Determinação de cinzas.** Genebra, 2010.

ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DE NORMALIZAÇÃO. **ISO 10694: Qualidade do solo – Determinação de carbono orgânico e total após combustão a seco (análise elementar)**. Genebra, 1995.

PAPAIIOANNOU, IOULIA. *et al.* **Study on the state of play of energy efficiency of heat and electricity production technologies**. [s.l.] Publications Office, 2012.

PRASITTISOPIN, L. Power plant waste (fly ash, bottom ash, biomass ash) management for promoting circular economy in sustainable construction: emerging economy context. **Smart and Sustainable Built Environment**, 2024.

UNIÃO EUROPEIA. **Regulamento (UE) 2019/1009 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 5 de junho de 2019, que estabelece regras relativas à disponibilização no mercado de produtos fertilizantes da UE e que altera os Regulamentos (CE) n.º 1069/2009 e (CE) n.º 1107/2009 e revoga o Regulamento (CE) n.º 2003/2003**. *Jornal Oficial da União Europeia*, Bruxelas, 2019. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX%3A32019R1009>. Acesso em: 30 jan.

UNIÃO EUROPEIA. **Regulamento (UE) 2019/1009 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 5 de junho de 2019, que estabelece regras relativas à disponibilização no mercado de produtos fertilizantes da UE e que altera os Regulamentos (CE) n.º 1069/2009 e (CE) n.º 1107/2009 e revoga o Regulamento (CE) n.º 2003/2003**. *Jornal Oficial da União Europeia*, Bruxelas, 2019. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX%3A32019R1009>. Acesso em: 30 jan.

VALENTIM BASTOS, J. B. *et al.* Addressing scale and seasonality in the design of sugarcane to ethylene glycol biorefineries. **Journal of Cleaner Production**, v. 337, 20 fev. 2022.

WELFLE, A. Balancing growing global bioenergy resource demands - Brazil's biomass potential and the availability of resource for trade. **Biomass and Bioenergy**, v. 105, p. 83–95, 2017.

WELFLE, A.; RÖDER, M. Mapping the sustainability of bioenergy to maximise benefits, mitigate risks and drive progress toward the Sustainable Development Goals. **Renewable Energy**, v. 191, p. 493–509, 1 maio 2022.

YADAV, V. K. *et al.* **Status of Coal-Based Thermal Power Plants, Coal Fly Ash Production, Utilization in India and Their Emerging Applications** *Minerals* MDPI, , 1 dez. 2022.

YAO, Z. T. *et al.* **A comprehensive review on the applications of coal fly ash** *Earth-Science Reviews* Elsevier, , 1 fev. 2015.

YIN, K. *et al.* Statistical comparison of leaching behavior of incineration bottom ash using seawater and deionized water: Significant findings based on several leaching methods. **Journal of Hazardous Materials**, v. 344, p. 635–648, 15 fev. 2018.

YIN, T. *et al.* Thermal Energy Utilization of High Temperature Ash: Current Situation and Prospects. **Bioresourcers**, v. 18, n. 3, p. 4866–4883, 2021.

ZHAI, J. *et al.* New insights into biomass combustion ash categorisation: A phylogenetic analysis. **Fuel**, v. 287, 1 mar. 2021.

ZHAI, J.; BURKE, I. T.; STEWART, D. I. **Beneficial management of biomass combustion ashes** *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Elsevier Ltd, 1 nov. 2021.

ŽIVOTIĆ, M. M. *et al.* Mogućnost korišćenja pepela i šljake sa deponije termoelektrane “nikola tesla” kao otpada sa upotrebnom vrednošću. **Hemijska Industrija**, v. 66, n. 3, p. 403–412, 2012.

2. CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOMÉTRICA E SISTEMÁTICA

RESUMO

A crescente geração de cinzas provenientes de usinas de energia tem se tornado um desafio ambiental significativo. Diante desse cenário, este estudo buscou compreender o estado da arte sobre as cinzas, utilizando uma abordagem combinada de revisão sistemática e métodos bibliométricos. A bibliometria permitiu avaliar o desempenho da produção científica, identificando tendências, principais autores, revistas e áreas de pesquisa associadas ao tema. Foram analisadas 147.154 publicações, destacando-se palavras-chave como "*fly ash*", "*bottom ash*" e "*compressive strength*", evidenciando o foco na utilização das cinzas em materiais de construção. Além disso, observou-se um aumento expressivo no número de publicações entre 2016 e 2022, com uma leve redução nos anos subsequentes. A distribuição geográfica das publicações indicou que China, Estados Unidos e Índia lideram a produção científica, com o Brasil ocupando a sétima posição e mantendo colaborações relevantes com diversos países. A análise dos periódicos revelou que as principais publicações estão concentradas em revistas das áreas de engenharia, ciência dos materiais e ecologia. Os resultados indicaram que as cinzas volantes possuem grande potencial para aplicações na construção civil. A análise sistemática corroborou esses achados, destacando a utilização das cinzas como adsorventes para redução de poluentes e sua transformação em geopolímeros. O estudo também revelou lacunas significativas, como a baixa exploração de outras cinzas, a falta de estudos sobre impactos ambientais e a escassez de pesquisas voltadas para regulamentação, viabilidade econômica e aplicações integradas. Concluiu-se que a pesquisa sobre cinzas apresenta um caráter multidisciplinar e crescente relevância, sendo essencial a continuidade de estudos para o desenvolvimento de novas aplicações sustentáveis.

Palavras-chave: Bibliometria; Cinzas Volantes; Construção Civil.

ABSTRACT

The increasing generation of ash from combustion in power plants has become a significant environmental challenge. In this context, this study aimed to understand the state of the art on ash by employing a combined approach of systematic review and bibliometric methods. Bibliometrics enabled the evaluation of scientific production performance, identifying trends, key authors, journals, and research areas related to the topic. A total of 147,154 publications were analyzed, with keywords such as "fly ash," "bottom ash," and "compressive strength" standing out, highlighting the focus on the use of ash in construction materials. Additionally, a significant increase in the number of publications was observed between 2016 and 2022, followed by a slight decline in the following years. The geographical distribution of publications indicated that China, the United States, and India lead scientific production, with Brazil ranking seventh and maintaining relevant collaborations with several countries. Journal analysis revealed that the main publications are concentrated in the fields of engineering, materials science, and ecology. The results indicated that fly ash has great potential for applications in civil construction. The systematic analysis supported these findings, highlighting the use of ash as adsorbents for pollutant reduction and its transformation into geopolymers. The study also revealed significant gaps, such as the underexploration of other types of ash, the lack of studies on environmental impacts, and the scarcity of research focused on regulation, economic feasibility, and integrated applications. It is concluded that research on ash has a multidisciplinary nature and growing relevance, making it essential to continue studies aimed at developing new sustainable applications.

Keywords: Bibliometrics; Fly Ash; Civil Construction.

2.1 INTRODUÇÃO

O aumento significativo da geração de cinzas em usinas de energia nos últimos anos tornou sua gestão um desafio ambiental (Cuenca-Moyano *et al.*, 2023). A abundância, o baixo custo e o potencial das cinzas na captura de CO₂ destacam sua relevância como um material promissor no desenvolvimento de soluções sustentáveis e inovadoras em nível global (Wu *et al.*, 2024). Entender o estado de arte das cinzas é fundamental para identificar avanços, desafios e lacunas no conhecimento sobre sua geração, características e possíveis aplicações.

A bibliometria é uma metodologia de pesquisa utilizada nas áreas de biblioteconomia e ciência da informação, sendo amplamente aplicada para avaliar o desempenho e as tendências da produção científica. Essa abordagem permite a análise de publicações por meio de diversos indicadores, como autoria, fontes de publicação, temas abordados e padrões de citação (Tian *et al.*, 2022). Sampaio e Mancini (2007) definem a bibliometria como uma disciplina que utiliza técnicas quantitativas para analisar e medir padrões na produção bibliográfica, como a frequência de citações, o número de publicações por autor e a distribuição de temas ao longo do tempo.

Atualmente, existem muitos softwares usados para a análise bibliométrica (Yang *et al.*, 2018). O VOSviewer é um software desenvolvido por Van Eck e Waltman, da Universidade de Leiden, na Holanda, projetado para a criação e visualização de redes bibliométricas. A ferramenta permite a construção de mapas que representam conexões entre periódicos, pesquisadores, palavras-chave e publicações, utilizando relações como cocitação, acoplamento bibliográfico e coautoria para estruturar e exibir os dados de forma intuitiva (Waltman, Eck, van e Noyons, 2010).

A revisão sistemática, por sua vez é definida como um método de pesquisa que se baseia na análise da literatura especializada sobre um tema específico. Essa abordagem não apenas proporciona um resumo das evidências relacionadas a uma determinada estratégia de intervenção, mas também pode incorporar elementos da bibliometria (Sampaio e Mancini, 2007). Na revisão sistemática da literatura, o risco de subjetividade é reduzido, pois os critérios de seleção são claros (Silva *et al.*, 2023).

Portanto, o objetivo deste trabalho foi combinar a revisão sistemática com métodos bibliométricos a fim de obter uma compreensão mais abrangente e objetiva do

estado atual de conhecimento sobre as cinzas, identificando lacunas de pesquisa e direcionando futuras investigações de maneira mais informada.

2.2 METODOLOGIA

Foi usado uma abordagem metodológica combinada, integrando elementos da revisão sistemática e da revisão bibliométrica para fornecer uma análise abrangente e detalhada dos trabalhos relacionados às cinzas.

Na primeira etapa, foi realizada a definição da pergunta de pesquisa, crucial para orientar e buscar por evidências. A pesquisa foi conduzida na base de dados Web of Science, com critérios de inclusão e exclusão baseados na declaração PRISMA (Moher *et al.*, 2009) e em palavras-chave selecionadas para abranger uma ampla gama de trabalhos relacionados ao tema. O período de estudo foi de 30 anos (1995-2025). Os critérios de exclusão e inclusão podem ser observados na Tabela 2 e a pergunta de pesquisa foi: “Qual é o estado atual do conhecimento sobre o uso e as propriedades das cinzas?”.

Tabela 2. Critérios para busca sistematizada

Palavras-chave	Filtros para busca
“ash” or “fly ash” or “bottom ash”	Palavras-chave presentes em ‘todos os campos’ Tipo de documento ‘artigo’

Fonte: elaborado pelo autor

Aqueles trabalhos que apresentaram esses critérios foram selecionados para a revisão bibliométrica. Os dados foram obtidos da própria base de dados Web of Science e do software VOSviewer Versão 1.6.19, permitindo a visualização gráfica de mapas bibliométricos. A coleta dos dados foi realizada em fevereiro de 2024. As métricas bibliométricas analisadas foram:

- Palavras-chave mais utilizadas, para identificar tendências e áreas de interesse predominantes;

- Quantidade de publicações por ano, para identificar padrões temporais na produção científica;
- Quantidade de publicação por país, para entender as disparidades na produção científica e revelar áreas geográficas com foco significativo no tema;
- Colaboração entre países, para compreender o grau de interação e cooperação internacional na pesquisa;
- Principais áreas de pesquisa, para compreender a diversidade de temas abordados e as subdisciplinas relevantes;
- Principais revistas, oferecendo insights sobre os veículos de comunicação mais influentes e respeitados dentro do campo;
- Principais autores, coautores e citações, reconhecendo os pesquisadores mais proeminentes e influentes dentro do campo, indicando líderes de opinião, colaborações frequentes e trabalhos mais citados, proporcionando uma visão geral da estrutura e dinâmica da comunidade científica.

Após essa primeira parte, os estudos foram submetidos a outros critérios de inclusão e exclusão para determinar sua relevância e validade para a revisão sistemática. Foram escolhidos os primeiros 20 artigos mais relevantes de caráter experimental que apresentavam usos alternativos das cinzas e que fossem de acesso aberto. A síntese dos estudos foi realizada após o agrupamento dos trabalhos com linhas de pesquisa semelhantes.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Revisão Bibliométrica

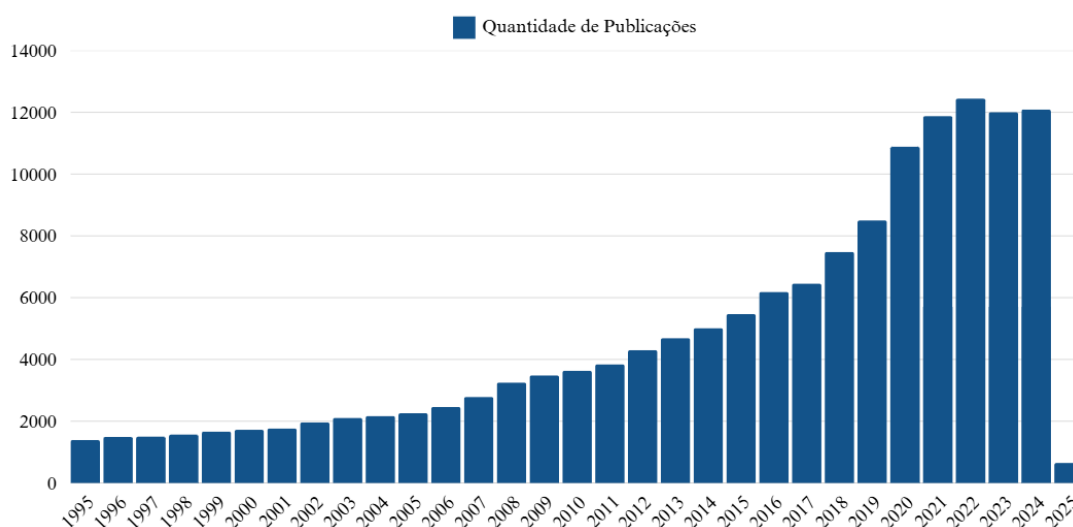
2.3.1.1 Palavras-chave

Os resultados da revisão bibliométrica revelaram um total de 147.154 artigos. Entre as principais palavras-chave identificadas (Figura 2), destacaram-se *“fly ash”*, *“concrete”*, *“strength”*, *“compressive strength”*, *“cement”*, *“bottom ash”*, *“heavy-metals”*, *“mechanical-properties”* e *“behavior”*. As palavras vistas na figura são as 1000 palavras-

2.3.1.2 Quantidade de publicações por ano

Os resultados relacionados à quantidade de publicações nos últimos 30 anos revelaram uma tendência de crescimento que pode ser observada na Figura 6, observa-se um aumento no número de publicações especialmente entre os anos de 2016 e 2022.

Figura 6. Quantidade de Publicação por ano dos últimos 30 anos



Fonte: elaborado pelo autor

Durante esse período, houve um aumento na produção de artigos, indicando um interesse crescente e contínuo na pesquisa sobre cinzas. No entanto, foi importante notar que houve uma leve queda no número de publicações de 2022 para 2023, passando de 12.442 para 12.008 publicações e 2024 manteve um número próximo de publicação (12.092). Essa diminuição pode ser atribuída a uma variedade de fatores, como flutuações naturais na atividade de pesquisa ou mudança nas prioridades e financiamento de pesquisa.

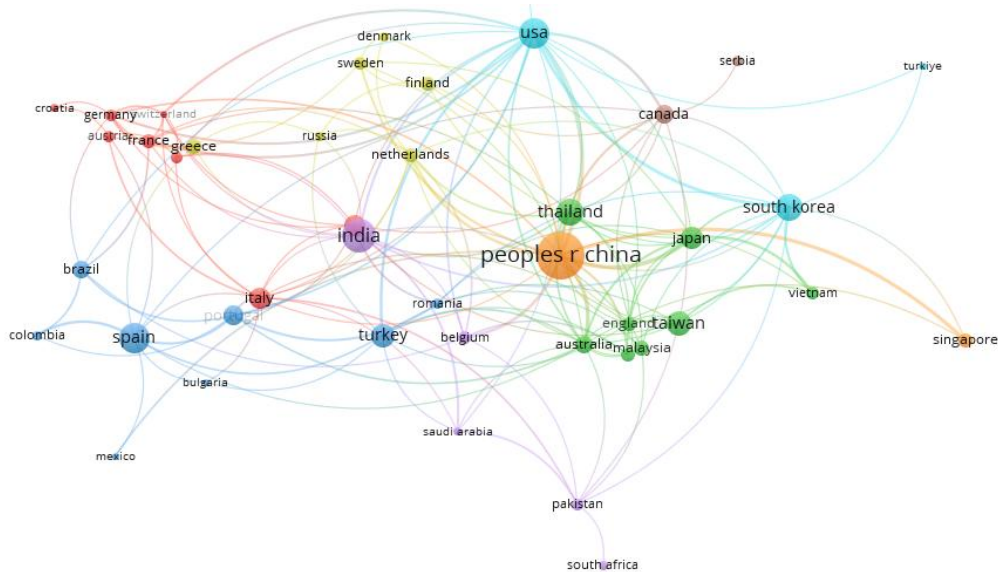
Além disso, os dados também indicam que o ano de 2025 já registrou um total de 651 publicações até o momento, o que pode ser considerado um bom número visto que a coleta dos dados foi realizada em janeiro. Esses resultados destacam a importância contínua do tema na comunidade acadêmica, bem como a necessidade de acompanhar de

perto as tendências de publicações ao longo do tempo para entender melhor o desenvolvimento e evolução do campo.

2.3.1.3 Quantidade de publicação por país

Os dados sobre a quantidade de publicações por país revelaram uma distribuição significativa da produção científica relacionada ao tema. Foi possível através da imagem Figura 7 observar quais os principais países produtores de pesquisa nesse campo. Dentre os que mais produzem estão: China (21,05%), Estados Unidos (16,4%), Índia (9,09%), Inglaterra (5,7%) e Alemanha (4,3%).

Figura 7. Colaboração entre os países



Fonte: elaborado pelo autor

O Brasil, visto no canto esquerdo da Figura 4, no cluster azul, ficou em sétimo lugar dentre os países que mais publicaram sobre o tema. Entre os idiomas principais dos artigos o português está em segundo lugar, com 0,547% das publicações, enquanto o inglês tem 97,543%. Na rede de colaboração com o Brasil os países conectados foram Alemanha, França, Colômbia, Portugal, Bélgica e Estados Unidos. A colaboração entre países na

pesquisa desempenha um papel fundamental no avanço do conhecimento e na solução de problemas complexos que transcendem fronteiras geográficas.

Foi possível notar que a China, os Estados Unidos e a Índia foram os países com maiores colaborações com os outros, a posição desses países como principais produtores de publicações científica pode estar intimamente ligada à sua capacidade de colaborar pesquisa internacionalmente.

Esses números destacam a importância global do tema e a colaboração internacional que ocorre na pesquisa e desenvolvimento nessa área, mostrando diferentes países contribuindo ativamente para o avanço do conhecimento.

2.3.1.4 Principais áreas de pesquisa

Os resultados revelaram uma distribuição significativa das publicações relacionadas a cinzas em várias áreas de pesquisa (Tabela 3).

Tabela 3. Porcentagem de publicação por área de pesquisa

Área de pesquisa	% de artigos
Engenharia	31,05%
Ciência de Materiais	20,3%
Ecologia Ciências Ambientais	15,76%
Química	12,96%
Tecnologia de Construção Civil	11,92%
Combustíveis Energéticos	9,35%

Fonte: elaborado pelo autor

A tabela mostra as seis principais áreas de pesquisa. A área de Engenharia foi a mais proeminente, isso indica um forte interesse e engajamento dos pesquisadores em diversas disciplinas de engenharia, como engenharia civil, mecânica e ambiental, no estudo e aplicação das cinzas.

A área de Ciências de Materiais também desempenhou um papel significativo, mostrando o interesse em compreender as propriedades físicas, químicas e mecânicas das cinzas e explorar seu potencial como um material de construção e aditivo em diversas aplicações, o que também se aplica para a área de Tecnologia de Construção Civil.

A preocupação com o impacto ambiental das cinzas e seu potencial para uso em práticas sustentáveis foi evidente na representação significativa de publicações na área de Ecologia e Ciências Ambientais, que refletiu a importância de considerar implicações ambientais ao avaliar o uso das cinzas.

Existiu também o interesse em compreender o uso de cinzas geradas a partir da combustão de carvão vegetal e outros combustíveis como fonte alternativa de energia e sua viabilidade em aplicações relacionadas à energia.

Esses resultados destacam a natureza multidisciplinar das pesquisas sobre cinzas e sua relevância em diversas áreas do conhecimento. Essa ampla variedade de disciplinas reflete a complexidade e o potencial das cinzas como recurso versátil e importante em várias aplicações industriais e ambientais.

