AVALIAÇÃO DA HETEROGENEIDADE DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA: CINZA DO BAGAÇO DE CANA DE AÇÚCAR APLICADA NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Heterogeneity evaluation of waste from the sugar and alcohol industry: sugarcane bagasse ash applied in civil construction

Annelize Cristina Bento de Oliveira
UFMG | Belo Horizonte, Minas Gerais | annelize@ufmg.br

Mateus Oliveira da Silva Roquim
UFMG | Belo Horizonte, Minas Gerais | mateusoliv@ufmg.br

Maria Teresa Gomes Barbosa
UFJF | Juiz de Fora, Minas Gerais | teresa.barbosa@ufjf.br

Dayana Cristina Silva Garcia
UFMG | Belo Horizonte, Minas Gerais | dayanacsgarcia@ufmg.br

Resumo

O presente estudo teve como objetivo avaliar a variabilidade das propriedades físico-químicas de cinco tipos de resíduos de cana-de-açúcar coletados em uma única indústria, focando na aplicação da CBCA (cinza do bagaço da cana-de-açúcar) em materiais de construção civil. O estudo busca otimizar o uso do resíduo como adição mineral, portanto foram conduzidos ensaios que analisam a composição química, morfologia, granulometria e condutividade elétrica de todas as amostras. Os resultados indicam que os cinco materiais possuem propriedades distintas, mostrando que o processo de queima e armazenamento na indústria tem uma grande influência na qualidade da CBCA. Portanto, a Cinza de Fundo, proveniente dos tanques de sedimentação, apresenta resultados de boa atividade pozolânica e viabilidade de uso em compósitos cimentícios.

Palavras-chave: Cimento; Meio ambiente; Resíduo agroindustrial; Bagaço de cana-de-acúcar; Matéria-prima.

ABSTRACT

This study aimed to assess the variability in the physicochemical properties of five types of sugarcane waste, with a focus on the potential application of sugarcane bagasse ash (SCBA) in construction materials. To optimize the use of this residue as a supplementary cementitious material, a series of tests were conducted to evaluate the chemical composition, morphology, particle size distribution, and electrical conductivity of the samples. The results revealed distinct characteristics among the five materials, indicating that combustion and storage processes within the industry significantly influence SCBA quality. Among the samples, Bottom Ash derived from sedimentation tanks demonstrated favorable pozzolanic activity and promising potential for incorporation into cementitious composites.

Keywords: Cement; Environment.; Waste; Sugarcane Bagasse; Raw material.

1 INTRODUÇÃO

A construção civil produz diversos impactos ambientais, uma vez que consome muita energia e matéria-prima natural. Sellitto (2013) afirma que a extração dos materiais utilizados para a produção do cimento causa inúmeros efeitos socioambientais, como a degradação do solo, alterações nos ecossistemas naturais e desmatamento. Por isso, a busca por inserir a sustentabilidade a essa indústria vem crescendo e ocupando espaço principalmente no setor de materiais de construção civil. O desenvolvimento de materiais sustentáveis está em evolução constante e, a cada dia, novas tendências, metodologias e materiais são desenvolvidos (FERREIRA NETO, 2022).

O concreto é um material produzido massivamente pela indústria da construção civil, portanto, está sempre em estágio de inovação para que sua produção e uso sejam otimizados. Por isso, inúmeras pesquisas científicas estão sendo desenvolvidas sobre o uso das cinzas do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA, um resíduo proveniente da queima do bagaço da cana-de-açúcar para a geração de energia na indústria sucroalcooleira) como um aditivo mineral, avaliando a substituição parcial do cimento Portland em concretos e argamassas (ABREU, 2021). As adições minerais são divididas em dois grupos: as quimicamente ativas - materiais pozolânicos e cimentantes - e as sem atividade química – fílers (TUTIKIAN, DAL MOLIN, 2008).

A CBCA pode atuar como material pozolânico - material silicoso que, quando moído e hidratado, reage com hidróxido de cálcio formando compostos com propriedades cimentícias (LIMA, 2010). Logo, quando é adicionada ao concreto, é notório o aumento de resistência mecânica final do material (SAMPAIO, 2013). Aplicar esse resíduo como adição mineral se destaca como um uso nobre deste material, dando valor ao que seria descartado e aterrado. Além do evidente benefício ambiental, a utilização de pozolanas na indústria cimenteira também possui vantagens econômicas, uma vez que a incorporação da CBCA no cimento diminui a demanda por clínquer – que é um material comparativamente caro – e resulta no prolongamento da vida útil das jazidas de calcário. Consequentemente, a possibilidade de substituir parte do clínquer, adicionando ao cimento materiais que antes eram tratados como resíduos industriais, é de suma importância para diminuir o impacto ambiental causado por esses resíduos se fossem eliminados no meio ambiente (FERNANDES, 2014).

