

**SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR NA PRODUÇÃO DE CONCRETO****PARTIAL REPLACEMENT OF PORTLAND CEMENT BY SUGARCANE BAGASSE ASH IN CONCRETE PRODUCTION****SUBSTITUCIÓN PARCIAL DEL CEMENTO PORTLAND POR CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR EN LA PRODUCCIÓN DE CONCRETO****Pamela Alves Carvalho<sup>1</sup>****João Victor Maciel de Andrade Silva<sup>2</sup>****Jonailce Oliveira Diodato<sup>3</sup>**

**Resumo:** Este estudo analisou a substituição parcial do cimento Portland por cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) no concreto com o objetivo de explorar alternativas sustentáveis na construção civil. Para tanto, foram adotados procedimentos de preparação da CBCA, assim como para a confecção dos corpos de prova com adoção de diferentes proporções de substituição do cimento por cinza. A abordagem teórica-experimental integrou ensaios de resistência à compressão e análises de difração de raio-X na CBCA, com o intuito de avaliar seu impacto na microestrutura do concreto. Os resultados indicaram que a substituição de 10% mostrou resistência similar à amostra de referência após 28 dias de cura, demonstrando seu potencial como material alternativo. Por outro lado, a substituição de 20% não obteve resultados tão satisfatórios, evidenciando a necessidade de ajustes nas proporções utilizadas para evitar a perda significativa de resistência. Esta pesquisa contribui para compreensão das proporções adequadas de CBCA no concreto, promovendo uma abordagem mais sustentável ao reduzir o consumo de cimento Portland e reaproveitar resíduos da indústria sucroalcooleira. Dessa forma, abre-se um importante caminho para uma construção civil mais sustentável, com benefícios econômicos e ambientais.

**Palavras-chaves:** CBCA; Concreto; Resistência.

**Abstract:** This study analyzed the partial replacement of Portland cement with sugarcane bagasse ash (CBCA) in concrete, aiming to explore sustainable alternatives in civil construction. To achieve this, specific procedures were adopted for preparing the CBCA, as well as for the production of test specimens using different proportions of cement replacement with ash. The theoretical-experimental approach integrated compression strength tests and X-ray diffraction analyses of the CBCA to evaluate its impact on the

---

<sup>1</sup>Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais na Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS/Dourados). Email: [06927741143@academicos.uems.br](mailto:06927741143@academicos.uems.br). Orcid iD: <https://orcid.org/0009-0005-5549-5009>.

<sup>2</sup> Mestre em Engenharia Civil com ênfase em Estruturas pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PCV) do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Universidade Estadual de Maringá. Docente efetivo junto à Coordenação de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS) Email: [joao.silva@uems.br](mailto:joao.silva@uems.br). Orcid iD: <https://orcid.org/0000-0002-2219-485X>.

<sup>3</sup>Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais na Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS/Dourados). Email: [jodiodato@gmail.com](mailto:jodiodato@gmail.com). Orcid iD: <https://orcid.org/0000-0002-0463-9456>.

microstructure of the concrete. The results indicated that the 10% replacement showed similar strength to the reference sample after 28 days of curing, demonstrating its potential as an alternative material. On the other hand, the 20% replacement did not yield satisfactory results, highlighting the need for adjustments in the proportions used to avoid significant strength loss. This research contributes to the understanding of appropriate proportions of CBCA in concrete, promoting a more sustainable approach by reducing Portland cement consumption and reusing waste from the sugarcane industry. Thus, an important pathway opens for a more sustainable civil construction, with economic and environmental benefits.

**Keywords:** CABC; Concrete; Strength.

**Resumen:** Este estudio analizó la sustitución parcial del cemento Portland por ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) en el concreto, con el objetivo de explorar alternativas sostenibles en la construcción civil. Para lograr esto, se adoptaron procedimientos específicos para la preparación del CBCA, así como para la confección de los cuerpos de prueba utilizando diferentes proporciones de sustitución del cemento por ceniza. El enfoque teórico-experimental integró ensayos de resistencia a la compresión y análisis de difracción de rayos X en el CBCA, con el fin de evaluar su impacto en la microestructura del concreto. Los resultados indicaron que la sustitución del 10% mostró una resistencia similar a la muestra de referencia después de 28 días de curado, demostrando su potencial como material alternativo. Por otro lado, la sustitución del 20% no obtuvo resultados satisfactorios, lo que destaca la necesidad de ajustes en las proporciones utilizadas para evitar una pérdida significativa de resistencia. Esta investigación contribuye a la comprensión de las proporciones adecuadas de CBCA en el concreto, promoviendo un enfoque más sostenible al reducir el consumo de cemento Portland y reutilizar residuos de la industria azucarera. De esta manera, se abre un camino importante para una construcción civil más sostenible, con beneficios económicos y ambientales.

**Palabras clave:** CBCA; Concreto; Resistencia.

## Introdução

A indústria da construção civil consome aproximadamente 30% das matérias-primas disponíveis globalmente e 25% da água em escala mundial, além de 17% de toda a água-doce existente (Dixit; Culp; Fernández-Solis, 2013; Oliveira Neto et al., 2018). O concreto é o segundo material mais utilizado no mundo. Com os agregados representando de 60% a 75% do volume da mistura de concreto, a qualidade desses componentes exerce influência direta nas características e propriedades do concreto produzido (Delsaute & Staquet, 2020).

O aquecimento global tornou-se uma grande preocupação para o futuro da civilização e a criação de um método de desenvolvimento sustentável e ambientalmente consciente é fundamental. O cimento Portland comum (OPC) é um dos principais ingredientes usados no concreto. No entanto, a produção de OPC produz grandes

quantidades de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) através da produção de clínquer (Dey et al. 2022). Isso contribui para a grande pegada ambiental do cimento (Farrant et al. 2022).

Além do mais, existe o fato de que a indústria da construção civil é um dos setores que mais consomem matérias primas naturais no mundo, sendo assim, Sampaio (2013) destaca a importância da utilização de resíduos para a produção de novos materiais. Esses devem atender à crescente demanda por tecnologias alternativas mais simples e eficientes, além de levar em consideração a sustentabilidade dos processos produtivos.

A sustentabilidade, na construção civil, vem ocupando cada vez mais espaço em todos os parâmetros, principalmente no setor de materiais, que possui um grande papel nas obras. A empregabilidade de materiais sustentáveis e o avanço no setor científico, para uma mudança no setor construtivo, está em evolução a cada dia, gerando novas tendências, metodologias, materiais, ferramentas, dentre outros itens, alinhando-se a tecnologia com objetivos sustentáveis (Neto et al. 2022).

Muitos países buscam informações e soluções alternativas através da utilização de fontes renováveis, incluindo a biomassa florestal. Essa é uma alternativa viável para reduzir a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera, ao mesmo tempo que considera o carbono armazenado nas plantas arbóreas (Caron et al. 2015).

Materiais cimentícios suplementares (SCMs) são benéficos para reduzir as emissões de carbono do cimento. Os SCMs reduzem a relação clínquer/cimento, substituindo parcialmente o conteúdo de cimento. Isso reduz indiretamente as emissões de carbono (Dey et al. 2022).