2.3.1.5 Principais Revistas

A Tabela 4 mostra quais são as cinco principais revistas que publicaram sobre o tema. A revista *Construction and Building Materials* foi dedicada especificamente aos materiais de construção, o que está alinhado com o interesse significativo na aplicação de cinzas na construção civil. Esta revista está alinhada com a área de pesquisa de Tecnologia e Construção Civil. Já as revistas *Fuel* e *Energy Fuel* estão relacionadas com a área de Combustíveis Energéticos.

Tabela 4. Porcentagem de publicação por revista

Revista	% de artigos
<i>Construction and Building Materials</i>	4,98%
<i>Fuel</i>	1,96%
<i>Materials</i>	1,37%
<i>Journal of Cleaner Production</i>	1,23%
<i>Energy Fuels</i>	1,12%

Fonte: elaborado pelo autor

A revista *Materials* se correlaciona com a área de Ciências de Materiais e ambas abordam a composição, propriedades e aplicações das cinzas em uma variedade de contextos, incluindo construção, cerâmica e metalurgia.

Já a revista *Journal of Cleaner Production* se relaciona com a área de Ecologia e Ciências Ambientais uma vez que elas abordam a preocupação com o impacto ambiental das cinzas e seu potencial para práticas sustentáveis na produção industrial.

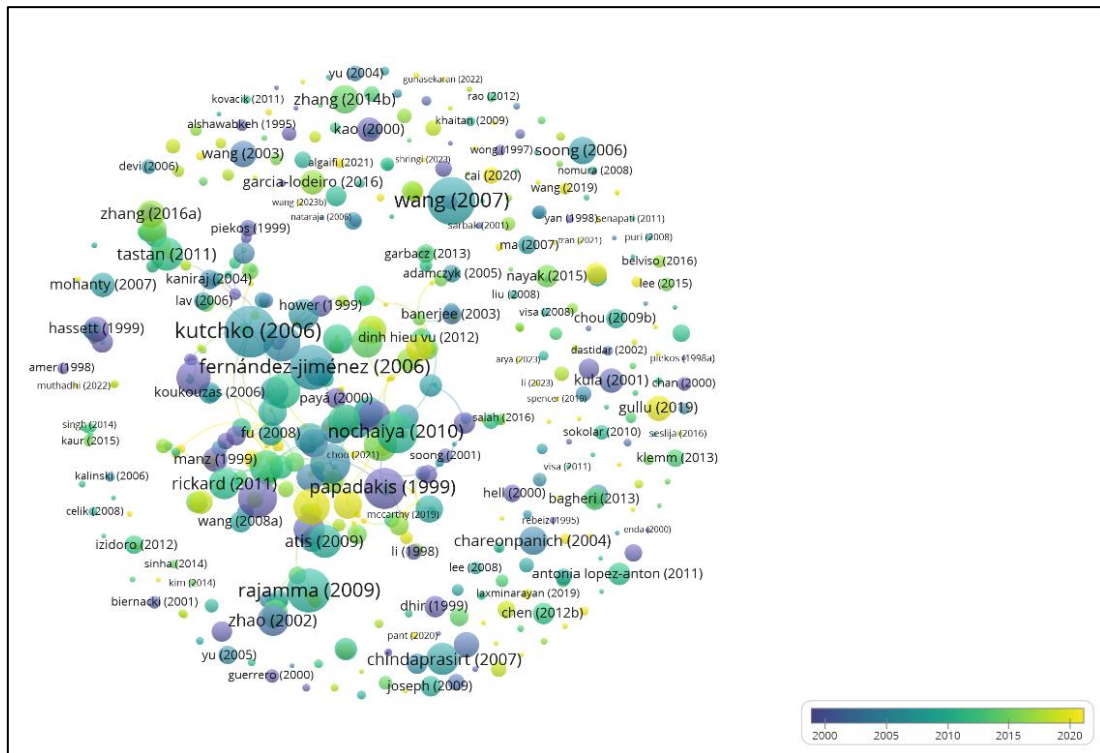
Essas relações destacaram a interdisciplinaridade das pesquisas sobre cinzas volantes e a importância de publicações em revistas de diversas áreas do conhecimento para uma compreensão abrangente e aprofundada desse tema.

2.3.1.6 Principais autores, coautores e citações

Os autores destacados desempenharam um papel fundamental na compreensão das cinzas, conhecer os principais autores e suas contribuições permite estabelecer um padrão de qualidade e excelência na área, servindo como referência para avaliar a qualidade de outras pesquisas e trabalhos relacionados.

trabalhos mais citados foram aqueles publicados principalmente entre os anos 2000 e 2010, o que pode indicar um período de crescimento e desenvolvimento significativo nesse campo de pesquisa e que esses trabalhos podem ter tido um impacto duradouro e significativo na comunidade acadêmica.

Figura 9. Trabalhos mais citados entre 1995 e 2025



Fonte: elaborado pelo autor

Os trabalhos mais citados são frequentemente considerados como referências na área, indicando importância e relevância de suas descobertas. A relação entre esses trabalhos cria uma rede de conhecimento, onde os estudos se conectam e se completam. Ao analisar essa relação, os pesquisadores podem identificar temas emergentes, tendências e padrões na pesquisa, fornecendo uma visão mais completa e abrangente do campo. O Quadro 1 mostra o número de citações e a área de pesquisa de cada trabalho.

Quadro 1. Trabalhos mais relevantes

Referência	Nº de citações	Área de Pesquisa
KUTCHKO, B. G. <i>et al.</i> Fly ash characterization by SEM-EDS. Fuel , v. 85, n. 18, p. 2537-2544, 2006.	453	Energia e Combustíveis, Engenharia
WANG, S. X. <i>et al.</i> Engineered cementitious composites with high-volume flyash. ACI Materials Journal , v. 104, n. 3, p. 233-241, 2007.	376	Construção e Tecnologia de Construção, Ciências de Materiais
FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. M. <i>et al.</i> Engineering Properties of álcali-activated fly ash concrete. ACI Materials Journal , v. 103, n. 2, p. 106-112, 2006.	336	Construção e Tecnologia de Construção, Ciências de Materiais
RAJAMMA, R. <i>et al.</i> Characterisation and use of biomass fly ash in cement-based materials. Journal of Hazardous Materials , v. 172, n. 3, p. 1049-1060, 2009	326	Engenharia, Ecologia e Ciências Ambientais
PAPADAKIS, V. G. Effect of fly ash on Portland cement systems Part I. Low-calcium fly ash. Cement and Concrete Research , v. 29, n. 11, p. 1727-1736, 1999.	287	Construção e Tecnologia de Construção, Ciências de Materiais
NOCHAIYA, T. <i>et al.</i> Utilization of fly ash with sílica fume and Properties of Portland cement-fly ash-silica fume concrete. Fuel , v. 89, n. 3, p. 768-774, 2010.	285	Energia e Combustíveis, Engenharia
SAKAI, E. <i>et al.</i> Hydration of fly ash cement. Cement and Concrete Research , v. 35, n. 6, p. 1135-1140, 2005.	273	Construção e Tecnologia de Construção, Ciências de Materiais
BIJEN, J. Benefits of slag and fly ash. Construction and Building Materials , v. 10, n. 5, p. 309-314, 1996.	256	Construção e Tecnologia de Construção, Engenharia, Ciências de Materiais
MORENO, N. <i>et al.</i> Physico-chemical characteristics of European pulverized coal combustion fly ashes. Fuel , v. 84, n. 11, p. 1351-1363.	229	Energia e Combustíveis, Engenharia
GIERGICZNY, Z. Fly ash and slag. Cement and Concrete Research , v. 124, 2019.	216	Construção e Tecnologia de Construção, Ciências de Materiais

Fonte: elaborado pelo autor

Foi possível notar que os trabalhos mais citados são de duas principais áreas de pesquisa, construção e energia, o que corresponde aos dados encontrados anteriormente. Dentre os nomes das revistas em que os artigos foram publicados também foram aqueles encontrados como mais relevantes para área. Essa consistência indica que os estudos mais influentes e relevantes na área de cinzas foram conduzidos e publicados em revistas que abordam tópicos relacionados a construção e energia. Em suma, essa correspondência fortalece a credibilidade e a relevância desses estudos, destacando sua importância para o avanço da pesquisa nesse campo específico.

Outro fato que se pôde notar foi que a palavra-chave de maior relevância encontrada nesse estudo (*“fly ash”*) aparece em todos os títulos dos trabalhos, que mostra que as cinzas volantes foram um tema predominante nas pesquisas realizadas nessa área.

Entretanto, observa-se que a maioria dos trabalhos mais citados se referem especificamente às cinzas provenientes da queima de carvão mineral, com foco em aplicações na indústria da construção civil e geração de energia. Esse padrão evidencia uma lacuna importante na literatura: a relativa escassez de estudos com o mesmo nível de aprofundamento e visibilidade voltados para cinzas de carvão vegetal e cinzas de biomassa, resíduos que vêm ganhando cada vez mais destaque com o avanço das energias renováveis e da valorização de materiais sustentáveis.

2.3.2 Revisão Sistemática

Os trabalhos escolhidos para a revisão sistemática se encontram no Quadro 2.

Quadro 2. Artigos mais relevantes e sua categoria segundo a Web of Science

(continua)

Referência	Categoria da Web of Science
ULATOWSKA, J. <i>et al.</i> Use of fly ash and fly ash agglomerates for As (III) adsorption from aqueous solution. Polish Journal of Chemical Technology , v. 16, n. 1, p. 21-27, 2014.	Química Aplicada, Engenharia Química

Quadro 2. Artigos mais relevantes e sua categoria segundo a Web of Science

(continua)

Referência	Categoria da Web of Science
PACHAMUTHU, S.; RHANGARAJU, P. Effect of incinerated paper sludge ash on fly ash-based geopolymer concrete. Gradevinar , v. 69, n. 9, p. 851-859, 2017.	Engenharia Civil
HADI, M. N. S. <i>et al.</i> Effects of fly ash characteristics and alkaline activator components on compressive strength of fly ash-based geopolymer mortar. Construction and Building Materials , v. 175, p. 41-54, 2018.	Construção e Tecnologia de Construção, Engenharia, Ciência de Materiais
SITARZ-PALCZAK, E. <i>et al.</i> Comparative study on the characteristics of coal fly ash and biomass ash geopolymers. Archives of Environmental Protection , v. 45, n. 1, p. 126-135, 2019.	Ciências Ambientais
TANRIVERDI, M. <i>et al.</i> Leachability of Heavy Metals from Autoclaved Fly Ash-Lime Building Bricks. Inzynieria Mineralna-Journal of the Polish Mineral Engineering , v. 1, n. 1, p. 67-74, 2021.	Mineração e Processamento Mineral
TRAN, N. <i>et al.</i> Self-healing behavior of expansive mortars with fly ash and bottom ash. Engineering Journal-Thailand , v. 25, n. 2, p. 121-122, 2021.	Engenharia, Multidisciplinar
TEIXEIRA, E. <i>et al.</i> Effect os biomass fly ash on fresh and hardened Properties of high volume fly ash mortars. Crystals , v. 11, n. 3, p. 1-21, 2021.	Cristalografia, Ciência de Materiais
SNELLINGS, R. <i>et al.</i> Classification and milling increase fly ash pozzolanic reactivity. Frontiers in Built Environment , v. 7, 2021.	Construção e Tecnologia de Construção, Engenharia
PURBASARI, A. <i>et al.</i> Comparison of alkali modified fly ash and alkali activated fly ash as Zn(II) Ions absorbente from aqueous solution. Science of Sintering , v. 54, n. 1, p. 49-48, 2022.	Ciência de Materiais, Metalurgia e Engenharia Metalúrgica
ALHARBI, Y., ABADEL, A. Engineering Properties of high-volume fly ash modified cement incorporated with bottle glass waste nanoparticles. Sustainability (Switzerland) , v. 14, n. 9, 2022.	Ciência e Tecnologia Verde e Sustentável, Ciências Ambientais, Estudos Ambientais
WASIL, M. Compressibility of fly ash and fly ash-bentonite mixtures. Baltic Journal of Road and Bridge engineering , v. 17, n. 3, p. 21-43, 2022.	Engenharia Civil
GRABIAS-BLICHAZ, E. <i>et al.</i> Mechanochemically assisted coal fly ash conversion into zeolite. Materials , v. 15, n. 20, 2022.	Química, Ciência de Materiais, Metalurgia e Engenharia Metalúrgica, Física
RYCHLEWSKA, K. <i>et al.</i> Zeolitization of coal fly ashes and coal fly ash microspheres. Journal of Ecological Engineering , v. 23, n. 11, p. 109-121, 2022.	Engenharia Ambiental

Quadro 2. Artigos mais relevantes e sua categoria segundo a Web of Science

(conclusão)

Referência	Categoria da Web of Science
NKOMO, N. Z. <i>et al.</i> Optimisation of mechanical Properties of polyethylene terephthalate fibre/fly ash hybrid concrete composite. Case Studies in Construction Materials , v. 17, 2022.	Construção e Tecnologia de Construção, Engenharia Civil, Ciência de Materiais, Multidisciplinar
WIDODO, S. <i>et al.</i> Development of eco-friendly self-compacting concrete using fly ash and waste polyethylene terephthalate bottle fiber. Civil Engineering Journal (Iran) , v. 9, n. 2, p. 437-452, 2023.	Engenharia Civil
GAO, J. M. <i>et al.</i> Template-free facile preparation of mesoporous sílica from fly ash for shaped composite phase change materials. Journal of Cleaner Production , v. 384, 2023.	Ciência e Tecnologia Verde e Sustentável, Engenharia Ambiental, Ciências Ambientais
MCCARTHY, M. J. <i>et al.</i> Wet storage effects on fly ash Properties relevant to its use in air-entrained concrete. Magazine of Concrete Research , v. 75, n. 3, p. 149-162, 2023.	Construção e Tecnologia de Construção, Ciência de Materiais, Multidisciplinar
MA, Y. W. <i>et al.</i> Effect of activator and mineral admixtures on the autogenous shrinkage of álcali-activated slag/fly ash. Sustainability , v. 15, n. 22, 2023.	Ciência e Tecnologia Verde e Sustentável, Ciências Ambientais, Estudos Ambientais

Fonte: elaborado pelo autor

Para um agrupamento mais assertivo dos trabalhos, as categorias da Web of Science (Quadro 2) e os aspectos abordados (Quadro 3) foram analisados e os trabalhos foram agrupados em dois tópicos principais: Engenharia e Sustentabilidade e Tecnologia de Construção, cada tópico com sua subdivisão como pode-se ver no Quadro 4.

Quadro 3. Aspectos abordados nos artigos selecionados para a revisão sistemática

(continua)

Referência	Aspectos Abordados
(Ulatowska <i>et al.</i> , 2014)	Otimização das condições de adsorção para remoção de arsênio (III) da solução aquosa por cinzas volantes e aglomerados de cinzas volantes.
(Pachamuthu e Thangaraju, 2017)	Análise de como a adição de cinzas de lama de papel em concreto geopolimérico à base de cinzas volantes afeta as propriedades mecânicas e a microestrutura do concreto.

Quadro 3. Aspectos abordados nos artigos selecionados para a revisão sistemática

(continua)

Referência	Aspectos Abordados
(Hadi, Al-Azzawi e Yu, 2018)	Influências de diferentes características de cinzas volantes e diferentes teores de ativadores alcalinos na resistência à compressão de argamassa geopolimérica à base de cinzas volantes.
(Sitarz-Palczak, Kalembkiewicz e Galas, 2019)	Síntese de um geopolímero à base de cinzas volantes de carvão e cinza de biomassa e a indicação da possibilidade de sua aplicação.
(Ishak <i>et al.</i> , 2019)	Propriedades e desempenho do concreto geopolímero de cinza volante incorporados com cinza de bambu sob temperatura elevada.
(Kara De Maeijer <i>et al.</i> , 2020)	Determinação da influência de cinzas volantes ultrafinas de diferentes finuras na trabalhabilidade do concreto, propriedades mecânicas e durabilidade.
(Tanriverdi <i>et al.</i> , 2021)	Potencial de lixiviação dos oligoelementos nas amostras de cinzas volantes/tijolos de cal.
(Tran, Saengsoy e Tangtermsirikul, 2021)	Efeitos das cinzas de fundo e cinzas volantes com diferentes teores de óxido de cálcio, cal livre e enxofre trióxido no comportamento de autocura de materiais a base de cimento.
(Teixeira <i>et al.</i> , 2021)	Efeito do uso de cinzas volantes de biomassa em argamassa de cinza volante de alto volume, isoladamente ou misturada com cinzas volantes de carvão.
(Snellings <i>et al.</i> , 2021)	Classificação de tamanhos e tratamentos de moagem como meios para aumentar a reatividade de cinzas volantes siliciosas.
(Purbasari <i>et al.</i> , 2022)	Eficiência na remoção de íons Zn(II) pelas cinzas volantes com ativação alcalina e cinzas volantes com modificação alcalina.
(Alharbi e Abadel, 2022)	Integração de nanopartículas derivadas de resíduos de vidro de garrafa no aumento das propriedades iniciais de resistência de argamassas de cimento à base de cinzas volantes de alto volume.
(Wasil, 2022)	Determinação da compressibilidade de cinzas volantes e misturas de cinzas volantes e bentonita como materiais substitutos para solos naturais em aplicação em estrutura de terra.
(Grabias-Blicharz <i>et al.</i> , 2022)	Influência da ativação mecânica de cinzas volantes no processo de cristalização da zeólita, oferecendo um método prospectivo de controle das morfologias cristalinas.
(Rychlewska, Tomaszewicz e Radko, 2022)	Utilização de cinzas volantes no processo de síntese de zeólita pelo método simples de ativação alcalina em uma etapa.
(Nkomo, Masu e Nziu, 2022)	Previsão e otimização usando modelagem em relação às propriedades frescas e endurecidas do concreto reforçado com fibra de tereftalato de polietileno (PET) contendo substituição parcial de cimento por cinza volante.

Quadro 3. Aspectos abordados nos artigos selecionados para a revisão sistemática

(conclusão)

Referência	Aspectos Abordados
(Widodo <i>et al.</i> , 2023)	Produção de concreto autoadensável utilizando cinzas volantes como material suplementar de cimento e resíduos de garrafa PET como reforço de fibra.
(Gao <i>et al.</i> , 2023)	Preparação de materiais à base de sílica mesoporosa derivados de cinzas volantes pelo processo de transformação ácida da fase mineral sem modelo.
(McCarthy, Hope e Csetenyi, 2023)	Efeitos de armazenamento úmido em cinzas volantes e propriedades das cinzas volantes que influenciam a entrada de ar no cimento.
(Ma <i>et al.</i> , 2023)	Teor de álcali e do módulo de silicato de ativadores e aditivos minerais na retração autógena de pastas de cinzas/escórias ativadas por álcalis.

Fonte: elaborado pelo autor

Quadro 4. Agrupamento dos trabalhos para revisão sistemática

Tópico	Subtópico	Referência
Engenharia e Sustentabilidade	Remoção de Elementos	(Ulatowska <i>et al.</i> , 2014) (Purbasari <i>et al.</i> , 2022)
	Engenharia Civil e Materiais de Construção	(Wasil, 2022) (Gao <i>et al.</i> , 2023) (Ma <i>et al.</i> , 2023)
	Zeolitização	(Grabias-Blicharz <i>et al.</i> , 2022) (Rychlewska <i>et al.</i> , 2022)
Tecnologia de Construção	Propriedades e Aplicações de Geopolímeros	(Pachamuthu e Thangaraju, 2017) (Hadi <i>et al.</i> , 2018) (Sitarz-Palczak <i>et al.</i> , 2019) (Ishak <i>et al.</i> , 2019)
	Influência das Cinzas em Materiais de Construção	(Kara De Maeijer <i>et al.</i> , 2020) (Tanriverdi <i>et al.</i> , 2021) (Tran <i>et al.</i> , 2021) (Teixeira <i>et al.</i> , 2021) (Snellings <i>et al.</i> , 2021) (Alharbi e Abadel, 2022) (Nkomo <i>et al.</i> , 2022) (Widodo <i>et al.</i> , 2023) (McCarthy <i>et al.</i> , 2023)

Fonte: elaborado pelo autor

2.3.2.1 Engenharia e Sustentabilidade

2.3.2.1.1 Filtro de Elementos

Ulatowska *et al.* (2014) e Purbasari *et al.* (2022) abordaram a utilização de resíduos industriais para resolver questões ambientais e de saúde pública. Com a utilização de cinzas volantes produzidas a partir do processo de combustão do carvão, Purbasari *et al.* (2022), testou sua aplicação como adsorvente para tratamento de águas residuais contaminadas com íons de Zn (II).

