XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/64

Aplicações da Cinza do Bagaço da Cana de Açúcar (CBCA) na Engenharia Geotécnica: Revisão Sistemática

Vitor Braga de Azevedo
Doutorando em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande - PB, Brasil, vitorba.eng@gmail.com

Auanny Alícia Alves da Silva
Mestranda em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande - PB, Brasil, auannyaliciasilva@gmail.com

Thiago Lucena Dias
Mestrando em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande - PB, Brasil, thiago.lucena.dias@gmail.com

Alisson do Nascimento Lima
Professor do Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Mato Grosso - UFMT, Cuiabá, Brasil, alisson.lima@ufmt.br

Carina Silvani
Doutora professora do departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande – PB, Brasil, carinasilvani@gmail.com

RESUMO: A produção de aglomerantes como cal e cimento é caracterizada pelo consumo energético intensivo, devido às altas temperaturas de queima e a geração de elevada pegada de carbono. Portanto, a busca por materiais alternativos com substituição parcial ou total dos aglomerantes se consolida como uma forma estratégica para garantir a sustentabilidade e a eficiência econômica no setor da construção. Atualmente, o descarte da cinza residual da queima do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) representa um ônus significativo para a indústria sucroalcooleira, dada a sua produção global em larga escala de até 1,9 bilhão de toneladas. Diante desse contexto, esse estudo tem como objetivo mapear o potencial de aplicação da CBCA, com ênfase em aplicações geotécnicas e estabilização de solos, por meio de uma revisão sistemática da literatura. A pesquisa foi conduzida com base no método *Systematic Search Flow*, utilizando o Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES como base de dados do período de 2016 a 2023. A busca inicial resultou em 76 trabalhos, dos quais 59 foram selecionados após aplicação de critérios de inclusão e exclusão. Os estudos foram analisados quanto às informações bibliométricas, métodos de beneficiamento da cinza, características microestruturais e áreas de aplicação. Os resultados indicam que 95% dos estudos reportaram efeitos positivos associados ao uso de CBCA, com incremento em propriedades mecânicas ou físicas. Observou-se presença de sílica amorfa em cerca de 50% dos trabalhos, o que é um fator determinante para a atividade pozolânica da cinza e justifica a predominância de aplicações em materiais cimentícios. Também foi verificado que a maior concentração de pesquisas sobre CBCA se concentram em instituições públicas das regiões Nordeste, Sul e Sudeste. Portanto, conclui-se que a CBCA possui elevado potencial para a valorização na construção civil, contribuindo para a redução do consumo de insumos não renováveis.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduos agroindustriais, Materiais cimentícios suplementares, Atividade pozolânica, Sustentabilidade.

ABSTRACT: The production of binders such as lime and cement is characterized by intensive energy consumption due to high calcination temperatures, as well as a high carbon footprint. Therefore, the search for alternative materials that enable the partial or total replacement of binders has become a strategic approach to ensure sustainability and economic efficiency in the construction sector. Currently, the disposal of residual ash from the combustion of sugarcane bagasse (SCBA) represents a significant burden for the sugar-energy industry, given its large-scale global production of up to 1.9 billion tons. In this context, this study aims to map the potential applications of SCBA, with an emphasis on geotechnical uses and soil stabilization, through a

systematic literature review. The research was conducted based on the Systematic Search Flow method, using the CAPES Theses and Dissertations Catalog as the database, covering the period from 2016 to 2023. The initial search yielded 76 studies, of which 59 were selected after applying inclusion and exclusion criteria. The selected studies were analyzed in terms of their bibliometric information, ash processing methods, microstructural characteristics, and application areas. The results indicate that 95% of the studies reported positive effects associated with the use of SCBA, including improvements in mechanical or physical properties. The presence of amorphous silica was observed in approximately 50% of the studies, which is a determining factor for the pozzolanic activity of the ash and justifies the predominance of applications in cementitious materials. It was also found that most research on SCBA is concentrated in public institutions located in the Northeast, South, and Southeast regions. Therefore, it is concluded that SCBA has significant potential for valorization in the construction industry, contributing to the reduction of non-renewable resource consumption.

KEYWORDS: Agro-industrial waste, Supplementary cementitious materials, Pozzolanic activity, Sustainability.