Apesar disso, a viabilidade do uso desse material depende da heterogeneidade da sua composição, uma vez que a complexidade química da biomassa vegetal apresenta grande heterogeneidade aos resíduos (JUNIOR, 2020). Enquanto isso, o maior resíduo gerado pela indústria sucroalcooleira é o bagaço da cana de açúcar e, visando reduzir custos no gasto de energia, queimá-lo é uma prática comum entre as indústrias sucroalcooleiras para a produção de energia elétrica, reduzindo o bagaço à cinza (SCHNEIDER, 2012). Dessa forma, diariamente são gerados e armazenados esses dois resíduos, fato que induz ao estudo de sua heterogeneidade quando coletados em uma indústria.

Portanto, o presente artigo objetiva analisar qual resíduo de CBCA será mais viável para seu uso como adição mineral. Serão conduzidos estudos sobre cinco CBCAs, a fim de identificar qual tipo de cinza apresenta melhor aplicação na construção civil, considerando reatividade e viabilidade de uso. Será verificada a possível atividade pozolânica das cinzas do bagaço da cana de açúcar, influenciada pelo conteúdo de sílica amorfa - utilizando o Ensaio de Luxan (1989), que avalia a reatividade do material através da análise de sua condutividade. Esse método permitirá avaliar a capacidade das cinzas de reagir quimicamente com o cimento.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

As indústrias sucroalcooleiras produzem dois tipos de cinzas: as cinzas provenientes das caldeiras das usinas - que apresentam baixa perda ao fogo e são compostas por um alto teor de sílica cristalina, ou quartzo, portanto, possui baixa reatividade - e as cinzas oriundas dos filtros de chaminés - que possuem perda ao fogo elevada, e uma alta reatividade decorrente da presença de sílica amorfa em sua composição (MORETTI, 2018).

Para a realização deste trabalho, foram coletados cinco resíduos em uma indústria sucroalcooleira. Entre eles, dois tipos de bagaço de cana armazenados no pátio da indústria — um claro, recém-espremido, e outro escuro, armazenado por mais tempo. Além disso, foram analisadas três cinzas: uma coletada diretamente nas caldeiras e duas provenientes dos tanques de sedimentação, denominadas cinza de topo e cinza de fundo, de acordo com o local de coleta. Note que, as cinzas correspondem ao material resultante da queima do bagaço para cogeração de energia.

Para reduzir a quantidade de matéria orgânica dos resíduos, estes passaram por um processo de queima, que foi realizado em um forno tipo mufla. Para os bagaços, o processo foi realizado em duas etapas. A primeira etapa, consistiu na queima a 300°C por 3 horas, seguida de queima a 600°C por mais três horas. A taxa de aquecimento utilizada foi de10°C/min. Uma vez que as cinzas coletadas já foram previamente queimadas na indústria para a cogeração de energia, a queima delas em laboratório foi realizada apenas em uma etapa, a 600°C por três horas. O resfriamento de ambos foi feito ao ar, até a temperatura ambiente.

2.2 MÉTODOS

Após a queima, todos os materiais obtidos foram cinzas de bagaço de cana-de-açúcar. Estas foram caracterizadas quanto a composição química, morfologia, granulometria e reatividade química. A composição química foi realizada por FRX, a morfologia foi determinada por meio de microscopia eletrônica de varredura e a reatividade química foi determinada por meio do ensaio de condutividade elétrica.

Para o ensaio de condutividade elétrica, foi preparada uma solução saturada com 2g de $Ca(OH)_2$ em 200 ml de água em temperatura constante de 40°C. Depois de misturar e filtrar, a solução foi completada com água destilada até 1L. Separou-se 250 ml da solução para cada amostra, e adicionou-se 5g de cada cinza em seu respectivo recipiente. Com o condutivímetro, foi medida a condutividade elétrica da solução antes de adicionar as cinzas depois de adicioná-las. Durante todo o processo, o ensaio deve estar em contato com um agitador magnético com aquecimento, para ser agitado e a temperatura ser mantida constante a 40°C.

3 RESULTADOS E ANÁLISES

3.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Depois de queimadas, as amostras perdem umidade e matéria orgânica, além da perda de massa devido à torrefação, que é causada pela degradação dos componentes químicos do material lignocelulósico - sensível à degradação térmica (YILDIZ, 2006).

