



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE CRATEÚS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

IURI VERÍSSIMO MENDONÇA

**CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÔNICA DA CINZA
DE BIOMASSA RESIDUAL DE FORNOS DA INDÚSTRIA CERÂMICA DE
CRATEÚS**

CRATEÚS

2023

IURI VERÍSSIMO MENDONÇA

CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÔNICA DA CINZA DE
BIOMASSA RESIDUAL DE FORNOS DA INDÚSTRIA CERÂMICA DE CRATEÚS

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. Dra., Heloína Nogueira da Costa.

CRATEÚS

2023

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)

- M495c Mendonça, Iuri Veríssimo.
Caracterização e avaliação da atividade pozolônica da cinzas de biomassa residual de fornos da indústria cerâmica de Crateús / Iuri Veríssimo Mendonça. – 2023.
46 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia Civil, Crateús, 2023.
Orientação: Profa. Dra. Heloína Nogueira da Costa .
1. Indústria Cerâmica. 2. Cinza de biomassa de madeira. 3. Materiais cimentícios suplementares. I. Título.
CDD 620
-

IURI VERÍSSIMO MENDONÇA

CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÔNICA DA CINZAS DE
BIOMASSA RESIDUAL DE FORNOS DA INDÚSTRIA CERÂMICA DE CRATEÚS

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.

Aprovado em: 29/03/2023.

BANCA EXAMINADORA

Profª. Dra. Heloína Nogueira da Costa (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Jorge Luis Santos Ferreira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profª. Ma. Katharine Taveira de Brito Medeiros
Instituto Federal da Paraíba (IFPB)

A Deus.

Aos meus pais, Cildo e Luciene.

Ao meu irmão, Ígor.

E aos meus amigos que viveram comigo essa etapa.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe e meu pai, Cildo e Luciene, por todo o apoio, motivação, amor e nunca ter me deixado faltar nada.

Agradeço ao meu irmão, Ígor, por todos os conselhos e apoio nessa fase da minha vida.

Agradeço ao meu avô paterno, Francisco Monteiro, que mesmo calado e sem intenção, me deu diversos ensinamentos que trago na memória. Às minhas avós Nemézia e Clemozilda e avô materno Antônio Izídio pelo carinho e amor recebido.

Agradeço a minha orientadora Prof. Dra. Heloína Nogueira da Costa, por me aceitar como orientando e me guiar tão bem nessa trajetória.

Agradeço a Empresa Ceramista Mondumbim, pela parceria e visitas técnicas realizadas.

Também agradeço aos meus colegas do curso de Engenharia Civil, em especial, o Eric, Michael, Helber e Vanutti por dividirmos as alegrias, tristezas e lutas nessa etapa das nossas vidas.

E por fim, aos professores participantes da banca examinadora Jorge Luis e Katharine Taveira pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

“Faça o teu melhor, com as condições que tu tens, enquanto não tem condições de fazer melhor ainda.”

Mário Sérgio Cortella

RESUMO

O Brasil está entre os países com maior número de empresas ceramistas do mundo, ocupando a 3ª colocação no ranking mundial. A produção de blocos para alvenaria, telhas e demais cerâmicas vermelhas passam por processos de transformações de insumos, que estes, depois de serem transformados no produto final, geram uma quantidade significativa de resíduos que não possuem por muitas vezes destinação específica, sendo acumulado em montes nas indústrias. Dentre os resíduos gerados tem-se restos de blocos danificados e a cinza resultante da queima da lenha para a produção da cerâmica. Há alguns anos os materiais cimentícios suplementares vêm sendo estudados devido à preocupação ambiental da quantidade de cimento utilizado no mundo, visto que sua produção emite dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera. No entanto, ainda são poucos os estudos voltados para a implementação da cinza de biomassa em concretos e argamassas. Portanto, o objetivo deste estudo é caracterizar e avaliar a atividade pozolânica da cinza residual de fornos da indústria cerâmica de Crateús-CE. Para isso, foram coletadas amostras da cinza resultantes da queima de madeiras secas da região (mofumbo e jurema) e peneiradas na peneira 200 com abertura de $75 \mu\text{m}$, posteriormente, foram realizados ensaios para a caracterização da cinza (Granulometria a laser e Espectroscopia por energia dispersiva) e potencial pozolânico (Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias e Determinação da atividade pozolânica com cal aos 7 dias). Diante dos resultados obtidos, a cinza apresentou uma elevada concentração de cálcio em sua composição (86,23%) e uma somatória nos teores de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 de 2,34 %. Além disso, apresentou um decréscimo no valor da resistência das argamassas de aproximadamente 25%. Apesar de que a cinza não apresentou características de material pozolânico, a utilização desta pode ser considerada em estudos futuros quanto à ativação alcalina, visto sua elevada concentração de cálcio.

Palavras-chave: Indústria Cerâmica; Cinza de biomassa de madeira; Materiais cimentícios suplementares.

ABSTRACT

Brazil is among the countries with the largest number of ceramic companies in the world, occupying 3rd place in the world ranking. The production of blocks for masonry, roof tiles and other red ceramics goes through input transformation processes, which, after being transformed into the final product, generate a significant amount of waste that often does not have a specific destination, being accumulated in heaps in industries. Among the waste generated, there are remains of damaged blocks and ash resulting from the burning of firewood for the production of ceramics. For some years, supplementary cementitious materials have been studied due to environmental concerns about the amount of cement used in the world, since its production emits carbon dioxide (CO₂) into the atmosphere. However, there are still few studies focused on the implementation of biomass ash in concrete and mortar. Therefore, the aim of this study is to characterize and evaluate the pozzolanic activity of residual ash from kilns in the ceramic industry in Crateús-CE. For this, samples of the ash resulting from the burning of dry wood in the region (mofumbo and jurema) were collected and sieved through a 200 sieve with an opening of 75 µm. dispersive) and pozzolanic potential (Determination of the performance index with Portland cement at 28 days and Determination of pozzolanic activity with lime at 7 days). In view of the results obtained, the ash showed a high concentration of calcium in its composition (86.23%) and a sum of SiO₂, Al₂O₃ and Fe₂O₃ contents of 2.34%. In addition, it showed a decrease in the mortar resistance value of approximately 25%. Although the ash did not show the characteristics of a pozzolanic material, its use may be considered in future studies regarding alkaline activation, given its high concentration of calcium.

