



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE CRATEÚS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

MATEUS FERREIRA DA SILVA

PASTAS ÁLCALI-ATIVADAS À BASE DE CINZAS DE BIOMASSA

CRATEÚS

2024

MATEUS FERREIRA DA SILVA

PASTAS ÁLCALI-ATIVADAS À BASE DE CINZA DE BIOMASSA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a. Dra. Heloína Nogueira da Costa

CRATEÚS

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S581p Silva, Mateus Ferreira da.
Pastas álcali-ativadas à base de cinza de biomassa / Mateus Ferreira da Silva. – 2024.
54 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús,
Curso de Engenharia Civil, Crateús, 2024.
Orientação: Profa. Dra. Heloína Nogueira da Costa.

1. Materiais álcali-ativados. 2. Pastas binárias. 3. Cinza volante. I. Título.

CDD 620

MATEUS FERREIRA DA SILVA

PASTAS ÁLCALI-ATIVADAS À BASE DE CINZA DE BIOMASSA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.^a. Dra. Heloína Nogueira da Costa

Aprovado em: 10/10/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dra. Heloína Nogueira da Costa (Orientador)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.^a Me. Tatiane Lima Batista

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Marco Antonio Barbosa de Oliveira

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA)

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Maria, por sempre me apoiar em todos os desafios, com muito amor e dedicação.

À minha irmã, Ana Paula, minha maior incentivadora e apoiadora na realização deste sonho.

Ao meu irmão, Antônio, por me mostrar o caminho e abrir as primeiras portas da vida, preparando-me para encarar o mundo.

Aos meus irmãos, Adriana e Marcos, por estarem presentes nas inúmeras viagens e ao longo de todo este período de muita luta.

Aos demais familiares, pelo apoio, reconhecimento e incentivo.

À minha namorada, Anna Karen, pelo companheirismo, paciência, apoio e carinho, sempre me impulsionando a ser cada vez melhor.

Ao amigo Jaquiel, que abraçou a ideia de deixarmos juntos nossa cidade em busca de novos desafios e esteve ao meu lado durante todo esse ciclo, apoiando e compartilhando momentos únicos.

Aos amigos de graduação, pelas experiências compartilhadas, pelos desafios superados e pelos momentos de descontração. A convivência me proporcionou um crescimento pessoal e profissional inestimável.

Agradecimento especial à minha orientadora, Heloína Nogueira, pelo conhecimento transmitido, pela paciência e pelo suporte no desenvolvimento deste trabalho. Seu incentivo e orientação foram essenciais para a concretização deste sonho.

RESUMO

A crescente demanda por alternativas sustentáveis na construção civil impulsiona o desenvolvimento de materiais cimentícios menos impactantes ao meio ambiente. Neste contexto, os materiais alcalinamente ativados surgem como uma opção promissora, permitindo a substituição parcial do cimento Portland por resíduos industriais, como cinzas de biomassa e cinza volante. Este trabalho investiga o uso de cinzas de biomassa da indústria cerâmica (CBIC) e da indústria de celulose (CBC), em misturas binárias com a cinza volante (CV), na produção de pastas cimentícias alcalinamente ativadas. Foram realizados ensaios de mini abatimento, tempo de pega, resistência à compressão, absorção de água e microscopia eletrônica de varredura (MEV). A CBIC, com elevado teor de cálcio (86,23%), apresentou maior reatividade e melhor desempenho mecânico nas pastas, enquanto a CBC, com alto teor de sílica (65,9%) e baixo teor de cálcio (6,54%), mostrou resultados bem variáveis, com bons índices de resistência à compressão e baixos índices de trabalhabilidade. Os resultados indicam que essas cinzas são alternativas viáveis ao cimento Portland, contribuindo para a sustentabilidade e a economia circular ao reaproveitar resíduos industriais. Contudo, a variabilidade nas propriedades das cinzas requer controle rigoroso para garantir a consistência e otimização dos compósitos. Conclui-se que, apesar das potencialidades, mais estudos são necessários para ampliar a aplicação dessas soluções em larga escala.

Palavras – Chave: materiais álcali ativados; pastas binárias; cinza volante.

ABSTRACT

The growing demand for sustainable alternatives in civil construction drives the development of cementitious materials that are less impactful on the environment. In this context, alkaline-activated materials emerge as a promising option, allowing the partial replacement of Portland cement with industrial waste, such as biomass ash and fly ash. This work investigates the use of biomass ash from the ceramic industry (CBIC) and the cellulose industry (CBC), together with fly ash (CV), in the production of alkaline activated cement pastes. Mini Slump, Setting Time, Resistance, Water Absorption and Scanning Electron Microscopy (SEM) tests were carried out. CBIC, with a high calcium content (86.23%), showed greater reactivity and better mechanical performance in pastes, while CBC, with a high silica content (65.9%) and low calcium content (6.54%), showed very variable results, with good resistance indices and poor workability indices. The results indicate that these ashes are viable alternatives to Portland cement, contributing to sustainability and the circular economy by reusing industrial waste. However, variability in ash properties requires rigorous control to ensure consistency and optimization of composites. It is concluded that, despite the potential, more studies are needed to expand the application of these solutions on a large scale.

Keywords: alkali activated materials; binary folders; fly gray.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Géis e produtos secundários formados durante o processo de álcali-ativação de acordo com o tipo de sistema.....	19
Figura 2 - Processo metodológico.....	25
Figura 3 - Produção dos corpos de prova.....	29
Figura 4 - Ensaio de mini abatimento.....	30
Figura 5 - Execução do ensaio do tempo de pega.....	31
Figura 6 - Corpos de prova impermeabilizados.....	32
Figura 7 - Resultados ensaio mini abatimento.....	34
Figura 8 - Resultado mini abatimento da CBC40.....	35
Figura 9 -Tempo de pega inicial.....	36
Figura 10 - Resultados do ensaio de resistência à compressão... ..	37
Figura 11 - Taxas de absorção de água no tempo.....	39
Figura 12 – Microscopia CBIC20 e CBIC40.....	40
Figura 13 – Microscopia CBC20 e CBC40.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterizações física e química da CV, CBIC e CBC.....	27
Tabela 2 – Pastas.	28

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
C-(N)-A-S-H	Géis Híbridos
C2	Condição de Cura 2
C-A-S-H	Aluminossilicato de Cálcio Hidratado
CB	Cinza de Biomassa
CBC	Cinza de Biomassa de Celulose
CBIC	Cinza de Biomassa da Indústria Cerâmica
CBIC	cinzas de biomassa da indústria cerâmica
CBM	cinza de biomassa de madeira
CP	Cimento Portland
C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratado
CV	Cinza Volante
ISO	International Organization for Standardization
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil do Centro de Tecnologia
MAA	Materiais Álcali-Ativados
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
Min	Minuto
N-A-S-H	Aluminossilicato de Sódio Hidratado

NBR	Norma Brasileira
SNIC	Sindicato da Industria do Cimento
UFC	Universidade Federal do Ceará

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
μm	Micrômetro
Al_2O_3	Óxido de Alumínio
Al_2O_3	Alumina
CaCO_3	Carbonato de Cálcio
CaO	Óxido de Cálcio
Cl	Cloro
CO_2	Dióxido de Carbono
Fe_2O_3	Óxido de Ferro
K_2O	Óxido de Potássio
MgO	Óxido de Magnésio
MnO	Óxido de Manganês
L	Litro
Na_2SiO_3	Silicato de Sódio
NaOH	Hidróxido de Sódio
$^\circ\text{C}$	Graus Celsius
P_2O_5	Fosfato
SiO_2	Sílica

SiO_3	Silicato
SO_3	Trióxido de Enxofre
SrO	Óxido de Estrôncio
TiO_2	Dióxido de Titânio
ZnO	Óxido de Zinco

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Contextualização.....	13
1.2 Objetivos.....	15
<i>1.2.1 Objetivo Geral.....</i>	<i>15</i>
<i>1.2.2 Objetivos Específicos</i>	<i>15</i>
1.3 Estrutura da pesquisa	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1 Materiais Álcali-Ativados:	17
<i>2.1.1 Mecanismo de Ativação e Tipos de Materiais</i>	<i>17</i>
<i>2.1.2 Desenvolvimento Histórico e Contribuições.....</i>	<i>19</i>
2.2 Cinza de Biomassa	21
<i>2.2.1 Cinzas de Óleo de Palma.....</i>	<i>22</i>
<i>2.2.2 Cinzas de Bagaço de Cana-de-Açúcar.....</i>	<i>22</i>
<i>2.2.3 Cinzas de Madeira</i>	<i>22</i>
2.3 Cinza Volante.....	23
3 MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1 Materiais.....	26
<i>3.1.1 Precursores</i>	<i>26</i>
<i>3.1.2 Ativadores.....</i>	<i>28</i>
3.2 Métodos.....	28
<i>3.2.1 Preparação das pastas</i>	<i>28</i>
<i>3.2.2 Ensaios e análises</i>	<i>30</i>
<i>3.2.2.1 Caracterização</i>	<i>30</i>
<i>3.2.2.2 Tempo de pega.....</i>	<i>31</i>

<i>3.2.2.3 Resistência a compressão</i>	31
<i>3.2.2.4 Absorção de Água</i>	32
<i>3.2.2.5 Microscopia Eletrônica de Varredura</i>	33
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
4.1 Caracterização das pastas no estado fresco	34
4.2 Tempo de Pega	36
4.3 Resistência à compressão	37
4.4 Absorção de Água	38
4.5 Microestrutura de Varredura	40
5. CONCLUSÃO	43
REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A evolução constante da humanidade impõe à construção civil a necessidade de adaptação contínua, refletindo nas demandas por recursos naturais, desde a extração de matérias-primas até o descarte de resíduos. Este setor está intrinsecamente ligado aos impactos ambientais, incluindo o consumo excessivo de energia e recursos, o descarte inadequado de entulhos e a exploração intensiva de matérias-primas (Rodrigues, 2017). Nesse contexto, a sustentabilidade e a proteção ambiental emergem como questões estratégicas para as organizações, que precisam equilibrar a lucratividade e a eficiência produtiva com o desenvolvimento sustentável e a preservação do meio ambiente (Citadin, 2017).

O Cimento Portland (CP), um dos principais materiais utilizados na construção civil, resulta da mistura de calcário (carbonato de cálcio) e argila (silicatos de alumínio e ferro). Durante esse processo, o aquecimento do carbonato de cálcio (CaCO_3) gera óxido de cálcio (CaO) e libera dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera (Castro, 2021). De acordo com o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2024), entre 2015 e 2023, o Brasil produziu anualmente mais de 50 milhões de toneladas de CP, sendo o maior produtor da América Latina em 2017, responsável por 1,3% da produção global (Governo Federal, 2018). Vale ressaltar que para cada tonelada de CP fabricada, são emitidas entre 0,5 e 0,6 toneladas de CO_2 (Roadmap Tecnológico do Cimento, 2019).

A emissão descontrolada de CO_2 , juntamente com outros gases, contribui significativamente para problemas ambientais, como a variação da temperatura global, alterações na composição atmosférica e impactos na saúde humana devido à dispersão de partículas poluentes (Silva *et al.*, 2016). Em resposta às mudanças climáticas globais, diversos países têm buscado formas de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (Smail *et al.*, 2014). Nesse cenário, torna-se crucial a pesquisa e desenvolvimento de materiais cimentícios alternativos que apresentem menores impactos ambientais e desempenho técnico equivalente ou superior ao CP.

Uma alternativa promissora são os Materiais Álcali-Ativados (MAA), que se destacam por não requererem a calcinação dos precursores. Esses materiais apresentam elevada resistência mecânica inicial, resistência ao fogo e baixa absorção de água (Júnior *et al.*, 2022).