1 INTRODUÇÃO

É fato que a construção civil é impulsionada principalmente pela alta demanda por cimento Portland, sendo este o segundo material mais consumido no planeta depois da água (Abdalla *et al*., 2024). A produção deste aglomerante é caracterizada pelo alto consumo energético, exigindo cerca de 110 kWh por tonelada, e é responsável por aproximadamente 7% a 9% das emissões globais de dióxido de carbono (CO_2), conforme Ullah et al. (2025). Desse modo, a busca por materiais cimentícios suplementares (MCSs) ou alternativos, como subprodutos industriais e resíduos agrícolas, consolidou-se como uma solução estratégica a fim de mitigar a pegada de carbono e proporcionar práticas mais sustentáveis (De Sande *et al*., 2021; Li *et al*., 2022; Memon *et al*., 2022; Sobuz *et al*., 2024).

Diante desse cenário, a cana-de-açúcar destaca-se como um recurso renovável gerado em larga escala, com uma produção global que atingiu cerca de 1,9 bilhão de toneladas em 2018, liderada por países como o Brasil e Índia (De Sande *et al*., 2021; Khatri; Pandit, 2022). O resíduo fibroso gerado na extração do caldo de cana, chamado de "bagaço", é frequentemente queimado em caldeiras para produção de eletricidade e vapor, gerando assim a Cinza do Bagaço da Cana de Açúcar (CBCA), representando entre 0,62% e 3,00% da massa original (Thomas *et al*., 2021; Li *et al*., 2022). Atualmente, a disposição inadequada desse subproduto em aterros sanitários representa um grande desafio ambiental, podendo causar poluição do ar e contaminação de águas subterrâneas por partículas finas (Ullah *et al*., 2025).

Apesar de ser tratada muitas vezes como resíduo, a CBCA possui um alto potencial de valorização na indústria devido a sua composição rica em sílica (SiO_2), geralmente apresentando teores acima de 60% a 70% (Thomas *et al*., 2021). Quando submetida aos devidos tratamentos, como moagem e queima controlada em temperaturas entre 600°C e 800°C, a cinza exibe atividade pozolânica, reagindo com o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) para formar gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) (Abdalla *et al*., 2022; Ullah *et al*., 2025). No âmbito da engenharia geotécnica, a incorporação da CBCA pode resultar na redução da plasticidade, no aumento da resistência à compressão não confinada e na melhoria da durabilidade de camadas de pavimentos e estruturas de fundação superficial. Além disso, a utilização desse resíduo contribui para o controle de deformações volumétricas, aspecto crítico em solos expansivos. Entretanto, a variabilidade na composição química e mineralógica da cinza, fortemente influenciada pelas condições de queima, ainda representa um desafio para sua aplicação padronizada em obras geotécnicas.

Este trabalho propõe o mapeamento do estado da arte brasileiro, por meio de uma revisão sistemática fundamentada no método *Systematic Search Flow* e na análise de produções científicas recentes (2016-2023) do banco da CAPES. A partir dessa análise, se buscou mapear o potencial de valorização da CBCA, consolidando o emprego desse resíduo agroindustrial para o fomento de soluções sustentáveis nas práticas de construção.

2 METODOLOGIA

A revisão sistemática da literatura foi conduzida segundo o método *Systematic Search Flow*, proposto por Ferenhof e Fernandes (2016). A adoção dessa metodologia justifica-se por sua capacidade de estruturar e

sistematizar as buscas nas bases de dados científicas, garantindo, assim, a reprodutibilidade metodológica do estudo e mitigando potenciais vieses por parte do pesquisador. Sua aplicação foi realizada em conformidade com o fluxograma apresentado na Figura 1.