Keywords: Ceramic Industry; Wood biomass ash; Supplementary cementitious materials.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Procedimento Metodológico	27
Figura 2 – CBM a) pontos de coleta; b) Peneiramento; c) Cinza processada	28
Figura 3 – Moldes e rompimento dos corpos de prova a) ensaio 02; b) ensaio 01; c) rompimento; d) corpo de prova rompido	29

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Distribuição das partículas da CBM	31
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Requisitos químicos (valores expressos em porcentagem %)	19
Tabela 2 – Requisitos físicos	19
Tabela 3 – Caracterização da CBM	30
Tabela 4 – Composição química da Cinza de Biomassa de Madeira (CBM)	32
Tabela 5 – Resistência à compressão das argamassas	33
Tabela 6 – Resistência à compressão dos corpos de prova com cal	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CBM	Cinza de Biomassa de Madeira
CCA	Cinza de Casca de Arroz
CCM	Cinza de Casca de Milho
CL	Cinza de Lenha
CP	Corpo de Prova
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
MCS	Materiais Cimentícios Suplementares
NBR	Norma Brasileira
SA	Sílica Ativa

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
μ	Micro
°C	Graus Celsius
μ	Micro
F _{ck}	Resistência característica do concreto à compressão
SiO ₂	Sílica
Na ₂ O	Óxido de sódio
Al ₂ O ₃	Alumina
NaOH	Hidróxido de sódio
CaO	Óxido de cálcio
MgO	Óxido de magnésio
K ₂ O	Óxido de potássio
SO ₃	Trióxido de enxofre
MPa	Megapascal
CO ₂	Dióxido de carbono

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Contextualização	14
1.2	Justificativa	15
1.3	Objetivo Geral	16
1.4	Objetivos Específicos	16
1.5	Delimitação do Estudo	16
1.6	Estrutura de Pesquisa	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	Materiais Cimentícios Suplementares (MCS)	18
2.1.1	Classificação	18
2.1.1.1	<i>Escória Granulada de alto-forno</i>	20
2.1.1.2	<i>Cinza volante</i>	21
2.1.1.3	<i>Sílica ativa</i>	21
2.1.1.4	<i>Cinza de casca de arroz</i>	22
2.2	Cinza de biomassa	23
2.2.1	<i>Cinza de óleo de palma</i>	23
2.2.2	<i>Cinza de bagaço de cana de açúcar</i>	24
2.2.3	<i>Cinza de biomassa de madeira</i>	24
3	MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1	Materiais	27
3.2	Métodos de pesquisa	28
3.2.1	<i>Caracterização da cinza</i>	28
3.2.2	<i>Potencial pozolônico</i>	28
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
4.1	Caracterização Pozolânica	30
4.1.1	<i>Características físicas</i>	30
4.1.2	<i>Características químicas</i>	31
4.2	Potencial Pozolânico	33
4.2.1	<i>Índice de atividade pozolânica com cimento Portland</i>	33
4.2.2	<i>Índice de atividade pozolânica com cal</i>	34
5	CONCLUSÃO	36

REFERÊNCIAS	37
ANEXO A – RELATÓRIO DO ENSAIO DE GRANULOMETRIA A LASER	42
ANEXO B – RELATÓRIO DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO COM CIMENTO PORTLAND AOS 28 DIAS (ARGAMASSA A)	43
ANEXO C – RELATÓRIO DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO COM CIMENTO PORTLAND AOS 28 DIAS (ARGAMASSA B)	44
ANEXO D – RELATÓRIO DO ENSAIO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA COM CAL AOS 7 DIAS	45

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

As Indústrias Ceramistas têm papel relevante na Indústria da Construção Civil (ICC), possuindo um faturamento anual de 18 bilhões, gerando mais de 290 mil empregos diretos e responsável por 4,8% do setor da Construção Civil (ANICER, 2008). No Brasil existem aproximadamente 6.903 fábricas de cerâmica, sendo 4.346 dessas unidades produtoras de blocos para alvenaria (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA, 2017).

O estado do Ceará ocupa a quinta colocação no ranking nacional em número de empresas do setor industrial cerâmico com 412 unidades produtoras (DIÁRIO DO NORDESTE, 2014). Segundo a Secretaria do Meio Ambiente (SMA) de Crateús-CE, a cidade possui atualmente três Indústrias Cerâmicas regularizadas. Nas cidades vizinhas, Nova Russas-CE conta com uma Olaria regularizada e Novo Oriente-CE não possui Indústrias produtoras de blocos, segundo a Secretaria do Meio Ambiente de cada cidade.

O segmento da indústria cerâmica é de extrema importância tendo em vista que a produção de tijolos, lajotas, telhas, blocos de vedação e estrutural são a base da Construção Civil. No estado do Ceará, o bloco cerâmico lidera as vendas, dentre os produtos mais comercializados das indústrias, sendo responsável por 77,3% de tudo que é vendido (DIÁRIO DO NORDESTE, 2014).

O processo de produção da cerâmica vermelha se dá por meio de etapas, sendo estas, a extração da matéria prima, a conformação das peças, a calcinação e por fim, a expedição destas (NETCERAMICS, 2009). As transformações de insumos deixam pelo caminho uma quantidade de resíduos. Todo processo produtivo industrial, é caracterizado pela utilização de insumos que, submetidos a uma transformação, dão lugar a produtos e com eles, os resíduos (ALMEIDA, SOARES, MATOS, 2020).

Dos resíduos gerados, inclui a cinza, resultante da queima da lenha para a produção da cerâmica. A combustão de lenha no Brasil gera uma grande quantidade de cinzas que não possuem uma destinação específica. A produção de cinza é em torno de 3% da massa da madeira queimada, o que resulta em aproximadamente 2,55 milhões de toneladas de cinzas (BORLINI et. al, 2005).

As cinzas provenientes dos fornos das olarias, dependendo da sua propriedade ligante, podem ser consideradas como um material pozolânico, que segundo a ABNT NBR 12653:2014, são materiais silicosos ou silicoaluminosos que sozinhos, possuem pouca ou

nenhuma propriedade ligante, mas que, quando finamente divididos e na presença da água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, formando compostos com propriedades ligantes.

Nesse contexto, o objeto de estudo da presente pesquisa tem como foco a caracterização e verificação do potencial pozolânico das cinzas geradas pela queima da lenha na fabricação dos blocos cerâmicos de indústria na cidade de Crateús-CE.

1.2 Justificativa

A forma da disposição final dos resíduos gerados pela construção civil tem preocupado a sociedade atual em relação ao meio ambiente. Os resíduos da construção civil e das indústrias representam um grave problema ambiental e econômico (MENEZES et al., 2002). As indústrias cerâmicas da região dos sertões de Crateús acumulam seus resíduos gerados em montes que vão crescendo e aumentando dia após dia.

Além da geração de resíduos, a produção de dióxido de carbono nos processos produtivo também é um fator preocupante. Um dos materiais mais utilizados na construção civil é o cimento, no entanto, no seu processo de fabricação ocorre uma grande liberação de gás carbônico (CO_2) para a atmosfera, e conseqüentemente, afeta o meio ambiente. Diante disso, pesquisadores têm investigado materiais com propriedades ligantes semelhantes à do cimento, para a substituição mesmo que parcial do mesmo, a fim de minimizar o impacto ambiental (MAGUESVARI; SUNDARARAJAN, 2017).

O cimento Portland consome energia e necessita de matéria-prima para a sua produção. Utilizar materiais cimentícios suplementares (MCS) é fundamental para reduzir a carga ambiental associada ao cimento. Segundo a Ecosmart Foundation (2008), estima-se que a substituição de 18% do cimento resultaria na redução de 17% nas emissões de CO_2 e que, se apenas 30% do cimento usado no mundo fosse substituído por materiais cimentícios suplementares, o aumento da emissão de CO_2 na produção do cimento poderiam ser revertidas.