No Brasil, uma das medidas para combater e reduzir problemas com resíduos foi a alteração da lei nº 13.305 (Brasil, 2010). O principal ajuste foi introduzir a Política Nacional de Resíduos Sólidos, que estabelece várias diretrizes a serem seguidas. Entre essas diretrizes, destacam-se: estímulo à adoção de padrões sustentáveis de produção e consumo de bens e serviços; o desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias limpas; e a gestão integrada de resíduos sólidos (Neto et al. 2022).

Entre as alternativas para melhorar a durabilidade do concreto pode-se destacar o uso de adições minerais para substituir parte do cimento Portland sem perda significativa de desempenho mecânico do concreto. Entre as adições minerais que podem ser empregadas, mas que ainda não foram completamente estudadas tem-se a cinza do bagaço da cana-de açúcar (CBCA) (Silveira, 2010).

Alguns estudos abrangem análises e pesquisas utilizando esse material para impactos sustentáveis, além de impactos inovadores, envolvendo diferentes usos das cinzas na construção civil. Como todo setor produtivo industrial, a cana-de-açúcar também fabrica vasta quantidade de resíduos que, quando não aproveitados, apresentam risco ao meio ambiente e à sociedade. O bagaço é queimado em caldeiras para gerar calor e energia na usina, produzindo areia de CBCA, um problema que os gerentes da planta enfrentam ao descartar esses resíduos (Neto et al, 2022).

Sendo assim, na produção do açúcar e do álcool, o material resultante é o bagaço da cana-de-açúcar (CBCA). Esse bagaço, com o passar dos anos, foi sendo valorizado na produção de energia através da sua queima gerando vapor. Segundo De Paula et al. (2009), a necessidade da geração de energia a partir de fontes renováveis e a busca por sustentabilidade tem aumentado nos últimos anos, o que estimulou a indústria de álcool etanol a partir da cana-de-açúcar.

Globalmente, mais de 100 países produzem cerca de 2,1 bilhões de toneladas métricas de cana-de-açúcar e, na África do Sul, a produção anual de cana-de-açúcar é de cerca de 15,07 milhões de toneladas métricas (Kolawole et al. 2020). Em áreas regionais, como a África do Sul, a produção de CBCA supera outras fontes de biossílca, como a cinza de casca de arroz, com a produção de 115 mil toneladas (Dey et al, 2022).

Dentro deste contexto, o setor sucroalcooleiro é uma das atividades econômicas mais antigas no Brasil, tornando o país o maior produtor de cana-de-açúcar. A produção acontece o ano inteiro e as regiões Sul, Sudeste, Centro Oeste e Nordeste, são as mais produtivas (Minosso et al, 2016). O país se posiciona como o maior produtor mundial de açúcar e álcool, e nesse processo industrial, durante a extração do caldo de cana-de-açúcar, aproximadamente 30% da cana se transforma em bagaço, biomassa de suma importância como fonte energética, onde 95% destes são utilizados para queima em caldeiras, ao redor do país, para geração de eletricidade, produzindo como resíduo final a cinza do bagaço de cana-de-açúcar (De Paula et al. 2009).

Um dado significativo apresentado por De Paula et al. (2009), indica que aproximadamente 10% do bagaço se converte em cinza, como resíduo final, durante o ciclo produtivo nas usinas sucroalcooleiras. No entanto, a disposição desse resíduo, na maior parte dos casos, não obedece a práticas propícias, podendo se configurar em sério problema ambiental.

Constituída, basicamente, de sílica,  $\text{SiO}_2$ , a cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) tem potencial para ser utilizada como adição mineral em argamassas e concretos (Cordeiro et al. 2008). Estimativas mostram que, para cada tonelada de cana-de-açúcar processada, são produzidos aproximadamente seis quilos de CBCA (Lima et al. 2010). Adicionalmente, a CBCA é composta predominantemente por sílica, um composto químico que, dependendo das suas características pode ter potencial pozolânico que diminui a permeabilidade e aumenta a durabilidade do concreto.

No aspecto ambiental, a substituição do cimento Portland por CBCA, além de diminuir o consumo de matéria-prima, consome um resíduo da agroindústria, e diminui a emissão de  $\text{CO}_2$  para a atmosfera, o qual tem sido apontado como um dos grandes responsáveis pelo efeito estufa e o consequente aquecimento global (Sousa, 2009).

Em resumo, a CBCA, atendendo certos requisitos, pode fazer parte da composição do concreto e diminuir a presença do cimento na elaboração desse produto (Cordeiro, 2006; Rêgo, 2004; Borline et al, 2006), apresentando assim, uma opção viável para a destinação deste resíduo, cuja quantidade gerada aumentará significativamente nos próximos anos. Ademais, o emprego da CBCA como adição mineral, substituindo parte do cimento em argamassas e concretos, contribui para a redução do impacto ambiental desses materiais.

Diante dessa problemática, a pesquisa em questão tem como objetivo substituir parcialmente o cimento Portland por um material pozolânico, a cinza do bagaço da cana-de-açúcar. Essa substituição visa criar um material com propriedades comparáveis às das argamassas convencionais. Nesse contexto, a relevância desta pesquisa, se dá pela possibilidade da incorporação do resíduo da queima do bagaço da cana-de-açúcar em argamassa. Essa incorporação potencializa a redução do consumo de cimento, um elemento que, conforme apontado por Cordeiro (2006), libera  $\text{CO}_2$  durante o seu processo de fabricação, incluindo a calcinação do calcário e a queima de combustíveis fósseis no processo da produção do clínquer.

Além disso, essa substituição contribui para a diminuição do volume da extração da matéria prima da natureza, visto que a construção civil é a indústria menos sustentável do planeta, pois é responsável por consumir cerca de 40 a 75% da matéria prima do mundo (Agopyan, 2013).

Nesse contexto, torna-se evidente a necessidade de estudos mais aprofundados sobre este tema. A divulgação dos resultados dessas pesquisas são cruciais não apenas

para disseminar as possibilidades do uso da cinza do bagaço da cana-de-açúcar, mas também para destacar suas limitações e desafios para uma aplicação mais ampla.

## **Procedimentos metodológicos**

### **Caracterização dos materiais**

A cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) utilizada neste estudo foi proveniente de um processo de produção de uma Usina Sucroalcooleira da região de Mato Grosso do Sul. Para preparação da CBCA, foi realizado um procedimento inicial de secagem em forno mufla, mantendo-a uma temperatura de 100 °C durante 24 horas. Em seguida, a cinza foi submetida ao processo de peneiramento primário.

No peneiramento primário seguiu um procedimento específico: Inicialmente, 300g de cinza foram pesados e submetidos ao processo de peneiramento, em todas as amostras. As amostras foram peneiradas durante um período inicial de 5 minutos. Conforme necessário, o tempo de peneiramento foi ajustado para 20, 30 e 45 minutos. A fração retida nas peneiras com abertura superiores a 75µm foi submetida à moagem até atingir a superfície específica desejada. Posteriormente, a granulometria foi aferida novamente por meio do processo de peneiramento.