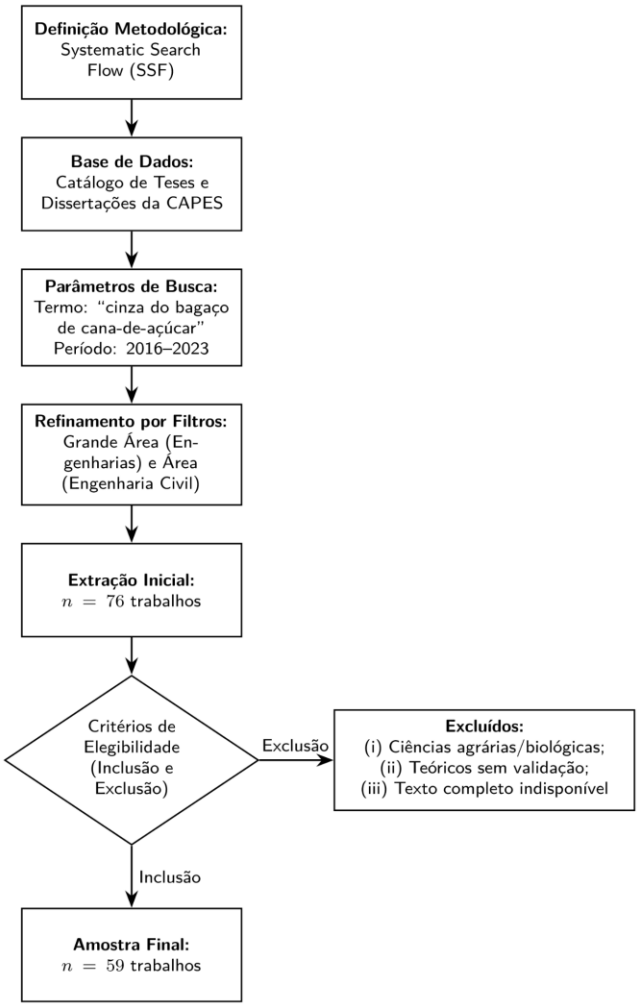


Figura 1. Fluxograma de análise pelo *Systematic Search Flow*.

A busca bibliográfica foi conduzida no "Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES", plataforma oficial que centraliza o acervo de pesquisas de pós-graduação *stricto sensu* no Brasil, dada a relevância do país como um dos maiores produtores. O recorte temporal estabelecido abrangeu publicações entre os anos de 2016 e 2023. Essa delimitação justifica-se por representar o período de oito anos mais recente com dados totalmente consolidados e disponibilizados pelo repositório no momento da condução deste estudo.

Para a estruturação da linha de busca, adotou-se como busca principal o termo "cinza do bagaço de cana-de-açúcar". A fim de refinar a extração dos trabalhos e direcionar os resultados exclusivamente às aplicações da engenharia civil, a pesquisa foi parametrizada com os filtros de Grande Área de Conhecimento ("Engenharias") e Área de Conhecimento ("Engenharia Civil") disponibilizados pela plataforma.

Após a extração inicial (76 trabalhos), os documentos passaram por filtros de elegibilidade. O critério de inclusão englobou: trabalhos com foco empírico na aplicação da CBCA como material de construção ou na estabilização de matrizes de solo. Em contrapartida, os critérios de exclusão englobam: (i) estudos cujo emprego da cinza fosse exclusivamente voltado às ciências agrárias ou biológicas; (ii) pesquisas de caráter puramente teórico, sem validação experimental; e (iii) documentos cujos textos completos não se encontravam disponíveis na plataforma ou depósito do programa de pós-graduação. Com a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, o conjunto inicial de 76 publicações foi submetido à triagem, sendo reduzido para 59 trabalhos válidos. Esse montante constitui a amostra final analisada nesta revisão.

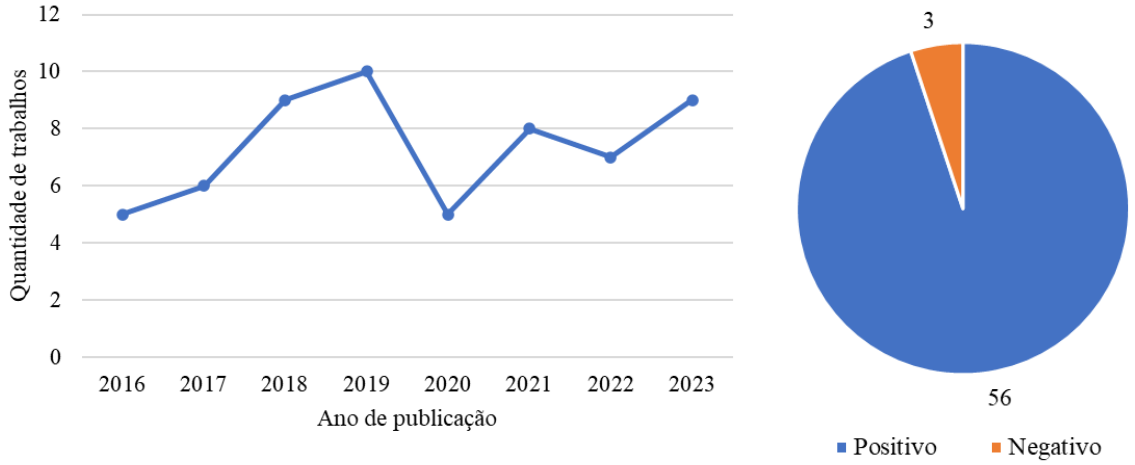
Na fase subsequente de extração e síntese, os dados dos trabalhos selecionados foram tabulados para permitir uma análise comparativa. Registraram-se o ano de publicação, a natureza institucional e a respectiva