O termo MAA refere-se a um grupo de materiais cimentícios formados pela reação de precursores com ativadores alcalinos (Kong; Kurumisawa, 2023). Os precursores consistem em uma mistura de alumínio e silicato em pó, enquanto o ativador é uma solução líquida capaz de gerar um aglutinante endurecido, baseado na combinação de aluminossilicato hidratado alcalino (Provis, 2018).

Conforme Costa, Cabral e Nogueira (2022), a matriz cimentícia dos MAA varia em termos de estrutura e composição química, sendo o teor de cálcio um fator determinante na formação da estrutura dos silicatos. Precursores com elevado teor de cálcio produzem um gel de aluminossilicato de cálcio hidratado (C-A-S-H), enquanto os com baixo teor de cálcio geram um gel de sódio hidratado (N-A-S-H), altamente reticulado e estruturalmente desordenado (Bernal; Provis, 2014).

Na produção de MAA, diversos resíduos ou subprodutos industriais podem ser utilizados como precursores. Um exemplo relevante é a cinza de biomassa, subproduto das indústrias de cerâmica vermelha e de celulose, dentre outras. A indústria de cerâmica vermelha, um setor crucial para a construção civil, gera a Cinza de Biomassa da Indústria Cerâmica (CBIC) durante o processo de queima da lenha no tratamento térmico das peças (Aguiar *et al.*, 2022). Por sua vez, a indústria de celulose, que ocupa uma posição de destaque no cenário industrial brasileiro, também gera resíduos semelhantes, como a Cinza de Biomassa de Celulose (CBC).

A caracterização desses resíduos é fundamental para determinar sua viabilidade como precursores em MAAs. No caso da CBC, Oliveira (2023) constatou que o material obtido na bacia de disposição de resíduos de uma planta de celulose no Maranhão apresentou 6,54% de óxido de cálcio (CaO), característica que, somada à sua atividade pozolânica, indica um potencial significativo para a produção de materiais cimentícios. Em contraste, a CBIC, proveniente dos fornos da indústria cerâmica no município de Crateús, Ceará, mostrou um teor de 86,23% de CaO (Mendonça, 2023). Essa variação nos teores de cálcio sugere que as duas cinzas podem ser utilizadas com diferentes funções na produção de MAAs.

A utilização de CBC e CBIC, combinadas a outros materiais potenciais pode resultar na criação de MAAs com propriedades físicas e mecânicas suficientes para sua usabilidade. A cinza volante (CV), um resíduo gerado pela queima de carvão mineral em usinas termelétricas, é conhecida por sua atividade pozolânica, o que a torna um material adequado

para a produção de cimentos e concretos com desempenho avançado (Costa, 2015; Cirino, 2021). Assim, a combinação desses diferentes resíduos em misturas binárias oferece uma abordagem promissora para a produção de MAAs com características otimizadas para a construção civil.

Dessa forma, este estudo tem como objetivo analisar as propriedades físicas e mecânicas de pastas binárias formadas pela reação entre CBC e CV e entre CBIC e CV, avaliando o potencial dessas combinações para a produção de MAA com menores impactos ambientais e características físicas e químicas suficientes para aplicações práticas no setor construtivo.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar o potencial da cinza de biomassa como precursor para a produção de materiais álcali-ativados.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Examinar a influência de cinzas de biomassa de baixo e alto teor de cálcio na trabalhabilidade de pastas alcáli-ativadas;
- Investigar a influência de cinzas de biomassa de baixo e alto teor de cálcio no tempo de pega de pastas alcáli-ativadas;
- Avaliar a influência de cinzas de biomassa de baixo e alto teor de cálcio na resistência à compressão de pastas alcáli-ativadas;
- Examinar a influência de cinzas de biomassa de baixo e alto teor de cálcio na taxa de absorção de água de pastas alcáli-ativadas;
- Avaliar a influência das cinzas de biomassa de baixo e alto teor de cálcio na microestrutura de pastas alcáli-ativadas.

1.3 Estrutura da pesquisa

A presente pesquisa está estruturada em cinco seções principais: Introdução, Referencial Teórico, Materiais e Métodos, Resultados e Discussões e Conclusão. A primeira seção contém a justificativa para a utilização da cinza de biomassa para produção de cimentos alternativos, seguida dos objetivos gerais e específicos. A segunda seção aborda estudos anteriores para consolidação de base teórica para o desenvolver do trabalho.

Na terceira seção são explícitos os materiais e a metodologia utilizada na preparação das pastas e ensaios realizados. A quarta seção traz os resultados dos procedimentos práticos, seguido de discussões relativas aos mesmos. Por fim, a última seção une todos os fragmentos do estudo, discutindo seus pontos em destaque e demonstrando a relevância do estudo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Materiais Álcali-Ativados:

2.1.1 Mecanismo de Ativação e Tipos de Materiais

Os materiais álcali-ativados são materiais cimentícios obtidos por meio da ativação alcalina de precursores ricos em sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3). Estes precursores podem incluir resíduos industriais, como cinza volante, escória de alto forno, escória de aciaria, metacaulim e cinzas da casca de arroz (Pereira *et al.*, 2020). O processo de ativação alcalina começa com a dissolução dos componentes do precursor, como alumínio e silício, e, quando presente, cálcio. Isso leva à formação de uma microestrutura que preenche os poros e resulta em um material endurecido com propriedades vantajosas para diversas aplicações (Severo *et al.*, 2013).

Para ativar alcalinamente os precursores, utiliza-se uma solução de hidróxido de sódio (NaOH), silicato de sódio (Na_2SiO_3) ou outros ativadores alcalinos. Estes ativadores são essenciais para dissolver os componentes amorfos dos precursores e promover reações químicas que formam fases cimentantes (Provis; Deventer, 2014). A eficácia da ativação é influenciada pela composição química do precursor, a concentração e o tipo de ativador, além da temperatura e métodos de cura (Luukkonen *et al.*, 2018).

Os materiais álcali-ativados podem ser classificados, quanto sua composição química, mais precisamente no teor de cálcio, em três tipos principais:

- **Baixo Teor de Cálcio:** Composto principalmente por alumínio e silício, este grupo forma redes tridimensionais de aluminossilicatos quando ativado, resultando em um gel N-A-S-H, ou aluminossilicato de sódio hidratado, frequentemente chamado de geopolímero (Davidovits, 1994; Wan *et al.*, 2020). O modelo de geopolimerização inclui cinco etapas: dissolução, equilíbrio das partículas, formação inicial do gel, reorganização e polimerização (Glukhovskiy, 1950; Duxson, 2006). Os materiais com baixo teor de cálcio apresentam excelente resistência mecânica e durabilidade, tornando-os adequados para aplicações em ambientes severos. Sua estrutura densa também confere resistência a agentes agressivos, como sulfatos e cloretos (Zhang *et al.*, 2017).

- **Alto Teor de Cálcio:** Envolve precursores com altos níveis de óxido de cálcio, resultando em um gel C-A-S-H, ou aluminossilicato de cálcio hidratado, semelhante ao gel C-S-H do cimento Portland (Bernal et al., 2014; Provis, 2014). Esse tipo de material é conhecido por sua capacidade de cura e desempenho mecânico que se compara ao do cimento convencional, no entanto, a trabalhabilidade pode ser prejudicada pela rápida formação dos géis (Mao et al., 2016).

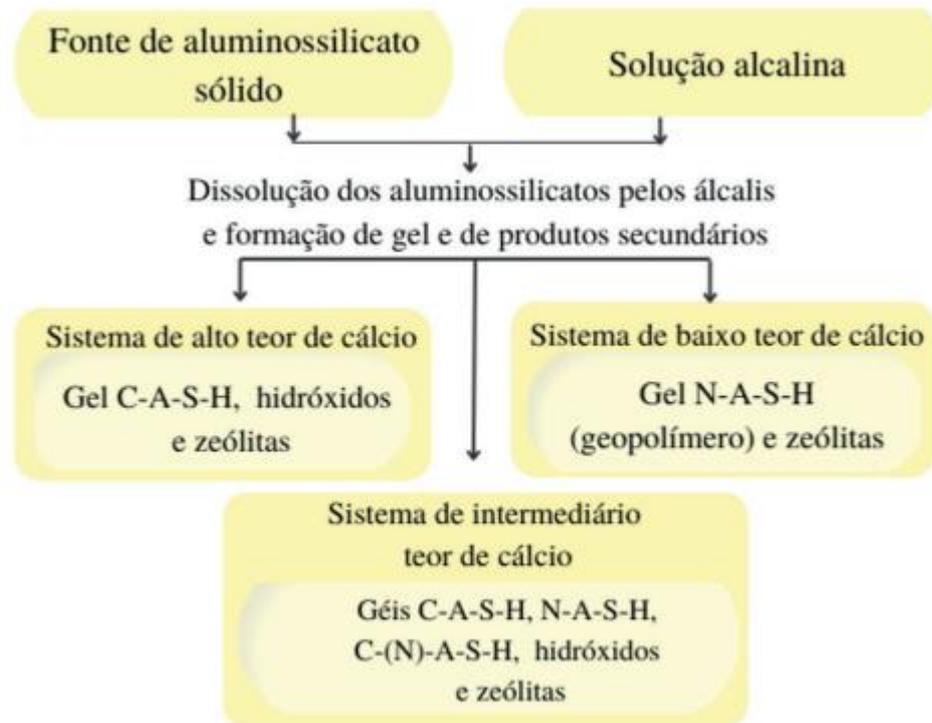
O gel C-A-S-H contribui para a resistência à compressão, mas pode ser mais suscetível a reações de alcalinidade e ataques químicos, o que deve ser considerado em aplicações específicas (Xiao *et al.*, 2018).

- **Teor Intermediário de Cálcio:** Caracterizado pela coexistência de géis N-A-S-H e C-A-S-H, além de géis híbridos C-(N)-A-S-H, este grupo resulta da combinação de precursores com baixo e alto teor de cálcio (Costa, 2022; Ismail *et al.*, 2014).

Os materiais com teor intermediário de cálcio oferecem uma combinação das propriedades desejáveis dos dois tipos anteriores, proporcionando resistência e durabilidade adequadas para uma variedade de aplicações. Essa versatilidade faz com que sejam particularmente atrativos para a construção civil, onde as exigências de desempenho podem variar amplamente (Bakharev, 2005).

Uma visão geral desses três sistemas é apresentada na Figura 1:

Figura 1. Géis e produtos secundários formados durante o processo de álcali-ativação de acordo com o tipo de sistema.



Fonte: Costa (2022).

Nos materiais ativados alcalinamente, a escolha do ativador é crucial para o desempenho mecânico. Soluções de sódio geralmente proporcionam maior resistência mecânica, enquanto soluções de potássio são mais eficazes em temperaturas elevadas (Azevedo *et al.*, 2017). Além disso, Provis (2014) sugere que a concentração do ativador deve ser ajustada de acordo com o tipo de precursor: precursores com baixo teor de cálcio exigem concentrações mais altas, entre 10 e 14 molares, enquanto precursores com alto teor de cálcio se beneficiam de concentrações mais baixas, entre 6 e 8 molares.

2.1.2 Desenvolvimento Histórico e Contribuições

O campo dos materiais álcali-ativados teve suas origens no início do século XX. Victor Glukhovsky, nas décadas de 1950 e 1960, explorou a combinação de materiais

vulcânicos com soluções de hidróxido de sódio, obtendo produtos com propriedades semelhantes às do cimento Portland após o endurecimento (Komnitsas & Zaharaki, 2007). Em 1959, Glukhovsky formalizou a teoria da ativação alcalina, estabelecendo as bases para o desenvolvimento futuro dessa tecnologia (Azevedo *et al.*, 2017). Seu trabalho inicial foi fundamental para demonstrar que materiais inorgânicos podem ser ativados para formar produtos com características semelhantes ao cimento, mas com propriedades modificadas e frequentemente melhoradas.