Segundo os estudos de Rukzon & Chindaprasirt (2012) ao utilizar o moinho de bolas para diminuir os grãos da cinza e passar por uma peneira de 75µm, a mesma quando substituída pelo cimento apresenta maiores reações pozolânicas. Esse processo é essencial para elevar a resistência mecânica da argamassa. Pois, de acordo com Lima & Monteiro (2016), o processo de moagem exerce efeito significativo sobre a atividade pozolânica, através da diminuição das partículas da cinza do bagaço, visto que o aumento da superfície específica das partículas demonstra o aumento na reação do material.

Além do mais, como destacado por Bahurudeen et al. (2015), a CBCA obtida de usinas elétricas não pode ser usada diretamente como materiais cimentícios suplementares (SCMs) devido às partículas não queimadas e a presença de fases cristalinas (Martirena, 2018). Diferentes métodos de processamento, como a moagem e calcinação, aumentam o potencial pozolânico da CBCA (Dey et al, 2022).

Diante dessas considerações e alinhada às diretrizes dos autores mencionados, a primeira amostra da CBCA estudada foi submetida ao moinho de bolas, onde o processo de moagem durou aproximadamente 120 minutos.

Finalizado tal processo descrito anteriormente, o material passou por uma

classificação granulométrica, onde foi realizado o processo de peneiramento novamente. As partículas retidas nas peneiras de 75 $\mu$ m, 45 $\mu$ m, bem como as partículas passantes na de 45 $\mu$ m, foram selecionadas para ser utilizadas na substituição do cimento. Essa seleção baseou-se na maior finura e na ausência de impurezas nessas frações da cinza, aumentando ainda mais a reação pozolânica na mistura da argamassa.

Ademais, a amostra que ficou retida, passou novamente pelo processo de moagem, onde foi aumentado o tempo de moagem para 240 minutos. Posteriormente, essa amostra foi submetida novamente ao processo de peneiramento, e qualquer material fora das especificações desejadas foi novamente submetido ao processo de moagem, com o tempo dobrado, e assim sucessivamente. Essa metodologia foi aplicada a toda a amostra de CBCA utilizada na confecção do concreto.

O processo de peneiramento e moagem foi concluído quando se obtiveram as seguintes amostras: cinzas retidas na peneira de 75 $\mu$ m, 45 $\mu$ m, além das partículas passantes na de 45 $\mu$ m. Todas as amostras foram coletadas e guardadas em sacos plásticos com as devidas identificações.

### **Caracterização Física da CBCA – Análise de Difração de Raio X**

Para caracterização física da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA), o ensaio realizado foi o da Análise de Difração de Raio X. As medidas de DRX foram realizadas em amostras na forma de pó, onde os DRX foram obtidos pelo equipamento fabricado pela Rigaku, modelo MiniFlex 600 W, gerador de Raios X de 40 kV, com tubo de radiação de CuK  $\alpha$  (foco normal de 2 kV) e detector HPAD (HyPix-400 MF 2D). As medidas foram feitas variando o ângulo de varredura de  $2\theta$ , entre 10° e 80°.

O ensaio de DRX foi conduzido em quatro tipos distintos de amostras: as cinzas retidas nas peneiras de 75 $\mu$ m, 45 $\mu$ m, as partículas passantes na de 45 $\mu$ m, e as partículas retidas na peneira de 150 mm.

### **Moldagem e Cura dos Corpos de Prova**

O concreto foi produzido a partir da mistura de Cimento Portland, CBCA, agregados graúdos, miúdos e água. Para a produção das amostras, foram adotadas três misturas variando a quantidade de CBCA em 10% e 20%, além de ajustes na quantidade de cimento em cada uma delas. Ademais, o traço unitário adotado foi de 1:1,5:2,5:0,55 em massa para cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água (Abreu, 2021). No

entanto, durante a moldagem das misturas, houve necessidade de realizar uma adaptação do traço realizado por Abreu (2021), devido a quantidade de água inicialmente prevista ter sido mais do que suficiente para a trabalhabilidade. Consequentemente, reduziu-se em 15% a quantidade de água total nas misturas com substituição de CBCA e em 20% na amostra referência, 0% de substituição.

Para as dosagens das argamassas, foram adotadas proporções de 0 (referência), 10 e 20% de CBCA em substituição ao cimento, pois conforme De Paula et al. (2006), essas proporções apresentaram resultados satisfatórios em suas análises. Entretanto, em proporções maiores que 30% apresentaram menor resistência, maior porosidade e também, maior absorção de água, conforme destacado pelo estudo.

Os detalhes das proporções de cada mistura, e os respectivos consumos de materiais, estão apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1:** Consumo dos materiais em cada mistura produzida

Mistura	Consumo dos materiais utilizados					
	Agregado miúdo (kg)			Água (kg)		
	Cimento (kg)	CBCA	Areia		Brita	a/c
<b>I (0% sub)</b>	6,49	0,00	9,73	3,57	16,22	0,55
<b>II (10% sub)</b>	5,84	0,65	9,73	3,57	16,22	0,55
<b>III (20% sub)</b>	5,19	1,30	9,73	3,57	16,22	0,55

**Fonte:** Elaboração própria, 2022.

Para o processo de produção do concreto, iniciou-se adicionando a brita e 20% da água de amassamento, ambas foram misturadas durante um minuto. Em seguida, a areia, 50% do cimento e a CBCA, foram adicionadas à mistura, misturando-as por três minutos. Por fim, acrescentou-se o restante dos materiais e misturou-os por mais quatro minutos. Ao final, verificou-se se era possível efetuar o abatimento de tronco de cone, ou seja, se havia coesão e plasticidade adequada, e também, se obteve consistência adequada e uma boa trabalhabilidade para a moldagem dos corpos de prova.

Para cada mistura, foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos de 10 cm de

diâmetro e 20 cm de altura, seguindo a norma NBR 5738 (ABNT, 2016). Após a moldagem, os corpos de provas foram desmoldados após 24 horas de endurecimento e mantidos submersos em cura até momentos antes dos ensaios no laboratório (28 dias). Após o tempo de cura, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência mecânica.

Na Figura 1 é possível observar os corpos de prova desmoldados.

**Figura 1:** Corpos de prova desmoldados



**Fonte:** Elaboração própria, 2022.

### **Ensaio para a Avaliação da Resistência à Compressão**

Após a moldagem e cura dos corpos de prova, as faces transversais foram retificadas para garantir uma superfície plana e uniforme para o ensaio de resistência à compressão. Esse procedimento de retificação foi importante para assegurar resultados mais precisos no teste.

O ensaio de resistência à compressão das amostras seguiu as diretrizes descritas pela norma NBR 5739 (ABNT, 2018). Este processo é ilustrado na Figura 2 e Figura 3, onde são apresentados o equipamento utilizado, a disposição dos corpos de prova e o procedimento do ensaio.

Durante o ensaio, as amostras foram submetidas a cargas progressivas até que ocorresse a ruptura, permitindo a determinação máxima resistência à compressão que o material pode suportar. Esse teste é fundamental para avaliar a capacidade de resistência do concreto e verificar se atende aos padrões estabelecidos pela norma.