Tabela 1: Perda de massa dos materiais

Material	Porcentagem de perda de massa
CINZA DE FUNDO	33,6%
CINZA DE TOPO	27,4%
BAGAÇO CLARO	96,9%
BAGAÇO ESCURO	90,6%
CINZA DE CALDEIRA (600°C)	5,5%
CINZA DE CALDEIRA (1000°C)	6,4%

Esse resultado mostra que a cinza de caldeira tem uma perda de massa muito inferior às demais, ou seja, ela teve uma queima eficiente na indústria, não sobrando resíduo de matéria orgânica significante. A coluna representada por {P} no Quadro 1 refere-se à soma dos teores de dióxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3). Em todas as amostras, o percentual de {P} é maior que 75%, indicando que todas as cinzas são compostas, principalmente, por dióxido de silício e óxidos de alumínio e ferro. Esses óxidos são fundamentais na formação de compostos cimentantes, como os silicatos e aluminatos de cálcio hidratados (SILVA, 2024).

Quadro 1: Composição química principal dos materiais

Material	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	P_2O_5	K_2O	{P}
CINZA DE FUNDO	3,83%	53,77%	18,71%	14,99%	1,86%	1,31%	4,93%	87,47%
CINZA DE TOPO	4,74%	53,25%	16,73%	14,36%	1,81%	1,89%	6,18%	84,34%
BAGAÇO CLARO	6,87%	41,63%	19,02%	16,75%	1,89%	1,39%	9,67%	77,40%
BAGAÇO ESCURO	7,65%	44,20%	19,92%	17,98%	2,53%	1,05%	5,20%	82,10%
CINZA DE CALDEIRA IN NATURA	6,52%	44,05%	11,34%	20,29%	2,29%	0,84%	12,60%	75,68%
CINZA DE CALDEIRA (600°C)	6,69%	43,88%	11,79%	19,56%	2,25%	0,92%	12,87%	75,23%
CINZA DE CALDEIRA (1000°C)	6,93%	44,10%	11,61%	19,37%	2,24%	1,05%	12,91%	75,08%

3.2 MORFOLOGIA

A morfologia dos materiais foi inicialmente analisada em escala macroscópica (Figura 1 e 2). Observou-se que as cinzas apresentam aspecto pulverulento, semelhantes a um pó fino, enquanto os bagaços possuem formato fibroso, com fibras longas e entrelaçadas.

Figura 1: Materiais coletados na indústria (in natura)



Figura 2: Materiais pós queima



As Figuras de 3 a 5 exibem o resultado das imagens geradas pelo MEV, que mostram a superfície das partículas que compõem cada amostra, e os mapas de EDS de cada material, que analisa os elementos presentes por área e gera o mapeamento químico. Um ponto importante a ser ressaltado é que o carbono detectado se refere à fita de carbono que as amostras são depositadas.

Comparando as imagens, nota-se que as cinzas apresentaram morfologia com partículas arredondadas, fibrosas ou prismáticas. Jittin (2021) diz que as partículas prismáticas geralmente estão associadas a cristais, como o quartzo, por exemplo. As partículas arredondadas são esferas de sílica a alumina, enquanto as fibrosas são partículas que conservaram a morfologia da própria cana-de-açúcar. Com relação aos mapas de composição química, fica claro que as cinzas são compostas predominantemente por Si, Al e O. As cinzas dos bagaços apresentam morfologia fibrosa, composta por fibras alongadas e delgadas, enquanto as cinzas dos tanques de decantação apresentam partículas mais prismáticas. Partículas esféricas foram observadas nas cinzas de caldeira. Segundo Vivian (2022), os bagaços apresentam baixa densidade e demonstram bom potencial energético em sua forma in natura.

Portanto, todos os materiais analisados contém uma quantidade relevante de silício, que é o composto mais importante para uso como adição mineral. Nas imagens do MEV, partículas de quartzo e ferro são facilmente detectadas, uma vez que estruturas lisas – circuladas em verde nas Figura 3 – são quartzo, e as partes mais brilhantes – circuladas em vermelho nas Figuras 3 e 4 – são ferro. As cinzas das caldeiras são compostas predominantemente por quartzo, oriundo do solo da lavoura, e essas partículas afetam negativamente a reatividade do material (FRÍAS, 2011).