As cinzas volantes foram submetidas a processos de modificação alcalina e ativação alcalina com procedimentos específicos de temperatura e agitação. E para o estudo de adsorção de íons Zn (II), foram realizados experimentos em lotes com variação de concentração inicial da solução de íons de zinco e tempo de adsorção e a eficiência de remoção dos íons foi medida por espectroscopia de absorção (Purbasari *et al.*, 2022).

A modificação alcalina se concentra na alteração da composição química e das propriedades de superfície das cinzas volantes, já a ativação vai além, induzindo uma reestruturação física do material para aumentar sua porosidade e área superficial específica. Ambos os processos visam melhorar a eficiência das cinzas como adsorvente (Purbasari *et al.*, 2022).

O estudo observou que um aumento no tempo de adsorção de até duas horas aumentou a eficiência de remoção dos íons Zn (II), estabilizando-se após esse período. Além disso, o aumento da concentração inicial dos íons diminuiu a eficiência de remoção, sugerindo uma saturação da capacidade de adsorção dos adsorventes. Ambos os tipos de cinzas volantes apresentaram capacidade de adsorver íons Zn (II), sendo mais eficaz nas cinzas volantes ativadas por álcali devido à sua maior área superficial.

Já Ulatowska *et al.* (2014) explorou o potencial das cinzas volantes como adsorvente para remoção de arsênio de soluções aquosas, que como o outro estudo, também foi eficiente.

Na metodologia, o autor faz uma análise abrangente das cinzas volantes, como análises granulométricas e físico-químicas detalhadas, além de realizar experimentos de aglomeração e estudos de resistência mecânica dos aglomerados. Experimentos de adsorção de As (III) foram conduzidos com esses aglomerados de cinzas volantes. A

análise cinética e termodinâmica da adsorção de arsênio (III) também foi realizada, destacando os parâmetros de adsorção em diferentes condições experimentais, como concentração inicial, pH e temperatura. Os experimentos revelaram que a adsorção de arsênio variou ligeiramente com o pH, mas não houve diferenças significativas entre cinzas volantes em pó e aglomerados de cinzas volantes (Ulatowska *et al.*, 2014).

Ambos os estudos destacaram a importância da adsorção como método eficiente e economicamente viável para remover poluentes da água, apresentando vantagens como simplicidade, flexibilidade, eficiência e baixo custo em comparação com outros métodos de tratamento de águas residuais, como precipitação química, troca iônica e filtração por membrana. Embora abordem diferentes poluentes e métodos de tratamento, esses estudos demonstraram como resíduos industriais, como as cinzas volantes, podem ser transformados em recursos para mitigar impactos negativos da poluição ambiental.

2.3.2.1.2 Engenharia Civil e Materiais de Construção

Existem diferentes aplicações e abordagens para o uso de cinzas volantes em engenharia civil e materiais de construção, destacando sua versatilidade e potencial para contribuir para a sustentabilidade e eficiência do setor.

Wasil (2022) abordou a utilização de cinzas volantes como material de construção alternativo para substituir o solo natural em aterros de estrada. O estudo realizou teste de compressibilidade em cinzas volantes, tanto isoladamente quanto em misturas com bentonita. A bentonita foi adicionada para melhorar as propriedades das cinzas volantes, especialmente a condutividade hidráulica.

A compressibilidade do solo refere-se à sua capacidade de reduzir o volume sob a aplicação de carga, sendo um dos principais fatores para contribuir para o assentamento do solo. Os testes de compressibilidade foram realizados em amostras quase saturadas, e os de consolidação foram feitos após a saturação (Wasil, 2022).

Os principais resultados mostraram que a adição de bentonita reduziu a compressibilidade das amostras, com misturas apresentando menor compressibilidade do que amostras puras. A consolidação foi rápida, com a sedimentação principal ocorrendo pouco tempo após a aplicação da carga. Portanto, as cinzas volantes e suas misturas com

bentonita podem ser uma alternativa viável, proporcionando soluções mais estáveis e eficientes em termos de compressibilidade e consolidação (Wasil, 2022).

O trabalho de Gao *et al.* (2023) apresentou um método inovador para preparar materiais mesoporosos à base de sílica a partir de cinzas volantes ativadas. Materiais mesoporosos, caracterizados por poros na faixa de 2 a 50nm, oferecem maior área superficial e capacidade de armazenamento, facilitando a transferência de calor. A sílica derivada de cinzas volantes foi explorada como matéria-prima para esses materiais, utilizando um método chamado gravação ácida de transformação de fase mineral para simplificar a preparação (Gao *et al.*, 2023).

Foi utilizado o ácido clorídrico para atacar a fase cristalina com alta densidade de alumínio ao longo das bordas dos limites de grão, resultando na destruição da estrutura cristalina e na formação de materiais porosos com diferentes formas de poros, controláveis pela dissolução da alumina. Esses materiais foram combinados com polietilenoglicol para formar compósitos estáveis, que têm potencial para aplicações em armazenamento de energia solar, sistemas de ar-condicionado e energia geotérmica (Gao *et al.*, 2023).

Já Ma *et al.* (2023) investigou a relação autóloga das cinzas e propõe métodos de mitigar esse efeito, visando sua aplicação na engenharia estrutural. A retração autóloga refere-se à contração que ocorre em materiais de construção devido a processos internos de secagem ou endurecimento. Esse estudo comparou a redução da contração autóloga de misturas de resíduos ativado por álcalis/cinzas volantes com diferentes proporções de mistura, teores de Na₂O e módulos de silicato além de aditivos minerais como sílica ativa e metacaulim. Parâmetros como evolução de calor, umidade relativa interna, pressão capilar, produtos de reação e estrutura de poros foram examinados (Ma *et al.*, 2023).

Os resultados mostraram que a retração autóloga foi principalmente impulsionada pela pressão capilar, que estava relacionada à cinética de reação dos materiais alcalinamente ativados. O uso de ativadores e aditivos específicos pode reduzir significativamente a retração autóloga, mas foi necessário um cuidado especial no projeto de misturas de materiais alcalinos, considerando o impacto na resistência à compressão (Ma *et al.*, 2023).

2.3.2.1.3 Zeolitização

A zeolitização refere-se ao processo de transformação de materiais ou substâncias em zeólita. As zeólitas são aluminossilicatos cristalinos microporosos com estruturas tridimensionais bem definidas. Esse processo envolve geralmente a utilização de técnicas de síntese, como a síntese hidrotérmica, para promover a formação de zeólita a partir de precursores adequados, como cinzas volantes, microesferas de carvão ou outros subprodutos de combustão. A zeolitização é importante porque as zeólitas possuem propriedades únicas de adsorção, troca iônica, peneira molecular e catalítica, tornando-as úteis em uma variedade de aplicações industriais (Grabias-Blicharz *et al.*; Rychlewska *et al.*, 2022, 2022).

Grabias-Blicharz *et al.* (2022) e Rychlewska *et al.* (2022) discutiram a reutilização de subprodutos da combustão, como cinzas volantes e microesferas de carvão, para a síntese de zeólita. Enquanto o primeiro explorou a mecanossíntese como alternativa promissora para síntese de zeólita a partir de cinzas volantes, o segundo destaca o potencial das zeólitas sintéticas na melhoria do desempenho em materiais de construção.

O estudo de Grabias-Blicharz *et al.* (2022) utilizou cinzas volantes coletadas de uma usina termelétrica e a submeteu a um processo de ativação mecânica por moagem em um moinho de bolas planetário. Em seguida as cinzas volantes moídas foram convertidas em zeólita por meio de um processo hidrotérmico, utilizando uma solução de NaOH (hidróxido de sódio). Diferentes condições de síntese foram testadas variando a temperatura e a concentração da solução de NaOH. Após a síntese, os materiais foram caracterizados.

Foi confirmado que o tratamento mecânico reduziu o tamanho das partículas de cinzas volantes, aumentou a reatividade e contribuiu para a formação de materiais zeolíticos de alta qualidade. Os resultados indicaram que as condições ideais para a síntese eficiente de zeólita a partir de cinzas volantes incluem um tempo de moagem específico, concentração de NaOH e temperatura de cristalização (Grabias-Blicharz *et al.*, 2022).

Rychlewska *et al.* (2022) utilizou duas amostras de subprodutos da combustão de carvão para a zeolitização, cinzas volantes de carvão classe A provenientes da combustão de carvão pulverizado e microesferas de cinzas volantes de carvão. A zeolitização

também ocorreu pelo processo hidrotérmico com o método de tratamento de ativação alcalina direta em etapa única.

Os resultados mostraram que a síntese hidrotérmica direta desses subprodutos produziu zeólita do tipo NaP1 (aluminossilicato de sódio hidratado) em ambos os casos, que são materiais porosos cristalinos. A análise revelou uma alta proporção de zeólita, mulita e quartzo nas amostras. A eficácia da síntese variou com o tempo de ativação alcalina e as condições de temperatura. A zeolitização resultou em um aumento significativo da área superficial específica dos materiais (Rychlewska *et al.* 2022).

Ambos os autores enfatizaram a importância da economia circular e da busca por métodos mais sustentáveis na utilização de resíduos industriais, visando a obtenção de produtos de valor acrescentado.

2.3.2.2 Tecnologia de Construção

2.3.2.2.1 Propriedades e Aplicação de Geopolímeros

Os geopolímeros são materiais inorgânicos poliméricos formados por reações químicas entre materiais aluminossilicatos e soluções alcalinas. Eles geralmente são produzidos a partir de materiais de origem mineral, como cinzas volantes, metacaulim, argila calcinada, entre outros. Esses materiais são ativados por uma solução alcalina, como hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio (Na_2SiO_3), resultando na formação de uma matriz tridimensional sólida (Hadi, Al-Azzawi e Yu, 2018; Ishak *et al.*, 2019; Pachamuthu e Thangaraju, 2017; Sitarz-Palczak, Kalemekiewicz e Galas, 2019).

Os geopolímeros têm propriedades mecânicas e durabilidade semelhantes ou até superiores às do concreto convencional. O estudo de Pachamuthu e Thangaraju (2017) analisou o efeito da substituição parcial de cinzas volantes por cinzas de lodo de papel incinerado na preparação de concreto geopolimérico. As cinzas de lodo de papel foram obtidas pela queima de borra de papel, que é o subproduto mais significativo da indústria de celulose e papel (Pachamuthu e Thangaraju, 2017).

O concreto geopolimérico foi preparado substituindo o cimento por cinzas volantes e ajustando a relação água/cimento com a razão entre a solução alcalina e cinzas

volantes. O processo de fabricação do concreto geopolimérico envolve a dissolução dos grânulos de NaOH em água, mistura de materiais secos, adição de solução alcalina, mistura e despejo nas formas. O aumento da resistência mecânica foi observado com a adição de cinzas de lama de papel em condições de cuidado externo e ambiental. A análise de microestrutura mostrou uma melhoria na homogeneidade após a adição dessas cinzas e a análise de energia dispersiva de raio X revelou que a relação Si/Al afeta as propriedades mecânicas do concreto geopolimérico (Pachamuthu e Thangaraju, 2017).

Ishak *et al.* (2019) examinaram o comportamento do concreto geopolimérico com cinzas volantes incorporando cinzas de bambu em temperaturas elevadas. O interesse no uso do bambu na construção se deve à sua sustentabilidade e ao seu potencial para desenvolvimento rural. Neste estudo foi comparada a utilização de cinzas volantes com baixo teor de cálcio e cinzas de bambu e a análise de microscopia eletrônica de varredura revelou que a cinza de bambu possui uma forma retangular, sugerindo que ela pode contribuir para manter a pasta unida e fornecer resistência a altas temperaturas (Ishak *et al.*, 2019).

Os resultados mostraram que a adição de 5% de cinza de bambu em 95% de cinza volante resultou em melhor resistência à compressão após 7 dias de cura, porém, à medida que a porcentagem de cinza de bambu aumentou, a resistência à compressão do concreto geopolimérico diminuiu, provavelmente devido à falta de alumina, que reduziu o produto de geopolimerização. A adição de cinza de bambu também reduziu a resistência à compressão em temperaturas mais elevadas, entretanto a presença de cinzas de bambu reduz a formação de fissuras e rachaduras (Ishak *et al.*, 2019).

Hadi *et al.* (2018) investigou a resistência à compressão de argamassas geopolimérica feitas com cinzas volantes de diferentes fontes. Foram utilizadas cinzas volantes de cinco fontes diferente ativadas utilizando diferentes proporções de ativador alcalino para produzir argamassa geopolimérica. Os resultados mostraram que o aumento do conteúdo de dióxido de silício alimentício (SiO₂) amorfo e o tamanho médio das partículas de cinzas influenciaram a resistência à compressão. Alteração na relação entre os líquidos alcalinos e as cinzas também afetaram a resistência à compressão, com valores abaixo ou acima do ideal resultando em redução da resistência (Hadi *et al.*, 2018).

Já Sitarz-Palczak *et al.* (2019) sintetizaram geopolímeros a partir de cinzas volantes de carvão e biomassa, usando soluções de hidróxido e silicato de sódio como

ativadores. Foi realizada uma comparação das propriedades de sorção e catalíticas desses geopolímeros. A espectroscopia UV-VIS-NIR demonstrou as propriedades catalíticas, sugerindo potencial uso como fotocatalisadores. Os geopolímeros mostraram capacidade de adsorção de íons metálicos, com destaque para imobilização de Cu^{2+} , Mn^{2+} , Pb^{2+} e Zn^{2+} (Sitarz-Palczak *et al.*, 2019).

Os geopolímeros apresentaram uma estrutura heterogênea, típica de geopolímeros a base de cinzas volantes. Também foi observado que as cinzas volantes de carvão têm formas esféricas de silicato e aluminossilicatos em tamanhos diversos, enquanto as de biomassa são menos variadas e granuladas. Esses resultados indicaram que os geopolímeros podem ser eficazes na remoção de metais pesados em soluções aquosas, oferecendo uma nova abordagem para o gerenciamento de resíduos industriais (Sitarz-Palczak *et al.*, 2019).

Em resumo, os artigos exploraram diferentes aspectos da produção e das propriedades do geopolímero, destacando seu potencial como alternativa sustentável na indústria da construção. Geopolímeros são considerados materiais alternativos mais sustentáveis devido ao seu processo de produção, que pode utilizar resíduos industriais ou materiais naturais abundantes, reduzindo assim a demanda por cimento comum, cuja produção é uma das principais fontes de emissão de dióxido de carbono (CO_2) na indústria da construção (Sitarz-Palczak *et al.*, 2019).

2.3.2.2.2 Influência das Cinzas em Materiais de Construção

As cinzas volantes têm sido amplamente estudadas e aplicadas para melhorar as propriedades do concreto, como resistência, durabilidade, trabalhabilidade e redução de fissuras. Ao substituir parcialmente o cimento comum em misturas de concreto, as cinzas volantes podem não só aumentar a resistência mecânica do material, mas também reduzir emissões de dióxido de carbono associadas à produção de cimento. Teixeira *et al.* (2021), Alharbi e Abadel (2022) e Kara de Maeijer *et al.* (2020) avaliaram o uso de cinzas volantes como substituto do cimento, a Quadro 5 mostra a metodologia utilizada por cada um.

Quadro 5. Metodologia aplicada nos trabalhos

Tipo de Cinzas	Metodologia	Referência
Cinzas volantes ultrafinas (dois tamanhos diferentes)	Foram utilizados dois tipos de cimento, ao nível de pasta e argamassa as cinzas foram substituídas em cinco porcentagens diferentes de 0 a 50% e ao nível de concreto em três porcentagens variando de 0 a 25%.	(Kara De Maeijer <i>et al.</i> , 2020)
Cinzas volantes de biomassa e cinzas volantes de carvão	Todas as argamassas foram feitas utilizando a mesma concentração da parte ligante (cimento + cinzas + cal), as formulações de argamassa foram testadas tanto no estado fresco quanto no endurecido.	(Teixeira <i>et al.</i> , 2021)
Cinzas volantes	A mistura de cimento comum com 60% de cinzas volantes foi substituída em cinco diferentes porcentagens por nanopartículas de resíduos de garrafa de vidro, variando de 0 a 10%.	(Alharbi e Abadel, 2022)

Fonte: elaborado pelo autor

Segundo Kara De Maeijer *et al.* (2020) quanto mais cimento for substituído por cinza volante ultrafina, melhor será a trabalhabilidade no nível de pasta e argamassa. Os resultados dos testes demonstraram que a substituição parcial do cimento por cinzas ultrafinas teve influência positiva na resistividade elétrica e coeficiente de migração de cloretos, entretanto teve influência negativa na resistência à carbonatação. Em resumo os resultados demonstraram que as cinzas podem melhorar várias propriedades dos materiais de construção, como trabalhabilidade, resistência mecânica, resistência a corrosão e resistência a expansão álcali-sílica (Kara De Maeijer *et al.*, 2020).

Os resultados de Teixeira *et al.* (2021) foram semelhantes, ao analisar a resistividade elétrica notou-se um aumento com o tempo de cura em todas as formulações, sendo que as argamassas com cinzas volantes de biomassa apresentavam valores inferiores aos daquelas com cinzas volantes de carvão. Entretanto, para os resultados de resistência mecânica, foi observado através do ultrassom de pulso que houve uma diminuição da velocidade nas argamassas com cinzas, indicando menor resistência mecânica (Teixeira *et al.*, 2021).

No teste de carbonatação, diferente do trabalho de Kara de Maeijer *et al.* (2020), Teixeira *et al.* (2021) observou que as cinzas melhoraram resultados de resistência carbonatação com resultados variáveis dependendo do tempo de cura e teor de hidróxido de cal. Outros testes foram realizados, como absorção de água por imersão e capilaridade, e o resultado mostrou que as argamassas com cinzas volantes de biomassa apresentaram comportamento semelhante às de cinzas volantes de carvão, com redução de porosidade com o tempo de cura (Teixeira *et al.*, 2021).

Alharbi e Abadel (2022) também notaram uma melhoria na trabalhabilidade das argamassas modificadas pela inclusão de cinzas volantes e nanopartículas, reduzindo o diâmetro do fluxo. Uma inclusão de 6% de nanopartículas resultou em maior resistência à compressão em todas as idades de cura, superando a amostra controle aos 90 dias. A resistência à flexão, à tração por fissuração e ao módulo de elasticidade também melhoraram (Alharbi e Abadel, 2022).

Além da utilização de fibras de vidro na produção de materiais de construção, existem estudos que investigaram o uso de PET (polietileno tereftalato) (Nkomo, Masu e Nziu, 2022; Widodo *et al.*, 2023). O PET, um dos plásticos mais comuns encontrados em embalagens de bebidas e alimentos, tem sido alvo de preocupações ambientais devido à sua difícil degradação e ao grande volume de resíduos gerados. O PET pode ser moído e transformados em fibras ou flocos, que podem ser incorporados em concretos asfálticos ou em concretos convencionais, melhorando suas propriedades mecânica e reduzindo o consumo de agregados naturais.

Nkomo, Masu e Nziu (2022) estudou a otimização do concreto reforçado com fibra de PET contendo substituição parcial de cimento por cinzas volantes, utilizando modelagem e planejamento experimental. Já Widodo *et al.* (2023) investigou o uso de cinzas volantes e resíduos de garrafas PET para produzir concreto autoadensável mais sustentável e resistente. O Quadro 6 mostra um resumo da metodologia utilizada por eles, ambos utilizam cinza volante classe F (com baixo teor de cálcio).