Na década de 1970, Joseph Davidovits avançou significativamente na área ao investigar materiais resistentes ao calor, o que levou ao desenvolvimento do geopolímero. Davidovits patenteou o geopolímero em 1979, fixando um marco importante na evolução dos materiais álcali-ativados (Severo *et al.*, 2013). O geopolímero é uma classe de materiais que utiliza uma combinação de fontes de sílica e alumina com uma solução alcalina, resultando em uma matriz sólida que exibe propriedades notáveis como resistência ao fogo e alta durabilidade. O conceito de geopolímero proporcionou um novo entendimento e aplicações para materiais à base de alumina e sílica ativados por álcalis.

A partir da década de 2000, houve um aumento substancial no interesse por materiais álcali-ativados devido às suas propriedades promissoras e benefícios ambientais. Estudos revelaram que esses materiais apresentam alta resistência à compressão, resistência ao fogo superior e baixa retração, tornando-os candidatos viáveis para substituir o cimento Portland em diversas aplicações (Duxson *et al.*, 2005; Severo *et al.*, 2013). A cura desses materiais pode variar dependendo da formulação e das condições de cura, o que permite uma flexibilidade adicional em suas aplicações.

Além das propriedades técnicas, os materiais álcali-ativados oferecem vantagens ambientais significativas. Eles têm o potencial de reduzir as emissões de CO₂ em até 80% em comparação com o cimento Portland tradicional, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas e promovendo uma construção mais sustentável (Mohajerani *et al.*, 2019). Essa redução é atribuída principalmente à menor quantidade de dióxido de carbono liberada durante a produção dos materiais álcali-ativados e à possibilidade de utilizar resíduos industriais como matérias-primas, como cinzas volantes e escórias de alto-forno.

Além das contribuições mencionadas, estudos recentes também têm explorado a resistência à corrosão dos materiais álcali-ativados, que se mostrou superior à dos cimentos

tradicionais, especialmente em ambientes agressivos, como zonas costeiras e áreas industriais (Palomo *et al.*, 2014). A capacidade desses materiais de incorporar diversos tipos de resíduos e subprodutos industriais contribui para a economia circular, reduzindo o impacto ambiental associado ao descarte de resíduos.

Em resumo, os materiais álcali-ativados representam uma área inovadora e promissora no campo da ciência dos materiais, oferecendo soluções sustentáveis e eficientes que podem transformar a construção civil e reduzir significativamente o impacto ambiental da indústria de materiais de construção.

2.2 Cinza de Biomassa

A cinza de biomassa é um subproduto gerado a partir da queima de biomassa florestal, que é utilizada como fonte de energia em vários setores industriais, como o cerâmico e o de papel e celulose. Essas cinzas apresentam uma morfologia variada, com partículas de diferentes formas e tamanhos, e uma composição química heterogênea. A variabilidade nas propriedades das cinzas está relacionada a diversos fatores, como o tempo de combustão, o tipo de biomassa utilizada e a temperatura do processo de incineração (Teixeira *et al.*, 2008). Assim, a eficácia das cinzas em aplicações distintas pode variar, especialmente quando se comparam cinzas provenientes de diferentes tipos de biomassa ou de processos de incineração distintos (Macedo, 2009).

Embora o interesse acadêmico sobre a utilização das cinzas de biomassa esteja crescendo, ainda existem opiniões divergentes quanto à viabilidade de seu uso. Essas diferenças são frequentemente atribuídas à variabilidade na composição química das cinzas, que depende do processo de produção, da origem da madeira, da capacidade da caldeira e dos métodos de incineração empregados (Maeda *et al.*, 2008; Gómez-Rey *et al.*, 2012; Hanisch; Fonseca, 2013).

De acordo com Demis, Tapali e Papadakis (2014), os principais tipos de cinza de biomassa incluem as cinzas provenientes da queima de óleo de palma, bagaço de cana-de-açúcar e madeira. Cada tipo possui características distintas, conforme descrito a seguir:

2.2.1 Cinzas de Óleo de Palma

As cinzas de óleo de palma, conhecidas no Brasil como óleo de dendê, são resíduos gerados pela queima das fibras, cascas e cachos vazios do dendê, um subproduto da indústria de óleo de palma (Demis *et al.*, 2014). Em um estudo realizado por Al-Kutti, Islam e Nasir (2019), foi observada uma redução na absorção de água e na permeabilidade de substâncias nocivas no concreto quando se substituiu 10% do cimento por cinza de óleo de palma. O estudo destacou o potencial das cinzas como material de construção, evidenciado pela diminuição de 29% no teor de hidróxido de cálcio na argamassa com adição de cinza, comparada à argamassa feita apenas com cimento.

2.2.2 Cinzas de Bagaço de Cana-de-Açúcar

A produção mundial de cana-de-açúcar é de aproximadamente 1,9 bilhões de toneladas por ano, com o Brasil sendo o maior produtor, gerando cerca de 768 milhões de toneladas anuais. Aproximadamente 95% do bagaço da cana é utilizado como combustível em caldeiras, resultando na formação de cinzas na proporção de 23,8 kg por tonelada de bagaço (Mansaneira *et al.*, 2017). Segundo Yogitha, Karthikeyan e Reddy (2020), a cinza do bagaço de cana-de-açúcar é um dos resíduos agroindustriais mais utilizados como material pozolânico. A substituição parcial do cimento por essa cinza em concretos mostrou um aumento na resistência e uma redução na permeabilidade e condutividade térmica e elétrica, demonstrando sua viabilidade como material de construção de baixo custo e sustentável.

2.2.3 Cinzas de Madeira

A cinza de biomassa de madeira (CBM) resulta da combustão de madeira e produtos derivados, como cavacos e serradura, e pode apresentar características semelhantes às cinzas volantes de carvão mineral (Demis *et al.*, 2014). A madeira é um combustível renovável e amplamente utilizado em grande escala por indústrias. Estimativas indicam que cerca de 3% da

CBM é gerada durante a incineração de uma tonelada de biomassa de madeira. Estudos, como o de Chowdhury, Mishra e Suganya (2015), mostram que a substituição parcial do cimento por CBM pode reduzir a retração por secagem das argamassas.

Medeiros *et al.* (2010) investigaram a incorporação de cinza de lenha em blocos cerâmicos, encontrando 43,32% de CaO e 7,36% de MgO na cinza coletada. A análise de difração de raios X revelou a presença de quartzo e outros compostos minerais. A pesquisa concluiu que a adição de cinza de lenha pode diminuir a absorção de água e aumentar o módulo de ruptura por flexão dos blocos cerâmicos.

Resende *et al.* (2013) examinou a adição de cinzas de cavaco de lenha de Eucalipto como material cimentício suplementar, encontrando que a substituição de até 15% do cimento por essas cinzas não afetou a quantidade de compósitos produzidos, mas melhorou as propriedades do concreto. A composição química das cinzas revelou altos teores de cálcio e ferro, e as cinzas moídas e requeimadas apresentaram reatividade que beneficiou o desempenho do compósito endurecido.

Finalmente, a pesquisa de Tamanna *et al.* (2020) indicou que as cinzas de madeira podem servir como uma fonte pozolânica promissora para substituir o cimento Portland, oferecendo vantagens como maior durabilidade e contribuição para a construção sustentável. Embora os resultados sobre a resistência e trabalhabilidade do concreto possam variar, a durabilidade estendida das misturas com cinza demonstra seu potencial para aplicações sustentáveis.

De maneira geral, a variabilidade nos resultados das pesquisas aponta para a necessidade de mais estudos que investiguem diferentes tipos de biomassa, condições de incineração e outros parâmetros para otimizar o uso das cinzas de biomassa.

2.3 Cinza Volante

Segundo a ABNT NBR 12653/2014, as cinzas volantes são definidas como "resíduos resultantes da combustão de carvão mineral pulverizado ou granulado, com atividade pozolânica". Estas cinzas possuem características pozolânicas, o que significa que reagem com a cal em presença de água para formar novos compostos com propriedades aglomerantes

(Kihara, 1983).

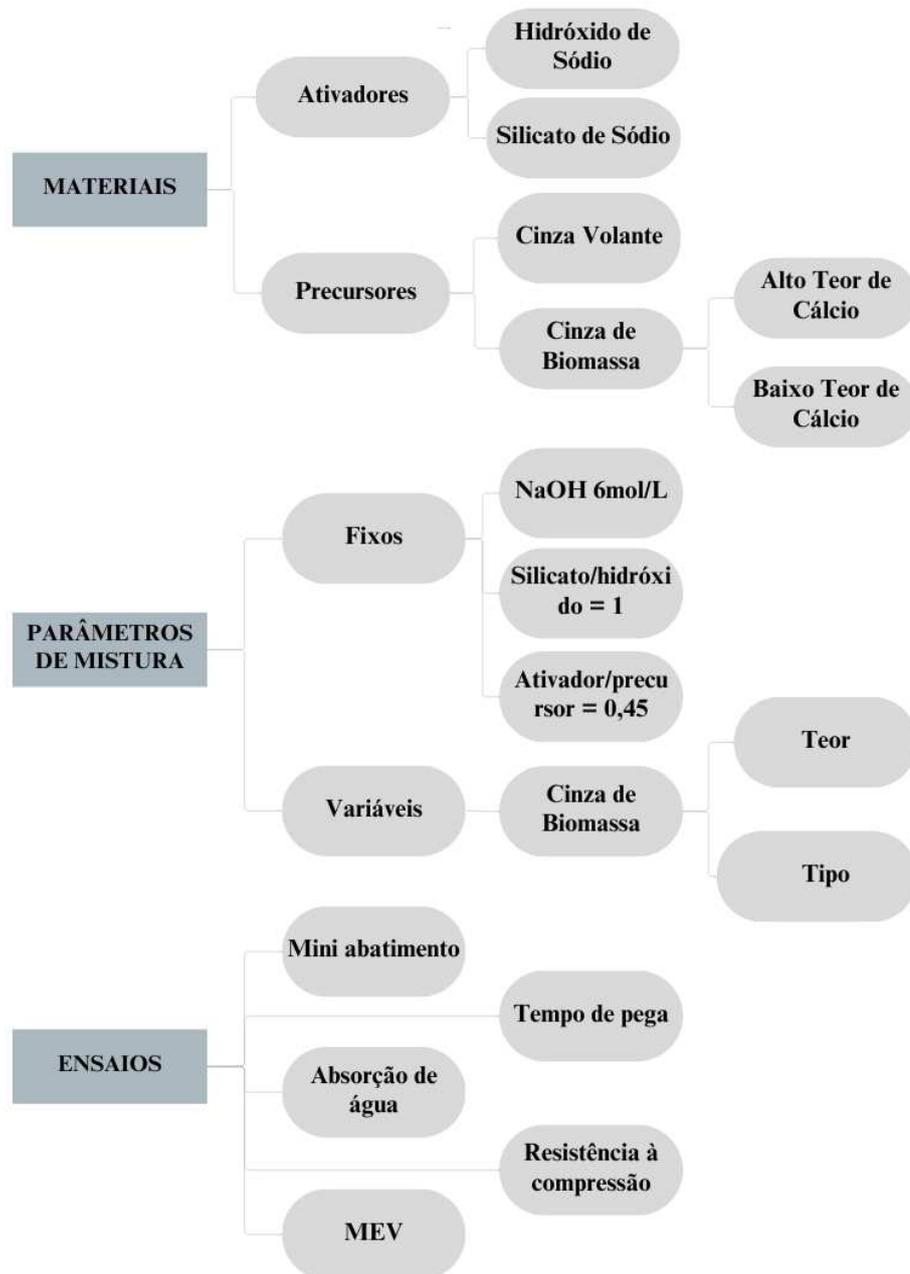
De acordo com Mehta e Monteiro (2008), as cinzas volantes podem ser categorizadas com base em sua composição mineralógica e teor de cálcio. As cinzas com baixo teor de cálcio (menos de 10% de CaO), geralmente derivadas da combustão de antracito e carvões betuminosos, contrastam com as cinzas de alto teor de cálcio, que possuem de 15% a 40% de CaO e resultam da queima de carvões de lignita e sub-betuminosos. A qualidade das cinzas volantes é frequentemente determinada pelo seu conteúdo de fase vítrea, que pode variar entre 70% e 85%.