Figura 3: Morfologia e composição principal das cinzas de caldeira

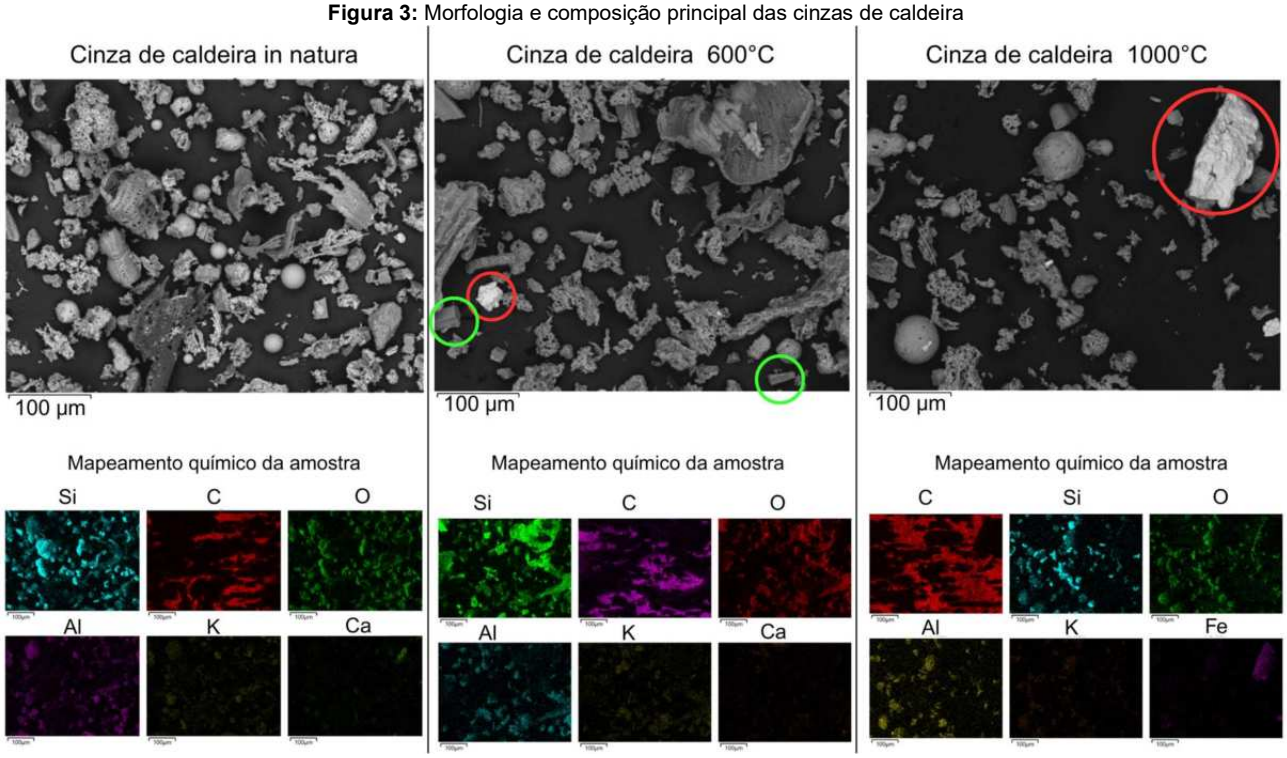
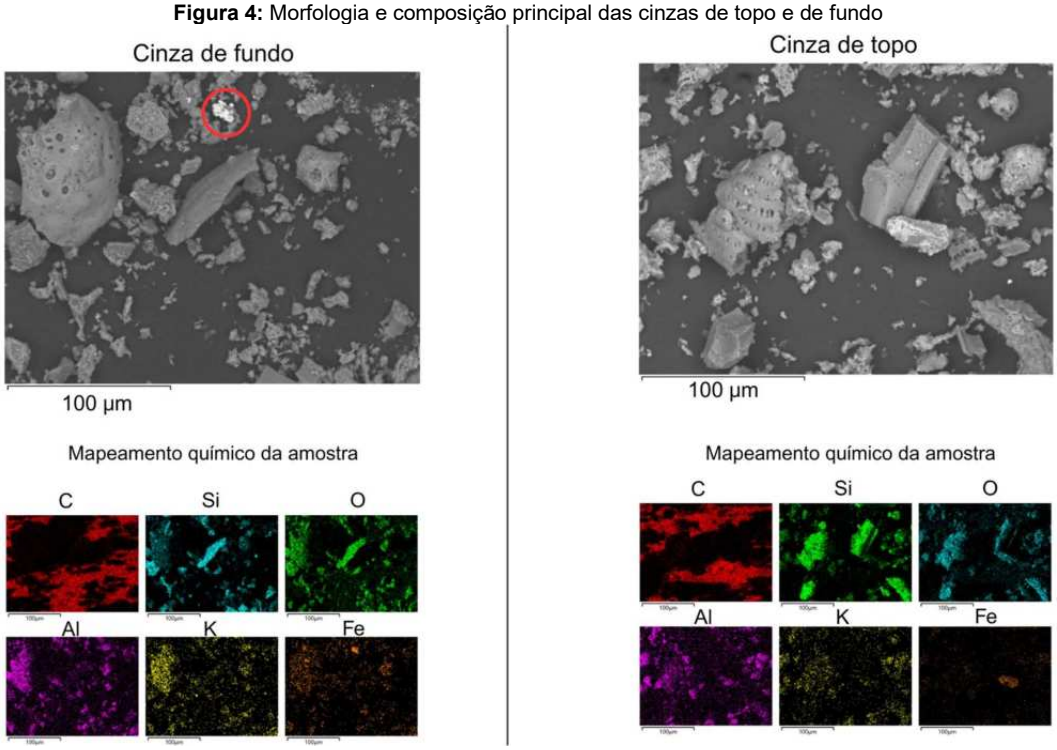