Quadro 6. Metodologia aplicada nos trabalhos

Metodologia	Referência
Foi realizado um planejamento fatorial completo de 2 fatores e 5 níveis para examinar o impacto da fração de fibras de PET e cinzas volantes nas propriedades mecânicas de lajes de concreto. Foram realizados 25 experimentos seguindo esse plano. O concreto fresco foi preparado conforme padrões específicos.	(Nkomo <i>et al.</i> , 2022)
Os trabalhos experimentais foram realizados em oito variações utilizando 80 corpos de prova, divididos em dois grupos principais de substituição parcial de cimento utilizando 0% e 15% de cinza volante em peso. As duas variantes são adicionadas de fibra PET com base nas frações volumétricas de 0%, 0,25%, 0,50% e 0,75%.	(Widodo <i>et al.</i> , 2023)

Fonte: elaborado pelo autor

A otimização feita por Nkomo *et al.* (2022) considerou simultaneamente várias respostas, incluindo resistência à compressão, resistência à flexão, resistência à tração dividida e custo total. O modelo desenvolvido foi avaliado usando dados experimentais reais e comparando com simulações numérica, os resultados mostraram uma boa correlação entre os valores previstos e os valores reais para a maioria das respostas, indicando a validade do modelo. Notou-se que a fração de massa de fibra no concreto tem uma influência significativa na resistência final do concreto para uma adição inferior a 0,5%, além desta faixa de adição, a resistência diminuiu. Também foi observado que a adição de cinzas volantes aumentou a resistência do concreto em vários níveis, dependendo da adição de fibras, a região ideal estava entre 6 e 25% de teor de cinzas e entre 0 e 0,5% de teor de fibra PET. A combinação ideal de constituintes para máxima resistência mecânica com o menor custo possível foi de 15,75% de cinzas volantes e 0,32% de fibra PET (Nkomo *et al.*, 2022).

Resultados diferentes foram encontrados por Widodo *et al.* (2023), os testes de resistência à compressão indicaram uma diminuição na resistência devido a adição de fibras de PET, sendo essa redução mais significativa nas misturas com cinzas volantes. A presença de fibras de PET causou um aumento na propensão à segregação do concreto fresco, reduzindo sua densidade e sua resistência à compressão. No entanto, todas as misturas testadas ainda atenderam aos requisitos mínimos de resistência à compressão (Widodo *et al.*, 2023).

Por outro lado, os testes de resistência à flexão mostraram que a adição de fibras de PET aumentou a capacidade de resistência à flexão das vigas de concreto. Isso ocorreu porque as fibras de PET foram capazes de resistir a propagação de fissuras e contribuir para a redistribuição das tensões no concreto, resultando em um aumento na resistência a flexão (Widodo *et al.*, 2023).

A formação de fissuras em concreto é uma preocupação comum em estruturas de concreto, e sua ocorrência pode ser influenciada por uma série de fatores, incluindo carga, ambiente, qualidade dos materiais e técnica de construção, a prevenção e o tratamento adequado de fissuras são aspectos essenciais do projeto de construção e manutenção de estruturas do concreto. Tran *et al.* (2021) explorou a eficácia das cinzas volantes no comportamento de autocura do concreto expansivo, buscando reduzir fissuras e melhorar a durabilidade do material (Tran *et al.*, 2021).

Neste estudo, cimento comum, um aditivo expansivo e três tipos de cinzas volantes foram usadas como ligantes. As cinzas utilizadas encontram-se no Quadro 7. Também foi utilizada uma cinza de fundo com densidade específica como substituto parcial do agregado miúdo. Os resultados mostraram que tanto o agente expansivo quanto a cinza volante melhoraram a capacidade de autocura das argamassas. A presença do agente expansivo aumentou significativamente a taxa de fechamento de fissuras, enquanto a cinza volante promoveu uma cura mais rápida (Tran *et al.*, 2021).

Quadro 7. Tipo de cinzas utilizadas por Tran et al. (2021)

Tipo de Cinzas Volante	Características
Tipo A	Alto teor de óxido de cálcio (CaO)
Tipo B	Alto teor de de CaO-SO ₃ -cinza volante de cal livre
Tipo R	Baixo teor de óxido de cálcio (CaO)

Fonte: elaborado pelo autor

Além disso, observou-se que o uso de cinzas volantes em combinação com o agente expansivo resultou em uma capacidade de autocura mais eficaz do que quando utilizados separadamente. O uso da cinza de fundo em uma substituição de 10% do agregado miúdo como agente de cura interna melhorou a capacidade de autocura das

argamassas testadas. A utilização combinada de cinzas de fundo e cinzas volantes tanto na argamassa de cimento comum como na argamassa expansiva conduziu a uma melhoria no comportamento de autocura das argamassas (Tran *et al.*, 2021).

Outros estudos abordaram diferentes aspectos relacionados ao uso e tratamento de cinzas volantes. O estudo de McCarthy *et al.* (2023) investigou o impacto do armazenamento úmido de cinzas volantes na sua utilização em concreto. Concluiu-se que o armazenamento úmido influencia a formação de produtos químicos na superfície das partículas. Os resultados dos testes de argamassa indicaram um aumento no teor de ar em doses fixas de aditivo incorporador de ar para materiais mantidos em condições úmidas (McCarthy *et al.*, 2023).

Já o estudo de Snellings *et al.* (2021) abordou a reciclagem e recuperação de cinzas volantes de baixa qualidade para uso como materiais cimentícios suplementares em cimentos misturados com baixo teor de carbono. O artigo comparou o efeito da classificação de tamanho e do tamanho de moagem na reatividade de cinzas volantes grossas. Notou-se que tanto a classificação de tamanho quanto a moagem aumentam significativamente a reatividade das cinzas volantes, com cinzas volantes classificadas finas alcançando resistência equivalente à do cimento Portland puro em 28 dias (Snellings *et al.*, 2021).

Tanriverdi *et al.* (2021) focaram na caracterização de cinzas volantes de usinas termelétricas a carvão e sua aplicação na produção de tijolos de construção. Os testes realizados nas amostras de cinzas volantes/tijolos de cal produzidos mostraram que a liberação de oligoelementos estava abaixo dos limites de materiais perigosos para a aceitação de resíduos. Os resultados mostraram que os tijolos de cinza volante não queimados são uma forma vantajosa de mitigar o impacto ambiental do descarte de cinzas volantes (Tanriverdi *et al.*, 2021).

2.3.2 Lacunas de pesquisa

2.3.2.1 Revisão bibliométrica

A revisão bibliométrica realizada revelou importantes tendências e enfoques na pesquisa sobre cinzas, particularmente cinzas volantes, em materiais de construção e suas

propriedades mecânicas. Os dados analisados apontam um forte crescimento na pesquisa sobre cinzas nos últimos anos, mas também destacam a necessidade de ampliação dos estudos em direção a novas aplicações.

A alta recorrência da palavra-chave "*fly ash*" (7,71%) em comparação com "*bottom ash*" (5,84%) indica que a maior parte da pesquisa está concentrada em cinzas volantes. Outras cinzas provenientes da combustão de biomassa e outros combustíveis ainda são menos exploradas, apesar do seu potencial para diferentes aplicações.

Embora a presença de palavras-chave como "*heavy-metals*" e "*ecology*" indique uma preocupação com a contaminação e os impactos ambientais, a quantidade de publicações na área de Ecologia e Ciências Ambientais ainda é inferior às da Engenharia e Ciências dos Materiais. Estudos mais abrangentes sobre a destinação adequada das cinzas e a redução de impactos ambientais são necessários.

A análise dos principais periódicos revela uma concentração de publicações em revistas de Engenharia e Ciências dos Materiais, enquanto há poucas publicações relacionadas a políticas públicas, regulamentações e viabilidade econômica da utilização de cinzas em larga escala.

Embora os estudos sobre cinzas tenham avançado significativamente nas últimas décadas, observa-se uma predominância de pesquisas voltadas às cinzas oriundas da combustão de carvão mineral, especialmente as cinzas volantes (*fly ash*). esse direcionamento evidencia uma lacuna relevante no corpo de conhecimento científico: a escassez de investigações aprofundadas sobre cinzas provenientes do carvão vegetal e de outras biomassas.

2.3.2.2 Revisão sistemática

A revisão sistemática evidenciou diversas aplicações das cinzas volantes na engenharia e sustentabilidade, engenharia civil e materiais de construção, além da zeolitização. No entanto, ainda existem lacunas na pesquisa. Falta uma comparação direta entre diferentes métodos de ativação das cinzas e seus impactos nas propriedades químicas e físicas. Além disso, a maioria dos estudos foi conduzida em escala laboratorial, sem considerar as previsões econômicas e operacionais em larga escala.

As aplicações das cinzas geralmente são comprovadas de forma isolada, sem explorar abordagens integradas que combinam suas propriedades adsorventes com usos na engenharia civil. A avaliação ambiental também é limitada, com alguns estudos sobre o ciclo de vida, pegada de carbono e resíduos secundários. Além disso, a durabilidade dos materiais ainda não foi amplamente testada sob condições ambientais reais, como umidade e variações de temperatura.

Por fim, há uma carência de regulamentação e normatização para garantir o uso seguro e comercial desses materiais. Essas lacunas destacam a necessidade de pesquisas futuras para aprimorar o conhecimento e viabilizar soluções mais sustentáveis.

2.4 CONCLUSÃO

A revisão bibliométrica revelou um forte interesse global no assunto, com um aumento constante no número de publicações ao longo do tempo. Os estudos revisados destacaram o potencial das cinzas volantes como uma alternativa sustentável e economicamente viável em várias frentes.

Embora a literatura apresente um volume significativo de estudos sobre cinzas, especialmente aquelas oriundas da queima de carvão mineral, ainda há lacunas importantes relacionadas às cinzas de carvão vegetal e de biomassa. A predominância de pesquisas focadas em *fly ash* limita a compreensão sobre o potencial de outros tipos de cinzas, cujas características físico-químicas distintas demandam investigação específica. Diante do crescente interesse por fontes renováveis e práticas sustentáveis, torna-se essencial ampliar os estudos voltados à caracterização e aplicação dessas cinzas alternativas, contribuindo para o avanço do conhecimento científico e para o desenvolvimento de tecnologias mais alinhadas à economia circular e à valorização de resíduos.

Em suma, a análise sistemática e bibliométrica identificou lacunas na pesquisa sobre cinzas, como a predominância de estudos sobre cinzas volantes em materiais de construção, enquanto outras cinzas e aplicações seguem pouco exploradas. Além disso, há uma carência de investigações sobre regulamentação, viabilidade econômica, impacto

ambiental e testes em condições reais, evidenciando a necessidade de abordagens mais integradas e estudos em larga escala.

2.5 REFERÊNCIAS

ALHARBI, Y. R.; ABADEL, A. A. Engineering Properties of High-Volume Fly Ash Modified Cement Incorporated with Bottle Glass Waste Nanoparticles. **Sustainability (Switzerland)**, v. 14, n. 19, 1 out. 2022.

CUENCA-MOYANO, G. M. *et al.* Design of lightweight concrete with olive biomass bottom ash for use in buildings. **Journal of Building Engineering**, v. 69, 15 jun. 2023.

GAO, J. MING *et al.* Template-free facile preparation of mesoporous silica from fly ash for shaped composite phase change materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 384, 15 jan. 2023.

GRABIAS-BLICHARZ, E. *et al.* Mechanochemically Assisted Coal Fly Ash Conversion into Zeolite. **Materials**, v. 15, n. 20, 1 out. 2022.

HADI, M. N. S.; AL-AZZAWI, M.; YU, T. Effects of fly ash characteristics and alkaline activator components on compressive strength of fly ash-based geopolymer mortar. **Construction and Building Materials**, v. 175, p. 41–54, 30 jun. 2018.

ISHAK, S. *et al.* Performance of fly ash geopolymer concrete incorporating bamboo ash at elevated temperature. **Materials**, v. 12, n. 20, 1 out. 2019.

KARA DE MAEIJER, P. *et al.* Effect of ultra-fine fly ash on concrete performance and durability. **Construction and Building Materials**, v. 263, 10 dez. 2020.

MA, Y. *et al.* Effect of Activator and Mineral Admixtures on the Autogenous Shrinkage of Alkali-Activated Slag/Fly Ash. **Sustainability**, v. 15, n. 22, p. 16101, 20 nov. 2023.

MCCARTHY, M. J.; HOPE, T. A.; CSETENYI, L. J. Wet storage effects on fly ash properties relevant to its use in air-entrained concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 75, n. 3, p. 149–162, 1 fev. 2023.

MOHER, D. *et al.* Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement *PLoS Medicine* Public Library of Science, , 1 jul. 2009.

NKOMU, N. Z.; MASU, L. M.; NZIU, P. K. Optimisation of mechanical properties of polyethylene terephthalate fibre/fly ash hybrid concrete composite. *Case Studies in Construction Materials*, v. 17, 1 dez. 2022.

PACHAMUTHU, S.; THANGARAJU, P. Utjecaj pepela iz papirnog mulja na geopolimerni beton s letećim pepelom. *Gradjevinar*, v. 69, n. 9, p. 851–859, 2017.

PURBASARI, A. *et al.* Comparison of Alkali Modified Fly Ash and Alkali Activated Fly Ash as Zn(II) Ions Adsorbent from Aqueous Solution. *Science of Sintering*, v. 54, n. 1, p. 49–58, 17 fev. 2022.

RYCHLEWSKA, K.; TOMASZEWICZ, M.; RADKO, T. Zeolitization of Coal Fly Ashes and Coal Fly Ash Microspheres. *Journal of Ecological Engineering*, v. 23, n. 11, p. 109–121, 2022.

SAMPAIO E MANCINI. São Carlos, v. 11, n. 1. *Revista brasileira de fisioterapia*, p. 83–89, 2007.

SILVA, L. H. P. *et al.* Potential of bamboo leaf ash as supplementary binder materials - A systematic literature review. *Journal of Building Engineering*, v. 71, 15 jul. 2023.

SITARZ-PALCZAK, E.; KALEMBKIEWICZ, J.; GALAS, D. Comparative study on the characteristics of coal fly ash and biomass ash geopolymers. *Archives of Environmental Protection*, v. 45, n. 1, p. 126–135, 2019.

SNELLINGS, R. *et al.* Classification and Milling Increase Fly Ash Pozzolanic Reactivity. *Frontiers in Built Environment*, v. 7, 12 abr. 2021.

TANRIVERDI, M. *et al.* Leachability of Heavy Metals from Autoclaved Fly Ash-Lime Building Bricks. *Inzynieria Mineralna*, v. 1, n. 1, p. 67–74, 1 dez. 2021.

TEIXEIRA, E. R. *et al.* Effect of biomass fly ash on fresh and hardened properties of high volume fly ash mortars. *Crystals*, v. 11, n. 3, p. 1–21, 1 mar. 2021.

TIAN, Q. *et al.* A Bibliometric Analysis of Research Progress and Trends on Fly Ash-Based Geopolymer. *Materials*, v. 15, n. 14, 1 jul. 2022.

TRAN, N. D.; SAENGSOY, W.; TANGTERMSIRIKUL, S. Self-healing behavior of expansive mortars with fly ash and bottom ash. **Engineering Journal**, v. 25, n. 2, p. 121–133, 2021.

ULATOWSKA, J. *et al.* Use of flyash and flyash agglomerates for As(III) adsorption from aqueous solution. **Polish Journal of Chemical Technology**, v. 16, n. 1, p. 21–27, 2014.

WALTMAN, L.; ECK, N. J. VAN; NOYONS, E. C. M. A unified approach to mapping and clustering of bibliometric networks. **Journal of Informetrics**, v. 4, n. 4, p. 629–635, out. 2010.

WASIL, M. COMPRESSIBILITY OF FLY ASH AND FLY ASH-BENTONITE MIXTURES. **Baltic Journal of Road and Bridge Engineering**, v. 17, n. 3, p. 21–43, 2022.

WIDODO, S. *et al.* Development of Eco-friendly Self-compacting Concrete Using Fly Ash and Waste Polyethylene Terephthalate Bottle Fiber. **Civil Engineering Journal (Iran)**, v. 9, n. 2, p. 437–452, 1 fev. 2023.

WU, W. Y. *et al.* **Harnessing Ash for Sustainable CO₂ Absorption: Current Strategies and Future Prospects** *Chemistry - An Asian Journal* John Wiley and Sons Ltd, , 17 jun. 2024.

YANG, L. *et al.* Mapping of trace elements in coal and ash research based on a bibliometric analysis method spanning 1971–2017. **Minerals**, v. 8, n. 3, 1 mar. 2018.

3. CAPÍTULO III – CARACTERIZAÇÃO DAS CINZAS E INDICAÇÕES DE USO

RESUMO

A queima de biomassa para geração de energia resulta na produção de cinzas, cujas propriedades físicas e químicas variam conforme o tipo de biomassa e as condições de combustão. Este estudo caracterizou oito tipos de cinzas de biomassa, divididas entre cinzas volantes e cinzas de fundo, para avaliar seu potencial de aproveitamento sustentável. Os resultados indicaram que as cinzas de biomassa apresentam grande variabilidade nas propriedades físicas e químicas. As cinzas volantes mostraram maior proporção de partículas finas, baixa umidade (menor que 6%, base úmida) e densidade inferior (até 435,9 kg/m³), enquanto as cinzas de fundo apresentaram partículas maiores, alta umidade (até 65,81%, base úmida) e maior densidade a granel (até 855,4 kg/m³). O teor de carbono fixo foi mais elevado nas cinzas de fundo (41,23%), indicando combustão incompleta, enquanto as cinzas volantes apresentaram maiores teores de voláteis (26,19%) e cinzas (87,13%). A análise química revelou alta concentração de sílica (30%), fósforo (8%) e potássio (14%), especialmente nas cinzas de casca de arroz, sugerindo potencial uso como fertilizante. Entretanto, a presença de metais pesados, como manganês e zinco, pode limitar sua aplicação agrícola sem tratamento prévio. O poder calorífico superior de algumas amostras (15596,5 para CV3) destacou o potencial energético das cinzas. Os resultados reforçaram a viabilidade do aproveitamento das cinzas em setores industriais e agrícolas.

Palavras-chave: Cinzas de Biomassa; Propriedades Físico-Químicas; Aproveitamento Sustentável.

ABSTRACT

The combustion of biomass for energy generation results in the production of ash, whose physical and chemical properties vary according to the type of biomass and the combustion conditions. This study characterized eight types of biomass ash, classified as either fly ash or bottom ash, to assess their potential for sustainable utilization. The results indicated significant variability in the physical and chemical properties of biomass ashes. Fly ashes showed a higher proportion of fine particles, low moisture content (less than 6%, wet basis), and lower bulk density (up to 435.9 kg/m³), while bottom ashes exhibited larger particles, high moisture content (up to 65.81%, wet basis), and higher bulk density (up to 855.4 kg/m³). The fixed carbon content was higher in bottom ashes (41.23%), indicating incomplete combustion, whereas fly ashes had higher contents of volatiles (26.19%) and ash (87.13%). Chemical analysis revealed high concentrations of silica (30%), phosphorus (8%), and potassium (14%), especially in rice husk ash, suggesting potential use as a fertilizer. However, the presence of heavy metals, such as manganese and zinc, may limit its agricultural application without prior treatment. The higher heating value of some samples (15596.5 for CV3) highlighted the energy potential of the ashes. The findings reinforce the feasibility of utilizing biomass ashes in industrial and agricultural sectors.

Keywords: Biomass Ash; Physicochemical Properties; Sustainable Utilization.

3.1 INTRODUÇÃO

A queima de combustíveis renováveis ou materiais residuais para gerar eletricidade ou calor pode resultar na produção de cinzas, que possuem propriedades físicas e químicas distintas das cinzas geradas pela queima de combustíveis não renováveis, como o carvão mineral (Zhai, Burke e Stewart, 2021). As cinzas resultantes da combustão da biomassa ainda são tratadas como resíduos, tornando o descarte e o manejo adequado desses subprodutos um desafio a ser enfrentado (Barišić *et al.*, 2022).

A composição, a morfologia e o tamanho das partículas, bem como a natureza das fases cristalinas e vítreas, o teor de carbono não queimado, e a presença de metais pesados variam significativamente entre as cinzas volantes e as cinzas de fundo. Essas variações são determinantes no comportamento das cinzas quando utilizadas em diferentes aplicações, influenciando diretamente suas propriedades químicas, físicas e ambientais (Jurado-Contreras *et al.*, 2022). A compreensão detalhada dessas características é essencial para otimizar o aproveitamento das cinzas em processos industriais e ambientais (Fidanchevski *et al.*, 2021).

Os altos custos ambientais e financeiros tornam os aterros uma opção cada vez menos viável. Para reduzir ou eliminar a necessidade de destinar cinzas a esses locais, é essencial identificar e promover usos benéficos. A descoberta de mercados potenciais desempenha um papel crucial nesse processo (Elliott, Mahmood e Kamal, 2022).

Qualquer produtor de cinzas deve primeiro caracterizá-las e, em seguida, avaliar se suas propriedades atendem aos requisitos da aplicação desejada. As características gerais das cinzas podem não ser adequadas para todas as específicas, sendo essencial garantir que elas estejam em conformidade com os padrões e regulamentações nacionais. O conhecimento da caracterização das cinzas, da exigência de aplicação e das normas vigentes é fundamental para identificar um uso eficiente das cinzas de caldeira de biomassa (Elliott, Mahmood e Kamal, 2022).