A análise dos resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão forneceu informações cruciais sobre a qualidade do concreto produzido, sua durabilidade e

capacidade estrutural, contribuindo de forma significativa para a avaliação da eficácia das diferentes formulações de misturas utilizadas.

**Figura 2:** CP's durante o ensaio de resistência à compressão.



**Fonte:** Elaboração própria, 2022.

**Figura 3:** CP's após o ensaio de resistência à compressão



**Fonte:** Elaboração própria, 2022.

## Resultados e Discussões

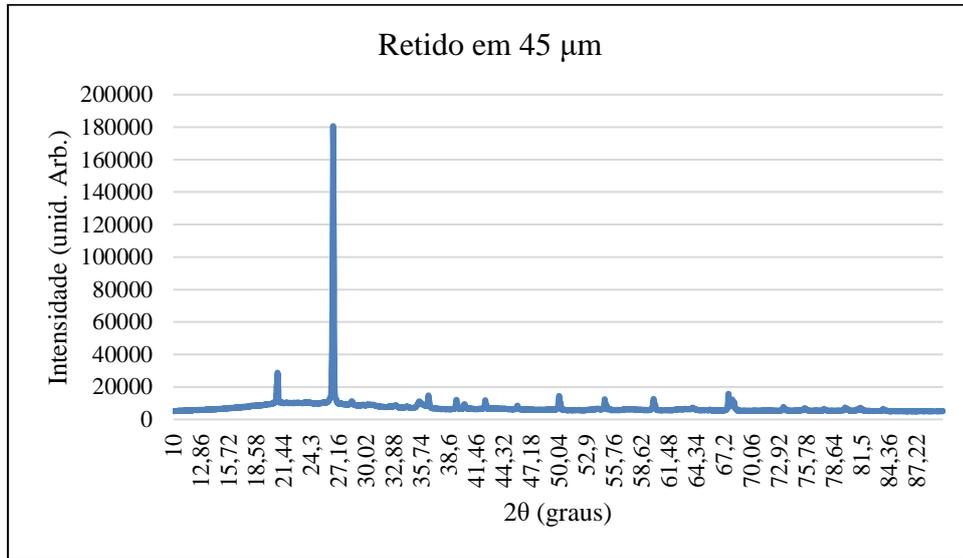
### Análise de Difração de Raio X

A técnica de Difractometria de Raios X (DRX) é uma técnica de caracterização de estruturas cristalinas bastante difundida e largamente utilizada. Quando a amostra disponível é na forma de pó, os difratômetros possuem um detector móvel, chamado goniômetro, capaz de girar em torno do material analisado, a fim de obter uma varredura com vários ângulos de reflexão (Fonseca Filho & Lopes, 2013).

Dessa forma, são detectadas as diferenças na intensidade do feixe refletido em função do ângulo de reflexão, que pelas leis da reflexão, é igual ao ângulo de incidência. Quando os ângulos dos feixes refletidos interferem construtivamente, detecta-se um máximo de reflexão que pode ser medido em contagens por segundo (cps). Para os demais ângulos, somente é detectada a radiação de fundo. Como resultado, é gerado o difratograma, que consiste em um gráfico de intensidade do feixe de raios detectados versus o ângulo de incidência (Fonseca Filho & Lopes, 2013).

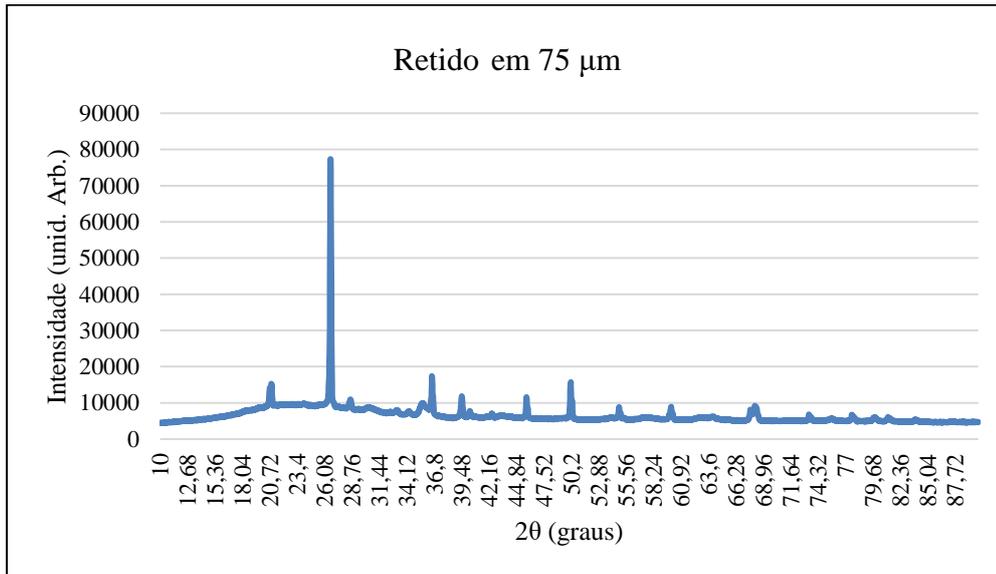
Neste estudo, as amostras da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) residual foram analisadas utilizando DRX, ilustradas nas Tabela 2, Tabela 3, Tabela 4 e Tabela 5. O difratograma gerado revela uma estrutura essencialmente cristalina da CBCA. No entanto, é notável observar que as amostras da CBCA, independente da granulometria, apresentaram picos e fases cristalinas, e também, porções onde não havia cristais, e sim, fase amorfa.

**Tabela 2:** Amostras retidas na peneira de 45µm. Intensidade expressa em unidades arbitrárias (unid. Arb.).



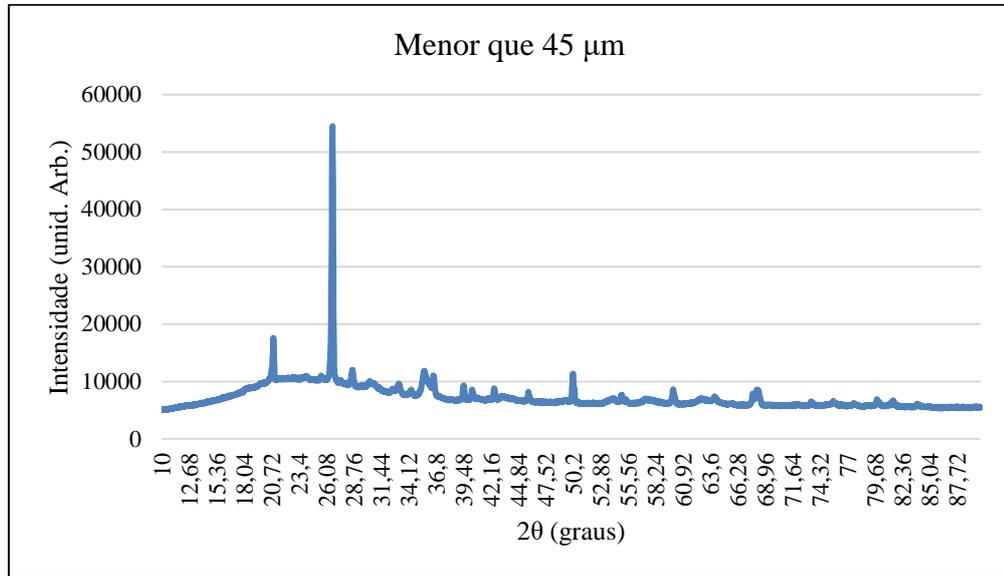
**Fonte:** Elaboração própria, 2022.