Figura 4: Morfologia e composição principal das cinzas de topo e de fundo



3.3 GRANULOMETRIA

As cinzas, tanto de topo quanto de fundo apresentam distribuições granulométricas semelhantes (Figura 6), e um grau de finura superior ao do bagaço, o que indica uma maior proporção de partículas de menor diâmetro. Os bagaços, por sua vez, apresentam um grau de finura menor em comparação com as cinzas. Isso é característico de um material fibroso e menos fragmentado - como é o caso de resíduos vegetais não completamente queimados. Já as cinzas de caldeira, em suas três variações, apresentam um grau de finura praticamente idêntico, uma vez que as linhas que as representam se sobrepõem no gráfico. Elas, portanto, apresentam o maior grau de finura dentre todos os materiais, com uma distribuição uniforme. Isso que pode ser atribuído à combustão completa do material na caldeira.

Figura 5: Morfologia e composição principal dos bagaços

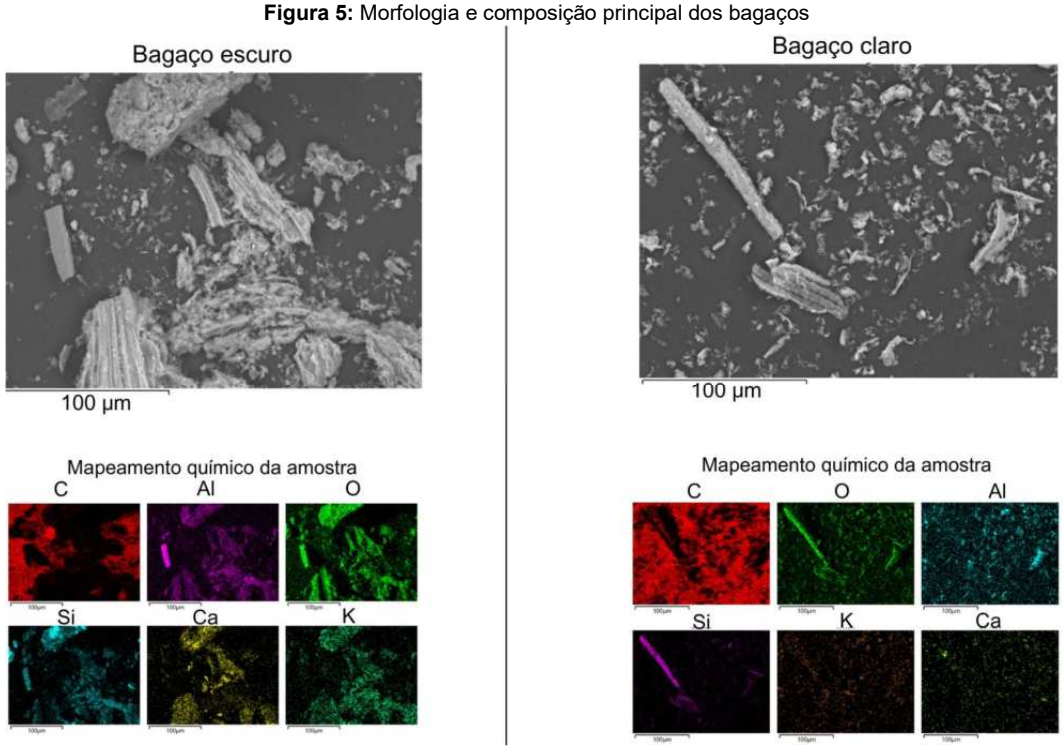
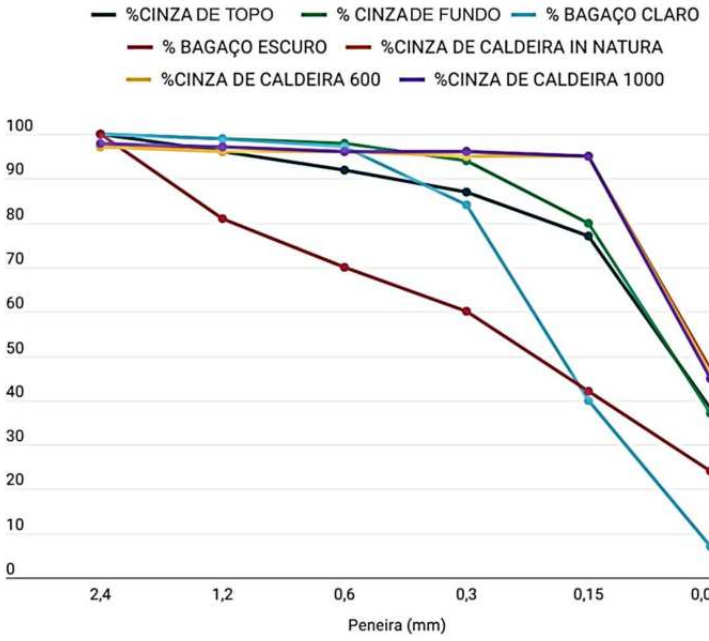