A utilização de cinzas de biomassa de madeira (CBM) como material pozolânico tem sido estudada nos últimos anos. Porém, a literatura não tem um consenso a respeito da atividade pozolânica das cinzas de biomassa, visto que Vaske (2012) pesquisou sobre a viabilidade de cinza obtida através da combustão de lenha de eucalipto em caldeira fumo tubular para a produção de vapor, na incorporação ao concreto. A lenha utilizada era composta por 60% de *Eucalyptus Saligna*, 30% de *Eucalyptus Camaldulensis* e 10% de

Eucalyptus Citriodora, e obteve como resultado que a cinza de lenha de madeira de eucalipto pode ser utilizada como filler na adição ao concreto. Já Gluitz e Marafão (2013), estudaram a adição da cinza da madeira de eucalipto na substituição parcial do cimento Portland em argamassas. A cinza foi coletada de uma indústria de secagem e armazenamento de grãos de Francisco Beltrão – PR, e concluíram depois de ensaios realizados, que a cinza não apresentou potencial pozolânico.

Tem se verificado que existe viabilidade no uso da CBM, no entanto, nem toda cinza de biomassa pode ser considerada material pozolânico. Por esta razão, é necessário realizar a caracterização da cinza proveniente da queima da lenha utilizada nos fornos da Indústria produtora de blocos cerâmicos a fim de determinar sua capacidade pozolânica.

Assim, um reaproveitamento da cinza de biomassa de madeira (CBM) como material cimentício suplementar (MCS) gera vantagens a indústria ceramista quanto à destinação eficaz da cinza, a diminuição do impacto ambiental causado pela liberação de CO₂ na produção de cimento e ainda pode garantir melhorias nas propriedades físicas e químicas das argamassas e concretos.

1.3 Objetivo Geral

Caracterizar e avaliar a atividade pozolânica da cinza de biomassa residual de fornos de indústria ceramista de Crateús.

1.4 Objetivos Específicos

- a) Caracterizar fisicamente e quimicamente a cinza de biomassa de madeira de fornos de indústria ceramista de Crateús-CE;
- b) Avaliar a atividade pozolânica através dos ensaios de resistência das argamassas com adições da cinza residual.

1.5 Delimitação do Estudo

A presente pesquisa delimitou-se ao estudo das cinzas residuais dos fornos da indústria cerâmica Mondubim, localizada na Vila Curral Velho, distante 15 km da zona urbana de Crateús-CE.

1.6 Estrutura de Pesquisa

A pesquisa está dividida em 5 partes: introdução, referencial teórico, materiais e métodos, resultados e discussões e conclusão.

A introdução, apresenta a contextualização na qual a pesquisa foi realizada. Posteriormente, o referencial teórico inclui uma síntese do conteúdo relevante coberto pelo estudo e é dividido nos tópicos: materiais cimentícios suplementares e cinza de biomassa.

Após o referencial teórico apresentam-se os materiais e métodos, baseada na descrição detalhada da fase de pesquisa, descrevendo-se a forma de obtenção dos resultados do trabalho. Em seguida, o produto dessa análise é apresentado na seção de resultados e discussões. Por fim, apresenta-se as conclusões, terminando pelas referências.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Materiais Cimentícios Suplementares (MCS)

Os materiais cimentícios suplementares (MCS) são materiais que veem sendo amplamente utilizados nas últimas décadas como substituição parcial do cimento, em concretos e argamassas, devido a promoção da sustentabilidade (BAJPAI; CHOUDHARY; SRIVASTAVA, 2020). O cimento Portland tem sua eficácia comprovada em concretos e argamassas, tanto no estado fresco como endurecido e desse modo, buscam-se materiais com propriedades semelhantes que possam substituí-lo mesmo que parcialmente (MARTINS, 2018).

Essas adições minerais, como também podem ser chamado os materiais cimentícios suplementares, têm sido utilizadas a fim de minimizar as quantidades de clínquer adicionadas ao cimento, visto que sua produção emite uma grande quantidade de CO₂. Assim, a adição de MCS no cimento Portland reduz a emissão de CO₂ e aumenta a eficiência de energia nas plantas de produção do cimento (MAIA, 2016).

Escórias de alto forno, cinzas volantes, pozolanas artificiais e filer calcário são exemplos de materiais cimentícios suplementares e suas adições ao clínquer na produção do cimento, atuam na redução das emissões de CO₂, pois diminuem a produção do clínquer. Esses materiais podem diversificar as características e aplicações do cimento, além de representar uma solução ambientalmente correta para resíduos de outros processos produtivos, como escórias siderúrgicas e cinzas de biomassa de madeira de olarias (KIHARA; VISEDO, 2014).

Além das questões ambientais, os materiais cimentícios suplementares modificam a microestrutura do concreto e argamassas, aumentando a estabilidade e sua durabilidade (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO CIMENTO PORTLAND, 2022; JOHN, 2003).

2.1.1 Classificação

Segundo MEHTA e MONTEIRO (2008), os materiais cimentícios suplementares podem ser tanto cimentantes como pozolânicos. Os materiais cimentantes são aqueles similares ao cimento Portland, que necessita apenas de água para formar produtos hidratados, enquanto os materiais pozolânicos, segundo a ABNT NBR 12653:2014, são materiais silicosos que, sozinhos não possuem propriedades ligantes, mas quando finamente dividido e

na presença de água reagem com o hidróxido de cálcio formando compostos com propriedades ligantes.

A palavra pozolana é de origem romana, pela semelhança com as cinzas vulcânicas encontradas na região de Pozzuoli, perto do Monte Vesúvio, no sul da Itália. A cinza foi amplamente utilizada pelos antigos romanos como material ligante, sendo o Coliseu, um exemplo de construção que tem em sua composição esse constituinte.

Segundo a ABNT NBR 12653:2014, os materiais pozolânicos são classificados em três partes: classe N para pozolanas naturais e artificiais, classe C para as cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termelétricas e classe E, para quaisquer pozolana que não se enquadram nas classes N e C.

As Tabelas 1 e 2 apresentam, respectivamente, os requisitos químicos e os requisitos físicos dos quais o material pozolânico deve estar em conformidade.

Propriedades	Classe de material pozolânico			Método de ensaio(*)
	N	C	E	
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	≥ 70	≥ 70	≥ 50	ABNT NBR NM 22
SO ₃	≤ 4	≤ 5	≤ 5	ABNT NBR NM 16
Teor de umidade	≤ 3	≤ 3	≤ 3	ABNT NBR NM 24
Perda ao fogo	≤ 10	≤ 6	≤ 6	ABNT NBR NM 18
Álcalis disponíveis em Na ₂ O	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 1,5	ABNT NBR NM 25
(*) Os métodos de ensaios devem ser adaptados, substituindo-se o cimento Portland pelo material pozolânico.				