Ainda existem lacunas de conhecimento e oportunidades de pesquisa sobre a utilização benéfica de cinzas (Zhai, Burke e Stewart, 2021). Portanto, o objetivo deste trabalho foi caracterizar oito tipos diferentes de cinzas para compreender sua composição e, assim, identificar as melhores formas de aproveitá-las, contribuindo para soluções mais sustentáveis dentro da economia circular.

3.2 METODOLOGIA

Os materiais utilizados foram as cinzas obtidas das caldeiras após a queima de biomassas. O Quadro 8 apresenta a nomenclatura adotada para as cinzas, sendo CV referente às cinzas volantes e CF para as cinzas de fundo. O Quadro 8 também identifica o material de origem, ou seja, aquele que foi queimado para gerar as cinzas. A Figura 10 mostra as cinzas.

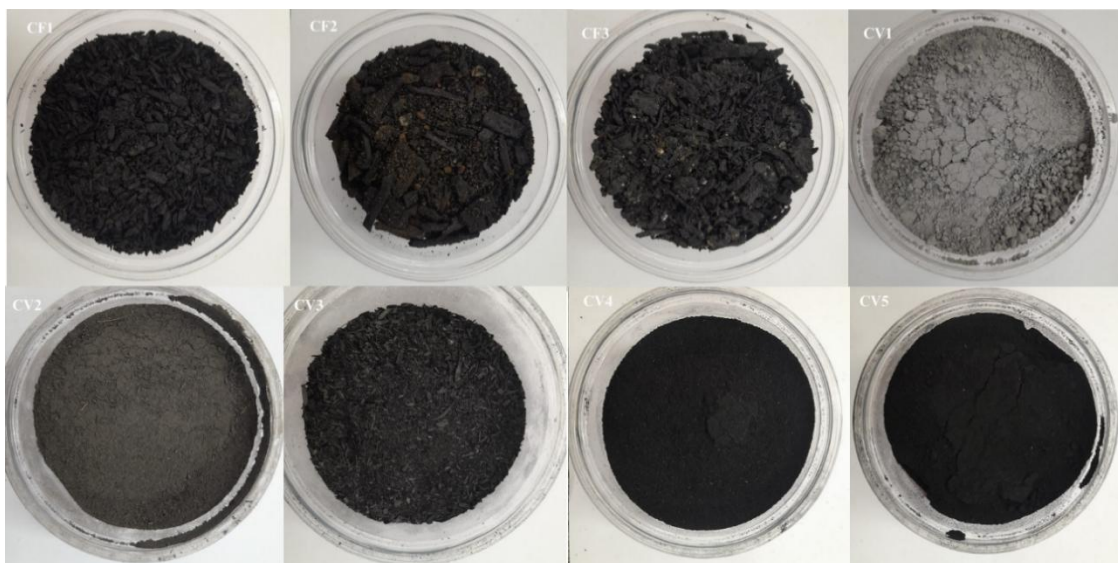
Quadro 8. Identificação das cinzas

ID	Biomassa
CF1	Cavaco derivado de madeira + pó de serra + maravalha
CF2	Cavaco de madeira + cavaco derivado de madeira
CF3	Serragem + resíduos
CV1	Citrus + tora de eucalipto
CV2	Bagaços diversos
CV3	Açaí + cavaco
CV4	Casca de arroz
CV5	Casca de arroz

CF: cinzas de fundo, CV: cinzas volantes.

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 10. Cinzas das caldeiras



CV: cinzas volantes e CF: cinzas de fundo

Fonte: acervo pessoal.

3.2.1 Distribuição granulométrica

A análise granulométrica foi realizada para determinar a distribuição do tamanho das partículas das amostras, o que influencia diretamente a reatividade e o comportamento físico-químico do material em processos industriais.

O ensaio seguiu a norma NBR 7217/87. Foram utilizadas peneiras com aberturas de 5 mesh (4 mm), 9 mesh (2 mm), 20 mesh (0,841 mm), 33 mesh (0,5 mm), 60 mesh (0,250 mm) e 100 mesh (0,149 mm). As amostras foram secas e submetidas ao agitador de peneiras, modelo MA 750, com sistema de agitação mecânico orbital com 250 rpm fixa, operando com batidas intermitentes, por um período de três minutos. Após o processo de agitação, as frações retidas em cada peneira foram coletadas e pesadas para posterior análise.

3.2.2 Teor de umidade

O teor de umidade pode afetar o armazenamento e o manuseio das cinzas, além de aumentar a densidade. Para medir a quantidade de água presente na amostra o teor de umidade foi feito em triplicata seguindo a norma EN 14774-1:2009, foram pesados 100 g de cada amostra e elas foram secas até atingir massa constante em uma estufa com ventilação forçada a 105 ± 2 °C. Uma vez terminado o processo de secagem, as amostras foram pesadas novamente para registrar o peso seco. O teor de umidade foi calculado de acordo com a Equação 1.

$$U\% = ((m_i - m_f) / m_i) \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Em que:

$U\%$ = teor de umidade (base úmida), %;

m_f = massa final, g;

m_i = massa inicial, g.

3.2.3 Densidade a granel

O objetivo da densidade a granel é medir a densidade da amostra no estado natural, sem compactação. A determinação da densidade a granel foi realizada conforme a norma ISO 17828:2015. O procedimento seguiu o princípio de utilizar um recipiente de volume previamente conhecido, o qual foi pesado antes do preenchimento com a amostra úmida. Após o preenchimento inicial, o recipiente foi submetido a quedas controladas de aproximadamente 10 cm de altura por três vezes, visando melhorar o assentamento das partículas. Em seguida, o recipiente foi completado com biomassa até a borda para a medição da massa total. O ensaio foi conduzido em triplicata. A densidade a granel foi determinada segundo a Equação 2.

$$d = (m2 - m1) / v \quad \text{(Equação 2)}$$

Em que:

d = densidade a granel, kg/cm³;

$m2$ = massa do recipiente cheio, kg;

$m1$ = massa do recipiente vazio, kg;

v = volume do recipiente, m³.

3.2.4 Análise imediata

A fim de verificar a qualidade da combustão da biomassa na caldeira, foi realizada a análise imediata das cinzas. O teor de cinzas foi executado em triplicata, baseado na norma ISO 18122:2015. Foram pesados um grama do material e o cadinho calcinado. O conjunto foi colocado na mufla M2/3, da marca Bravac, a 600 °C por 6 horas. O teor de cinzas foi calculado pela Equação 3.

$$tc = (mf / mi) \times 100 \quad \text{(Equação 3)}$$

Em que:

tc = teor de cinzas, %;

mf = massa final de cinzas, g;

mi = massa inicial de cinzas, g.

O teor de materiais voláteis foi feito em triplicata, seguindo a norma ISO 18123:2014. Foram pesados 1,0 g de material, o cadinho e a tampa. O conjunto foi colocado na mufla M2/3, da marca Bravac, a 900 °C por 7 min. O teor de materiais voláteis foi determinado a partir da Equação 4.

$$tv = ((mi - mf) / mi) \times 100 \quad (\text{Equação 4})$$

Em que:

tv = teor de materiais voláteis, %;

mf = massa final, g;

mi = massa inicial, g.

O teor de carbono fixo foi calculado pela diferença entre os valores do teor de materiais voláteis e o teor de cinzas de acordo com a Equação 5.

$$cf = 100 - (tv + tc) \quad (\text{Equação 5})$$

Em que:

cf = teor de carbono fixo, %;

tv = teor de materiais voláteis, %;

tc = teor de cinzas, %.

3.2.5 Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX)

Com o objetivo de identificar e quantificar a composição elementar da amostra, principalmente os elementos inorgânicos, a análise por FRX fornece informações sobre metais, óxidos e outros elementos presentes, ajudando a caracterizar a composição química total da amostra. As amostras foram preparadas por meio da prensagem (prensa hidráulica) da amostra em pastilhas de quatro cm cm de diâmetro por 1,5 cm de altura, utilizando como aglomerante ácido bórico na proporção de aproximadamente 30%, de forma a obter uma amostra compacta. Utilizou-se um equipamento da Marca Rigaku, modelo Supermini 200, equipado com tubo de raio X, 50 kV e 15 mA com potência de 750 w, para estas análises.

3.2.6 MEV/EDS

A fim de avaliar a morfologia e a estrutura superficial das partículas das amostras, foi realizada a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) em conjunto com a Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios X (EDS). Para cada tipo de amostra, foram analisados múltiplos pontos, e a composição elementar das cinzas foi determinada pela média dos valores obtidos. Além disso, a análise também foi realizada no resíduo da análise imediata.

As análises foram conduzidas utilizando um microscópio eletrônico de varredura da marca HITACHI, modelo TM3000, equipado com detector EDS para identificação qualitativa e semiquantitativa dos elementos presentes nas amostras.

3.2.7 FTIR

A análise de cinzas por Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) permite a identificação de ligações químicas presentes nas cinzas com base nas vibrações moleculares. Os espectros foram registrados com a amostra seca e usando um espectrômetro (Thermo Scientific Nicolet™ modelo IR200; região: 4000 a

400 cm^{-1}). A resolução espectral foi de 4 cm^{-1} . Os espectros registrados foram de 32 varreduras.

3.2.8 Poder calorífico superior

O Poder Calorífico Superior (PCS) representa a quantidade total de energia disponível no material durante a combustão. O poder calorífico é chamado de superior quando a combustão se efetua a volume constante e no qual a água formada durante o processo é condensada e o calor latente do vapor d'água não é perdido (Costa *et al.*, 2023). Essa análise é essencial para determinar o valor energético da amostra e sua eficiência em processos de geração de energia. No caso das cinzas, espera-se que o PCS seja zero, o que indica uma combustão eficiente da biomassa e a queima completa do carbono fixo. Ele foi obtido em duplicata com 1,0 g de material previamente seco em estufa. Foi utilizada uma bomba calorimétrica IKA C200 e o procedimento foi baseado na norma ASTM D2015:2000.

3.2.9 Determinação do pH

A determinação do pH foi realizada para avaliar o caráter ácido ou alcalino da amostra em solução aquosa. O pH influencia a reatividade da amostra em diversos processos industriais e pode indicar o potencial de corrosão por alcalinidade das cinzas. Foi realizada conforme a norma ASTM D4972. Inicialmente, uma suspensão foi preparada misturando dez gramas da amostra de cinzas com 40 mL de água destilada. A mistura foi agitada manualmente por 30 segundos para garantir a homogeneidade e, em seguida, deixada em repouso por uma hora para estabilização.

Após o período de repouso, a medição do pH foi realizada utilizando um medidor simpla pH140 previamente calibrado com soluções padrão de pH 4, 7 e 10, de acordo com as instruções do fabricante. O eletrodo foi imerso na suspensão até estabilização da leitura, momento em que o valor do pH foi registrado. O ensaio foi realizado em duplicata para garantir a repetibilidade dos resultados.

3.2.10 Análise estatística

Os dados coletados foram submetidos a testes não-paramétricos uma vez que não havia elementos suficientes para afirmar normalidade da distribuição. Para fazer a comparação entre os 8 tratamentos foi utilizado o Teste de Kruskal-Wallis. O coeficiente de variação, representado pela sigla VAR, foi calculado baseado na mediana e no desvio absoluto da mediana. Foram analisados o coeficiente de variação entre as repetições e entre as amostras. O software utilizado foi o RStudio versão 4.2.1.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Distribuição granulométrica

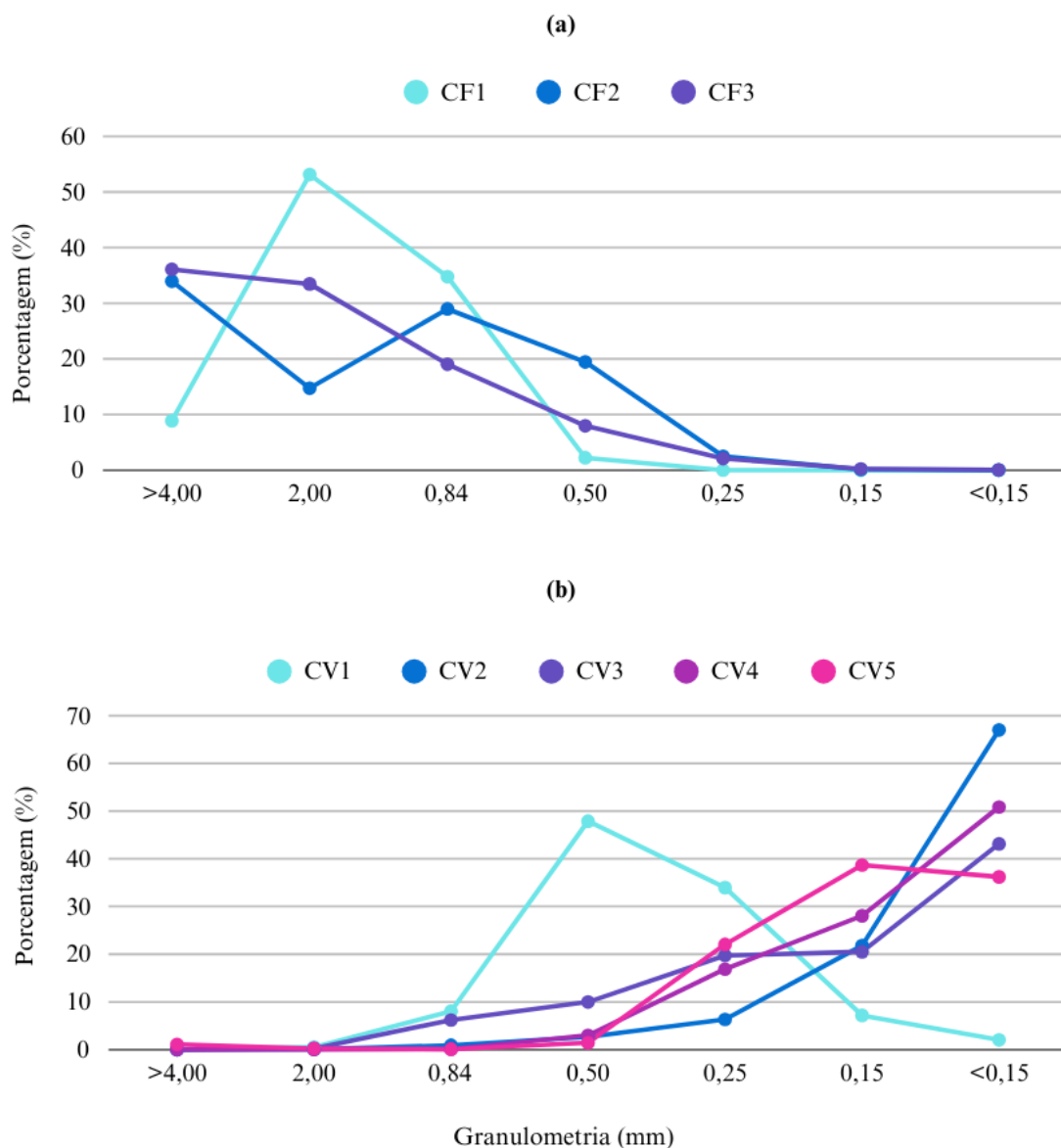
O tamanho das partículas das cinzas volantes é amplamente determinado por fatores como a temperatura do processo de combustão, pelo tamanho da fração de alimentação e pela técnica de combustão. Em reatores de leito fluidizado, o processo ocorre a temperaturas entre 800 e 1000 °C, sob pressão de 1–1,2 MPa, utilizando frações de combustível com tamanhos entre um e cinco milímetros. Por outro lado, em caldeiras de combustível pulverizado, o processo opera a temperaturas de 1200 a 1600 °C, com pressão de dois a oito MPa, e utiliza partículas de combustível menores que 0,1 mm. (Baran *et al.*, 2023; Bošnjak *et al.*, 2022; Zhuge, Duan e Liu, 2021). As cinzas estudadas no presente trabalho são de caldeira de leito fixo.

As cinzas volantes geradas nesses processos podem ser diferenciadas com base no tamanho de seus grãos. As cinzas de granulação fina são aquelas em que as partículas menores que 0,075 mm representam pelo menos 75% do total. Já as cinzas de granulação média possuem entre 40% e 75% de partículas com tamanho inferior a 0,075 mm. Essa faixa distribuída apresenta maior homogeneidade em termos de proporção de partículas finas. Por fim, as cinzas de granulação grossa contêm até 40% de partículas menores que 0,075 mm. Nesse caso, predomina a presença de partículas maiores (Baran *et al.*, 2023b).

A granulometria encontrada nas cinzas (Figura 11) mostrou a diferença entre as cinzas de fundo (a) e as cinzas volantes (b). Nas cinzas de fundo a maioria do seu material foi retido em peneiras menores que 33 mesh (0,5 mm). As cinzas CF2 e CF3 tem cerca

de 97% do material retido em até 33 mesh, enquanto CF1 tem essa mesma quantidade retida em até 20 mesh (0,841 mm). Nas cinzas volantes a quantidade retida nessa granulometria foi bem menor, sendo 8,57% para CV1, 0,96% para CV2, 6,47% para CV3, 0,14% para CV4 e 1,43% para CV5, considerando as peneiras até 20 mesh (5, 9 e 20 mesh).

Figura 11. Granulometria das cinzas



(a) cinzas de fundo e (b) cinzas volantes.

Fonte: elaborado pelo autor

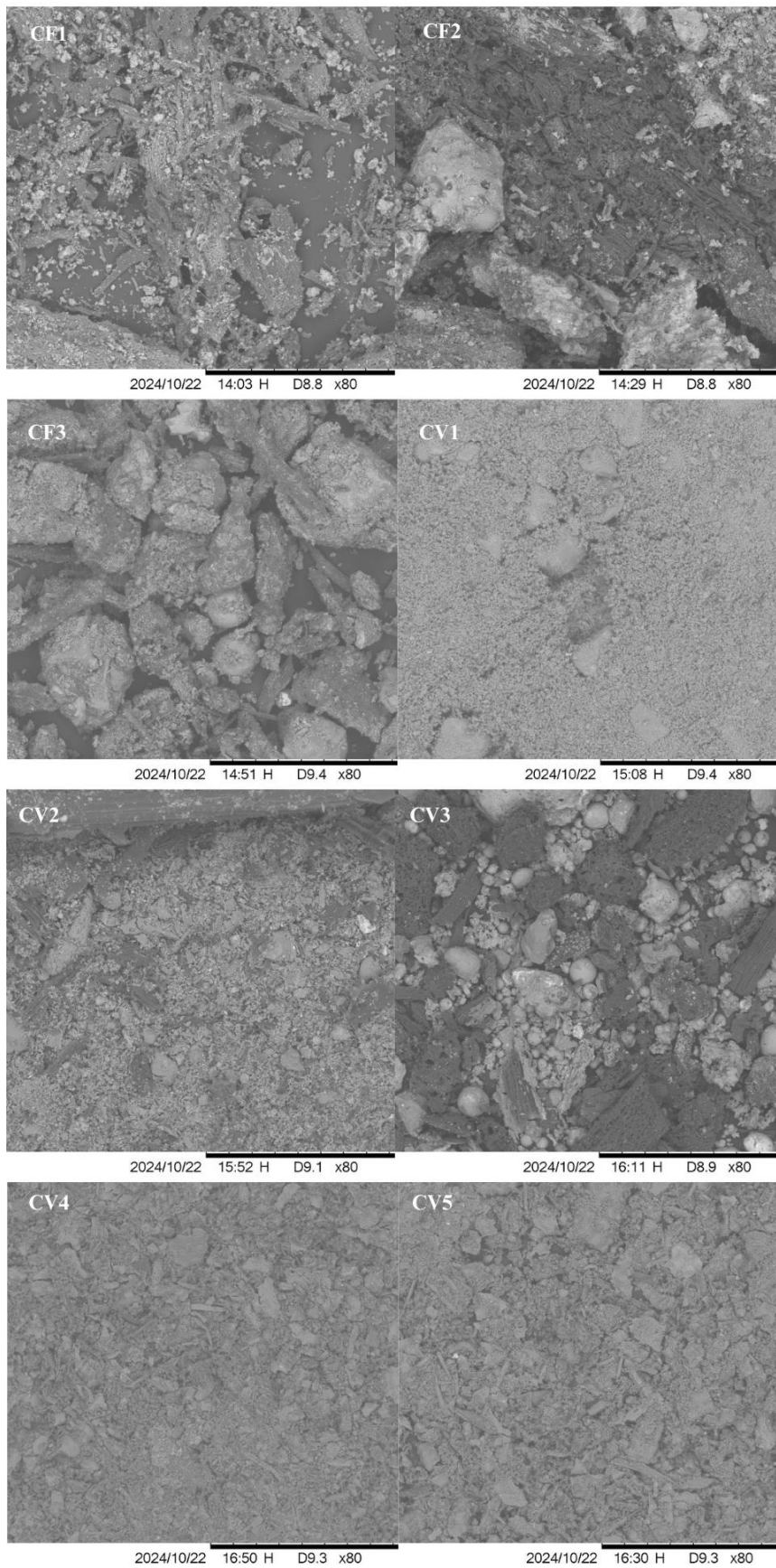
Houve um padrão diferente entre CV1 e as demais cinzas volantes (Figura 11b), o material CV1 apresentou maior porcentagem de retenção em 33 mesh e essa porcentagem foi diminuindo com o tamanho dos mesh, já as cinzas CV2 a CV5 apresentaram uma porcentagem de retenção crescente com o aumento dos meshes. De acordo com a classificação do tamanho das cinzas volantes de Zhuge *et al.* (2021), CV1 apresenta granulação fina, CV2 a CV4 apresentam grão médio e CV5 apresenta grão grosso. Os resultados da análise da peneira feitos por Zhuge *et al.* (2021) mostraram que o tamanho médio das partículas das cinzas de madeira era de aproximadamente 150 μm , o que condiz com os resultados encontrados.