localização geográfica de origem do estudo. No escopo tecnológico, tabularam-se a procedência agroindustrial do resíduo, os métodos de beneficiamento aplicados e a caracterização microestrutural da cinza. Por fim, mapeou-se o nicho específico de aplicação dentro da engenharia civil, classificando o impacto decorrente da adição do resíduo sob a ótica de um efeito final positivo ou negativo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A evolução das publicações entre 2016 e 2023 indica uma tendência de crescimento contínuo até 2019, seguida por um declínio abrupto em 2020, possivelmente associada às restrições impostas pela pandemia de COVID-19. A partir de 2021, observa-se retomada gradual das pesquisas, embora sem alcançar o patamar pré-pandêmico de aproximadamente 10 trabalhos anuais. O comportamento sugere que a redução observada não está relacionada à saturação do tema, mas à limitação temporária de atividades experimentais. A Figura 2a apresenta a evolução quantitativa das publicações ao longo do recorte temporal estabelecido (2016–2023).

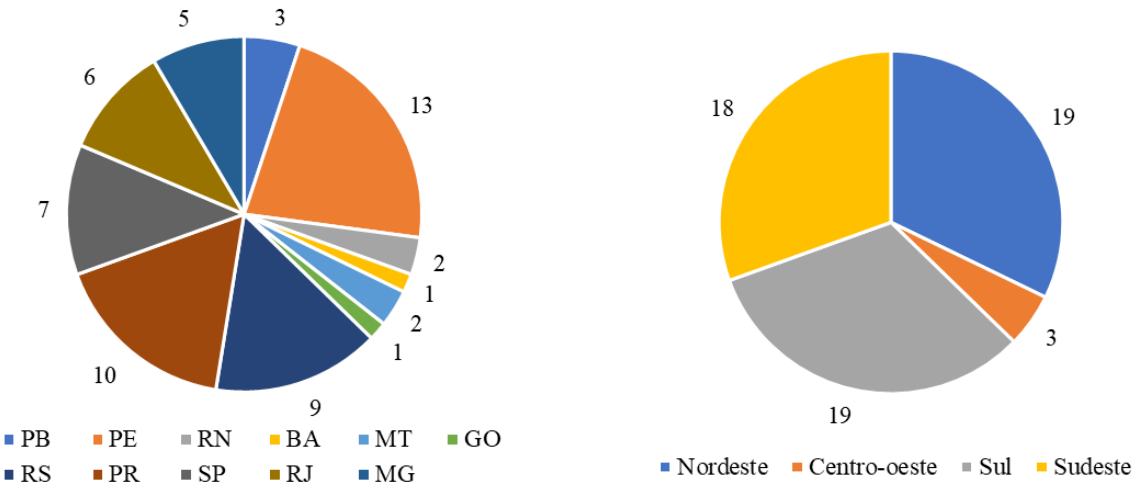
Quanto à eficácia da aplicação da CBCA (Figura 2b), 56 estudos (95% da amostra) reportaram efeitos positivos, evidenciando melhorias em parâmetros físicos e mecânicos (tais como resistência, durabilidade e consistência) nas diversas áreas da engenharia civil. Em contrapartida, 3 estudos (5%) reportaram efeitos negativos que associam o declínio das propriedades à aplicação da CBCA na geopolimerização. De modo geral, Li *et al*., (2022) e Thomas *et al*. (2021) evidenciaram que a incorporação da cinza interfere negativamente na reação, comprometendo a resistência mecânica do geopolímero.