Tabela 1 – Requisitos químicos (valores expressos em porcentagem %)

Fonte: ABNT NBR 12653:2014

Tabela 2 – Requisitos físicos

Propriedade	Classe de material pozolânico			Método de ensaio
	N	C	E	
Material retido na peneira 45 µm	< 20 %	< 20 %	< 20 %	ABNT NBR 15894-3(*)
Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle	≥ 90 %	≥ 90 %	≥ 90 %	ABNT NBR 5752

Atividade pozolânica com cal aos sete dias	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa	ABNT NBR 5751
(*) Esse método de ensaio deve ser adaptado, substituindo-se o metacaulim pelo material pozolânico. Alternativamente, o método prescrito pela ABNT NBR 12826 pode ser utilizado desde que o material pozolânico retido na peneira de ensaio não apresente visualmente aglomeração de partículas..				

Fonte: ABNT NBR 12653:2014

A reação pozolânica abrange efeitos químicos e físicos. O efeito químico ocorre devido a reação química entre a alumina (Al_2O_3) e a sílica (SiO_2) amorfas presentes no material pozolânico, e a portlandita ($Ca(OH)_2$) formada na hidratação do cimento Portland, produzindo hidratos de silicato de cálcio (C-S-H), hidratos de aluminato de cálcio (C-A-H) e hidratos de aluminossilicato de cálcio (C-A-S-H), fazendo com que as propriedades mecânicas da matriz sejam melhoradas (TASHIMA, 2016).

O efeito físico da utilização de materiais pozolânicos é visto de duas formas, sendo eles o efeito de nucleação e o efeito filler. O efeito de nucleação proporciona uma cinética de reação mais veloz das partículas de cimento, aumentando assim, a quantidade de produtos hidratados em um menor intervalo de tempo, influenciando diretamente na resistência mecânica, enquanto o efeito filler é a capacidade que as finas partículas de pozolana têm de preencher os vazios da matriz, tornando o material mais coeso e dificultando a ruptura (PANESAR, 2019).

Ainda de acordo MEHTA e MONTEIRO (2008), os materiais cimentícios suplementares mais utilizados atualmente são escória granulada de alto-forno, cinzas volantes, sílica ativa e cinzas de casca de arroz, cujas características são apresentadas a seguir.

2.1.1.1 Escória granulada de alto-forno

As escórias são resíduos da indústria siderúrgica, com partículas predominante vítreas e ricas em Ca, Mg e Si, na forma de silicatos e sílico-aluminatos de cálcio amorfos (ALMEIDA, 2009). As escórias são subproduto da manufatura do ferro-gussa em alto-forno, onde acontece a fusão da ganga (minério de ferro e impurezas) e dos fundentes (calcário, coque ou carvão vegetal) que geram por meio de reações químicas a escória (MIZUMOTO; SALLES, 2012).

Quando finamente moída, as escórias adquirem propriedades ligantes em contato com água e se tornam capazes de endurecer sozinhas. Sua composição de fase vítrea é mais importante do que sua composição química para ser usado como matéria-prima para

fabricação do cimento Portland porque, quanto maior a porcentagem de fase vítrea, mais hidráulica é a escória. Segundo Calleja (1982) sua composição vítrea deve ser superior a 95%.

De acordo com Masuero et. al (1998), a geração mundial de escória de alto-forno é estimada em 120 milhões de toneladas para uma produção anual de 700 milhões de toneladas de aço. No Brasil, segundo o Instituto Brasileiro de Siderurgia (1999), são gerados aproximadamente 5,7 milhões de toneladas de escória de alto-forno por ano.

As escórias siderúrgicas começaram a ser usadas como materiais de construção na Inglaterra no final do século XVIII (1982). Sua adição no concreto provoca melhorias nas suas características, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. A distribuição das partículas de escória juntamente com sua superfície lisa, tornam a mistura mais coesiva e aumentam a fluidez do concreto no estado fresco.

De acordo com Neville (1997), cimentos com escória de alto-forno (CP II-E e CP III) são muitas vezes mais vantajosos devido a resistência ao ataque químico, tendo em vista ensaios realizados com argamassa com escória de alto-forno mostram que a permeabilidade à água é reduzida em até 100 vezes e que há uma grande redução da difusividade, em relação aos íons cloreto.

2.1.1.2 Cinza volante

De acordo com a ABNT NBR 12653/2014, as cinzas volantes podem ser definidas como “resíduos que resultam da combustão de carvão mineral pulverizado ou granulado, com atividade pozzolânica”.

As cinzas volantes caracterizam-se como pozzolanas, pois possuem capacidade de reação com cal, quando em contato com a água, originando a formação de novos compostos com propriedades aglomerantes (KIHARA, 1983).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), as cinzas volantes podem ser divididas em duas categorias que se diferem por sua composição mineralógica, suas propriedades e principalmente pelo seu teor de cálcio, onde as cinzas com baixo teor de cálcio possuem menos de 10 % de CaO e são geralmente produto da combustão do antracito e carvões betuminosos enquanto as cinzas com alto teor de cálcio possuem 15 a 40% de CaO e são produtos de combustão de carvões de lignita e sub-betuminosos.

Uma cinza volante de boa qualidade pode apresentar de 70 % a 85 % de fase vítrea, apresentando fases cristalinas, como o quartzo, mulita, hematita e magnetita, possuindo

assim uma boa reatividade com o cimento, tendo em vista que a reatividade de uma pozolana é influenciada pelo teor da fase vítrea (ISAIA, 2007).

2.1.1.3 Sílica ativa

A sílica ativa (SA) é proveniente da indústria de silício metálico e possui um elevado teor de dióxido de silício amorfo (SiO_2). Sua adição nas argamassas e concretos substituindo parcialmente o cimento, promove um aumento na sua resistência mecânica (SANJUÁN et. al, 2015; LUO; ZHOU; WANG, 2020).

A substituição do cimento por sílica ativa nos teores de 5 % a 20 % tem sido responsável por um aumento na resistência à compressão de concretos de até 36% com relação água/aglomerante igual a 0,45 após 28 dias de cura (PRADHAN; DUTTA, 2013). Com uma relação água/aglomerante de 0,60 após 90 dias de cura, os concretos podem adquirir um aumento de resistência à compressão de até 11 % (UZBAS; AYDIN, 2020).

Segundo Rossignolo (2007) e Nezerka et. al (2019), dentre as melhorias promovidas pela adição de sílica ativa nos compósitos cimentícios estão: (a) capacidade de melhorar o refinamento da estrutura porosa e o empacotamento dos sólidos, através do preenchimento dos vazios entre os grãos de cimento; (b) redução da porosidade local e do aumento na qualidade dos produtos de hidratação do cimento na região, aumentando a resistência da zona de transição entre os agregados e a pasta cimentícia; (c) exibição de propriedades pozolânicas, correspondendo à interação com o hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento, resultando na formação de silicatos de cálcio hidratado secundários (C-S-H); (d) precipitação dos produtos de hidratação nas primeiras idades devido aos sítios de nucleação, o que contribuem para a formação de cristais menores de hidróxido de cálcio.

A reatividade da sílica ativa é caracterizada por dois parâmetros, no qual o primeiro consiste na quantidade máxima de cal quimicamente fixada pela adição pozolânica. Enquanto o segundo parâmetro é a taxa de reatividade do material, que é influenciado pelo tamanho das partículas, área específica superficial, relação água/sólidos e temperatura de cura (KRAMAR; DUCMAN, 2018).