**Tabela 3:** Amostras retidas na peneira de 75µm.



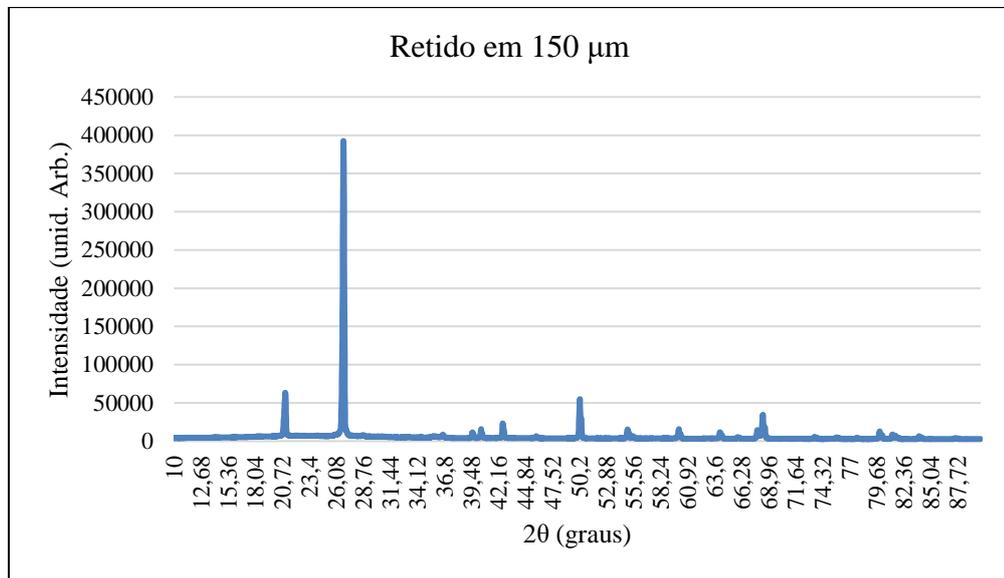
**Fonte:** Elaboração própria, 2022.

**Tabela 4:** Amostras passantes na peneira de 45µm. Intensidade expressa em unidades arbitrárias (unid. Arb.)



Fonte: Elaboração própria, 2022.

**Tabela 5:** Amostras retidas na peneira de 150 mm. Intensidade expressa em unidades arbitrárias (unid. Arb.)



Fonte: Elaboração própria, 2022.

Através da análise dos difratogramas obtidos, foi possível realizar uma identificação qualitativa dos minerais presentes nas amostras em estudo. Os difratogramas apresentam picos com diversas intensidades, os quais correspondem a

diferentes planos cristalinos. Essa variação de intensidade está diretamente relacionada à presença de minerais específicos, porém, não detalhados neste contexto. É importante destacar que o gráfico do difratograma é obtido ao incidir feixes em ângulos variáveis em uma amostra na forma de pó e colocando as intensidades em função do ângulo entre a onda incidente e a onda espalhada (ângulo de espalhamento  $2\theta$ ) (Abreu, 2021).

As amostras apresentaram fases cristalinas distintas, pois trata-se de granulometrias diferentes, sendo característico o pico cristalino maior na amostra com granulometria retida na peneira de 150  $\mu\text{m}$ . A possível cristalização pode ser atribuída ao período de permanência das cinzas no forno de mufla, devido à inércia térmica do forno ao ser desligado. Quanto maior a temperatura de calcinação das cinzas, maior a tendência de cristalização (Vasconcelos, 2013).

Ademais, um ponto interessante se refere a temperatura de queima do bagaço de cana-de-açúcar, o qual pode sofrer variações e definir o surgimento das distintas fases da sílica (amorfas ou cristalinas), a presença de material cristalino nas cinzas é devida às altas temperaturas de combustão nas caldeiras, podendo influenciar tanto na cor, na forma e a quantidade da sílica (Hernández et al. 1998; Paula, 2006).

A relevância desse ensaio está interligada com a composição da CBCA, cujo principal componente químico é a sílica ( $\text{SiO}_2$ ), geralmente presente em quantidades superiores a 60% em massa. A principal característica que viabiliza a utilização da CBCA como pozolana é o estado amorfo dessa sílica presente no bagaço. Um dos métodos mais utilizados para verificar se a cinza possui fases amorfas é a análise por meio da difração de raio X (Cordeiro, 2006; Sampaio, 2013).

Conforme descrito por Mehta & Monteiro (2008), a reação pozolânica é uma reação do tipo ácido base, onde os óxidos (ácidos) da pozolana reagem com a cal (básica) presente na portlandita. É crucial ressaltar que para essa reação ocorrer, é necessário que os óxidos de sílica e alumina estejam no estado amorfo, ou seja, em uma condição de instabilidade para serem vulneráveis ao hidróxido de cálcio.

Sendo assim, é possível manter a sílica contida no bagaço em estado amorfo a partir das condições de queima adotadas. Essa característica pode proporcionar a aplicação desse resíduo como pozolana (Abreu, 2021). Outra forma de melhorar a reatividade da cinza é através de tratamentos físicos, em especial a moagem. Quanto mais fina for a cinza, maior será a área de contato com a pasta de cimento gerando grande número de pontos de nucleação para a reação pozolânica, logo, mais reativa ela será.

Outra vantagem da redução do tamanho das partículas da cinza é o efeito fíler (Vasconcelos, 2013).

Em resumo, através da análise detalhada dos difratogramas obtidos a partir do ensaio de Difractometria de Raios X (DRX), foi possível identificar a presença de fases cristalinas e amorfas nas amostras de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA). Essas amostras exibiram uma variedade de picos e intensidades nos difratogramas gerados, evidenciando diferentes planos cristalinos e minerais específicos, apesar de não detalhados neste estudo. A diversidade nas granulometrias também influenciou na presença e intensidade desses picos cristalinos

Além do mais, a temperatura de queima da CBCA também desempenhou um papel significativo na formação das fases de sílica, seja amorfa ou cristalina, evidenciando a influência das condições de queima nas propriedades da CBCA. Pois, o teor de sílica, composto principal da CBCA, em estado amorfo, é um ponto-chave para sua aplicação como pozolana, ressaltando a importância da DRX para identificar a presença dessas fases na cinza.

Além disso, tratamentos físicos como a moagem se mostraram como estratégia para aumentar a reatividade da cinza, enfatizando sua relevância na fabricação de concretos. Esses resultados destacam a necessidade de considerar não apenas a composição, mas também a estrutura e as condições da CBCA para seu uso eficaz como pozolana na indústria de materiais de construção.