Os materiais extremamente finos desempenham um papel físico importante em matrizes cimentícias, por exemplo, contribuindo para a densificação da mistura. Esse processo resulta no refinamento da estrutura dos poros e na modificação da microestrutura da zona de transição entre os agregados finos e a pasta cimentícia. Além disso, essas partículas inertes de tamanho reduzido podem atuar como pontos de nucleação, promovendo a formação de produtos hidratados. Já as cinzas de fundo possuem grãos irregulares, bordas angulares, superfícies rugosas, partículas porosas e conglomerados, o que pode aumentar a demanda de água e afetar a trabalhabilidade das matrizes cimentícias, influenciando a relação água-cimento (A/C) (Nascimento *et al.*, 2023).

As cinzas volantes mostraram tamanho de partículas menores que as cinzas de fundo, com exceção da cinza CV3, de açaí com cavaco, que além de mostrar uma granulometria maior que as outras cinzas volantes, concordando com a medição do tamanho das partículas (Figura 11), mostrou-se heterogênea, apresentando detritos com formas irregulares, assim como as cinzas de fundo. As partículas esféricas encontradas podem ser atribuídas à temperatura de combustão, que impede a fusão das partículas. O baixo teor de carbono total (Tabela 7) também favorece a formação de partículas finas (Wang, Shen e Sheng, 2012).

Na Figura 12 pode-se perceber a diferença do tamanho das partículas através da imagem do microscópio eletrônico de varredura.

Figura 12. Imagens de MEV das amostras



Fonte: elaborado pelo autor

3.3.2 Teor de umidade

Os resultados apresentados na Tabela 5 mostra as diferenças no teor de umidade entre as amostras de cinzas.

Tabela 5. Teor de umidade das cinzas

Material	Umidade (%bu)
CF1	65,81
CF2	27,39
CF3	49,71
CV1	1,62
CV2	1,73
CV3	5,85
CV4	2,24
CV5	1,89

bu: base úmida; VAR = 58,59%

Fonte: elaborado pelo autor

Os valores encontrados para as cinzas volantes, com exceção de CV3, estão próximos da faixa de valores encontrados na literatura (0,04 – 2,54%). Já o valor para as cinzas de fundo encontrado na literatura (5,29%) é menor que os encontrados no presente trabalho (Wang, Shen e Sheng, 2012).

O alto teor de umidade obtido nas amostras de cinzas de fundo (CF1 a CF3) deve-se principalmente à água utilizada para interromper a combustão dos materiais. Esse processo resulta em um aumento significativo da umidade que, por sua vez, afeta a densidade, elevando o peso das amostras sem alterar o volume ocupado.

O alto teor de umidade afeta diretamente a densidade, pois aumenta o peso das cinzas sem alterar seu volume (Wang, Shen e Sheng, 2012). Já um teor de umidade baixo pode tornar o material inflamável, esse fator pode ser vantajoso em aplicações que requerem uma ignição eficiente, como em processos de queima controlada para recuperação energética. Por outro lado, essa característica também pode representar um risco, especialmente durante o armazenamento e transporte. A maior facilidade de combustão pode aumentar a suscetibilidade a incêndios acidentais.

Nas cinzas volantes, os teores de umidade concentram-se predominantemente baixos, refletindo processos de formação que favorecem a baixa retenção hídrica. No entanto, a amostra CV3 apresentou um teor de umidade maior que os das outras cinzas volantes (5,85%), esse resultado pode estar relacionado com a região úmida em que essas cinzas foram coletadas (Barcarena/PA). Além disso, esse maior teor de umidade pode ser atribuído à maior granulometria e heterogeneidade da amostra, características que facilitam a retenção de água. Esta particularidade influencia diretamente a densidade, uma vez que CV3 apresentou uma densidade maior ($435,9 \pm 4,8 \text{ kg/m}^3$) em comparação com as demais cinzas volantes.

3.3.3 Densidade a granel

As variações na densidade do granel das cinzas podem ser atribuídas a diversos fatores físicos e químicos das amostras. A relação entre o teor de umidade e a densidade foi analisada com base nos valores apresentados na Tabela 5, indicando uma possível correlação com as densidades registradas na Tabela 6, especialmente para o material CF2.

Tabela 6. Densidade a granel das cinzas seguido do desvio absoluto da mediana e do teste de Kruskal-Wallis

Material	Densidade (kg/m^3)	Coefficiente de Variação (%)
CF1	$503,2 \pm 4,1$	0,39
CF2	$855,4 \pm 11,6$	1,36
CF3	$504,4 \pm 3,5$	0,69
CV1	$294,4 \pm 2,9$	0,98
CV2	$382,9 \pm 7,1$	1,86
CV3	$435,9 \pm 4,8$	1,11
CV4	$287,9 \pm 5,0$	1,73
CV5	$261,1 \pm 0,4$	0,14

Teste de Kruskal-Wallis: $H = 22,15$, $p = 0,0024$; VAR = 25,55%

Fonte: elaborado pelo autor

Os resultados do teste de Kruskal-Wallis indicaram diferenças significativas entre as amostras ($p = 0,0024$), evidenciando a influência da origem da biomassa e das condições de combustão nas propriedades das cinzas. O baixo coeficiente de variação

(VAR) em amostras como CF1 e CV5 indicou maior homogeneidade, sugerindo maior eficiência na combustão e composição química uniforme. Por outro lado, CV2 apresentou maior variabilidade, possivelmente devido à heterogeneidade da granulometria.

A densidade das cinzas de biomassa pode variar entre 150-1.300 kg/m³, e em uma faixa mais estreita varia entre 230-770 kg/m³ (Bošnjak *et al.*, 2022; Herman *et al.*, 2016; James *et al.*, 2012). No presente estudo, embora as cinzas tenham demonstrado possuir uma diferença significativa entre elas, as densidades das cinzas demonstradas estão em concordância com a faixa de densidades encontrada na literatura, o que pode refletir as diferenças na compactação mineral, granulometria, e composição química das cinzas.

Entre as amostras avaliadas, CF2 destacou-se como a de maior densidade provavelmente devido à diferenças composicionais. Em contrapartida, amostras como CV5 apresentam densidade mais baixa, refletindo diferenças em sua composição estrutural e teor de umidade. Dentre as cinzas volantes, CV3 que apresentou um maior teor de umidade também apresentou uma maior densidade, entretanto esse resultado foi consistente com os resultados relatados em pesquisas anteriores para cinzas de caroço de açaí (Cordeiro *et al.*, 2019).

3.3.4 Análise imediata e poder calorífico superior

A Tabela 7 apresenta os resultados da análise imediata seguida de seu desvio absoluto da mediana. O Apêndice III apresenta o coeficiente de variação baseado na mediada de cada amostra.

Tabela 7. Valores médios seguido do desvio absoluto da mediana e do teste de Kruskal-Wallis

(continua)

Material	Voláteis (%)	Cinzas (%)	Carbono Fixo (%)
CF1	23,38 ± 0,62	35,38 ± 2,10	41,23 ± 2,38
CF2	7,65 ± 2,52	76,89 ± 3,34	13,82 ± 2,02
CF3	11,60 ± 0,70	53,66 ± 7,46	34,73 ± 7,65

Tabela 7. Valores médios seguido do desvio absoluto da mediana e do teste de Kruskal-Wallis

(conclusão)

Material	Voláteis (%)	Cinzas (%)	Carbono Fixo (%)
CV1	26,19 ± 0,86	74,16 ± 1,20	0
CV2	9,01 ± 0,16	87,13 ± 0,42	3,86 ± 0,58
CV3	7,94 ± 0,35	38,93 ± 0,67	52,70 ± 0,42
CV4	6,31 ± 0,20	79,79 ± 0,32	13,85 ± 0,49
CV5	6,52 ± 1,82	83,15 ± 1,67	10,33 ± 0,96

Teste de Kruskal-Wallis: $p_{VOLÁTEIS} = 0,006$, $p_{CINZAS} = 0,003$, $p_{CARBONO\ FIXO} = 0,002$;

$VAR_{VOLÁTEIS} = 29,46\%$, $VAR_{CINZAS} = 11,88\%$, $VAR_{C\ FIXO} = 80,48\%$

Fonte: elaborado pelo autor

Os resultados do teste de Kruskal-Wallis indicaram diferenças estatisticamente significativas entre as amostras para todas as variáveis analisadas ($p < 0,05$). O coeficiente de variação do carbono fixo foi o mais alto (80,48%), indicando uma grande dispersão entre os valores das amostras. Isso sugere uma significativa variação na composição desse componente, possivelmente devido à heterogeneidade das matérias-primas.

Os valores das cinzas volantes apresentados, tanto para o teor de cinzas quanto para o teor de carbono fixo, com exceção da amostra CV3, estão em concordância com os resultados reportados na literatura. Por outro lado, os valores observados para as cinzas de fundo mostram-se divergentes. Essa discrepância pode ser atribuída a fatores como diferenças nas condições de combustão, na composição do material combustível original ou na eficiência de separação das cinzas durante o processo (Wang, Shen e Sheng, 2012).

Após a análise imediata das cinzas, CV1 apresentou um teor de carbono fixo nulo. Desta forma, presume-se que todo o carbono presente na amostra foi completamente consumido durante a combustão, resultando na ausência de carbono fixo residual.

Os altos teores de cinzas observados nas amostras CV4 e CV5, provenientes da casca de arroz, estão em concordância com resultados relatados em outros estudos (Son

et al., 2023). Já a amostra CV2 destaca-se entre aqueles com maior teor de cinzas, que pode estar relacionado com a eficiência da combustão e com a presença de impurezas.

O conteúdo de voláteis consiste em compostos que se vaporizam durante o aquecimento do combustível, incluindo gases combustíveis e hidrocarbonetos. Dessa forma, materiais com altos teores de voláteis tendem a produzir chamas mais longas e rápidas, enquanto teores baixos indicam uma combustão mais lenta e estável (Demirbas, 2005). Os valores de teor de voláteis apresentados na Tabela 7 variaram entre as amostras demonstradas, refletindo a heterogeneidade das cinzas. As cinzas volantes CV1 destacaram-se com o maior teor de voláteis ($26,19 \pm 0,86$), seguidas de CF1 ($23,38 \pm 0,62$), indicando maior presença de compostos voláteis que são direcionados para combustões mais reativas. Em contrapartida, CV4 ($6,31 \pm 0,20$) e CV3 ($7,94 \pm 0,35$) apresentaram os menores teores de voláteis, o que sugere uma queima mais completa durante o processo de combustão que originou estas cinzas.

Altos teores de carbono não queimado em cinzas de fundo ou cinzas volantes indicam ineficiência da combustão, como visto nas cinzas CF1, CF3 e CV3. Cinzas volantes podem ser reutilizadas em caldeiras de leito fluidizado circulante, nesse processo o carbono residual é queimado novamente, substituindo entre 1% e 2% do combustível primário, o que reduz custos e resulta em cinzas finais com menos carbono, adequadas para outras aplicações industriais, promovendo sustentabilidade e economia. (Demirbas, 2005; James *et al.*, 2012).

O teor de carbono nas cinzas de madeira afeta a eficiência dos processos e a reciclagem. Maior conversão de carbono reduz o volume de cinzas e melhora a eficiência energética. Embora haja potencial para reutilizar cinzas como combustível, como pode ser visto na Tabela 8, que mostra o poder calorífico superior encontrado para as cinzas, são necessárias mais pesquisas sobre o carbono não queimado e estratégias de reaproveitamento, como peletização ou briquetagem (James *et al.*, 2012).

A Tabela 8 apresenta o poder calorífico superior das amostras. O Teste de Kruskal-Wallis aplicado ao PCS resultou em um valor-p de 0,104, indicando que não há diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos ao nível de 5% de significância.

Tabela 8. Poder calorífico superior das cinzas seguido do desvio absoluto da mediana e do teste de Kruskal-Wallis

Material	PCS (J/g)	Coeficiente de Variação (%)
CF1	16801 ± 74,95	0,45
CF2	-	-
CF3	10569 ± 515,0	4,87
CV1	-	-
CV2	-	-
CV3	15596,5 ± 1678,5	10,76
CV4	-	-
CV5	-	-

Teste de Kruskal-Wallis: H = 6,17, p = 0,104, VAR = 31,56%

(-) não detectado

Fonte: elaborado pelo autor

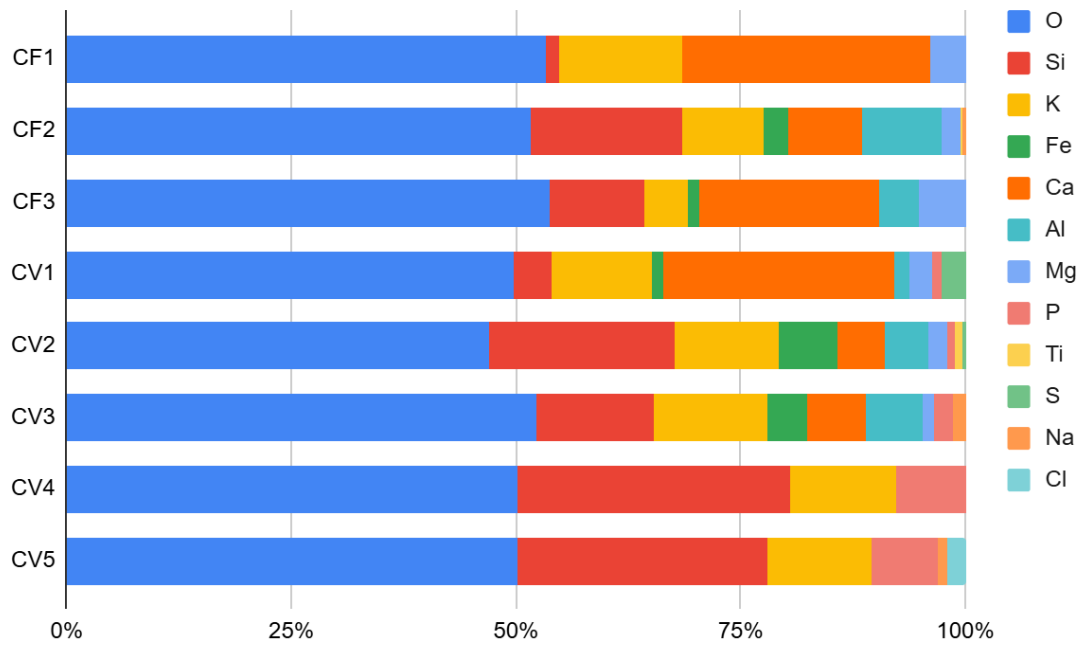
A medida padrão do conteúdo energético de um combustível é seu valor calorífico (Demirbas, 2002). O poder calorífico superior é afetado diretamente pelo teor de cinzas (Demirbas, 2005). Os poderes caloríficos não detectados foram justificados pelo maior teor de cinzas (Tabela 7) encontrados nas amostras CF2, CV1, CV2, CV4 e CV5. Os materiais CF1 e CV3 destacam-se com os maiores PCS, afirmando sua viabilidade como biocombustível. Já CF1 apresenta o menor valor de PCS, provavelmente devido ao alto teor de umidade e cinzas, que diminuem sua eficiência energética (Kamruzzaman *et al.*, 2024).

3.3.6 EDS e FRX

As figuras 13 e 14 mostram o resultado da espectroscopia por energia dispersiva das cinzas antes e depois da análise imediata, respectivamente. O Apêndice II contém a tabela com a quantidade exata de cada elemento. A análise de Fluorescência de Raios X (FRX) foi realizada, contudo, apenas as amostras CV4, CV5 e CF2 apresentaram resultados conclusivos. As demais amostras causaram falhas no equipamento, possivelmente devido à umidade ou problemas no vácuo do sistema. Foram adotadas medidas como secagem, trituração, aumento da compactação e ajuste na proporção de ácido bórico, porém sem sucesso. Como cada tentativa exigia a exposição do tubo de

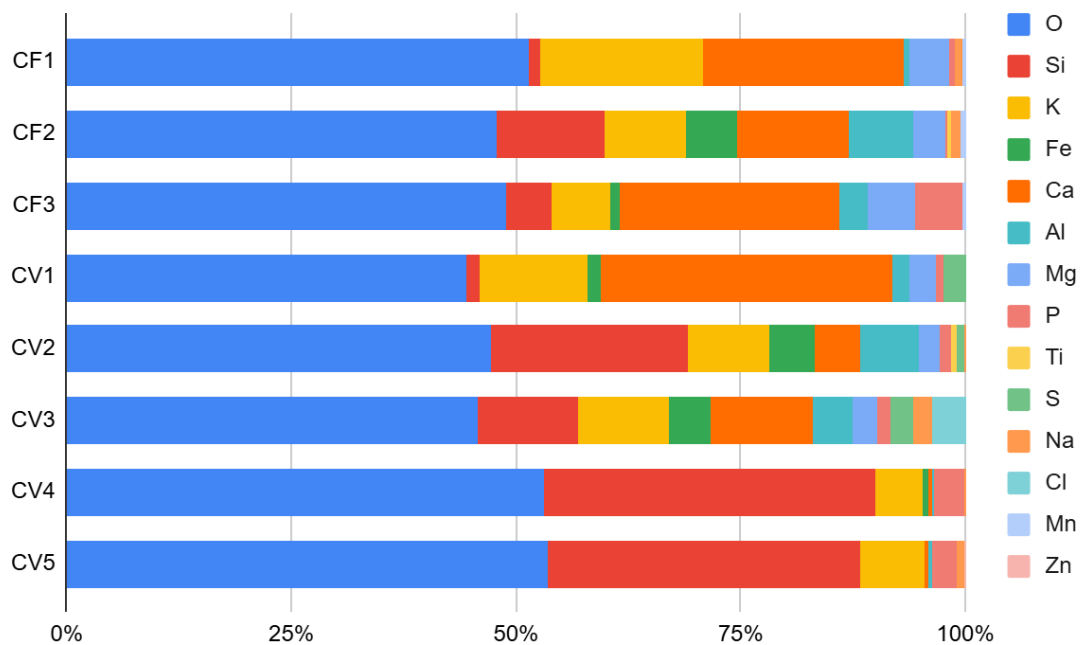
raios X e dos detectores à atmosfera não controlada, optou-se por interromper as análises para evitar danos ao equipamento.

Figura 13. EDS das cinzas



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 14. EDS das cinzas da análise imediata



Fonte: elaborado pelo autor

A composição química da biomassa e, em particular, dos constituintes das cinzas, apresenta alta variabilidade devido a diferenças nos tipos de matéria inorgânica presentes na biomassa, determinados por suas características genéticas (Vassilev *et al.*, 2012). Os principais componentes de interesse das cinzas incluem sílica (Si), potássio (K), cloro (Cl), enxofre (S), ferro (Fe), fósforo (P), magnésio (Mg), cálcio (Ca), titânio (Ti), carbono (C), hidrogênio (H) e oxigênio (O) (Eliche-Quesada *et al.*, 2017).