2.1.1.4 Cinza de casca de arroz

A cinza de casca de arroz (CCA) é um material considerado como uma pozolana devido às suas características e composição química. Sensale (2006) observou que essas

cinzas são de natureza silicosa, com teores de sílica entre 87 e 95 %. A sílica das cinzas é geralmente cristalina e possui três principais formas, que são quartzo, cristobalita e tridimilita, segundo uma análise das CCA provenientes de diferentes temperaturas de queima (HARA et al, 1989).

Segundo os dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2014), as cinzas de casca de arroz representam 20 % da quantidade total de arroz colhida. De acordo com a Fundação Estadual de Proteção Ambiental (2014), as cinzas da casca de arroz provenientes da queima são fontes de poluição e contaminação, impactando o meio ambiente e a saúde humana, quando não são gerenciadas da forma correta. Desse modo, a utilização das CCA como aditivo na composição de argamassas e concretos é uma forma de valorizar estes resíduos, oferecendo vantagens para o meio ambiente como a eliminação de aterros e redução do período tóxico.

2.2 Cinza de biomassa

A cinza de biomassa é um resíduo resultante da queima de biomassa florestal utilizada como parte da matriz energética dos setores industriais cerâmicos, de papel e celulose.

Essas cinzas possuem em sua morfologia, partículas de diferentes formas e tamanhos, uma composição heterogênea, bem como sua formação química, variando em função dos parâmetros do processo de incineração como o tempo de queima, do tipo de biomassa incinerada e a temperatura (TEIXEIRA et al., 2008). Desse modo, as propriedades das cinzas obtidas de diferentes biomassas, assim como cinzas obtidas da mesma biomassa com parâmetros de incineração desiguais, podem variar, como também a sua eficiência nas diferentes aplicações (MACEDO, 2009).

As pesquisas sobre o uso de cinzas de biomassa têm ganhado espaço na comunidade científica, mas ainda apresentam conclusões divergentes sobre a viabilidade do seu uso, especialmente devido às diferenças avaliadas na composição química entre as cinzas relacionadas com os processos de produção, principalmente a origem da madeira, capacidade da caldeira e o método da incineração (SAARSALMI et al. 2001, MAEDA et al. 2008, GÓMEZ-REY et al. 2012, HANISCH; FONSECA, 2013).

Demis, Tapali e Papadakis (2014) indicam os três principais tipos de cinza de biomassa: cinzas combustíveis de óleo de palma, cinzas de bagaço de cana de açúcar e cinzas de madeira, cujas características são apresentadas a seguir.

2.2.1 Cinzas combustíveis de óleo de palma

A cinza combustível de óleo de palma, popularmente conhecido no Brasil como óleo de dendê, é um subproduto da indústria de óleo de palma, tratando-se de um resíduo conseguido a partir da queima de suas fibras, cascas e cachos vazios do dendê (DEMIS, TAPALI e PAPADAKIS, 2014).

Em uma pesquisa realizada por AL-KUTTI, ISLAM e NASIR (2019), substituindo o cimento por 10% da cinza, resultou uma menor taxa de absorção de água, e assim, uma redução da permeabilidade de substâncias deletérias no concreto. Esse estudo mostrou que a cinza possui grande potencial como material de construção, visto que foi observado uma redução de 29% no teor de hidróxido de cálcio na argamassa com adição de cinza, quando comparada à argamassa somente com cimento.

2.2.2 Cinza de bagaço de cana de açúcar

De acordo com o Atlas Big (2021), no mundo são produzidas em torno de 1,9 bilhões de toneladas de cana-de-açúcar por ano, sendo o Brasil o maior produtor do mundo, com volume de produção de 768.678.382 toneladas por ano. Desse volume, 95% do bagaço é utilizado como combustível para geração de energia elétrica em caldeiras a vapor, processo que leva a formação da cinza do bagaço de cana, que são geradas na proporção de 23,8 kg de cinza para cada tonelada de bagaço (MANSANEIRA et al. 2017).

A cinza do bagaço da cana de açúcar está entre os resíduos agroindustriais mais utilizados como material pozolânico. Yogitha, Karthikeyan e Reddy (2020) estudaram o desempenho da cinza como substituto parcial do cimento Portland em concretos e comprovaram que o concreto obtido apresentou aumento de resistência, trabalhabilidade aceitável, redução da permeabilidade e resistência a condutividade térmica e elétrica quando comparado ao concreto tradicional, concluindo assim, que a cinza do bagaço da cana de açúcar pode ser aproveitado na adição do concreto com baixo custo e de forma sustentável satisfazendo os parâmetros de resistência.

2.2.3 Cinza de biomassa de madeira

A cinza de biomassa de madeira (CBM), objeto de estudo dessa pesquisa, é uma mistura complexa de resíduos orgânicos e inorgânicos gerados devido à combustão de

madeira e produtos de madeira como cavacos serradura, casca etc. A CBM pode apresentar características semelhantes às cinzas volantes, que são obtidas do carvão mineral, que é uma madeira fossilizada (DEMIS, TAPALI, PAPADAKIS, 2014).

A biomassa de madeira é uma biomassa leve e pode ser conhecida como um combustível inesgotável, sendo assim extremamente atraente para indústrias e usinas de ignição de biomassa em larga escala (GORI et al. 2013). Cerca de 3% da CBM é gerada durante a incineração de 1 tonelada da biomassa de madeira, por esta razão, são realizados estudos da cinza como material cimentício suplementar. A substituição parcial do cimento por CBM pode influenciar nas propriedades das argamassas, segundo Chowdhury, Mishra e Suganya (2015), a substituição diminui os valores de retração por secagem.

Medeiros et al. (2010) estudaram a incorporação de cinza de lenha (CL), coletadas de uma indústria ceramista da cidade de São Sebastião – DF, em massa cerâmica para a produção de blocos. Feito uma análise química da CL coletada, foi encontrado 43,32% de CaO, 7,36% de MgO e 8,24% de K₂O. Após uma análise de difração de raios X foi verificado que a CL tem em sua composição quartzo (SiO₂), aluminato de magnésio (MgAl₂O₄), feldspato potássico e óxido de cálcio (CaO). Em seu comportamento granulométrico, a CL apresentou 87,49% de fração de silte, 8,44% de fração de argila e 4,04% de fração de areia com diâmetro médio de 25,62 µm. Medeiros et al. (2010) concluiu em sua pesquisa que o aumento na quantidade de CL pode reduzir a absorção de água e aumentar o módulo de ruptura por flexão.

Resende (2013), pesquisou o efeito da adição de cinzas de cavaco de lenha de Eucalipto como material cimentício suplementar. A cinza foi coletada de uma caldeira alternativa da empresa DPA-Nestlé localizada na cidade de Ibiá-MG. O material coletado foi dividido em três grupos: cinza in natura, cinza moída e cinza requeimada em forno por 2 horas na temperatura de 600°C. Cada grupo de cinza foi substituído em 0, 5, 10 e 15% em relação ao cimento CP V utilizado. Foram realizados os ensaios de espectrometria por energia dispersiva de raios X para definir a composição química para os três grupos de cinzas, indicando baixo teor de matéria orgânica e alto teor de cálcio (aproximadamente 50%) e ferro (aproximadamente 15%).