(a) (b)

Figura 2. (a) Evolução da quantidade de publicações ao longo dos anos e (b) avaliação final qualitativa do efeito da adição da CBCA.

A distribuição geográfica dos estudos, presente na Figura 3a, evidencia concentração em estados como Pernambuco (22%), Paraná (17%) e Rio Grande do Sul (15%). Em nível regional (Figura 3b), Nordeste e Sul lideram com 32% cada, seguidos do Sudeste (30%), indicando uma distribuição relativamente equilibrada da produção científica no país. Vale ressaltar que não foram encontrados trabalhos referentes à região Norte.

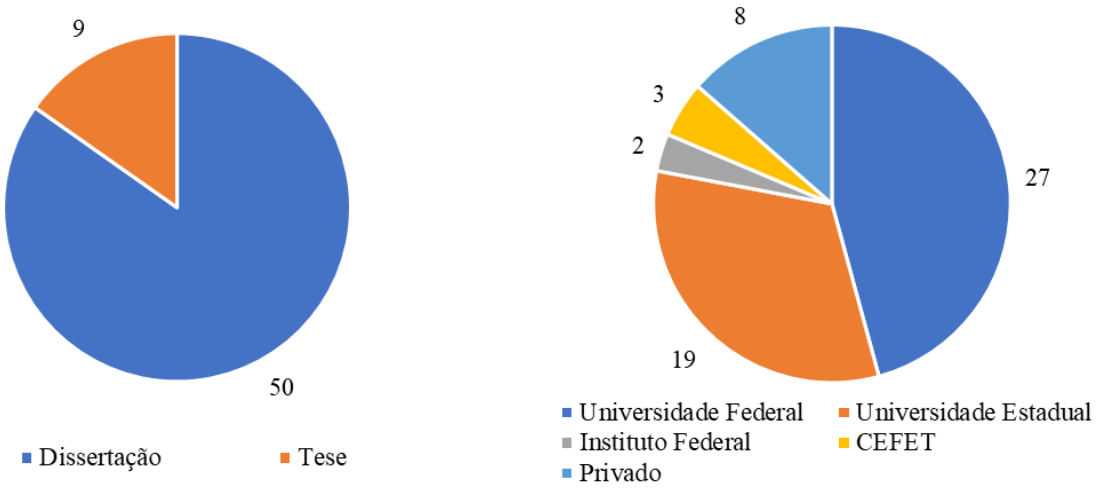


(a) (b)

Figura 3. Distribuição geográfica dos trabalhos (a) por estado e (b) por região.

É notável que ocorre a predominância de dissertações de mestrado, totalizando 50 trabalhos, em relação às teses de doutorado, que somam apenas 9 publicações, o que sugere maior volume de investigações exploratórias iniciais, ilustrado na Figura 4a. Esse resultado sugere a predominância de estudos exploratórios, indicando a necessidade de maior aprofundamento em nível de doutorado, o que poderia gerar um volume mais equilibrado de teses no Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES.

Quanto à natureza institucional (Figura 4b), as universidades federais destacam-se com 27 trabalhos publicados (46%), seguidas pelas universidades estaduais, responsáveis por 19 publicações (32%). Apenas 8 estudos (14%) foram desenvolvidos em instituições da rede privada de ensino. Esse panorama evidencia o papel protagonista e a importância fundamental das instituições públicas no avanço do conhecimento científico voltado à aplicação da CBCA na construção civil.