As cinzas volantes são reconhecidas como materiais com baixo teor de cálcio, sendo particularmente adequadas para a produção de materiais álcali-ativados. Esse resíduo apresenta uma contribuição ambiental significativa, pois pode ajudar a resolver problemas ecológicos e de saúde pública relacionados à grande quantidade de cinzas geradas anualmente (Azevedo *et al.*, 2017). Essas cinzas são produzidas durante a queima de carvão em usinas termoelétricas e caldeiras industriais. Entretanto, a variabilidade nas propriedades químicas das cinzas, que depende da fonte e das características específicas de cada usina, pode complicar o controle de qualidade e a padronização dos produtos finais. Portanto, uma caracterização detalhada das cinzas é crucial para assegurar a eficácia em misturas de materiais álcali-ativados (Wijaya *et al.*, 2017).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa se enquadra como quantitativa, explicativa e experimental, da qual o processo metodológico está demonstrado na Figura 2.

Figura 2 - Processo metodológico.



Os procedimentos experimentais foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal do Ceará - Campus Crateús e Laboratório de Materiais de Construção Civil do Centro de Tecnologia (LMCC) localizado na Universidade Federal do Ceará - Campus do Pici.

3.1 Materiais

Os materiais utilizados para o desenvolvimento das pastas foram: cinzas de biomassa da indústria cerâmica CBIC e da celulose CBC, com alto e baixo teor de cálcio, respectivamente, cinza volante de usina termelétrica, hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio (Na_2SiO_3).

3.1.1 Precursores

Primeiramente, a CBIC foi obtida em uma indústria cerâmica, atuante na produção de blocos cerâmicos, situada no distrito de Curral Velho, a cerca de 15 km da sede da cidade de Crateús, no estado do Ceará. As madeiras utilizadas pela olaria são oriundas da região, como mofumbo e jurema (Mendonça, 2023). A caracterização foi feita por meio dos ensaios de granulometria a laser conforme ABNT NBR 12653, a determinação da massa específica pelo método do cimento Portland segundo a ABNT NBR 16605/2017, e a caracterização química por meio de espectroscopia por energia dispersiva de raios X.

Já a CBC, é oriunda da indústria de beneficiamento de celulose, mais precisamente da bacia de disposição de resíduos da Suzano Celulose e Papel, localizada na cidade de Imperatriz, município do Maranhão. Alguns dos ensaios realizados foram de distribuição granulométrica por difração a laser, seguindo a ISO 13320 (2020), determinação da massa específica pela técnica de picnometria a gás, conforme a ISO NBR 12154 (ABNT, 2022), e caracterização por meio da fluorescência de raios X. O percentual de cálcio existente na cinza foi de 6,54% (Oliveira, 2023).

Por fim, a cinza volante foi fornecida pela Usina Termelétrica Energia Pecém, localizada no Complexo Industrial do Pecém, no município de São Gonçalo do Amarante, estado do Ceará. A massa específica foi obtida conforme o método da ABNT 16605 (2017). Além disso, para a composição química, foi realizada a análise de fluorescência de raios X. A Tabela 1 apresenta as caracterizações físicas e químicas da CV, CBIC e CBC.

Tabela 1 - Caracterizações física e química da CV, CBIC e CBC.

Composição Química (% em massa)	Materiais		
	Cinza Volante	CBIC	CBC
Al ₂ O ₃	14,49	-	8,4
SiO ₂	41,49	2,34	65,9
P ₂ O ₅	0,44	2,49	0,92
SO ₃	0,29	1,54	4,71
Cl	-	-	0,05
K ₂ O	4,54	3,61	1,72
CaO	9,54	86,23	6,54
TiO ₂	3,26	-	0,83
MnO	0,17	-	0,08
Fe ₂ O ₃	24,95	-	3,5
ZnO	0,14	-	0,02
SrO	0,55	-	0,04
MgO	-	3,78	1,18
Na ₂ O	-	-	0,67
NiO	-	-	0,01
CuO	0,11	-	0,01
Rb ₂ O	-	-	< 0,01
Y ₂ O ₃	-	-	< 0,01
ZrO ₂	-	-	0,11
Nb ₂ O ₅	-	-	< 0,01
Massa Específica (g/cm ³)	2,18	2,87	2,59
F45 µm (%) Amostra	-	12	12
D10% (µm)	1,61	4,918	1,51
D50% (µm)	7,38	14,384	5,12
D90% (µm)	30,50	53,489	25,96

Fonte: Mendonça (2023); Oliveira (2023); Costa (2022).

Os parâmetros D10%, D50% e D90% representam, respectivamente, os diâmetros de corte da curva de distribuição acumulada em 10%, 50% e 90%.

3.1.2 Ativadores

Os ativadores utilizados foram o silicato de sódio e o hidróxido de sódio, ambos presentes no laboratório de materiais da UFC - Campus Crateús. O hidróxido de sódio estava em estado sólido e necessitou de preparação antecipada da solução com concentração molar de 6mols/litro. Por outro lado, o silicato já se encontrava em solução e sua composição apresentava 14,38% de Na₂O, 31,83% de SiO₂, 46,21% de sólido totais e massa específica 1,58 g/cm³.

3.2 Métodos

3.2.1 Preparação das pastas

Os percentuais de cada precursor utilizados nesta pesquisa foram definidos mediante testes e os intervalos escolhidos de acordo com o comportamento das pastas. Dessa maneira, foram definidos os valores apresentados na Tabela 4.

Tabela 2 – Pastas.

Pasta	Cinza Volante (%)	CBIC (%)	Pasta	Cinza Volante (%)	CBC (%)
CBIC20	80	20	CBC20	80	20
CBIC40	60	40	CBC40	60	40

Fonte: Autor (2024).

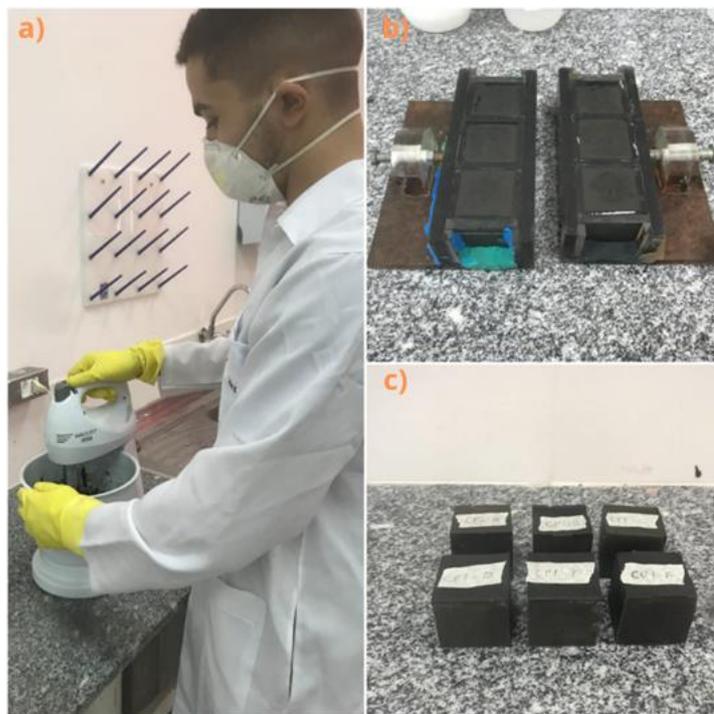
A quantidade de combinações, percentuais de 20% e 40% para cada cinza, foi devido à pasta com 60% de cinza de biomassa não apresentar trabalhabilidade suficiente para moldagem dos corpos de prova e, conseqüentemente, para a realização de ensaios. Além disso, a limitação de CBIC já caracterizada foi outro fator que impediu a produção de mais pastas.

Por conseguinte, a relação líquido/sólido foi de 0,45, onde o líquido representa a soma dos ativadores (hidróxido de sódio e silicato de sódio na proporção 1:1) e o sólido a soma

das cinzas volante e de biomassa. Os únicos fatores variáveis foram os teores de CV, CBIC e CBC.

A mistura dos materiais (precursores e ativadores) seguiu a sequência abaixo: início com 1 minuto de mistura manual, seguido por 1 minuto e 30 segundos na argamassadeira. Em seguida, houve mais 1 minuto de mistura manual e, finalmente, mais 1 minuto e 30 segundos na argamassadeira, totalizando 5 minutos de processamento. Os corpos de prova foram moldados em fôrmas cúbicas de 4x4x4 cm, feitas de acrílico com paredes lisas, com três unidades em cada fôrma. As etapas do processo produtivo estão ilustradas na Figura 3.

Figura 3 – Produção dos corpos de prova.



Fonte: Autor (2024).

Desta maneira, foram obtidos os elementos suficientes para a realização dos ensaios necessários à pesquisa. As Figuras 3-a, 3-b e 3-c demonstram, respectivamente, a produção das pastas, secagem dos corpos de prova e corpos de prova desformados.

3.2.2 Ensaios e análises

3.2.2.1 Caracterização

A caracterização ocorreu no estado fresco pelo ensaio de mini abatimento, utilizando um mini cone sobre placa de vidro (Kantro, 1980). O processo consistiu em preencher o cone com a pasta até ficar completamente cheio. Em seguida, foi levantado e o espalhamento foi medido com paquímetro em três direções diferentes nos tempos de 30s, 1min, 2min, 3min, 4min e 5min. A Figura 4 demonstra partes da execução.

Figura 4 - Ensaio de mini abatimento.



Fonte: Autor (2024).

As Figuras 4-a, 4-b e 4-c apresentam, respectivamente, material inserido no tronco de cone, pasta espalhada e não espalhada para aferição do diâmetro de espalhamento.

3.2.2.2 Tempo de pega

Para o tempo de pega seguiu-se a ABNT NBR 16607, que estabelece a utilização do aparelho de Vicat como equipamento para as medições. Na prática, após a produção da pasta, ela foi inserida em um tronco de cone e iniciou-se a contagem do tempo, com medidas realizadas em intervalos iniciais de 30 minutos e diminuídos gradativamente até intervalos de 5 minutos. Quando a agulha penetrou pela primeira vez apenas (6 ± 2) mm na pasta, foi identificado o tempo de início de pega. A Figura 5 mostra o equipamento utilizado.

Figura 5 - Execução do ensaio do tempo de pega.



Fonte: Autor (2024).

3.2.2.3 Resistência a compressão

O ensaio foi realizado de acordo com a NBR 13279 (2005). Os corpos de prova foram submetidos à compressão aos 28 dias no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFC - Campus do Pici.