Através do ensaio de espectroscopia de raios X, as cinzas de cavaco de eucalipto apresentaram em sua composição química 27,4% de óxido de cálcio, 22,6% de óxido de alumínio e 10,9% de óxido de ferro. Apresentou ainda, altos valores de perda ao fogo para as cinzas in natura e moídas, 47,5% e 51,0%, respectivamente, enquanto a cinza requeimada apresentou 15% de perda ao fogo. Nos ensaios de comportamento mecânico, todas as cinzas

de eucalipto apresentaram a característica de preenchimento de vazios. As cinzas moídas e requeimadas apresentaram uma reatividade que melhorou as propriedades do compósito no estado endurecido. Resende (2013) concluiu em sua pesquisa, que a substituição de 5% de cimento pela cinza estudada na produção do concreto, não altera a quantidade de compósitos produzidos, desse modo, a cinza de cavaco de eucalipto pode ser utilizada como um material cimentício suplementar.

Tamanna et al. (2020) realizou uma pesquisa com resíduos provenientes da queima da madeira, e tal material apresentou-se como fonte pozolânica promissora para futura substituição do cimento Portland, tendo vantagens como melhoria na durabilidade do concreto e prática ao desenvolvimento sustentável. Em resumo, o estudo da incorporação da cinza em misturas de concreto resultou em uma resistência e trabalhabilidade reduzidas, porém com a durabilidade estendida, podendo ser útil para a construção sustentável.

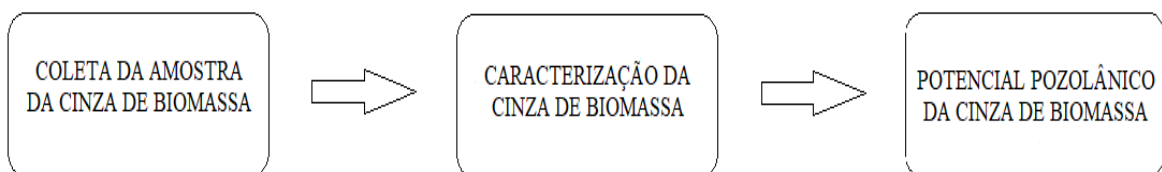
De modo geral, as pesquisas não apontam para uma tendência de comportamento, o que provoca a necessidade de avanços nos estudos desses materiais, alterando o tipo de biomassa, o tempo de incineração e os demais parâmetros.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão apresentados a delimitação da pesquisa, os procedimentos realizados para caracterização das cinzas, assim como o levantamento de dados para verificação do potencial pozolânico do material.

A pesquisa foi realizada seguindo a sequência de passos apresentados no fluxograma da Figura 1.

Figura 1 – Procedimento metodológico



Fonte: Autor (2023)

Os procedimentos experimentais foram executados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da Universidade Federal do Ceará (UFC) – Campus do Pici, Fortaleza-CE.

3.1 Materiais

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram: o material pozolânico correspondente a cinza de biomassa de madeira, areia normal do Instituto de Pesquisa

Tecnológica (IPT), conforme a ABNT NBR 7414, cimento Poty CP II-F-32, cuja massa específica é $3,0 \text{ g/cm}^3$, e o hidróxido de cálcio P.A. que possui massa específica de $2,24 \text{ g/cm}^3$ conforme fabricante.

A amostra do material foi coletada de diferentes fornos da Cerâmica Mondubim, que é uma olaria destinada à produção de blocos cerâmicos localizada no distrito de Curral Velho, a uma distância de aproximadamente 15 km da zona urbana de Crateús.

A coleta foi realizada em junho de 2022 e posteriormente foi peneirada na peneira 200 com abertura de $75 \mu\text{m}$, como podemos ver na Figura 2.

Figura 2 – Cinza a) Ponto de coleta; b) Peneiramento; c) Cinza processada



Fonte: Autor (2023)

O tipo de madeira utilizado para queima são as madeiras secas da região, como mofumbo (*Combretum leprosum*) e jurema (*Mimosa ophthalmocentra*). Além disso, a incineração acontece por um período de 20 horas à temperatura que varia de 600 a 800°C .

3.2 Métodos de pesquisa

3.2.1 Caracterização da cinza

A fim de saber se a cinza da olaria atende aos requisitos químicos e físicos estabelecidos na ABNT NBR 12653 foram realizados os seguintes ensaios: - Granulometria a laser, realizada pelo instrumento Malvern Mastersizer 2000 na Fábrica de cimento Apodi-Ceará, para a obtenção da distribuição do tamanho das partículas; Determinação da

massa específica, pelo método do cimento Portland (Figura 3), segundo a ABNT NBR 16605/2017; Determinação da finura por meio da peneira 45 micrômetros, segundo a ABNT NBR 15894-3. A composição química da CBM foi caracterizada por meio de Espectroscopia por energia dispersiva de raios X, realizada no laboratório de geologia da Universidade Federal do Ceará no campus do Pici em Fortaleza/CE.

3.2.2 Potencial pozolânico

Para avaliar o potencial pozolânico das cinzas residuais provenientes dos fornos da Indústria Ceramista Mondumbim, foram produzidas argamassas para a determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias segundo a ABNT NBR 5752/2014 (Ensaio 01), e para a determinação da atividade pozolânica com cal aos 7 dias de acordo com a ABNT NBR 5751/2015 (Ensaio 02).

Na Figura 3 tem-se a confecção dos corpos de prova seguido o seu rompimento com a prensa hidráulica.

Figura 3 – Moldes e rompimento dos corpos de prova a) ensaio 02; b) ensaio 01; c) rompimento; d) corpo de prova rompido



Fonte: Autor (2023)

Foram moldados seis corpos de prova cilíndricos (50x100) mm para cada argamassa do Ensaio 01, sendo a primeira referência com cimento Portland. A segunda com a adição da cinza de biomassa de madeira, totalizando doze corpos de prova. Para o ensaio 02, foram feitos três corpos de prova cilíndrico (50x100) mm para ruptura à compressão aos 7 dias.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização Pozolânica

4.1.1 Características físicas

Na Tabela 3 são mostrados os resultados da massa específica e do módulo de finura (F45), além do diâmetro médio, D10, D50 e D90, que indicam, respectivamente, que 10%, 50% e 90% das partículas possuem um diâmetro menor do que o valor indicado.