### **Resistência à Compressão**

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados no Laboratório de Materiais da UEMS, e os valores médios, o desvio padrão e a resistência à compressão dos diferentes tipos de concretos estão detalhadamente representados na Tabela 2. Com o propósito de avaliar a viabilidade de utilização da CBCA em substituição ao cimento Portland, foram ensaiados três lotes de concreto, variando as porcentagens de substituição para 0, 10, e 20% de CBCA.

Além disso, ao analisar a Tabela 6, verifica-se que a mistura de referência, com substituição de 0%, apresentou os melhores valores de resistência à compressão. Por outro lado, as amostras que continham substituições de 10 e 20% de CBCA demonstraram um decréscimo na resistência de 5,90% e 35,17%, respectivamente em relação à mistura tida como referência.

**Tabela 6:** Resultados do ensaio de Resistência à Compressão dos corpos de prova

Resultados do ensaio de resistência - 28 dias					
Percentual de Substituição de CBCA	Corpos de provas	Tensão (MPa)	Média	Desvio Padrão	Variância
0%	CP 1	18,73	20,5	4,73	3,29
	CP 2	18,45			
	CP 3	20,56			
	CP 4	21,09			
	CP 5	23,96			
	CP 6	20,22			
10%	CP 1	17,21	19,29	2,14	1,27
	CP 2	20,14			
	CP 3	20,46			
	CP 4	18,47			
	CP 5	19,43			
	CP 6	20,01			
20%	CP 1	12,79	13,29	1,74	0,43
	CP 2	13,99			
	CP 3	13,62			
	CP 4	12,07			
	CP 5	13,66			
	CP 6	13,64			

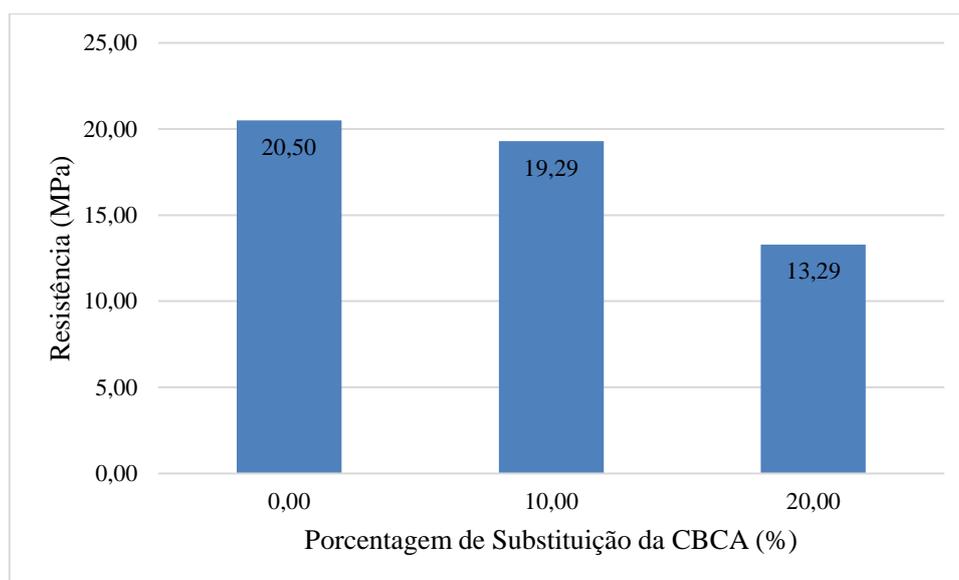
**Fonte:** Elaboração própria, 2022.

Em relação a resistência à compressão, conforme evidenciado na Tabela 7, foi observada redução gradativa conforme aumentava a quantidade de CBCA utilizada em substituição ao cimento Portland. É perceptível que, com uma substituição de 10%, os valores de resistência à compressão foram muito semelhantes ao da amostra controle. No

entanto, ao elevar a substituição para 20%, a resistência teve uma queda significativa, comparado ao da amostra com 0% de substituição de CBCA.

Portanto, a partir da análise dos dados obtidos neste experimento, os resultados indicam que a substituição de 10% de CBCA provocou uma diminuição menos expressiva na resistência à compressão em comparação com a substituição de 20%. Essa constatação ressalta a influência significativa da quantidade de CBCA na resistência do concreto, sugerindo que teores mais altos dessa adição podem resultar em uma redução mais acentuada na resistência à compressão. Contudo, é fundamental salientar que, outros aspectos discutidos no ensaio físico, como a granulometria e composição da CBCA, também desempenham um papel crucial na influência da resistência à compressão do concreto.

**Tabela 7:** Evolução da resistência à compressão das amostras com substituição parcial do cimento Portland pela CBCA.



**Fonte:** Elaboração própria, 2022.

Para avaliar o índice de atividade pozolânica (IAP), foi utilizado o método estabelecido pela NBR 5752 (ABNT, 1992). O IAP é calculado dividindo a resistência à compressão da amostra contendo o material pozolânico pela resistência à compressão da amostra de controle, ambas aos 28 dias. O resultado deve ser expresso em porcentagem. De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 1992), para uma adição mineral ser caracterizada como pozolânica, a mesma deve apresentar o IAP superior a 75%. Sendo assim, o IAP

encontrado para as amostras com substituição de 10 e 20%, foram de 94,10% e 64,82% respectivamente. Assim, a amostra contendo a substituição de 10% superou os 75% exigidos pela referida norma, indicando que o ganho de resistência à compressão dessa amostra se aproximou da resistência à compressão da amostra de controle, caracterizando um efeito pozolânico da CBCA utilizada.

Outro aspecto relevante é a influência da idade na resistência da zona de transição do concreto, conforme discutido por Mehta & Monteiro (1994). Com a idade, a resistência da zona de transição do concreto pode tornar-se igual ou maior que a resistência da matriz de argamassa, devido à cristalização de novos produtos nos vazios da zona de transição através de reações químicas lentas, formando silicato de cálcio hidratado. As reações químicas dos óxidos presentes na CBCA com o hidróxido de cálcio formados na hidratação do cimento contribuem para a resistência porque tendem a reduzir a concentração de hidróxido de cálcio na zona de transição.

Ainda, como observado por Mehta & Monteiro (1994), a reação pozolânica é lenta, com isso a taxa de liberação de calor e de desenvolvimento da resistência serão consequentemente lentas. Essas reações também consomem óxido, ao invés de produzi-lo, o que representa uma importante contribuição para a durabilidade da pasta endurecida de cimento diante dos meios ácidos.

Portanto, o ganho de resistência lento, principalmente nas primeiras idades das amostras que apresentaram efeito pozolânico, contendo CBCA, indica um menor calor de hidratação liberado em comparação com as amostras sem a presença da cinza. Sendo assim, em obras com peças que demandam grande volume de concreto, que podem apresentar um elevado calor de hidratação, seria indicado fazer uso da CBCA como adição mineral, como alternativa para solucionar o problema com o calor da hidratação gerado nas primeiras idades.

Como citado por Aitcin (2000), a substituição de parte do cimento por um material suplementar que possua granulometria bem próxima ou igual a do cimento, torna-se interessante do ponto de vista econômico, pois o preço dos materiais cimentícios suplementares é usualmente menor que o do cimento.