3.2.2.4 Absorção de Água

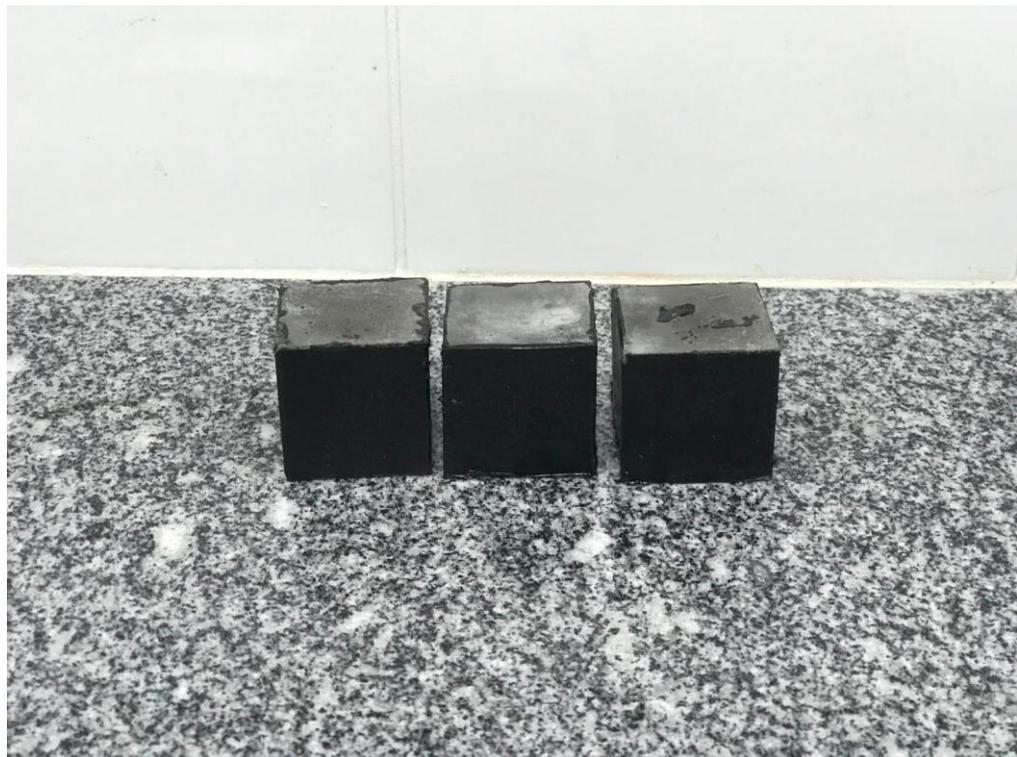
A taxa de absorção de água foi adaptada de Luukkonen (2019) e seu processo consistiu em levar os corpos de prova a 50 °C em estufa, seguido da medição do peso seco. Posteriormente, todas as faces foram impermeabilizadas com manta líquida, exceto uma que ficou em contato com a água com uma profundidade de 2 mm. As pesagens subsequentes ocorreram nos seguintes intervalos: 1 min, 5 min, 10 min, 20 min, 30 min, 60 min, 1 dia, 2 dias, 4 dias, 6 dias e 8 dias. Por fim, a absorção de água foi calculada pela Equação 1.

$$I = \frac{m_t}{a \times d} \quad (1)$$

Em que I = quantidade de água absorvida (mm), m_t = peso da amostra (g), a = área da superfície exposta (mm²) e d = densidade da água (g/mm³).

A Figura 6 apresenta os corpos de prova impermeabilizados, com a superfície livre para submersão.

Figura 6 – Corpos de prova impermeabilizados.



Fonte: Autor (2024).

3.2.2.5 Microscopia Eletrônica de Varredura

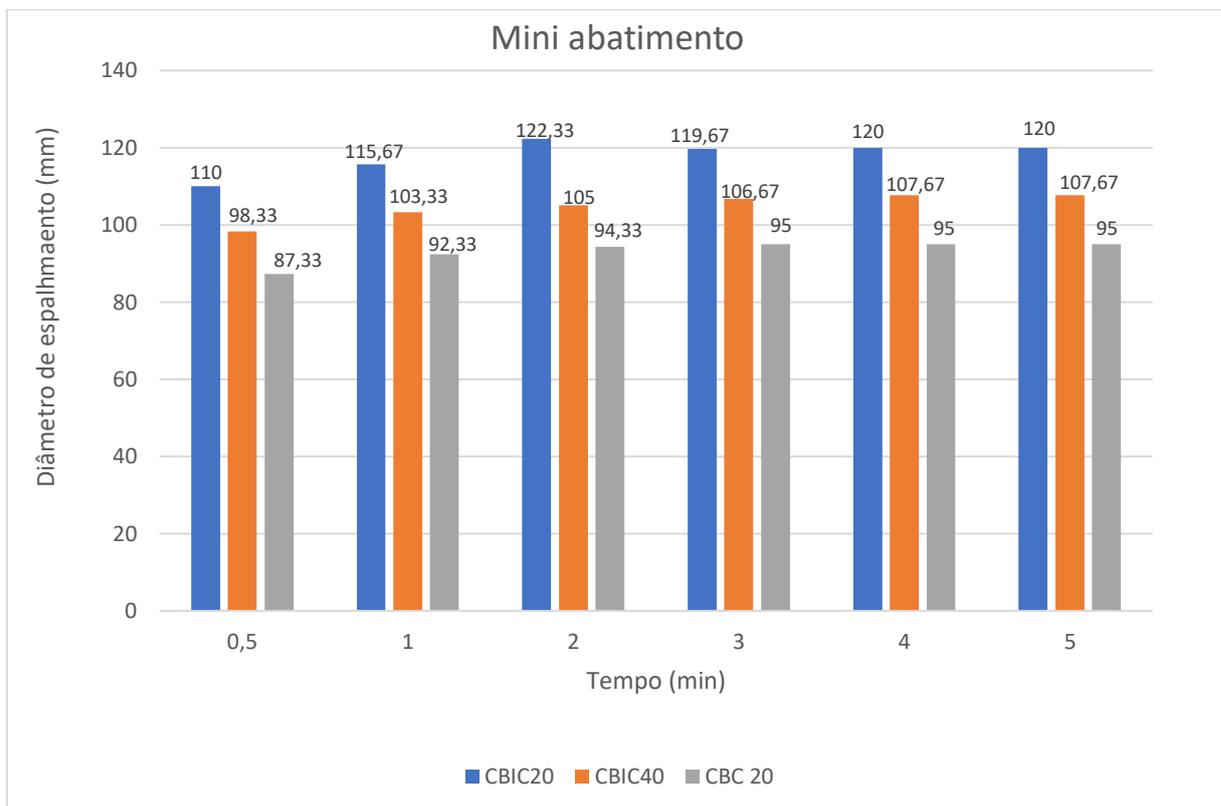
Foi realizada análise microestrutural por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), conduzida na Central Analítica da Universidade Federal do Ceará (UFC). O equipamento utilizado foi o FEI company, modelo QUANTA FEG 450, da Central Analítica/UFC.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização das pastas no estado fresco

O gráfico da Figura 7 apresenta a variação do diâmetro de espalhamento ao longo do tempo, obtida no ensaio de mini abatimento para três das quatro pastas produzidas, já que a pasta CBC40 não apresentou fluidez suficiente para ser medida.

Figura 7: Resultados ensaio mini abatimento.



Fonte: Autor (2024).

Os diâmetros finais medidos foram de 95 mm (CBC20), 107,7 mm (CBIC40) e 120 mm (CBIC20). No entanto, as pastas CBIC40 e CBIC20 atingiram esses valores no quarto minuto, enquanto a CBC20 se estabilizou a partir do terceiro minuto. Essa diferença no tempo de estabilização indica uma maior fluidez nas misturas contendo CBIC, o que era esperado, uma vez que, conforme observado na Tabela 01, a CBC é uma cinza mais fina, com tendência a ter menor fluidez devido à maior área de superfície das partículas (Metha, 2014).

A pasta composta por CBIC40, com um aumento de 20% no teor de cinza de biomassa em relação à CBIC20, apresentou uma redução de 10,25% no diâmetro final. Já nas pastas com CBC, o mesmo acréscimo percentual de CBC40 em relação à CBC20 resultou em uma diminuição significativa da trabalhabilidade, a ponto de a CBC40 não ser passível de aferição, como mostrado na Figura 8. Assim, é evidente que ambas as cinzas apresentaram comportamentos semelhantes diante das variações no teor presente na pasta.

Figura 8: Resultado mini abatimento da CBC40.



Fonte: Autor (2024).

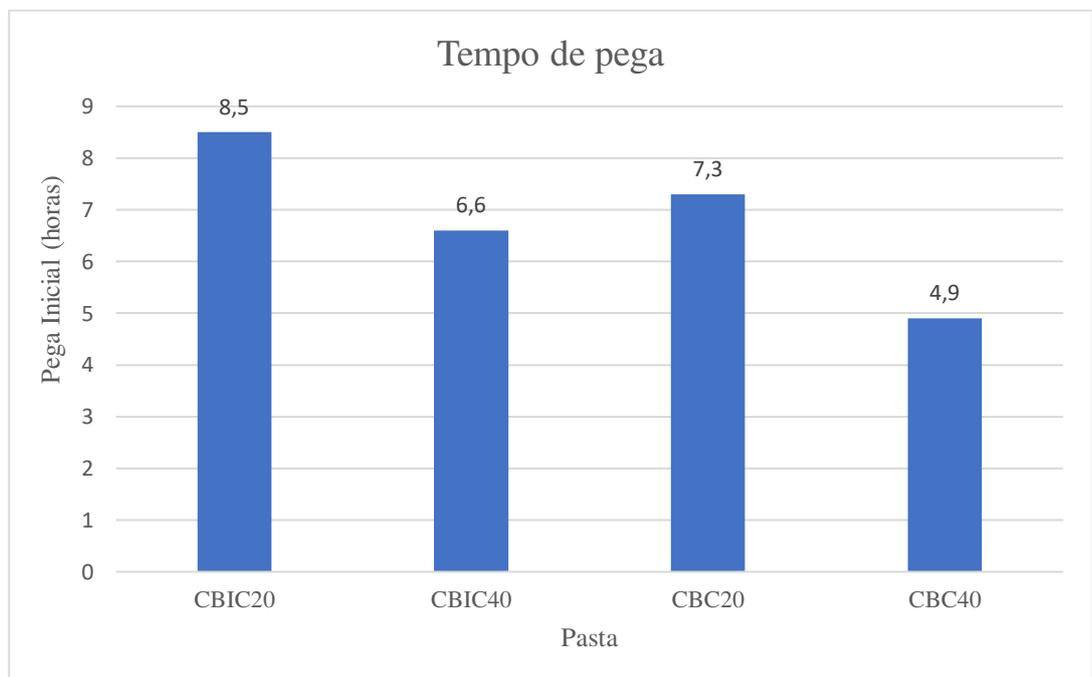
Essa redução na trabalhabilidade à medida que o teor de cinza de biomassa aumenta foi relatada por Teixeira *et al.* (2015). Segundo os autores, isso ocorre devido à irregularidade da forma das partículas e à elevada área de superfície, que aumenta conforme o acréscimo de cinza, sendo este o material mais fino da mistura. Esse comportamento foi observado nas pastas com CBC e CBIC, como mencionado acima, entretanto, apenas a CBC é mais fina que a CV, como está explícito na Tabela 1, o que implica que outros fatores influenciaram nesses resultados das misturas com CBIC.

No entanto, o elevado teor de cálcio da CBIC incide negativamente na trabalhabilidade da pasta, assim, quando o percentual de CBIC aumenta de 20% da CBIC20 para 40% na CBIC40, a trabalhabilidade cai devido o teor de cálcio da CV ser menor que da CBIC.

4.2 Tempo de Pega

Os resultados do ensaio de tempo de pega estão apresentados na Figura 9. Considerando os mesmos percentuais de cinza de biomassa e cinza volante, a CBIC apresentou maior tempo para o início de pega em ambos os teores de CV e CB.

Figura 9: Tempo de pega inicial.



Fonte: Autor (2024).