Tabela 3 – Caracterização da CBM

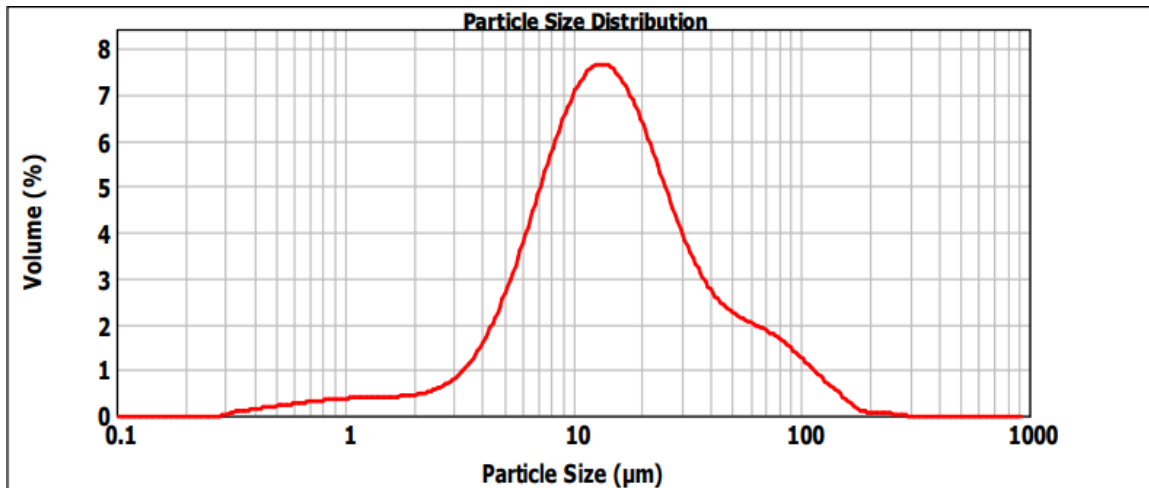
Massa específica (g/cm ³)	2,87
F45 µm (%) Amostra	12
D10% (µm)	4,918
D50% (µm)	14,384
D90% (µm)	53,489
Dmédio (µm)	23,167

Fonte: Autor (2023)

Nota-se que a amostra do resíduo possui massa específica menor que a do cimento, indicando partículas mais leves. De acordo com a norma NBR 12653:2014, o requisito da retenção de material na peneira (F45 µm) é de até 20% da massa inicial. Desse modo, a cinza de biomassa de madeira resultou uma porcentagem de 12%, atingindo nessa situação, um pré-requisito de um material pozolânico.

No Gráfico 1 são apresentados os resultados da análise granulométrica da CBM. A curva em vermelho indica a distribuição granulométrica da amostra da cinza coletada.

Gráfico 1 – Distribuição das partículas da CBM



Fonte: Autor (2023)

De acordo com a Tabela 3, a cinza tem um percentual de 10% com partículas de diâmetro menores ou iguais a 4,91 µm, 50% das suas partículas possuem diâmetro menores ou iguais a 14,384 µm e 90% das partículas têm diâmetro menor que 53,49 µm.

Tashima (2006) realizou a caracterização da cinza de casca de arroz (CCA) para analisar seu comportamento em matrizes de cimento Portland, e no ensaio de granulometria a laser feito pelo autor, a cinza atingiu um diâmetro médio de 11,076 µm. Esse resultado diverge da presente pesquisa, que teve um diâmetro médio de 23,167 µm, possivelmente, devido ao tempo de 20 minutos de moagem que a cinza de casca de arroz passou como tratamento prévio. O autor realizou um estudo da influência do tempo de moagem da cinza na granulometria, tomando amostras com 2,5 min.; 5 min.; 10 min.; 15 min.; 20 min. e 60 min. de moagem para a análise granulométrica e observou que a máxima eficiência do moinho de bolas utilizado foi com 20 minutos atingindo 11,076 µm. Já com 60 minutos notou-se que a CCA começou a aglomerar-se, aumentando o diâmetro médio da cinza. No tempo de 2,5 minutos, a cinza apresentou um diâmetro médio de 20,026 µm, o que se aproxima do resultado do diâmetro médio da cinza do presente trabalho sem tratamento prévio.

4.1.2 Características químicas

Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Composição química da Cinza de Biomassa de Madeira (CBM)

Amostra	MgO (%)	SiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	SO ₃ (%)	K ₂ O (%)	CaO (%)
CBM	3.78	2.34	2.49	1.54	3.61	86.23

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Segundo a norma ABNT NBR 12653:2014, para que um resíduo seja classificado como material pozolânico, este deve apresentar em sua composição, um somatório nos teores de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ equivalente a 70% para as classes N e C, e equivalente a 50% para a classe pozolânica E. Analisando a composição química da cinza estudada, notou-se que essa condição não é satisfeita, visto que possui um teor de 2,34% de SiO₂ e teores nulos de Al₂O₃ e Fe₂O₃.

Ainda segundo a norma, o material deve respeitar uma quantidade máxima de 4% de SO₃ para a classe pozolânica N, e de 5% para as classes C e E. Segundo os dados obtidos na Tabela 3, percebeu-se que a CBM respeitou o critério referente à quantidade máxima de SO₃, com 1,54%.

Esses resultados são semelhantes ao que foi visto no estudo realizado por Silva et al. (2020), que coletaram cinza de uma indústria cerâmica da região de São Paulo, que produzem blocos em fornos intermitentes do tipo abóbora. As cinzas provenientes da queima da lenha de eucaliptos (*Eucalyptus spp.*), e casca de pinus (*Pinus spp.*) à temperatura que variavam de 600 a 800°C tiveram como resultados uma grande quantidade de óxido de cálcio (39,35%) e somatória de 28,10% nos teores de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃, através do ensaio de fluorescência de raios-X (FRX). Ainda segundo o autor, a cinza não apresentou nenhuma quantidade de SO₃.

Outro estudo também semelhante foi o de Borlini et al. (2005), caracterizando quimicamente cinzas de eucalipto provenientes de fornos de olarias, que também apresentaram um elevado teor de óxido de cálcio (CaO), com 32,6%.

Lima e Cordeiro (2021) pesquisaram sobre a cinza da palha de milho (CPM) e obtiveram como resultado teores de 94,20% de SiO₂ e 0,20% de Fe₂O₃ em sua composição química. Esses resultados divergem dos valores apresentados nesse estudo (2,34% de SiO₂ e teores nulos de Al₂O₃ e Fe₂O₃) devido ao procedimento que a cinza de palha passou para se tornar uma CPM de alta reatividade, por um processo de lixiviação ácida controlada, incinerada em duas etapas e moagem altamente fina, enquanto a cinza do mofumbo e jurema passaram somente por uma incineração de 600 a 800°C e peneiramento na peneira 200.

Salvo et al. (2015) coletaram cinzas de biomassa de três usinas diferentes, uma delas sendo da central elétrica de palha localizada na Suécia. Após uma análise de difração de

raio-X (DRX), a cinza estudada obteve uma composição de 57,30% de SiO₂, 0,4% de Al₂O₃ e 0,6% de Fe₂O₃. Apesar dos baixos teores de ferro e alumina, a cinza atingiu o pré-requisito de classe pozolânica E. E devido ao seu alto teor de sílica, a cinza pode ser potencialmente usada como material cimentício suplementar (MCS) após a redução do teor alcalino. Esse resultado diverge do presente estudo possivelmente devido ao tipo de cinza e ao tratamento prévio pela qual a cinza passou, que além do peneiramento, passou por moagem e 48 horas de lavagem.