Teores de potássio em amostras de cinzas de combustão de madeira podem variar de 1,1 a 23,55% (Cuenca *et al.*, 2013; Smołka-Danielowska e Jabłońska, 2022). Os teores de sódio variam de 0,16 a 2,05% e o de fósforo de 1,03 a 3,40% (Cuenca *et al.*, 2013). O fósforo apareceu inicialmente somente nas cinzas volantes, entretanto após a combustão das cinzas de fundo, ele também apareceu, principalmente na CF3, com 5,2%. De forma semelhante, o sódio foi identificado em algumas cinzas somente após a combustão, estando ausente em todos os momentos na amostra CV1.

A adição de metais pesados como o manganês (Mn) e o zinco (Zn), que apareceram nas análises posteriores (ex.: 0,2% Mn em CF1 e 0,2% Zn em CV5), pode indicar a possível influência de poluentes ou outros resíduos presentes na amostra original que foram liberados durante a queima. Na análise de FRX das amostras CV4 e CV5 também foram identificadas pequenas concentrações de óxidos de manganês (0,894% e 1,07%, respectivamente) e zinco (1,05% e 1,36%, respectivamente). As cinzas de fundo têm concentrações menores de metais pesados do que as cinzas volantes, como tal, uma mistura de cinzas volantes e cinzas de fundo pode ser adequada para aplicação como uma emenda de solo para solos florestais (James *et al.*, 2012).

Segundo Smolka-Danielowska & Jablonska (2022), concentração de manganês nas amostras de cinza pode variar entre 0,02 e 1,47%, os dados obtidos estão alinhados com as informações disponíveis na literatura (Jukić *et al.*, 2017). A amostra CF2 também apresentou teores de óxido de manganês (2,44%) na análise do FRX.

O teor de titânio pode variar de 0,22 a 0,37% em cinzas de biomassa de madeira (Smołka-Danielowska e Jabłońska, 2022), sua presença foi observada apenas nas cinzas das cinzas CF2 (0,4%) e CV2 (0,6%) com valores superiores que os encontrados na literatura.

Uma abordagem para analisar e classificar as cinzas volantes consistem em agrupamentos com base nas concentrações de dióxido de silício (SiO₂), óxido de alumínio

(Al₂O₃) e óxido de cálcio (CaO). Dessa forma, elas são subdivididas em cinzas de silicato, alumínio e cálcio. O principal composto químico que constrói a estrutura cristalina das cinzas é o SiO₂, e seu teor médio em cada cinza volante é de cerca de 50%. O segundo composto químico a ser considerado é o Al₂O₃, seu teor varia de 20 a 30% (Baran *et al.*, 2023).

A sílica apresenta variações consideráveis, na amostra CF1 a concentração permanece constante (1,3%). Já em outras amostras (como CF2), há uma redução significativo na quantidade de Si (de 16,9% para 11,9%), possivelmente devido à transformação das fases de sílica cristalina em amorfa (Hossain, Mathur e Roy, 2018). As cinzas CV2, CV4 e CV5 tiveram um aumento na quantidade de sílica após a combustão.

A análise de FRX da amostra CV5 revelou uma composição predominantemente rica em sílica (48,5%). Além disso, foram identificadas menores concentrações de óxidos de cálcio (2,74%), magnésio (0,717%), alumínio (0,379%), ferro (0,783%). Para a amostra CV4 também revelou uma composição predominantemente rica em sílica (56,2%), óxido de fósforo (14,6%) e o óxido de potássio (18,0%), além da presença de cloro (3,11%) e bromo (0,236%) que sugere a possibilidade de compostos halogenados associados à amostra. Já a amostra CF2 apresentou uma composição distinta, caracterizada por um alto teor de óxido de ferro (27,4%) e óxido de cálcio (16,8%), além de uma quantidade expressiva de sílica (26,5%).

As cinzas da casca de arroz contêm mais de 85% de sílica em sua composição (Hossain, Mathur e Roy, 2018; Saceda *et al.*, 2011), entretanto, as amostras demonstradas neste estudo tiveram teores menores, com valores de 30,4% e 27,8% para as cinzas volantes CV4 e CV5, respectivamente. Essa diferença pode ser atribuída às condições específicas de combustão, processamento ou ao material de origem utilizado neste trabalho. A composição química da casca de arroz varia de uma amostra para outra devido às diferenças no tipo de arroz, ano de colheita, clima e condições geográficas (Pode, 2016).

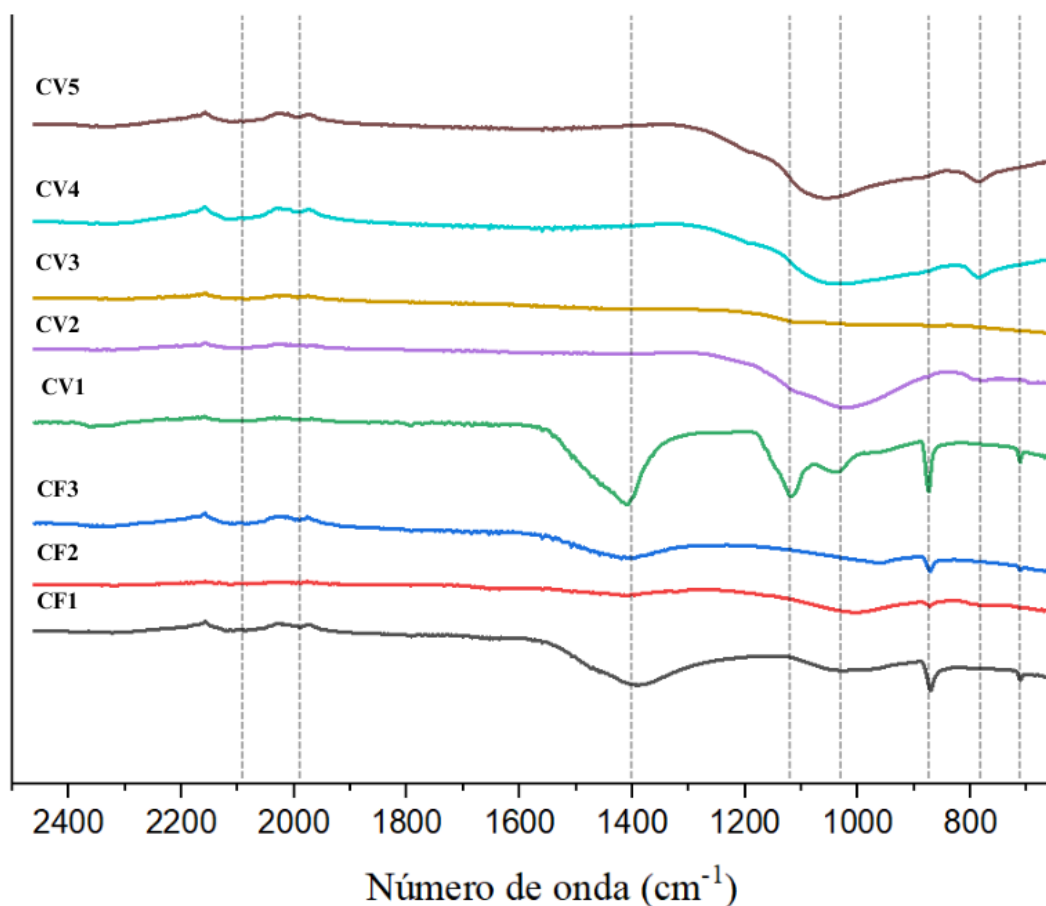
O fósforo presente nas cinzas CV1 a CV5, mais presente nas cinzas CV4 (7,7%) e CV5 (7,3%), é uma alternativa sustentável e renovável às fontes não renováveis, como os minérios de fosfato, atendendo à crescente demanda desse elemento essencial para a segurança alimentar e a indústria (Vassilev, Vassileva e Bai, 2023a). Também foram

detectadas concentrações relevantes de óxido de potássio (9,23%) e óxido de alumínio (6,88%) na amostra CF2 após a análise de FRX.

3.3.7 FTIR

Os grupos funcionais na superfície das cinzas foram determinados por FTIR (Figura 15). Os espectros confirmam a presença do grupo carbonato (CO_3)²⁻ em 1405-1380 cm^{-1} (Trivedi *et al.*, 2016; Trivedi, Mandavgane e Chaurasia, 2018), vistos na amostras CF1, CF3 e CV1. Os picos de vibrações em 1011-1062 cm^{-1} vistos em quase todas as amostras são vibrações de alongamento de Si-O-Si, concordando com os dados encontrados nas análises de EDS e FRX (Silvestro *et al.*, 2023; Yang *et al.*, 2024).

Figura 15. Espectroscopia de infravermelho



Fonte: elaborado pelo autor

A banda de absorção em torno de 875 cm^{-1} mostra a vibração do óxido de alumínio (Al_2O_3) e pode ser vista nas amostras CF1, CF2, CF3 e CV1 (Silvestro *et al.*, 2023). A banda larga de $800\text{-}1200\text{ cm}^{-1}$ (CV2, CV4 e CV5) sugere uma ampla distribuição de unidades de Si com ligações variadas. As bandas de 710 , 711 e 726 cm^{-1} detectadas nas amostras CF1, CV1 e CF3, respectivamente são devido a ligações Si-O e as bandas entre $1990\text{-}2100\text{ cm}^{-1}$ são de grupos OH da ligação Si-OH (Nelson *et al.*, 2023; Silvestro *et al.*, 2023; Trivedi, Mandavgane e Chaurasia, 2018)

Não houve detecção de banda em $2300\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$, sugerindo a remoção de todos os traços de moléculas de água e grupos funcionais polares durante o processo de calcinação (Nelson *et al.*, 2023).

3.3.8 Determinação do pH

A Tabela 9 mostra os valores de pH encontrados nas cinzas. Os valores de pH variaram significativamente entre os materiais analisados.

Tabela 9. pH das cinzas seguido do desvio absoluto da mediana e do teste de Kruskal-Wallis

Material	pH	Coefficiente de Variação (%)
CF1	$10,56 \pm 0,01$	0,048
CF2	$9,94 \pm 0,05$	0,458
CF3	$11,10 \pm 0,02$	0,137
CV1	$12,87 \pm 0,01$	0,039
CV2	$9,86 \pm 0,10$	1,026
CV3	$9,73 \pm 0,05$	0,468
CV4	$4,04 \pm 0,02$	0,509
CV5	$4,06 \pm 0,05$	1,141

Teste de Kruskal-Wallis: $H = 0,099$, $p = 0,753$, VAR = 9,48%

Fonte: elaborado pelo autor

Materiais como CV1 apresentaram pH bastante alcalino ($12,76 \pm 0,01$), enquanto CV4 e CV5 demonstraram caráter ácido ($3,93 \pm 0,02$ e $3,95 \pm 0,05$, respectivamente). Apesar dessa variação, o teste de Kruskal-Wallis para pH resultou em um valor-p de

0,753, indicando que as diferenças entre as amostras não foram estatisticamente significativas.

Isso sugere que, embora os valores absolutos do pH variem entre os materiais, essa variação não é suficientemente consistente para ser considerada estatisticamente relevante dentro da amostragem utilizada. Esse resultado pode estar relacionado à baixa quantidade de amostras ou à alta variabilidade dos dados dentro de cada grupo.

Os valores de CF1, CF2, CF3, CV1, CV2 e CV3 coincidiram com valores encontrados na literatura (8,6 – 13,5) (Asquer *et al.*, 2017; Demeyer, Voundi Nkana e Verloo, 2000; Jukić *et al.*, 2017; Reed *et al.*, 2017; Wang, Shen e Sheng, 2012). Já os valores das cinzas de casca de arroz, CV4 e CV5, embora menores que os valores das outras cinzas, foram inferiores ao encontrado em outro trabalho (8,1) (Vassilev, Vassileva e Bai, 2023b). Portanto, com exceção de CV4 e CV5, todas as outras cinzas são alcalinas.

As cinzas das amostras CV4 e CV5 apresentaram pH ácido devido à sua composição química. Ambas as amostras possuem elevados teores de sílica (60,9% e 55,7%, respectivamente), um composto de caráter ácido predominante em materiais ricos em óxidos ácidos. Além disso, a presença significativa de fósforo (15,4% em CV4 e 14,6% em CV5) contribui para a geração de acidez, possivelmente pela formação de fosfatos ácidos. A ausência de elementos alcalino-terrosos como cálcio e magnésio, conhecidos por neutralizar compostos ácidos (Meurer *et al.*, 2010), intensifica essa característica. A análise de difração de raios X (DRX) foi realizada para essas cinzas a fim de identificar a estrutura cristalina dos materiais e entender melhor esse caráter ácido das cinzas. O resultado justificou a acidez observada, devido à predominância de KH_2PO_4 (fosfato monopotássico) nas cinzas da casca do arroz. A maior concentração desse composto pode reduzir o pH da amostra, uma vez que seu pH característico é aproximadamente 4,0 (Wang *et al.*, 2024).

Son *et al.* (2023) estudaram as cinzas de casca de arroz e relataram a presença de elementos, como magnésio e cálcio, que são conhecidos por aumentar o pH por meio da formação de compostos básicos, como óxidos, hidróxidos e carbonatos, que tamponam a acidez. A predominância de sílica na composição das cinzas de casca de arroz, aliada à escassez de cátions básicos como magnésio, ferro, cálcio e alumínio, contribui para a acidez do material (Meurer *et al.*, 2010).

3.3.9 Aplicações potenciais

A sustentabilidade e os princípios da economia circular priorizam a redução no consumo de recursos não renováveis, promovendo a substituição desses por resíduos. Nesse contexto, as cinzas provenientes da combustão de biomassa se destacam por seu potencial de uso em diversas áreas, como fertilizantes agrícolas, combustível devido ao alto conteúdo de carbono não queimado, e aditivos em materiais de construção (James *et al.*, 2012).

Particularmente, cinzas volantes com elevado teor de cálcio possuem uma resistência hidráulica significativamente alta, permitindo seu uso como substituto do cimento na construção, o que contribui para a redução do custo de produção. Além disso, com características pozolânicas, as cinzas de madeira melhoram a resistência ao ataque ácido e reduzem os efeitos de cloretos e reações expansivas, mas aumentam a carbonatação e podem prejudicar a resistência mecânica com altos teores. Substituições inferiores a 10% são recomendadas, mas questões ambientais e variações químicas limitam sua aplicação prática. (Baran *et al.*, 2023; Silva *et al.*, 2015; Zhuge, Duan e Liu, 2021).

O uso de cinzas como fertilizante e corretivo de solos está relacionado à sua composição química, influenciada por cálcio, fósforo, potássio, magnésio, micronutrientes e pH alcalino (Bošnjak *et al.*, 2022). A aplicação de cinzas de madeira aumenta o pH do solo, reduzindo o teor de Al trocável em solos ácidos, o que é crucial para sua eficácia como fertilizante e corretivo de solo (Demeyer, Voundi Nkana e Verloo, 2000; Wang, Shen e Sheng, 2012). Valores de pH mais ácidos geralmente se correlacionam positivamente e significativamente com a matéria inorgânica e os componentes móveis de enxofre, cloro e sódio (Vassilev *et al.*, 2012; Vassilev, Vassileva e Bai, 2023a).

A presença de metais pesados e outras substâncias poluentes deve ser considerada. Cinzas podem fornecer Ca, Mg, K e P a longo prazo (Bošnjak *et al.*, 2022). Em solos ácidos tropicais e florestais, cinzas de madeira reduzem a toxicidade de Al e Mn, mas há limites de pH para seu uso direto: até 10,0 para solos ácidos e 8,7 para solos neutros ou alcalinos (Demeyer, Voundi Nkana e Verloo, 2000).

Além de fertilizantes, as cinzas de biomassa também têm sido estudadas para melhorar processos biológicos. Asquer *et al.* (2017) avaliaram a adição de cinzas de biomassa na compostagem de resíduos orgânicos, constatando melhoria no processo e na

qualidade do composto final, com maior degradação da matéria orgânica, maior estabilidade biológica e aumento de nutrientes, especialmente potássio e fósforo. Embora não tenha havido aumento significativo de metais pesados, exceto alumínio e manganês, houve maior lixiviação de cobre, que exige atenção. As cinzas volantes e de caldeira demonstraram potencial como condicionadores físicos, aditivos minerais e melhoradores da humificação em compostos provenientes de resíduos sólidos urbanos.

Ademais, as cinzas de fundo apresentaram um grande potencial para uso como catalisadores na gaseificação a vapor de biomassa. A presença de elementos como sílica, cálcio, magnésio, ferro, alumínio e titânio reforça essa viabilidade, pois esses compostos são amplamente utilizados como catalisadores em processos de gaseificação. O alto teor de dióxido de silício (SiO_2) permite seu uso como material de leito, enquanto o óxido de ferro (Fe_2O_3) contribui para a eficiência das reações químicas (Herman *et al.*, 2016).

Outro campo promissor é o uso de subprodutos da combustão na síntese de geopolímeros e zeólitas. Os geopolímeros, que são copolímeros de silício e óxido de alumínio estabilizados por cátions metálicos, têm diversas aplicações industriais. Já as zeólitas, minerais aluminossilicatos com microporos, também possuem um amplo espectro de usos, desde a purificação de água até o armazenamento de energia (Baran *et al.*, 2023; Rocha Junior *et al.*, 2012).

Entre as cinzas estudadas, as cinzas de casca de arroz, como CV4 e CV5, destacaram-se pela maior presença de sílica, que pode estar em forma amorfa ou cristalina, dependendo das condições de combustão. Sílica amorfa é aplicada na fabricação de géis de sílica, chips de silício, isolantes, zeólitas, baterias de íons de lítio, grafeno e sistemas de armazenamento de energia (Chandrasekhar *et al.*, 2003; Eliche-Quesada *et al.*, 2017; Pode, 2016; Zucco e Beraldo, 2008).

Em termos de aplicações concretas, as cinzas com alta variabilidade química e maior quantidade de sílica amorfa têm maior potencial pozolânico. A substituição parcial do cimento Portland por cinza de fundo pode valorizar esse resíduo, com substituições ideais entre 5% e 20%, sendo 10% o nível mais eficiente para o desempenho do concreto (Nascimento *et al.*, 2023). Além disso, as cinzas de biomassa possuem fósforo em níveis comparáveis aos minérios, o que as torna uma opção viável para fertilizantes e condicionadores de solo, embora a biodisponibilidade do fósforo seja reduzida após altas temperaturas de combustão (Vassilev, Vassileva e Bai, 2023a).

Apesar do grande potencial das cinzas, sua heterogeneidade, resultante da variação no processo de queima, ainda representa um desafio significativo para sua utilização industrial. A falta de uniformidade dificulta a padronização necessária para muitas aplicações, como na construção civil e na agricultura (Cacuro e Waldman, 2015). Por isso, o tratamento das cinzas, como a moagem e a lavagem, surge como uma alternativa mais sustentável e econômica em relação ao seu descarte em aterros (Doudart de la Grée et al., 2016).

Além da questão de heterogeneidade, A utilização da biomassa para geração de energia enfrenta desafios relacionados à sazonalidade e à necessidade de grandes volumes homogêneos, além de exigir um sistema logístico complexo para suprimento (Leitão, 2016; Valentim Bastos et al., 2022; Zhai, Burke e Stewart, 2021). Barreiras técnicas, econômicas e regulatórias, como altos custos de transporte e normas restritivas, limitam seu aproveitamento, apesar do potencial para aplicações ambientais e na construção civil (Prasittisopin, 2024). A superação desses desafios demanda investimentos em pesquisa, desenvolvimento tecnológico e maior conscientização sobre os benefícios das cinzas (Ahmaruzzaman, 2010).

Com isso, o Quadro 14 a seguir mostra as possíveis aplicações para cada tipo de cinza estudada neste trabalho de acordo com suas propriedades.