No contexto desta pesquisa, a vantagem econômica é ainda mais atrativa. O material suplementar proposto trata-se de um resíduo, que além de apresentar economia direta, pode resultar na diminuição do custo de produção do concreto, uma vez que teria a substituição de 10% do cimento por um material de menor valor. Também tem

importância ambiental, minimiza os danos ambientais acarretados à natureza com a produção de cimento e disposição inadequada de cinzas, assim, evidenciando aspectos positivos para o meio ambiente com a substituição parcial do cimento pela CBCA.

Comparando os resultados desta pesquisa com estudos de outros autores, tem-se que no trabalho realizado por Silveira (2010), o melhor resultado obtido foi o da amostra com a substituição de 10%, onde a CBCA residual utilizada no estudo, apresentou desempenho satisfatório como insumo para a produção dos concretos estudados, podendo ser utilizada em substituição de parte do cimento Portland no concreto convencional e de alto desempenho. Este teor possibilitou uma manutenção no desempenho mecânico do concreto. Por outro lado, a amostra com teor de 20% de substituição, apresentou uma pequena queda do desempenho em função da baixa reatividade química da CBCA residual e do menor volume de cimento empregado (Silveira, 2010).

O trabalho desenvolvido por Delalibera et al. (2014), trouxe como resultado em relação a resistência à compressão, que as amostras apresentaram redução da resistência conforme a quantidade de CBCA em substituição ao cimento Portland aumentava, mesmo com o aumento da idade. Aos 28 dias observou-se que a redução da resistência ainda foi acentuada onde a substituição de CBCA foi maior que 10%, podendo-se notar que na substituição de 10%, os valores de resistência à compressão foram muito semelhantes ao da amostra controle.

Diante dos resultados apresentados e das referências de outros estudos, torna-se evidente que a substituição parcial do cimento Portland pela CBCA no concreto influencia diretamente sua resistência à compressão. Foi possível observar que a presença de CBCA impacta de forma significativa na resistência, sendo que as amostras com substituição de 10% demonstram uma menor redução nesse aspecto em comparação com as amostras com 20% de substituição, aproximando-se até mesmo dos resultados da amostra controle.

A análise dos índices de atividade pozolânica (IAP) evidenciou a presença de um efeito pozolânico nas amostras com 10% de CBCA, com um IAP superior a 75%, proposto pela norma, reforçando a possibilidade de utilização dessa adição mineral como um componente viável na composição do concreto.

Além disso, ao considerar os estudos de outros autores, nota-se a importância de uma adequada granulometria e da reatividade química da CBCA na formulação do concreto para manter ou otimizar suas propriedades mecânicas. Esses dados coletados

comprovam a viabilidade técnica e econômica da incorporação da CBCA como material alternativo na produção de concretos convencionais, ressaltando sua relevância tanto no aspecto de desempenho quanto na preocupação ambiental e econômica da construção civil.

### **Considerações Finais**

Os resultados obtidos no ensaio de Resistência à Compressão enfatizam que a CBCA residual utilizada apresentou um desempenho satisfatório como insumo para a produção dos concretos estudados. Essa cinza pode ser utilizada com sucesso para substituir parte do cimento Portland empregado em teores de até 10%, resultando em concretos com valores de resistência próximos aos da amostra referencial (substituição de 0%), além de atingir um índice de Atividade Pozolânica superior ao estabelecido pela norma.

No entanto, ao considerar a substituição de 20%, não foram obtidos resultados satisfatórios. Este cenário pode ser justificado pela CBCA ter apresentado estrutura basicamente cristalina, devido a essa característica, a amostra não pode proporcionar a aplicação desse resíduo como pozolana. A principal característica que viabiliza a utilização da CBCA como pozolana é se a sílica, presente no bagaço, estiver em estado amorfo, e não em estado cristalino.

Além dos benefícios técnicos, a substituição por CBCA também oferece vantagens do ponto de vista ambiental, como a redução do consumo de cimento e conseqüentemente, uma menor emissão de CO<sub>2</sub> pelo menor uso do cimento Portland e aproveitamento nobre de um resíduo agroindustrial.

É importante ressaltar que este estudo é uma investigação preliminar sobre a utilização da CBCA, e que ainda deverão ser realizados estudos mais aprofundados para verificação da viabilização técnica e econômica deste resíduo para seu confiável emprego como material de construção, visando atingir fatores econômicos e ambientais. Logo, novas pesquisas nessa área são fundamentais para resolver questões econômicas e ambientais, visto que a utilização de resíduos de processos industriais como matéria-prima alinha-se com práticas de sustentabilidade e representa um campo promissor a ser explorado.

## Referências

ABREU, E. DO R. **Avaliação das características do concreto produzido com a cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição parcial do cimento Portland e sua viabilidade econômica**. 2021. 142f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Católica de Pernambuco, 2021. Disponível em: <http://tede2.unicap.br:8080/handle/tede/1382>. Acesso 20 out. 2021.

AITICIN, P. C. **Concreto de Alto Desempenho**. São Paulo: PINI, 2000.

AGOPYAN, V. **Construção Civil consome até 75% da matéria-prima do planeta**. In: Globo Ciência. 2013. Disponível em: <http://redeglobo.globo.com/globociencia/noticia/2013/07/construcao-civil-consome-ate-75-da-materia-prima-do-planeta.htm>. Acesso em 18 nov. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos**. NBR 5739:2018. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. NBR 5738:2016. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752:1992** Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com o cimento - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653:1992**. Materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 1992.

BAHURUDEEN, A.; KANRAJ, D.; DEV, V.G; SANTHANAM, M. Performance Evaluation of Sugarcane Bagasse Ash Blended Cement in Concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 59, p.77-88, 2015. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2015.03.004.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/lei/112305.htm), 2010. Acesso em: 03 mar. 2024.

BORLINE, M. C.; MENDONÇA, J. L. C. C.; VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N. Influência da temperatura de sinterização nas propriedades físicas, mecânicas e microestruturais de cerâmica vermelha incorporada com cinza de bagaço de cana de açúcar. **Revista Matéria**, v. 11, n. 4, pp. 435 – 443, 2006. DOI: 10.1590/S1517-70762006000400010.

CARON, B. O.; ELOY, E.; SOUZA, V. Q.; SCHMID, D.; BALBINOT, R.; BEHLING, A.; MONTEIRO, G. C. Quantification of forest biomass in short rotation plantations with different spacings. **Comunicata Scientiae**, Bom Jesus, v.6, n.1, p.106-112, Jan./Mar. 2015. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/283428577\\_Quantification\\_of\\_forest\\_biomass\\_in\\_short\\_rotation\\_plantations\\_with\\_different\\_spacings](https://www.researchgate.net/publication/283428577_Quantification_of_forest_biomass_in_short_rotation_plantations_with_different_spacings). Acesso em: 20 out. 2021.