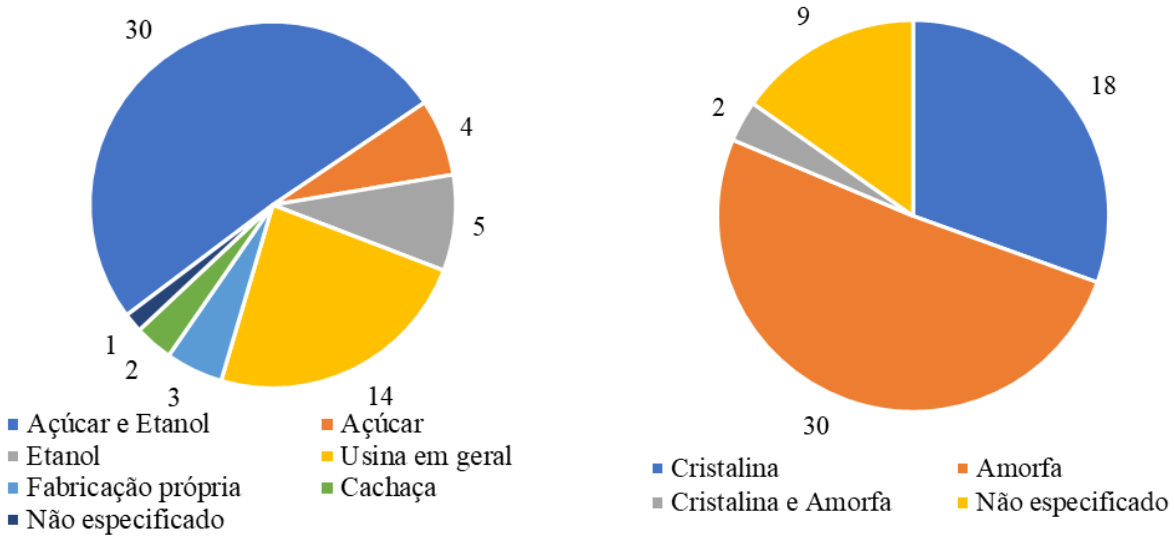


(a) (b)

Figura 4. Distribuição para (a) tipo de trabalho e (b) natureza da instituição.

Conforme a Figura 5a, o setor sucroalcooleiro representa a principal origem da CBCA, presente em 39 trabalhos, evidenciando a demanda dessa indústria por alternativas sustentáveis para a destinação final desta cinza. Na sequência, observou-se a utilização de cinzas provenientes de usinas em geral (14 trabalhos), cujas plantas industriais empregam a queima do bagaço predominantemente como biomassa para a geração de energia.

Em relação à microestrutura (Figura 5b), nos trabalhos de Ferreira (2023) e Cruz (2021), foram analisadas múltiplas amostras, nas quais se constatou a coexistência de fases amorfas e cristalinas na mesma coleta de uma mesma usina. A presença de sílica amorfa mostra-se determinante para aplicações cimentantes e de estabilização de solos, especialmente quando associada a ativadores alcalinos. De modo geral, a maioria (32 estudos) relatou que a CBCA apresenta estrutura com algum carácter amorfo, indicando disponibilidade para reações químicas (atividade pozolânica) com os argilominerais do solo ou com agentes cimentantes. Por outro lado, 20 trabalhos identificaram uma matriz estritamente cristalina, condição na qual a cinza atua de forma inerte no compósito, exercendo primordialmente um efeito de preenchimento de vazios. Por fim, cabe ressaltar que 9 dos estudos analisados omitiram essa etapa de caracterização, não especificando de forma clara a natureza microestrutural (amorfa ou cristalina) da CBCA empregada em suas respectivas aplicações.



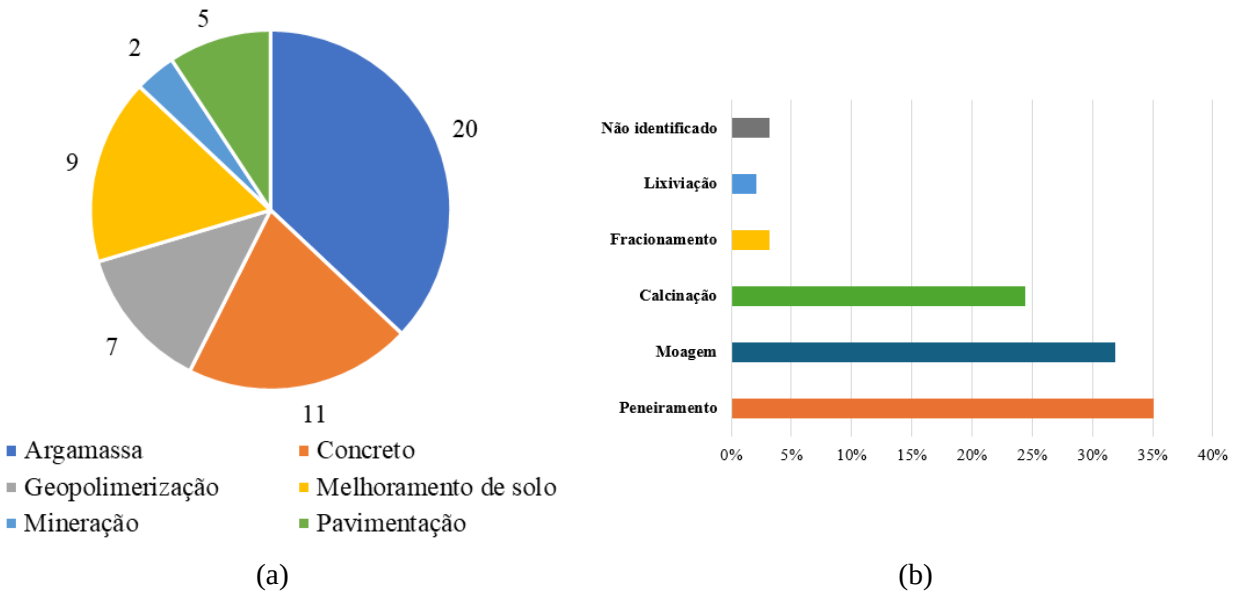
(a) (b)