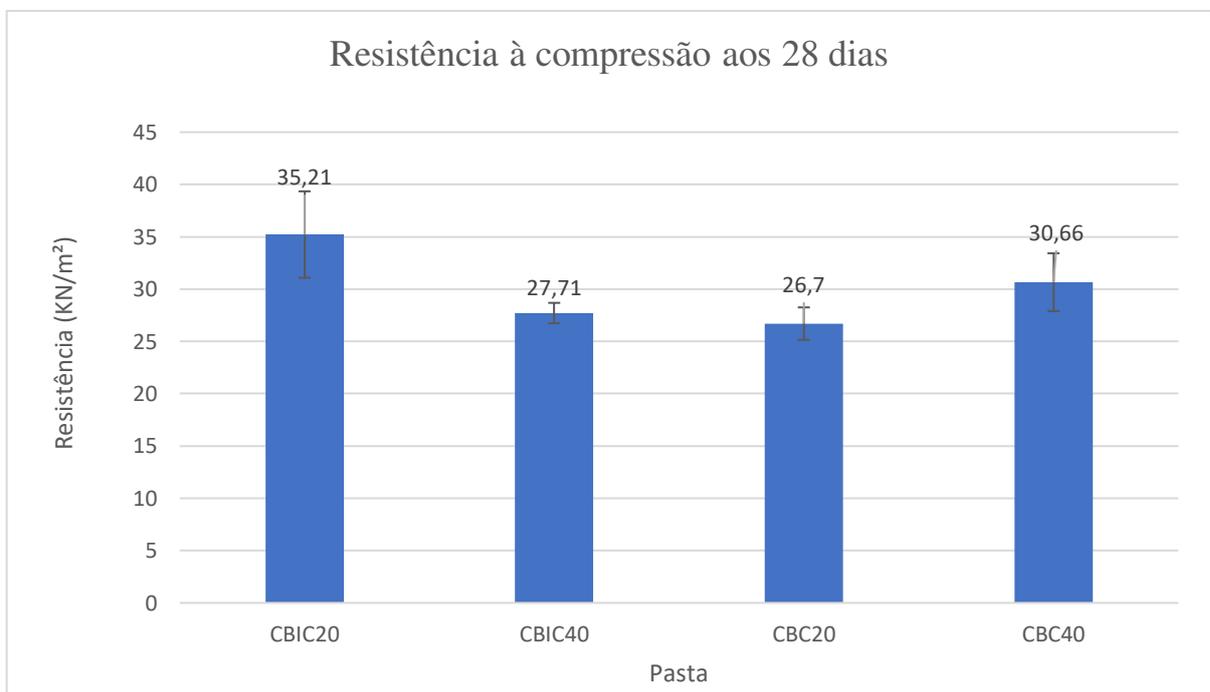
Conforme o ensaio realizado, para o mesmo aumento percentual do teor de cinza de biomassa (20%), houve redução no tempo de pega em ambos os casos (CBIC e CBC). No entanto, a redução foi de 32,87% para a CBC, enquanto para a CBIC foi de 22,35%. Essa

variação para a CBIC está associada ao acréscimo do teor de cinza, pois aumento da proporção de cálcio e a diminuição de sílica tendem a reduzir o tempo de pega de materiais cimentícios (Hewlett, 2004). Por outro lado, para a CBC, a redução pode estar interligada ao tamanho das partículas, já que partículas menores aumentam a área da superfície, o que pode acelerar o tempo de pega (Mehta, 2014).

4.3 Resistência à compressão

Na Figura 10 estão dispostos os resultados dos ensaios de resistência à compressão.

Figura 10: Resultados do ensaio de resistência à compressão.



Fonte: Autor (2024).

As resistências das pastas de CBIC e CBC apresentaram comportamentos distintos em resposta ao aumento do percentual de cinza de biomassa. Para a pasta CBIC, observou-se uma redução de 21% na resistência com o acréscimo de 20% de CB. Em contraste, a pasta CBC mostrou um acréscimo de 14% na resistência com a mesma proporção de CB. Além disso, ao comparar os mesmos percentuais de cinza de biomassa entre CBIC e CBC, notou-se também

uma divergência no comportamento. Com 80% de cinza volante (CV) e 20% de CB, a mistura com cinza da indústria cerâmica demonstrou maior resistência. Em contraste, para os teores de 60% de CV e 40% de CB, a cinza proveniente da celulose apresentou melhores índices de resistência.

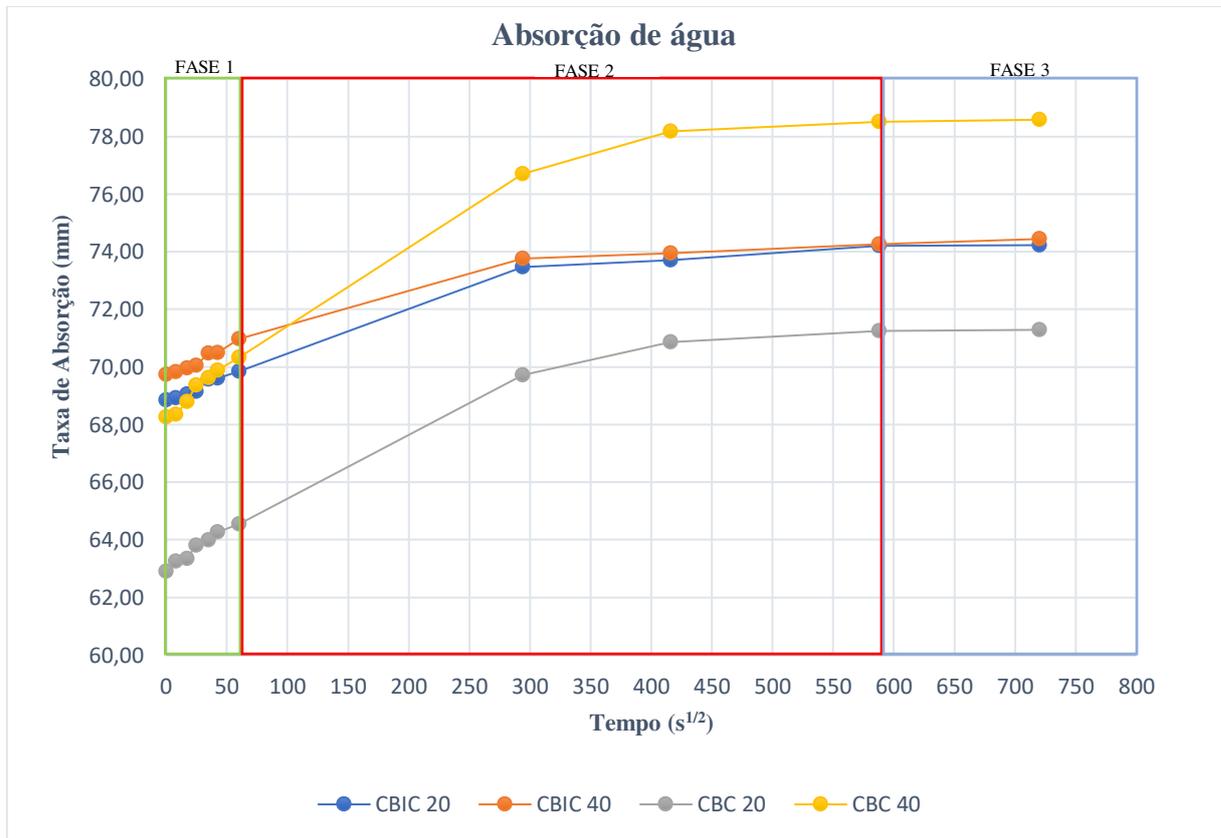
A sílica (SiO_2) e a alumina (Al_2O_3) são os principais responsáveis pela formação de aluminosilicatos, que fornecem a estrutura rígida necessária para a resistência mecânica (Davidovits, 2008). No caso das pastas estudadas, a CBC possui um índice de SiO_2 de 65%, enquanto a cinza volante apresenta 42,20% e a CBIC apenas 2,34%. Com isso, compreende-se o comportamento divergente das pastas: ao aumentar o teor de CBC, eleva-se a quantidade de SiO_2 , promovendo maior formação de aluminosilicatos e, conseqüentemente, maior resistência. Por outro lado, o aumento da CBIC reduz o teor de SiO_2 , o que prejudica a formação de ligações aluminosilicáticas.

Resende *et al.*, (2023) analisou a cinza de cavaco de eucalipto com teor de sílica de 2,1%, observando um comportamento semelhante ao da CBIC, onde houve diminuição da resistência à medida que se aumentava o teor de cinza na mistura. No entanto, a cinza volante de biomassa estudada por Teixeira *et al.*, (2015) apresentou variação positiva no teor de SiO_2 , mas não foi acompanhada por um aumento de resistência, sugerindo que outros fatores químicos ou microestruturais podem ter influenciado negativamente o desempenho mecânico. Além disso, Nunes *et al.*, (2010) e Poggiali *et al.*, (2013) identificaram variações positivas e negativas na resistência aos 28 dias com o aumento do teor de cinza do bagaço de cana-de-açúcar, destacando a influência complexa de diferentes tipos de biomassa nas propriedades dos materiais alcalinos ativados.

4.4 Absorção de Água

A Figura 11 exibe o gráfico com as taxas de absorção de água, calculadas pela Fórmula 01, em relação à raiz quadrada do tempo.

Figura 11: Taxas de absorção de água no tempo.



Fonte: Autor (2024).

As taxas de absorção de água podem ser divididas em três fases. A primeira corresponde à primeira hora ($t < 60S^{1/2}$), em que há absorções pouco consideráveis em todas as pastas, sendo a maior na CBC40 (2,08 mm). A segunda fase refere-se ao período de 1 hora até 96 horas ($60S^{1/2} < t < 587S^{1/2}$), onde a taxa de absorção é mais acentuada, com a maior variação novamente observada na CBC40 (8,19 mm) e a menor na CBIC40 (3,30 mm). Por fim, a terceira fase corresponde às medições feitas após as 96 horas ($t > 587S^{1/2}$), que demonstraram que todas as pastas estavam saturadas, sem absorção adicional significativa.

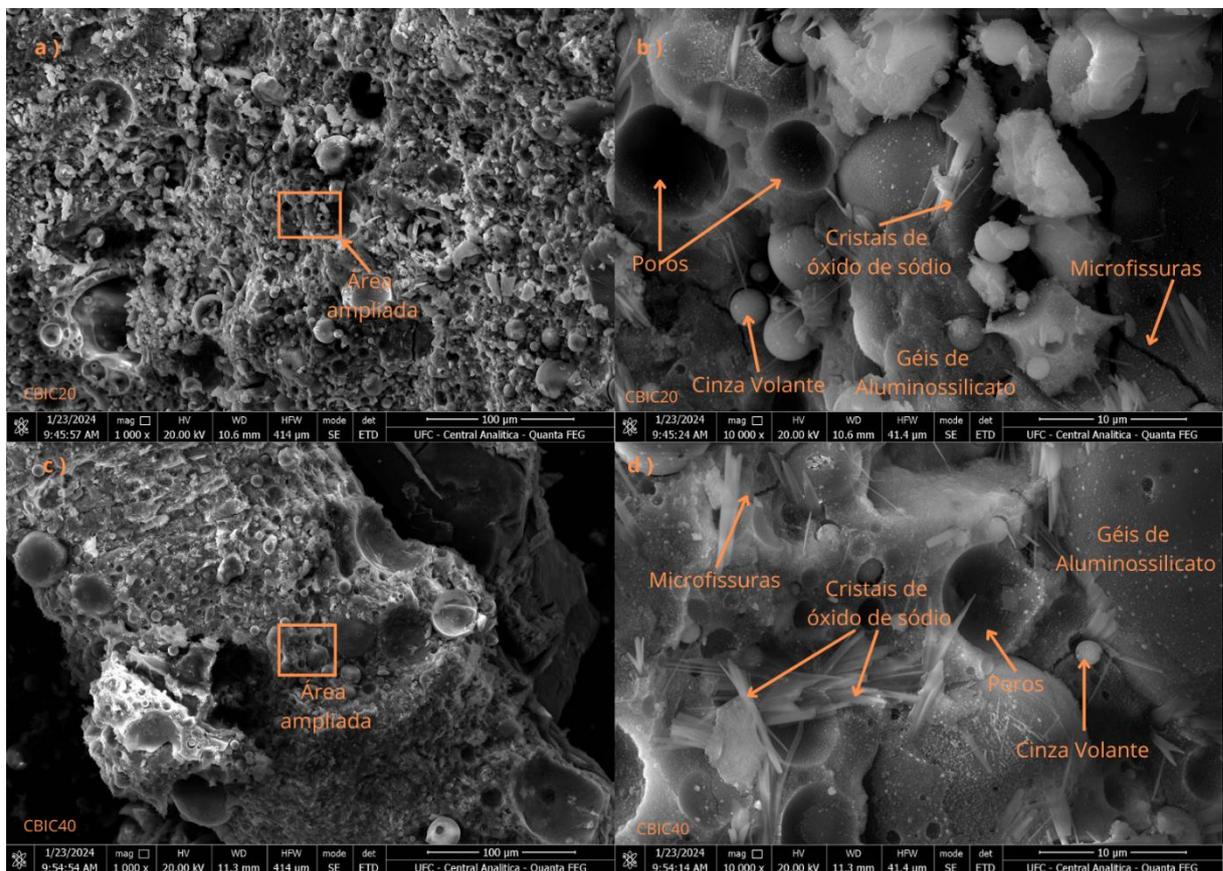
A CBC apresentou um aumento significativo na absorção de água com o acréscimo de cinza na composição da pasta, enquanto a CBIC não mostrou variações expressivas. Um fator relevante para essa diferença observada na CBC foi a baixa trabalhabilidade da pasta CBC40, que pode ter causado um maior índice de vazios. Estudos de Al - Kutti *et al.*, (2017) e Poggiali *et al.*, (2013), que investigaram o uso de cinza de tamareira e de bagaço de cana-de-

açúcar, respectivamente, como materiais cimentícios relataram comportamentos semelhantes ao observado na CBC.