CORDEIRO, G. C. **Utilização de Cinzas Ultrafinas do Bagaço de Cinza de Cana-de-açúcar e da Casca de Arroz como Aditivos Minerais em Concreto**. 2006. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/pt/teses-de-doutorado/150-2006/1077-guilherme-chagas-cordeiro>. Acesso em: 20 out. 2021.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R.; TAVARES, L. M. M. Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. **Cement & Concrete Composites**, v. 30, p. 410-418, 2008. Doi:[10.1016/j.cemconcomp.2008.01.001](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.01.001).

DELALIBERA, Rodrigo; SARMENTO, Antover; LOPES, Bárbara; BRITO, Alexandre. Análise da viabilidade da utilização da cinza de bagaço de cana-de-açúcar como substituição parcial do cimento Portland. REEC - **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 9, 2014. DOI: 10.5216/reec.v9i3.32023.

DELSAUTE, B.; & STAQUET, S. Impact of recycled sand and gravel in concrete on volume change. **Construction and Building Materials**, 2020. Doi: [10.1016/j.conbuildmat.2019.117279](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117279).

DEY, D.; SRINIVAS, D.; PANDA, B.; SURANENI, P.; & SITHARAM, T. G. Use of industrial waste materials for 3D printing of sustainable concrete: A review. **Journal of cleaner production**, v. 340, 2022. Doi: [10.1016/j.jclepro.2022.130749](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130749).

DE PAULA, M. O.; TINÔCO, I. F.; RODRIGUES, C. S.; DA SILVA, E. N.; SOUZA, C. F. Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial do cimento Portland. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, n. 3, p. 353-357, 2009. Doi: 10.1590/S1415-43662009000300019.

DIXIT, M. K.; CULP, C. H.; FERNÁNDEZ-SOLÍS, J. L. System boundary for embodied energy in buildings: A conceptual model for definition. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 21, p. 153-164, 2013. Doi: 10.1016/j.rser.2012.12.037.

FARRANT, W. E.; BABAFEMI, A. J.; KOLAWOLE, J. T.; PANDA, B. Influence of Sugarcane Bagasse Ash and Silica Fume on the Mechanical and Durability Properties of Concrete. **Materials (Basel, Switzerland)**, v. 15, 2022. Doi: [10.3390/ma15093018](https://doi.org/10.3390/ma15093018).

FONSECA FILHO, H. D. da.; LOPES, G. A. DE C. Avanços em caracterização de amostras sólidas cristalinas através de Difractometria de Raios-X. **Estação Científica (UNIFAP)**, v. 3, n. 1, p. 31-45, 2013. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/301890680\\_Avancos\\_em\\_caracterizacao\\_de\\_amostras\\_solidas\\_cristalinas\\_atraves\\_de\\_Difractometria\\_de\\_Raios-X](https://www.researchgate.net/publication/301890680_Avancos_em_caracterizacao_de_amostras_solidas_cristalinas_atraves_de_Difractometria_de_Raios-X). Acesso 20 out. 2021.

HERNÁNDEZ, J. F. MARTIRENA et al. Use of wastes of the sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: study of the reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 28, p. 1525-1536, 1998. Doi: [10.1016/S0008-8846\(98\)00130-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00130-6).

KOLAWOLE, J. T.; BABAFEMI, A. J.; PAUL, S. C.; D PLESSIS, A. Performance of concrete containing Nigerian electric arc furnace steel slag aggregate towards sustainable production. **Sustainable materials and technologies**, v. 25, 2020. Doi: [10.1016/j.susmat.2020.e00174](https://doi.org/10.1016/j.susmat.2020.e00174).

LIMA, J. S.; MONTEIRO, E. C. B. Influência da Moagem da Cinza do Bagaço de Cana-de-açúcar na Atividade Pozolânica. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, v. 1, p. 23-28, 2016. Doi: [10.25286/repa.v1i1.186](https://doi.org/10.25286/repa.v1i1.186).

LIMA, S. A.; SALES, A.; MORETTI, J. P.; ALMEIDA, F. C. R.; SANTOS, T. J. Caracterização de concretos confeccionados com a cinza do bagaço da cana-de-açúcar. **In Anais do 6º Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação de Estruturas**, Cordoba, 2010.

MARTIRENA, F.; MONZÓ, J. Vegetable ashes as supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 57-64, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.015>.

MEHTA, P. K.; Monteiro, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: Editora: Pini, 1994.

MEHTA, P. K.; Monteiro, P. J. M. (2008). **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Editora Pini, 2008.

MINOSSO, A. M.; et al. Vantagens da Utilização da Cinza do Bagaço da Cana de Açúcar como uma Medida Sustentável para a Indústria do Cimento. **VI Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção**, UFSM / UTFPR, Paraná, Brasil, 2016.

NETO, A. A.; AMORIM MARTINS, I.; RAMOS ALVES, J. V.; JACOB DA PINA, L.; CARRIJO ADORNO, A. L. Utilização das cinzas do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) como aditivo natural no concreto estrutural. **Revista Científica de Engenharia Civil**, v. 5, n. 1, p. 82-96, 2022. Disponível em: <http://anais.unievangelica.edu.br/index.php/reciec/article/view/9432>. Acesso 20 out. 2021.

OLIVEIRA NETO, Geraldo Cardoso; PINTO, Luiz Fernando Rodrigues; AMORIM, Marlene Paula Castro; GIANNETTI, Biagio Fernando; ALMEIDA, Cecília Maria Villas Boas. A framework of actions for strong sustainability. *Journal of Cleaner Production*, v. 196, p. 1629-1643, 2018. DOI: [10.1016/j.jclepro.2018.06.067](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.067).

RÊGO, J. H. S. (2004). **As cinzas de casca de arroz (CCAs) amorfa e cristalina como adição ao concreto: aspectos de microestrutura das pastas**. 2004, 301f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

RUKZON, S.; CHINDAPRASIRT, P. Utilization of bagasse ash in high-strength concrete. **Materials & Design**, v 34, p. 45-50, 2012. Doi: [10.1016/j.matdes.2011.07.045](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.07.045).

SAMPAIO, Z. L. M. **Análise do comportamento mecânico de concretos produzidos com incorporação de cinza do bagaço da cana-de-açúcar de variedades SP911949**,

**RB 92579 e SP 816949.** 2013, 150f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/14843>. Acesso 20 out. 2021

**SILVEIRA, D. A. Influência da substituição parcial do cimento Portland pela cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) residual no concreto.** 2010, 110f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiás, Goiânia, 2010. Disponível em: <http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tde/651>. Acesso 20 out. 2021

**SOUSA, L. R. L. Viabilidade do uso de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar (CBC) residuais do estado de Goiás como adição mineral ao cimento Portland.** 2009, 121f. Dissertação (Mestrado de Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiás, Goiânia, 2009. Disponível em: <http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tde/682>. Acesso 20 out. 2021

**VASCONCELOS, M. C. A. Avaliação da atividade pozolânica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar utilizando métodos físicos.** 2013, 134f. Dissertação (Mestre em Engenharia) - UFPE, Recife, PE, 2013. Universidade Federal de Goiás, Goiás, Goiânia, 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/17103>. Acesso 20 out. 2021.

*Recebido em 03 de abril de 2024.  
Aceito em 25 de novembro de 2024.  
Publicado em 30 de janeiro de 2025.*