Figura 6: Gráfico da granulometria dos materiais

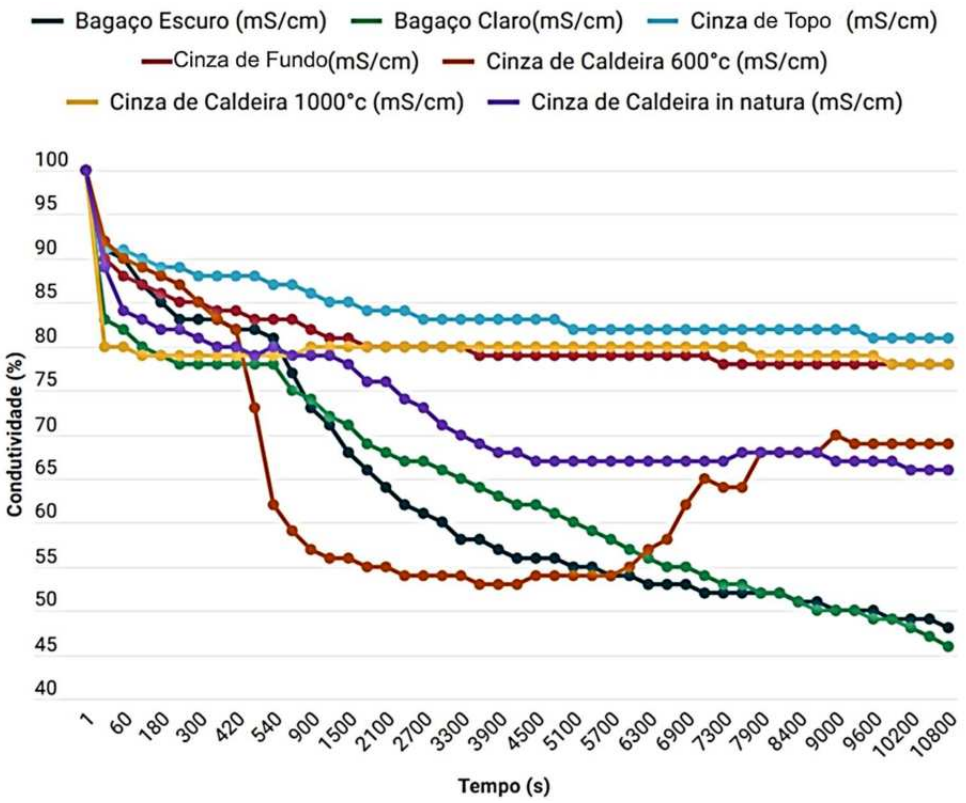


3.4 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

Segundo o método de Luxan (1989), se o material analisado for uma pozolana, é esperado que a condutividade da solução com cinzas, após dois minutos, seja menor que a condutividade da solução inicial, devido à menor quantidade de íons Ca+2 e (OH)- na solução. A condutividade elétrica da solução é um parâmetro muito importante, uma vez que a mobilidade iônica na solução indica sua condutividade, portanto indica a maior facilidade de ocorrência de processos corrosivos (MORETTI, 2018). Dessa forma, o material é classificado de acordo com o módulo da variação de condutividade do ensaio, e quanto maior a variação, maior a atividade.