4.5 Microestrutura de Varredura

Na Figura 12 são apresentados os resultados do ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) das matrizes CBIC20 e CBIC40.

Figura 12 - Microscopia CBIC20, CBIC40.

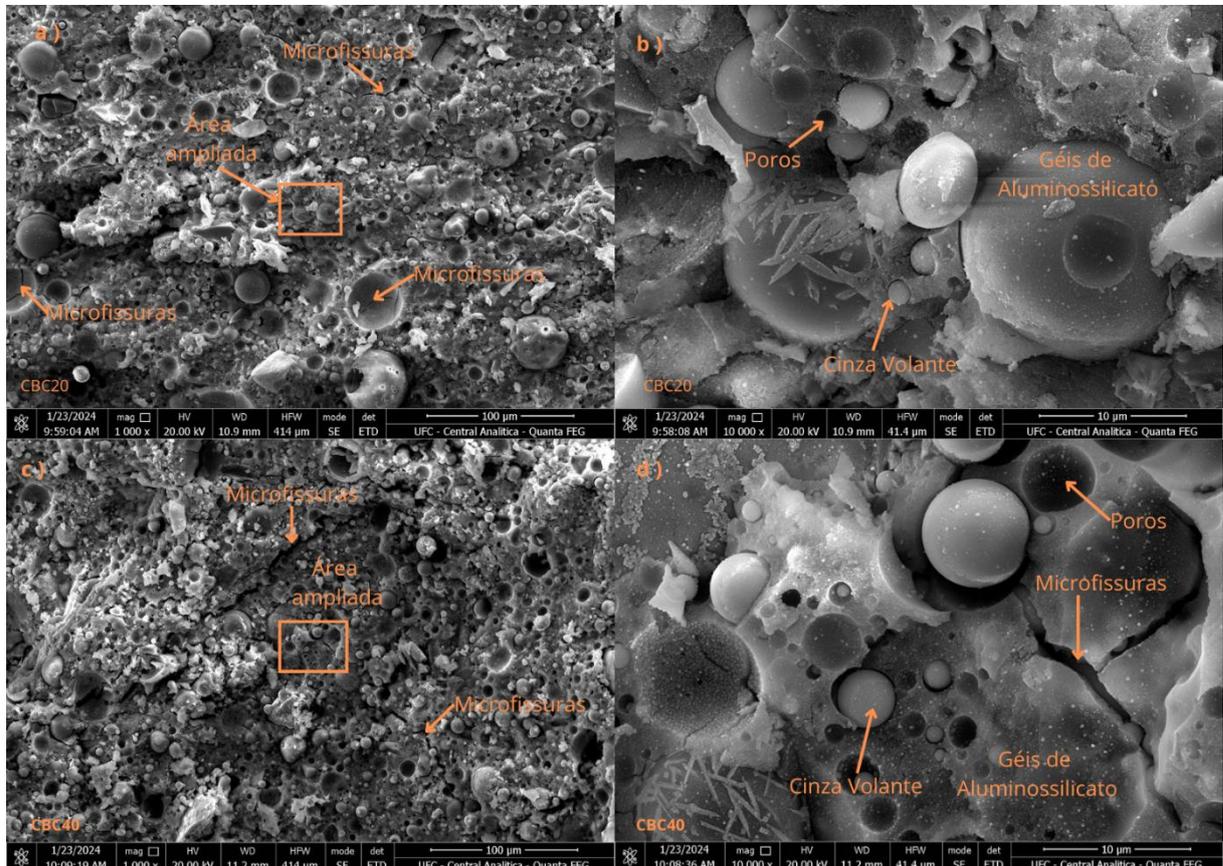


Fonte: Autor (2024).

As Figuras 12b e 12d são as áreas ampliadas das Figuras 12a e 12c, respectivamente. Nas duas pastas, foram identificados cristais de óxido de sódio, microfissuras, géis de aluminossilicato e partículas de cinza volante, juntamente com regiões porosas, como ilustrado na Figura 12.

A Figura 13 demonstra os resultados da microscopia de eletrônica de varredura (MEV) para as matrizes CBC20 e CBC40.

Figura 13 - Microscopia CBC20, CBC40.



Fonte: Autor (2024).

As Figuras 13b e 13d são as áreas ampliadas das Figuras 13a e 13c, respectivamente. Assim como nas matrizes com CBIC foram identificadas microfissuras, géis de aluminossilicato e partículas de cinza volante, juntamente com regiões porosas, como ilustrado na Figura 13.

Observa-se partículas não reagidas ou parcialmente reagidas com morfologia esférica e superfície lisa, características típicas da cinza volante proveniente da combustão de carvão mineral(Oliveira, 2023). Essas partículas esféricas contribuem para a formação de regiões porosas na mistura. Assim, a CBIC40, que contém menor percentual de cinza volante em relação à CBIC20, apresentou uma redução na quantidade de poros e de partículas não reagidas ou parcialmente reagidas. Da mesma maneira, ocorre com a CBC40 que, em relação à CBC20, reduziu a ocorrência de poros e partículas não reagidas ou parcialmente reagidas.

Além disso, foi constatada a formação de géis de aluminossilicato em todas as pastas. Esses géis podem ser do tipo C-A-S-H em sistemas de alto teor de cálcio, N-A-S-H em sistemas de baixo teor de cálcio, ou C-N-A-S-H, que resulta da combinação de materiais com alto e baixo teor de cálcio (Costa, 2022; Bernal *et al.*, 2014; Provis, 2014). As matrizes CBIC20 e CBIC40 se enquadram em um sistema de teor intermediário de cálcio, que pode ter a formação do gel C-N-A-S-H, uma vez que combinam a CBIC, com alto teor de cálcio (86,25%), e a cinza volante, com baixo teor (9,54%). Por outro lado, as pastas CBC20 e CBC40 formam géis N-A-S-H, com a combinação da CBC e cinza volante, ambas com baixo teor de cálcio, conforme Tabela 1.

Por fim, a presença de óxido de sódio está interligada ao alto teor de cálcio da CBIC, que “compete” com o sódio no processo de polimerização, ligando-se preferencialmente aos silicatos e aluminatos, resultando em um excesso de sódio ou potássio não incorporado a matriz (Davidovits, 2008).

5. CONCLUSÃO

A presente pesquisa analisou as propriedades de diferentes pastas álcali-ativadas, especificamente compostas por cinzas de biomassa e cinzas volantes, com foco em suas características de fluidez, tempo de pega, resistência à compressão, absorção de água e microestrutura. Em relação aos ensaios, vale destacar:

- **Fluidez e Trabalhabilidade:** A análise da fluidez revelou que as misturas com cinza da indústria cerâmica (CBIC) apresentaram melhor trabalhabilidade em comparação às pastas com cinza de biomassa de celulose (CBC). Essa diferença está correlacionada com a finura das partículas e o teor de cálcio, que influenciam diretamente a capacidade de manuseio das pastas em aplicações práticas;
- **Tempo de Pega:** Os resultados mostraram que o aumento no teor de cinzas de biomassa impactou negativamente o tempo de pega, em ambos os casos, sendo mais significativo nas pastas com CBC. Esta informação é crucial para a definição de processos de cura e aplicação das pastas, já que o tempo de pega é fundamental para a eficácia da utilização;
- **Resistência à Compressão:** Observou-se um desempenho divergente entre as pastas compostas por CBIC e CBC, com a primeira apresentando redução na resistência à compressão ao aumentar o teor de cinzas. Em contrapartida, a pasta CBC demonstrou aumento na resistência com a mesma variação de teor de cinza de biomassa. Esses resultados indicam que a escolha da cinza de biomassa pode afetar a viabilidade do material para certas aplicações;
- **Absorção de Água:** A absorção de água apresentou um comportamento diferente nas pastas, com a CBC mostrando maior variação em relação ao aumento do teor de cinza. A baixa trabalhabilidade da pasta CBC40 pode ter influenciado esse resultado, sugerindo que a escolha do material deve considerar não apenas a resistência, mas também a durabilidade e a permeabilidade;
- **Microestrutura Eletrônica de Varredura (MEV):** A análise da microestrutura revelou a presença de géis de aluminossilicato e microfissuras, sugerindo que a formação dessas estruturas é favorecida pela combinação adequada de materiais. A presença de partículas não reagidas em ambas as pastas destaca a importância de um equilíbrio na formulação das misturas para otimizar a performance do material. Além

disso, a formação de cristais de óxido de sódio indica a necessidade da escolha adequada do ativador em qualidade e quantidade.

. Os resultados demonstraram que a utilização de pastas álcali-ativadas pode não apenas contribuir para a sustentabilidade ambiental, mas também resultar em materiais com propriedades mecânicas aceitáveis, dependendo da proporção e da natureza das cinzas utilizadas

Pesquisas futuras podem explorar o comportamento desses materiais submetidos a altas temperaturas, contato com ácidos, resistência em mais intervalos de tempo e mais variações de percentuais das cinzas, visando entender melhor o comportamento com resultados mais aprofundados, podendo viabilizar a usabilidade no setor construtivo.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, Mariane Costalonga de; GADIOLI, Mônica Castoldi Borlini; SANT'ANNA, Maria Angélica Kramer; ALMEIDA, Kayrone Marvila de; GIORI, Ana Júlia Nali. Processos de fabricação de cerâmica vermelha. Série Tecnologia Ambiental. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2022. 53 p.
- AL-KUTTI, Walid; ISLAM, A. B. M. S.; NASIR, Muhammad. Potential use of date palm ash in cement-based materials. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, v. 31, n. 1, p. 26-34, 2019. DOI: 10.1016/j.jksues.2017.01.004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1018363916300551>. Acesso em: 15 jun. 2024.
- ANDRADE, Priscyla Lima de; RIBEIRO, Iara Margolis (Org.). *Ciência e engenharia de materiais: princípios e fundamentos em pesquisa: volume 2*. Guarujá, SP: Científica Digital, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16607: Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653: Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA, C. E. R. A. M. I. C. A. (ANICER). Setor. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em < <http://portal.anicer.com.br/setor/> >.
- BAKHAREV, T. Geopolymeric materials: a new solution for sustainable construction. *Cement and Concrete Research*, v. 35, n. 8, p. 1650-1658, 2005.
- BERNAL, S. A. et al. Cement and concrete research. *Cement and Concrete Research*, v. 66, p. 73-82, 2014.