Figura 5. Distribuição para (a) origem da CBCA e (b) cristalinidade da microestrutura.

Como discutido anteriormente, a disponibilidade de sílica amorfa é um ponto-chave para aplicações da CBCA, especialmente em processos de cimentação, seja em concretos e argamassas ou na estabilização de solos. Neste último, geralmente busca-se a ativação da cinza com o uso da cal ou outros ativadores alcalinos. Ainda assim, para CBCA com fração cristalina dominante são reportadas aplicações como fíler em misturas asfálticas, promovendo melhorias expressivas no respectivo desempenho mecânico dessas misturas. Hipólito e Ildefonso (2024) observaram aumentos de aproximadamente 40% na estabilidade Marshall, 26% na resistência à tração indireta e 17% no módulo de resiliência, além de reduções de 28% e 11% na deformação permanente em ensaios de creep dinâmico e Hamburg Wheel Tracking Test (HWTD), respectivamente, evidenciando ganhos tanto em laboratório quanto em campo.

A Figura 6a categoriza as pesquisas selecionadas quanto aos diferentes nichos de aplicação da CBCA na engenharia civil, cujo emprego majoritário foi observado quanto à produção de argamassas (20 estudos) e concretos (11 pesquisas), seguido da utilização em processos de melhoramento de solos (9 aplicações). Esse quantitativo reduzido evidencia que, embora a CBCA apresente potencial técnico para uso geotécnico, sua aplicação nesse contexto ainda é incipiente quando comparada às aplicações em materiais cimentícios. Todavia, houve poucos relatos envolvendo a utilização desse resíduo em atividades relativas aos setores de pavimentação (5 casos), bem como de mineração (apenas 2 estudos).

Depreende-se, ainda, a partir da Figura 6b que o peneiramento, a moagem, bem como a calcinação correspondem a cerca de 35%, 32% e 24,5% dos métodos de beneficiamento adotados nas pesquisas envolvendo CBCA, respectivamente, denotando a predominância de processos físicos ou termo-físicos que visam a adequação do material com fins de utilização direta como insumo, em detrimento de etapas de natureza físico-química, menos reversíveis.



(a) (b)

Figura 6. Distribuição para (a) nicho específico de aplicação e (b) métodos de beneficiamento.

4 CONCLUSÕES

A análise das produções científicas recentes (2016–2023) disponíveis no banco de teses e dissertações da CAPES evidenciou que o uso da cinza do bagaço de cana-de-açúcar na engenharia civil apresenta tendência de crescimento, apesar da redução pontual observada no período associado à pandemia de COVID-19. No contexto geotécnico, os resultados indicam que a CBCA possui potencial relevante como material estabilizante de solos dadas às aplicações reportadas em diferentes tipos de matrizes, incluindo solos de baixa capacidade de suporte e materiais expansivos. Logo, o cenário apresentado evidencia não uma limitação do material, mas uma lacuna de investigação, indicando a necessidade de ampliação de estudos experimentais voltados à estabilização de solos com CBCA.