Quadro 9. Sugestões de aplicação das cinzas de acordo com suas características

(continua)

Aplicação	Característica	Cinzas
Construção civil (substituto do cimento, aditivos pozolânicos)	Teor de Ca >25%, Al >6%, densidade >800kg/m ³ , pH >10,	CF1, CF2, CV1, CV2
Correção de solo ácido (neutralização de Al tóxico)	Teor de Ca >25%, pH >10	CF1, CV1
Catalisadores e adsorventes (suporte de catalisadores, materiais porosos)	Carbono fixo >30%, pH alcalino (>9)	CF3, CV3

Quadro 9. Sugestões de aplicação das cinzas de acordo com suas características

(conclusão)

Aplicação	Característica	Cinzas
Uso agrícola (aditivos para solos com deficiência de micronutrientes)	Teor de Al >8%, Si >15%, pH moderado (9-10)	CF2
Aditivos para compostagem (retenção de nutrientes)	Carbono fixo >30%, pH alcalino (>9)	CF3
Fertilizantes	Presença de Ca (>8%) e K (>10%)	CF1, CF2
Combustível sólido e gaseificação	Carbono fixo >40%, PCS >10.000 J/g	CF3, CV3
Fertilizantes especiais e biofertilizantes	Teor de Si >25%, P >7%, pH ácido (<5)	CV4, CV5
Síntese de zeólitas e materiais refratários	Teor de Si >20%, Al >6%	CF2, CV2, CV4, CV5
Materiais adsorventes	Alta porosidade e pH >10	CV1, CV3, CV4, CV5
Produção de géis de sílica e purificação de água	Teor de Si >25%, P >7%, pH ácido (<5)	CV4, CV5
Materiais para energia (grafeno, baterias, armazenamento)	Teor de Si >50%, P >7%, pH ácido (<5)	CV4, CV5

Fonte: elaborado pelo autor

3.4 CONCLUSÃO

A classificação e caracterização das cinzas destacaram o grande potencial desses subprodutos da combustão para aplicações diversificadas, contribuindo para a reutilização sustentável desses materiais. A análise revelou que as propriedades químicas e físicas das cinzas, como teor de carbono fixo, níveis de cálcio, sílica, potássio, alumínio, fósforo, além do pH e granulometria, são fatores determinantes para sua utilização em diversas áreas.

Os resultados deste estudo reafirmaram a importância de caracterizar as cinzas de biomassa como forma de explorar melhor seu aproveitamento em uma economia circular. Estratégias que combinem avanços tecnológicos e econômicos podem facilitar a valorização desses materiais, transformando um resíduo em um recurso com alto valor agregado. Assim, a integração de cinzas de biomassa em processos industriais, agrícolas e tecnológicos representa uma oportunidade significativa para reduzir o impacto ambiental e promover a sustentabilidade.

3.5 REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7217:1987**. Determinação do índice de forma de agregados. Rio de Janeiro, 1987.

AHMARUZZAMAN, M. **A review on the utilization of fly ash** *Progress in Energy and Combustion Science*, jun. 2010.

ASQUER, C. *et al.* Biomass ash reutilisation as an additive in the composting process of organic fraction of municipal solid waste. **Waste Management**, v. 69, p. 127–135, 1 nov. 2017.

ASTM. American Society for Testing and Materials. **D2015:2000**. Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke by the Adiabatic Bomb Calorimeter. West Conshohocken, 2000.

ASTM. American Society for Testing and Materials. **D4972**. Standard Test Method for pH of Soils. West Conshohocken, 2001.

BARAN, P. *et al.* **Management of Fly Ash to Synthesise Geopolymers and Zeolites** *Energies* Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), , 1 dez. 2023.

BARIŠIĆ, I. *et al.* Multidisciplinary Approach to Agricultural Biomass Ash Usage for Earthworks in Road Construction. **Materials**, v. 15, n. 13, 1 jul. 2022.

BOŠNJAK, K. *et al.* APPLICATION OF BIOMASS ASH ON GRASSLANDS. **Poljoprivreda**, v. 28, n. 1, p. 85–94, 2022.

CACURO, T. A.; WALDMAN, W. R. Fly-ash from biomass burning: Applications and potentialities. **Revista Virtual de Quimica**, v. 7, n. 6, p. 2154–2165, 1 nov. 2015.

CEN. European Committee for Standardization. **EN 14774-1:2009**. Solid biofuels: Determination of moisture content. Oven dry method – Part 1: Total moisture: Reference method. Brussels, 2009.

CHANDRASEKHAR, S. *et al.* Review Processing, properties and applications of reactive silica from rice husk-an overview. **Journal of Materials Science**, v. 38, p. 3159–3168, 2003.

CORDEIRO, L. DE N. P. *et al.* Caracterização da cinza de caroço de açaí residual para adição ao concreto. **Ambiente Construído**, v. 19, n. 1, p. 45–55, mar. 2019.

COSTA, S. *et al.* Quality classification of black wattle trees biomass for energetic purposes. **Ciencia Florestal**, v. 33, n. 2, 7 jun. 2023.

CUENCA, J. *et al.* Effects of olive residue biomass fly ash as filler in self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 702–709, 2013.

DEMEYER, A.; VOUNDINKANA, J. C.; VERLOO, M. G. Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: an overview. **Bioresource Technology**, v. 77, p. 287–295, 29 fev. 2000.

DEMIRBAS, A. Relationships Between Heating Value and Lignin, Moisture, Ash and Extractive Contents of Biomass Fuels. **Energy Exploration & Exploitation**, v. 20, n. 1, p. 105–111, 2002.

DOUDART DE LA GRÉE, G. C. H. *et al.* Contaminated biomass fly ashes - Characterization and treatment optimization for reuse as building materials. **Waste Management**, v. 49, p. 96–109, 1 mar. 2016.

ELICHE-QUESADA, D. *et al.* Characterization and evaluation of rice husk ash and wood ash in sustainable clay matrix bricks. **Ceramics International**, v. 43, n. 1, p. 463–475, 1 jan. 2017.

ELLIOTT, A.; MAHMOOD, T.; KAMAL, A. **Boiler ash utilization in the Canadian pulp and paper industry** *Journal of Environmental Management* Academic Press, , 1 out. 2022.

FIDANCHEVSKI, E. *et al.* Technical and radiological characterisation of fly ash and bottom ash from thermal power plant. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 330, n. 3, p. 685–694, 1 dez. 2021.

HERMAN, A. P. *et al.* **Bottom Ash Characterization and its Catalytic Potential in Biomass Gasification**Procedia Engineering. **Anais...**Elsevier Ltd, 2016

HOSSAIN, S. K. S.; MATHUR, L.; ROY, P. K. **Rice husk/rice husk ash as an alternative source of silica in ceramics: A review**Journal of Asian Ceramic SocietiesTaylor and Francis Ltd., , 2 out. 2018.

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. *Relatório Anual 2024*. Disponível em:<https://iba.org/relatorio2024.pdf>.

ISO. International Organization for Standardization. **ISO 17828:2015**. Solid biofuels: Determination of bulk density. Geneva, 2015.

ISO. International Organization for Standardization. **ISO 18122:2015**. Solid biofuels: Determination of ash content. Geneva, 2015.

ISO. International Organization for Standardization. **ISO 18123:2014**. Solid biofuels: Determination of the content of volatile matter. Geneva, 2014.

JAMES, A. K. *et al.* **Ash management review-applications of biomass bottom ash**EnergiesMDPI AG, , 2012.

JUKIĆ, M. *et al.* Fractionation of Heavy Metals in Fly Ash from Wood Biomass Using the BCR Sequential Extraction Procedure. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 99, n. 4, p. 524–529, 1 out. 2017.

JURADO-CONTRERAS, S. *et al.* Synthesis and characterization of alkali-activated materials containing biomass fly ash and metakaolin: effect of the soluble salt content of the residue. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 22, n. 3, 1 ago. 2022.

KAMRUZZAMAN, M. *et al.* Thermochemical and physical characterization of agricultural biomass for sustainable energy in Bangladesh. **Energy Reports**, v. 12, p. 5758–5768, 1 dez. 2024.

LEITÃO, A. Bioeconomy: The Challenge in the Management of Natural Resources in the 21st Century. **Open Journal of Social Sciences**, v. 04, n. 11, p. 26–42, 2016.

NASCIMENTO, L. C. *et al.* Use of wood bottom ash in cementitious materials: a review. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 23, p. 4226–4243, 1 mar. 2023.

NELSON, E. S. *et al.* Extraction and Characterization of Silica from Empty Palm Fruit Bunch (EPFB) Ash. **Processes**, v. 11, n. 6, 1 jun. 2023.

PODE, R. **Potential applications of rice husk ash waste from rice husk biomass power plant** **Renewable and Sustainable Energy Reviews** Elsevier Ltd, , 1 jan. 2016.

PRASITTISOPIN, L. Power plant waste (fly ash, bottom ash, biomass ash) management for promoting circular economy in sustainable construction: emerging economy context. **Smart and Sustainable Built Environment**, 2024.

REED, E. Y. *et al.* Critical comparison of the impact of biochar and wood ash on soil organic matter cycling and grassland productivity. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 110, p. 134–142, 1 jul. 2017.

ROCHA JUNIOR, C. A. F. *et al.* Síntese de zeólitas a partir de cinzas volantes de caldeiras: caracterização física, química e mineralógica. **Cerâmica**, v. 58, p. 43–52, 2012.

SACEDA, J.-J. F. *et al.* PROPERTIES OF SILICA FROM RICE HUSK AND RICE HUSK ASH AND THEIR UTILIZATION FOR ZEOLITE Y SYNTHESIS. **Química Nova**, v. 34, n. 8, p. 1394–1397, 2011.

SILVA, R. B. *et al.* Cinzas de biomassa geradas na agroindústria do cacau: caracterização e uso em substituição ao cimento. **Ambiente Construído**, v. 15, n. 4, p. 321–334, dez. 2015.

SILVESTRO, L. *et al.* Use of biomass wood ash to produce sustainable geopolymeric pastes. **Construction and Building Materials**, v. 370, 17 mar. 2023.

SMOŁKA-DANIEŁOWSKA, D.; JABŁOŃSKA, M. Chemical and mineral composition of ashes from wood biomass combustion in domestic wood-fired furnaces. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 19, n. 6, p. 5359–5372, 1 jun. 2022.

SON, S. H. *et al.* Mechano-chemical conversion of rice husk ash and gasifier-derived rice husk ash into porous silicon. **Energy and Environment**, 2023.

TRIVEDI, N. S. *et al.* Characterization and valorization of biomass ashes. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, n. 20, p. 20243–20256, 1 out. 2016.

TRIVEDI, N. S.; MANDAVGANE, S. A.; CHAURASIA, A. Characterization and valorization of biomass char: a comparison with biomass ash. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 4, p. 3458–3467, 1 fev. 2018.

VALENTIM BASTOS, J. B. *et al.* Addressing scale and seasonality in the design of sugarcane to ethylene glycol biorefineries. **Journal of Cleaner Production**, v. 337, 20 fev. 2022.

VASSILEV, S. V. *et al.* **An overview of the organic and inorganic phase composition of biomassFuel**, abr. 2012.

VASSILEV, S. V.; VASSILEVA, C. G.; BAI, J. **Content, modes of occurrence, and significance of phosphorous in biomass and biomass ash** *Journal of the Energy Institute* Elsevier B.V., , 1 jun. 2023a.

WANG, G.; SHEN, L.; SHENG, C. **Characterization of biomass ashes from power plants firing agricultural residues** *Energy and Fuels. Anais...* 19 jan. 2012

WANG, Y. *et al.* Effect of fluorogypsum and KH_2PO_4 on physical properties and hydration mechanisms of aluminat cement based grouting materials. **Construction and Building Materials**, v. 417, 23 fev. 2024.

YANG, L. *et al.* Research on the effect of recombustion treatment on the performance of straw biomass fly ash. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 2024.

ZHAI, J.; BURKE, I. T.; STEWART, D. I. **Beneficial management of biomass combustion ashes** *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Elsevier Ltd, , 1 nov. 2021.

ZHUGE, Y.; DUAN, W.; LIU, Y. Utilization of wood waste ash in green concrete production. *Em: Sustainable Concrete Made with Ashes and Dust from Different Sources: Materials, Properties and Applications*. [s.l.] Elsevier, 2021. p. 419–450.

ZUCCO, L. L.; BERALDO, A. L. EFEITO DA ADIÇÃO DE CINZA DA CASCA DE ARROZ EM MISTURAS CIMENTO-CASCA DE ARROZ 1 EFFECT OF THE

ADDITION OF RICE HUSK ASH IN CEMENT-RICE HUSK MIXTURES. **Energia na Agricultura**, v. 28, n. 2, p. 217–226, 2008.

4. CONCLUSÃO FINAL

Este estudo mostrou que a gestão das cinzas é fundamental para minimizar impactos ambientais e maximizar seu aproveitamento em diferentes setores. A revisão bibliográfica destacou a relevância da biomassa como fonte de energia renovável e os desafios associados à geração e ao descarte das cinzas, enquanto a análise bibliométrica revelou um crescimento expressivo das pesquisas sobre cinzas, com ênfase nas aplicações na construção civil e na filtragem de poluentes. A caracterização experimental evidenciou a grande variabilidade das propriedades físico-químicas das cinzas, ressaltando oportunidades e desafios para sua reutilização sustentável.

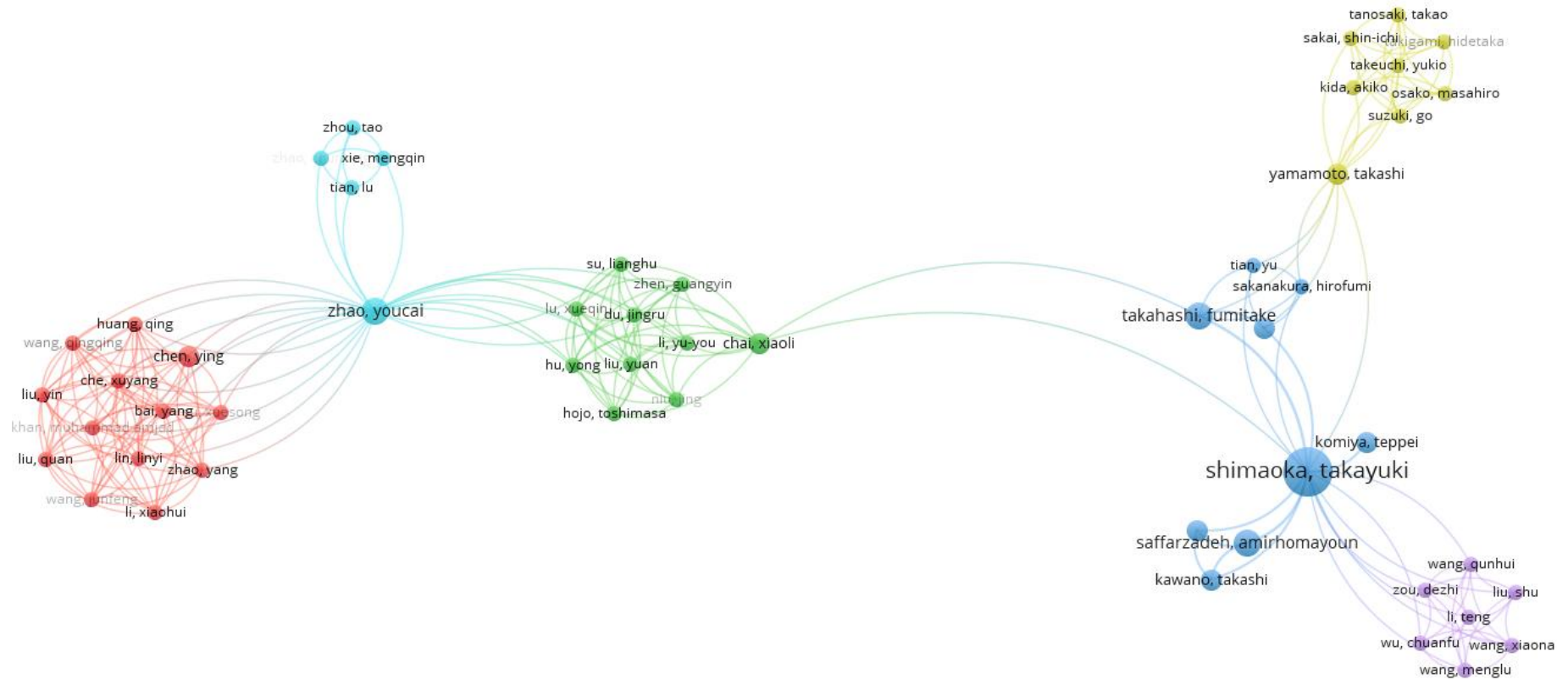
Apesar do potencial de aproveitamento, a heterogeneidade das cinzas representa um obstáculo significativo. A composição das cinzas varia conforme o tipo de biomassa utilizada, as condições de combustão e até fatores sazonais, como a época do ano e o local de origem da biomassa. Essa variabilidade pode comprometer a padronização e dificultar sua aplicação em larga escala, especialmente em setores que exigem especificações técnicas rigorosas, como a construção civil e a agricultura. Além disso, a presença de metais pesados em algumas amostras impõe restrições ao uso direto das cinzas no solo, tornando necessário o desenvolvimento de tecnologias para sua purificação.

Outro desafio é a sazonalidade da biomassa, que pode influenciar tanto a quantidade quanto a qualidade das cinzas geradas. Esse fator afeta a disponibilidade do material para reaproveitamento e pode impactar cadeias produtivas que dependem de um fornecimento constante e homogêneo.

Portanto, para ampliar a valorização das cinzas da biomassa, é essencial investir em pesquisas que busquem soluções para minimizar essas variações e aprimorar processos de tratamento. O desenvolvimento de normativas técnicas e estratégias de gestão integrada pode favorecer a padronização e viabilizar economicamente o uso das cinzas em diferentes aplicações. Conclui-se que, apesar dos desafios, a utilização das cinzas da biomassa é uma alternativa promissora dentro dos princípios da economia circular, contribuindo para a redução de resíduos, a substituição de matérias-primas convencionais e a sustentabilidade ambiental e industrial.

5. APÊNDICES

Apêndice I – rede de colaboração entre autores, principais coautores



Fonte: elaborado pelo autor

Apêndice II – tabelas com porcentagem de cada elemento antes (a) e depois (b) da análise imediata.

(a)

	O	Si	K	Fe	Ca	Al	Mg	P	Ti	S	Na	Cl
CF1	53,37	1,33	13,77	-	27,70	-	3,80	-	-	-	-	-
CF2	51,73	16,87	9,10	2,60	8,33	8,70	2,30	-	0,20	-	0,23	-
CF3	53,67	10,57	4,80	1,27	19,97	4,43	5,23	-	-	-	-	-
CV1	49,77	4,13	11,33	1,13	25,87	1,67	2,50	1,07	-	2,60	-	-
CV2	47,03	20,53	11,63	6,5	5,33	4,83	2,13	0,77	0,93	0,30	-	-
CV3	52,37	13,07	12,53	4,47	6,47	6,33	1,33	2,13	-	-	1,37	-
CV4	50,13	30,37	11,77	-	-	-	-	7,70	-	-	-	-
CV5	50,20	27,77	11,63	-	-	-	-	7,30	-	-	1,03	2,10

Fonte: elaborado pelo autor

(b)

	O	Si	K	Fe	Ca	Al	Mg	P	Ti	S	Na	Cl	Mn	Zn
CF1	51,30	1,30	18,10	-	22,30	0,77	4,37	0,67	-	-	0,87	-	0,23	-
CF2	46,73	11,60	8,93	5,50	12,10	6,97	3,53	0,20	0,40	-	0,97	-	0,60	-
CF3	48,83	5,13	6,47	1,03	24,47	3,17	5,20	5,23	-	-	0,13	-	0,23	-
CV1	44,43	1,47	11,97	1,57	32,33	2,00	2,87	0,90	-	2,37	-	-	-	-
CV2	47,13	21,97	9,13	5,10	4,87	6,60	2,30	1,33	0,57	0,83	0,17	-	-	-
CV3	45,73	11,10	10,20	4,73	11,30	4,47	2,77	1,37	-	2,63	1,97	3,73	-	-
CV4	53,00	36,93	5,37	0,47	0,43	0,30	-	3,30	-	-	0,17	-	-	-
CV5	53,60	34,77	7,13	-	0,40	0,40	-	2,73	-	-	0,80	-	-	0,17

Fonte: elaborado pelo autor

Apêndice III – Tabela com coeficiente de variação baseado na mediana da análise imediata

Coeficiente de Variação (%)			
Material	Teor de Voláteis	Cinzas	Carbono Fixo
CF1	3,68	5,81	6,86
CF2	14,61	6,35	14,61
CF3	5,34	9,52	15,75
CV1	2,08	1,59	-
CV2	0,99	0,48	12,43
CV3	5,71	2,21	0,77
CV4	0,79	0,17	0,64
CV5	5,67	0,02	5,47

Fonte: elaborado pelo autor