BERNAL, S. A.; NICOLAS, R.S.; MYERS, R.J.; GUTIÉRREZ, R.M.; PUERTAS, F.; VAN DEVENTER, J.S.J.; PROVIS, J.L. MgO content of slag controls phase evolution and 175 structural changes induced by accelerated carbonation in alkali-activated binders. *Cement and Concrete Research*, v. 57, p. 33–43, 2014.

BORLINI, M. C., SALES, H. F., VIEIRA, C. M. F. et al. —Cinza da lenha para aplicação em cerâmica vermelha. parte I: características da cinza, *cerâmica*, v. 51, n. 319, pp.191-197, set. 2005.

CASTRO, V. G. Cimento Portland. In: *Compósitos madeira-cimento: um produto sustentável para o futuro* [online]. Mossoró: EdUFERSA, 2021, p. 13-21. ISBN 978-65-87108-26-1. Disponível em: <https://doi.org/10.7476/9786587108612.0002>.

CIRINO, A. A. Desempenho de concretos avançados para a construção civil, formulados a partir do método de dosagem computacional. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/abcm/>. Acesso em: 12 dez. 2023.

COSTA, Andressa Bianca da. Potencial pozolânico da cinza volante como material de substituição parcial de cimento. 2015. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Centro Universitário UNIVATES, Lajeado, 2015

COSTA, Heloína Nogueira. Cimentos álcali-ativados à base de cinzas do carvão mineral e de escórias siderúrgicas. 2022. (Tese). Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

DAVIDOVITS, J. Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal of Materials Education*, v. 16, n. 1, p. 91-99, 1994.

DAVIDOVITS, J. *Geopolymer Chemistry and Applications*. Institut Géopolymère, 2008.

DE AZEVEDO, G. S.; STRECKER, K.; DE ARAÚJO, A. G.; DA SILVA, C. A. (2017). Produção de geopolímeros à base de cinza volante usando soluções ativadoras com diferentes composições de Na₂O e Na₂SiO₃. *Cerâmica*, 63(366), 143–151.

DE AZEVEDO, J. S.; DIAS, D. P.; SOARES, J. C. Efeito da temperatura em resinas geopoliméricas à base de metacaulim ativado por diferentes combinações entre silicatos e hidróxidos. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, p. 1–13, 2019.

DEMIS, S., TAPALI, J. G., PAPADAKIS, V.G. Na investigation of the effectiveness of the utilization of biomass ashes as pozzolanic materials. *Construction and Building Materials* 68, pp. 291-300. (2014).

DUXSON, P.; PROVIS, J. L.; LUKEY, G. C.; MALLICOAT, S. W.; KRIVEN, W. M.; VAN DEVENTER, J. S. J. (2005). Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 269(1–3), 47–58.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2005.06.060>

DUXSON, P.; PROVIS, J. L.; LUKEY, G. C.; VAN DEVENTER, J. S. J. (2007). The role of inorganic polymer technology in the development of “green concrete.” *Cement and Concrete Research*, 37(12), 1590–1597. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.018>

DUXSON, P. et al. *Journal of materials science. Journal of Materials Science*, v. 42, n. 9, p. 2987-2996, 2006.

GLUKHOVSKY, V. D. Soviet patent. 1950.

GÓMEZ-REY MX et al. 2012. Wood ash effects on nutrient dynamics and soil properties under Mediterranean climate. *Annals of Forest Science* 69: 569–579.

HANISCH AL & FONSECA JA. 2013. Efeito da adubação com cinza de biomassa sobre uma pastagem de *Hemarthria altissima* cv. Flórida cultivada em solo ácido. *Revista Agropecuária Catarinense* 26: 74-80.

ISAIA, Geraldo Cechella. *Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais*. São Paulo: IBRACON, 2007. 2v.

ISMAIL, I.; BERNAL, S.A.; PROVIS, J.L.; NICOLAS, R.S.; HAMDAN, S.; VAN DEVENTER, J.S.J. Modification of phase evolution in alkali-activated blast furnace slag by the incorporation of fly ash. *Cement and Concrete Composites*, v. 45, p. 125–135, 2014.

KANTRO, D. L. *Measurement of workability of cement paste using a mini-slump test*. *Cement, Concrete, and Aggregates*, v. 2, n. 2, p. 95-102, 1980. DOI: 10.1520/CCA10038J.

KIHARA, Y. O estudo mineralógico das cinzas volantes brasileiras: origem, características e qualidade. São Paulo, 1983.

KOMNITSAS, K; ZAHARAKI, D. (2007). Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry. In *Minerals Engineering* (Vol. 20, Issue 14, pp. 1261–1277). <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2007.07.011>.

KONG, Y.K.; KURUMISAWA, K. Fresh properties and characteristic testing methods for alkali-activated materials: A review. *Journal of Building Engineering*, 2023. DOI: 10.1016/j.jobbe.2023.106830(KONG).

KUHL, H. “Early Studies on Alkali Activation of Silicates.” *Chemical Journal*, 1908.

LUUKKONEN, T.; ABDOLLAHNEJAD, Z.; YLINIEMI, J.; MASTALI, M.; KINNUNEN, P.; ILLIKAINEN, M.. *Alkali-activated soapstone waste: Mechanical properties, durability, and economic prospects*. *Journal of Cleaner Production*, v. 206, p. 256-268, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.09.161.

MACEDO, P. C.; Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, 2009.

MAEDA S et al. 2008. Resposta de Pinus taeda à aplicação de cinza de biomassa vegetal em Cambissolo Húmico, em vaso. *Pesquisa Florestal Brasileira* 56: 43-52.

MAO, Y. et al. Cement and concrete composites. *Cement and Concrete Composites*, v. 70, p. 125-132, 2016.

MANSANEIRA, E. C. et al. Sugar cane bagasse ash as a pozzolanic material. *Dyna*, Colombia, v. 84, n. 201, p. 163–171. Disponível em: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/61409>.

MARQUES JUNIOR, André Luiz; TAMBARA JUNIOR, Luís Urbano Durlo; MARVILA, Markssuel Teixeira; CRUZ, Ariana Silva Azeredo; CRUZ, Lucas Reis; AZEVEDO, Afonso Rangel Garcez de. Estudo de composições ativadoras em pastas álcali ativadas de metacaulim e resíduo cerâmico. In: ANAIS DO XIV CONGRESSO FLUMINENSE DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA / VII CONGRESSO FLUMINENSE DE PÓS-GRADUAÇÃO, 2022, Campos dos Goytacazes. Campinas: Galoá, 2022. Disponível em: <https://proceedings.science/confict-conpg-2022/trabalhos/estudo-de-composicoes-ativadoras-em-pastas-alcali-ativadas-de-metacaulim-e-resid?lang=pt-br>. Acesso em: 12 set. 2023.

MENDONÇA, IURI VERÍSSIMO. Caracterização e avaliação da atividade pozolônica das cinzas de biomassa residual de fornos da indústria de cerâmica de Crateús. Repositorio.ufc.br, 2023.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: IBRACON, 2008.

MOHAJERANI, A.; SUTER, D.; JEFFREY-BAILEY, T.; SONG, T.; ARULRAJAH, A.; HORPIBULSUK, S.; LAW, D. (2019). Recycling waste materials in geopolymer concrete. In *Clean Technologies and Environmental Policy* (Vol. 21, Issue 3, pp. 493–515). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/s10098-018-01660-2>.

NUNES, Igo Henrique Silva; VANDERLEI, Romel Dias; SECCHI, Maicon; ABE, Marcelo Akira Pietrobom. Estudo das características físicas e químicas da cinza do bagaço de cana-de-açúcar para uso na construção. *Revista Tecnológica*, v. 17, p. 39-48, 2008. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/277170409>. Acesso em: 28 abr. 2024.

OLIVEIRA, Marco Antonio Barbosa de. Aproveitamento de resíduos da indústria de celulose para produção de cimento Portland na Região Amazônica. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2023.

POGGIALI, Flávia Spitale Jacques; SOARES, M. M. N. S.; BEZERRA, Augusto Cesar da Silva; PÁDUA, Paula Gisele Lamezon; FIGUEIREDO, R. B.; AGUILAR, Maria Teresa Paulino; CETLIN, P. R. Desempenho de argamassas fabricadas com adição de cinza de bagaço de cana-de-açúcar. *57º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 5º Congresso Iberoamericano de Cerâmica*, Natal, RN, Brasil, 2013. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/312029336>. Acesso em: 15 jun. 2024.

PROVIS, J. L. Geopolymers and other alkali activated materials: Why, how, and what? *Materials and Structures*, v. 47, n. 1–2, p. 11–25, 2014.

PROVIS, John L.; VAN DAVENTER, Jannie S. J. Alkali-Activated Materials: State-of-the-Art Report, RILEM TC 224-AAM. Springer, 2014.

RESENDE, Domingos Sávio de; RADISPIEL FILHO, Herbet; KELES, José Genário; GOUVEIA, Antonio Maria Claret de; BEZERRA, Augusto Cesar da Silva; AGUILAR, Maria Teresa Paulino. Cinzas de cavaco de eucalipto processadas em compósitos cimentícios. *20º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*, Joinville, SC, Brasil, 2012. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/311986542>. Acesso em: 28 set. 2024.

ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050. Coord. por Gonzalo Visedo e Marcelo Pecchio. Rio de Janeiro: SNIC, 2019. 64 p.(Roadmap_Tecnologico_Cim...).

SAARSALMI A et al. 2001. Effects of wood ash fertilization on forest soil chemical properties. *Silva Fennica* 35: 355–368.

SEVERO, C. G. S.; COSTA, D. L.; BEZERRA, I. M. T.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. A. (2013). Características, particularidades e princípios científicos dos materiais ativado alcalinamente. 2, 55–67.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. *Relatório anual 2021*. Rio de Janeiro: SNIC, 2021. 57 p.(rel_anual_2021).

SILVA, Mália Marelino Montalvão da; SILVA, Lays Xavier Da; SILVA, Milleny Almeida; DUARTE, Thainá Guimarães; OLIVEIRA, Ana Cláudia Alves de. Efeitos do dióxido de carbono na saúde e no meio ambiente. 2023. Trabalho acadêmico (Biomedicina) – Faculdade Alfredo Nasser, Aparecida de Goiânia, 2016.

TAVARES, M. L. Avaliação das condições de cura sobre a resistência à compressão e a microestrutura de argamassa álcali-ativada à base de cinza volante e escória de aciaria. Repositorio.ufc.br, 2023

Teixeira, S. R.; de Souza, A. E.; Santos, G. T. A.; Peña, A. F. V.; Miguel, A. G. Sugarcane bagasse ash as a potential quartz replacement in red ceramic. *Journal of the American Ceramic Society* 2008, 91, 1883.

TEIXEIRA, Elisabete; CAMÕES, Aires; BRANCO, Fernando G. Incorporação de cinzas de biomassa como substituto do cimento em argamassas. In: II Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, Guimarães, Portugal. CTAC, Universidade do Minho, 2015.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. Biblioteca Universitária. Guia de normalização de trabalhos acadêmicos da Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2013.

XIAO, H. et al. Journal of materials in civil engineering. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 30, n. 8, p. 04018137, 2018.

WAN, D. et al. Materials science and engineering: A. *Materials Science and Engineering: A*, v. 784, p. 139-148, 2020.

WIJAYA, A. L.; EKAPUTRI, J. J.; TRIWULAN. Factors influencing strength and setting time of fly ash based-geopolymer paste. In: MATEC Web of Conferences, 138, 2017. Anais [...]. MATEC Web, 2017.

YOGITHA, B.; KARTHIKEYAN, M.; MUNI REDDY, M. G. Progress of sugarcane bagasse ash applications in production of eco-friendly concrete - review. *Materials Today: Proceedings, Andhra Pradesh*, v. 33, p. 695–699, 2020.

ZHANG, J. et al. Construction and building materials. *Construction and Building Materials*, v. 150, p. 703-710, 2017.