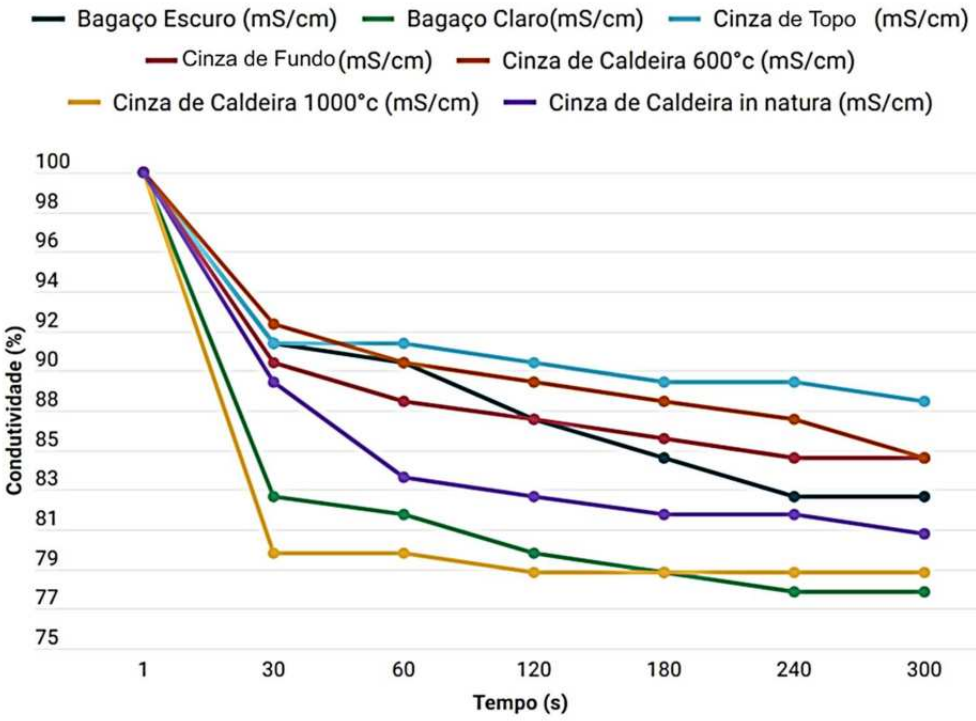
O gráfico da Figura 7 foi plotado após a coleta dos dados pelo condutivímetro em 10800s. Como o ensaio de Luxan estipula o tempo de 120s, o gráfico da Figura 8 apresenta um recorte do ensaio completo.

Figura 7: Gráfico de variação da condutividade elétrica



A Figura 8 indica que todas as amostras apresentam resultados moderados quanto à atividade pozolânica. As cinzas de caldeira apresentam uma reatividade muito baixa quando analisadas em seu módulo, por isso os gráficos foram plotados em porcentagem. No tempo de 120s, temos, em ordem decrescente de reatividade, Cinza de caldeira queimada a 1000°C, o Bagaço Claro, Cinza de caldeira in natura, Cinza de Fundo, Bagaço Escuro, Cinza de caldeira queimada a 600°C e, por fim, Cinza de Topo.

Figura 8: recorte ensaio de condutividade



Analisando o gráfico expandido, observa-se que as amostras de bagaço continuam apresentando variação de condutividade mesmo após a estabilização das curvas das cinzas, o que indica maior reatividade e boa

atividade pozolânica. Uma exceção é a cinza de caldeira queimada a 600 °C, cuja curva de condutividade difere significativamente das demais. Esse comportamento não era esperado e, após análise, foi atribuído a um possível erro experimental. De acordo com Moretti (2018, as cinzas de caldeira, que contém uma grande quantidade de quartzo e não passaram por outros tipos de processamentos para aumentar a reatividade - como moagem ultra-fina, separação gravimétrica e lixiviação química - podem ser aplicadas como material inerte - agregado miúdo ou fíler na produção de concretos e argamassas, uma vez que apresentam pouca atividade pozolânica (MORETTI, 2018).

4 CONCLUSÃO

Os resultados distintos dos ensaios conduzidos mostram a heterogeneidade dos resíduos gerados em uma única indústria. Um fator que pode explicar a variação dos resultados de cada amostra é que que o processo de queima e armazenamento das cinzas em uma indústria não é monitorado, portanto, cada queima gera uma cinza com propriedades distintas. O fato da reação da CBCA oriunda da queima dos bagaços em laboratório ser maior, no ensaio de Luxán, é motivado por ter todo seu processo de queima monitorado, então tem menor dispersão e menor perda das partículas mais finas de dióxido de silício que, por sua vez, reagem mais, devido a maior superfície de contato.