Os estudos analisados demonstram que a incorporação da CBCA pode promover melhorias significativas em propriedades geotécnicas, como aumento da resistência mecânica, redução da plasticidade e controle de deformações volumétricas. Tais efeitos estão diretamente associados à presença de sílica amorfa e à possibilidade de ocorrência de reações pozolânicas, especialmente quando a cinza é utilizada em conjunto com agentes ativadores, como a cal.

Apesar dos avanços observados, a variabilidade na composição química e mineralógica da CBCA ainda representa um desafio para sua aplicação em larga escala, reforçando a necessidade de padronização dos processos de beneficiamento e caracterização do material. Dessa forma, conclui-se que a CBCA apresenta elevado potencial de aplicabilidade e, para além da alternativa sustentável, representa uma oportunidade de avanço no campo da engenharia geotécnica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdalla, T. A., Hussein, A. A. E., & Ahmed, Y. H. (2024). Strength, durability, and microstructure properties of concrete containing bagasse ash – A review of 15 years of perspectives, progress and future insights. *Results in Engineering*, 21, 101764–101764. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101764.

Abdalla, T. A., Koteng, D. O., Shitote, S. M., & Matallah, M. (2022). Mechanical Properties of Eco-friendly Concrete Made with Sugarcane Bagasse Ash. *Civil Engineering Journal*, 8(6), 1227–1239. https://doi.org/10.28991/cej-2022-08-06-010.

Cruz, M. A. (2021) *Caracterização da Cinza do Bagaço de Cana-De-Açúcar Calcinado Sob Diferentes Temperaturas para Aplicação em Geopolímeros.* Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Faculdade Atitus Educação Passo Fundo, 88 p.

De Sande, V. T., Sadique, M., Pineda, P., Bras, A., Atherton, W., & Riley, M. (2021). Potential use of sugar cane bagasse ash as sand replacement for durable concrete. *Journal of Building Engineering*, 39, 102277. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102277.

Ferreira, W. P. (2023) *Cimento Ecológico: Substituição De Cinzas De Bagaço De Cana-De-Açúcar Derivado Da Indústria Sucroalcooleira.* Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, Instituto Federal De Educação, Ciência e Tecnologia Goiano / IFGO, 53 p.

Hipólito, V. M., & Ildefonso, J. S. (2024). Functional and structural assessment of an experimental section gap graded modified with sugarcane bagasse ash. *Scientific Reports*, *14*(1), Article 18436. https://doi.org/10.1038/s41598-024-67900-2.

Khatri, P., & Pandit, A. B. (2022). Systematic review of life cycle assessments applied to sugarcane bagasse utilization alternatives. *Biomass and Bioenergy*, 158, 106365. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106365.

Li, Y., Chai, J., Wang, R., Zhang, X., & Si, Z. (2022). Utilization of sugarcane bagasse ash (SCBA) in construction technology: A state-of-the-art review. *Journal of Building Engineering*, 56, 104774. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104774.

Memon, S. A., Javed, U., Shah, M. I., & Hanif, A. (2022). Use of Processed Sugarcane Bagasse Ash in Concrete as Partial Replacement of Cement: Mechanical and Durability Properties. *Buildings*, 12(10), 1769. https://doi.org/10.3390/buildings12101769.

Sobuz, M. H. R., Al-Imran, Datta, S. D., Jabin, J. A., Aditto, F. S., Hasan, N. M. S., & Zaman, A. A. U. (2024). Assessing the Influence of Sugarcane Bagasse Ash for the Production of Eco-friendly Concrete: Experimental and Machine Learning Approaches. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e02839–e02839. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02839.

Thomas, B. S., Yang, J., Bahurudeen, A., Abdalla, J. A., Hawileh, R. A., Hamada, H. M., Nazar, S., Jittin, V., & Ashish, D. K. (2021). Sugarcane bagasse ash as supplementary cementitious material in concrete – a review. *Materials Today Sustainability*, 15, 100086. https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2021.100086.

Ullah, M. F., Tang, H., Ullah, A., Toth, Z., Ahmad, M., & Abdullah Alzlfawi. (2025). Mechanical and environmental performance of sugarcane Bagasse Ash from Khyber Pakhtunkhwa in sustainable concrete. *Scientific Reports*, 15(1). https://doi.org/10.1038/s41598-025-10383-6.