Apesar disso, a viabilidade de aplicação do bagaço da cana de açúcar é questionável, já que utilizá-lo em escala veta seu uso como potencial energético na indústria sucroalcoooleira, tornando o processo mais caro ao adicionar o processo de queima completa, tanto pelo gasto de energia com o forno, quanto pela sua perda percentual de volume maior que 90%. Dessa forma, a Cinza de Caldeira tem o resultado que apresenta maior atividade pozolânica e aplicabilidade.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao suporte financeiro da FAPEMIG #APQ – 00786-22, a Capes, ao CNPq, ao Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, a UFMG e ao LCPnano - UFMG.

REFERÊNCIAS

ABREU, Ennes do Rio et al. 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. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2021. Disponível em: http://tede2.unicap.br:8080/handle/tede/1382. Acesso em: 14 jan. 2025.

FERNANDES, Sérgio Eduardo. Concreto com adição de cinza de bagaço de cana-de-açúcar. 2014. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2014. Disponível em: http://hdl.handle.net/11449/124098. Acesso em: jan. 2024.

FRÍAS, M.; VILLAR, E.; SAVASTANO, H. Brazilian sugar cane bagasse ashes from the cogeneration industry as active pozzolans for cement manufacture. *Cement and Concrete Composites*, v. 33, p. 490–496, 2011.

JITTIN, V.; MINNU, S. N.; BAHURUDEEN, A. Potential of sugarcane bagasse ash as supplementary cementitious material and comparison with currently used rice husk ash. **Construction and Building Materials**, v. 273, p. 121679, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121679 . Acesso em: 28 abr. 2025.

JUNIOR, Silvio Vaz. Aproveitamento de resíduos agroindustriais: uma abordagem sustentável. Brasília, DF: Embrapa, 2020. Disponível em: http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1126255. Acesso em: 7 jan. 2025.

LIMA, Sofia Araújo et al. Caracterização de concretos confeccionados com a cinza do bagaço da cana-de-açúcar. In: CINPAR 2010 – VI Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação de Estruturas, 2010, Córdoba, Argentina. Tema Caracterização de Materiais. 2010. Acesso em: 10 ago. 2024.

LUXÁN, M. P. de; MADRUGA, F.; SAAVEDRA, J. Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. *Cement and Concrete Research*, v. 19, n. 1, p. 63-68, 1989. Disponível em: https://doi.org/10.1016/0008-8846(89)90066-5. Acesso em: 28 jun. 2024.

MORETTI, Juliana Petermann. Incorporação de resíduo agroindustrial em matrizes cimentícias. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018. Disponível em: https://repositorio.ufscar.br/handle/20.500.14289/9935. Acesso em: 17 jan. 2025.

FERREIRA 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 em: 31 jan. 2025.

SAMPAIO, Zodinio Laurisa Monteiro. Análise do comportamento mecânico de concretos produzidos com incorporação de cinza do bagaço da cana-de-açúcar de variedades SP911049, RB92579 e SP816949. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013. Acesso em: 12 ago. 2024.

SCHNEIDER, Cristina Fernanda et al. Formas de gestão e aplicação de resíduos da cana-de-açúcar visando redução de impactos ambientais. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v. 7, n. 5, p. 2, 2012. Acesso em: 3 jan. 2025.

SILVA, J. R.; COSTA, L. M.; OLIVEIRA, M. F. Estudo das relações SiO_2/Al_2O_3 e CaO/SiO_2 em cimentos álcali-ativados. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 17, n. 3, 2024. Disponível em: https://www.scielo.br/j/riem/a/npPnG6PXBZzyVCKkpd56YbJ/. Acesso em: 30 abr. 2025.

SELLITTO, M. A. et al. Coprocessamento de cascas de arroz e pneus inservíveis e logística reversa na fabricação de cimento. *Ambiente & Sociedade*, v. 16, n. 1, p. 141–162, jan. 2013. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S1414-753X2013000100009. Acesso em: 14 fev. 2024.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. Concreto auto-adensável. São Paulo: PINI, 2008.

VIVIAN, Magnos Alan et al. Caracterização do bagaço de cana-de-açúcar e suas potencialidades para geração de energia e polpa celulósica. *Madera y Bosques*, Xalapa, v. 28, n. 1, e2812376, 2022. Disponível em: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712022000100112&lng=es&nrm=iso. Acesso em: 31 jan. 2025. DOI: https://doi.org/10.21829/myb.2022.2812376.

YILDIZ, Sibel; GEZER, Engin D.; YILDIZ, Umit C. Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat. *Building and Environment*, v. 41, n. 12, p. 1762-1766, 2006. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.07.017. Acesso em: 31 jan. 2025.