No entanto, segundo Hills et al. (2020), a diferença nos valores dos teores químicos da cinza é explicada pela influência do estado do material coletado para a pesquisa, a perda de nutrientes das plantas, às condições de colheita e o tipo de solo utilizado para o cultivo.

4.2 Potencial Pozolânico

4.2.1 Índice de atividade pozolânica com cimento Portland

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos de resistência à compressão no ensaio de índice de desempenho com cimento Portland (ABNT NBR 5752/2014) referente a argamassa A contendo cimento CP II-F-32, areia normal e água, e argamassa B contendo 25% de massa de cinza em substituição ao cimento, com 75% de massa de cimento CP II-F-32, areia normal e água.

Tabela 5 – Resistência à compressão das argamassas

Corpo de Prova	Resistência Compressão (Mpa)
CP 1 A	23,67
CP 2 A	25,10
CP 3 A	24,77
CP 4 A	22,83
CP 5 A	22,57
CP 6 A	23,84
CP 1 B	18,81
CP 2 B	17,14
CP 3 B	18,67
CP 4 B	12,26
CP 5 B	16,68
CP 6 B	17,81

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

A argamassa de referência atingiu a máxima resistência à compressão de 25,10 MPa, enquanto a substituição de 25% do volume de cimento pela cinza de biomassa de madeira diminuiu a resistência para 18,81 MPa. De acordo com a norma NBR 12653:2014, é estabelecido um percentual mínimo de 90% da resistência à compressão da argamassa de referência para a atribuição do potencial pozolânico à adição residual ensaiada. Desse modo, as argamassas com adições residuais devem atingir uma resistência mínima de 22,6 MPa, o que não ocorreu com a adição da CBM.

4.2.2 Índice de atividade pozolânica com cimento cal

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos de resistência à compressão no ensaio de determinação da atividade pozolânica com cal (ABNT NBR 5752/2014).

Tabela 6 – Resistência à compressão das argamassas com cal

Corpo de Prova	Resistência Compressão (Mpa)
CP 1	0,81
CP 2	0,65
CP 3	0,67

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

As prescrições da ABNT NBR 12653:2014 estabelecem uma resistência à compressão mínima de 6 MPa. Assim sendo, a argamassa com cal e CBM ensaiada não atingiram o valor mínimo requisitado, chegando apenas a uma resistência máxima de 0,81 MPa. Desse modo, a cinza de biomassa de madeira não é considerada pozolana, o que está de acordo com o ensaio realizado com cimento. Este comportamento mostra que não houve uma atividade química significativa entre o material estudado e o hidróxido de cálcio.

Os baixos valores de resistência à compressão podem ser explicados pelo leve indício de atividade pozolânica evidenciado na caracterização química no ensaio de Espectroscopia por energia dispersiva, indicando que a cinza do mofumbo e da jurema não apresenta reatividade suficiente para incorporação em argamassas e concretos em substituição total ou parcial do cimento.

Tashima (2006) que realizou o estudo da cinza de casca de arroz (CCA) e sílica ativa (SA), mencionados anteriormente, obteve resultado positivo nos ensaios de resistência à

compressão. As duas cinzas apresentaram ganhos de resistência para todas as porcentagens de substituição do cimento (5, 10 e 15%), à medida que aumentou a porcentagem de substituição, o ganho de resistência aumentou. Todas as amostras atingiram o pré-requisito de percentual mínimo de 90% da resistência à compressão da argamassa de referência. Esse fato pode ser explicado já que foi introduzido um material pozolânico que além do efeito químico mencionado anteriormente, também atua como filler diminuindo o tamanho dos poros e aumentando por consequência, a resistência das argamassas. Além disso, o ganho de resistência foi associado a uma elevada fixação de cal, o que não aconteceu com a cinza da jurema e do mofumbo.

5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho mostram que a cinza estudada não apresenta características adequadas para a utilização como material pozolânico em componentes do cimento Portland.

A caracterização química da cinza de biomassa de madeira (CBM), realizada através do método de espectroscopia por energia dispersiva, constatou que a cinza apresentou baixo teor de sílica (alumina e ferro). A somatória dos teores dos elementos em sua composição não satisfaz o valor mínimo de 50% exigido pela ABNT NBR 12653:2014 para que seja classificado como material pozolânico.

Esse caráter não pozolânico da CBM foi confirmado introduzindo o resíduo em matrizes do cimento Portland, que apresentou resultados negativos quanto ao ganho de resistência.

Apesar de que a cinza não apresentou características de material pozolânico, a utilização desta pode ser considerada na aplicação de estudos futuros na temática referente à ativação alcalina, considerando que a cinza apresentou elevada concentração de cálcio, segundo os resultados da espectroscopia por energia dispersiva. Além disso, pode ser realizado um estudo de caso referente às indústrias ceramistas de Crateús, avaliando o seu porte, sua produção e a quantidade de resíduos gerados.

REFERÊNCIAS

- AL-KUTTI, W.; ISLAM, A. B. M. S.; NASIR, M. Potential use of date palm ash in cementbased materials. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, Amsterdam, v. 31, n. 1, p. 26–31, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2017.01.004>.
- ALMEIDA, J. A. Influência da adição de resíduo siderúrgico na performance do concreto. 2009. 74 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Belo Horizonte, MG
- ALMEIDA, L.S.; SOARES R.A.L.; MATOS, J.M.E. Efeito de resíduos de gesso e de granito em produtos da indústria de cerâmica vermelha: Revisão bibliográfica. *Revista Matéria* 25(1),e-12568. 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NOFMAS 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/>>.
- BAJPAI, R., CHOUDHARY, K.,SRIVASTAVA, A., et al. “Environmental impact assessment of fly ash and silica fume based geopolymer concrete,” *Journal of Cleaner Production*, v. 254, 2020.
- 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.192-196, set. 2005.
- CALLEJA, J. Escorias y cementos siderúrgicos. In: *MATERIALES DE CONSTRUCCION*. Madrid, 1982.
- Concreto Ecosmart. Impacto ambiental – produção de cimento e CO2 desafio. Canadá: Fundação Ecosmart; 2008.
- DEMIS, S., TAPALI, J. G., PAPADAKIS, V.G. Na investigation of the effectiveness of the utilization of biomass ashes as pozzolanic materiais. *Construction and Building Materils* 68, pp. 291-300. (2014).
- DIÁRIO DO NORDESTE. Ceará é o 5º do País em empresas ceramistas. 2014. Disponível em: <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/negocios/ceara-e-o-5-do-pais-em-empresasceramistas-1.1134275>.
- GLUITZ, A. C.; MARAFÃO, D. (2013). Utilização da cinza da madeira de eucalipto na substituição parcial do cimento Portland em argamassa. Trabalho de Conclusão de Curso de

bacharelado em Química Industrial. Universidade Tecnológica do Paraná. p. 53. Pato Branco-PR.

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.

HARA, N. et al. *Hydrothermal Reactivity of Rice Husk Ash and its Use for Calcium Silicate Products* In: Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in concrete, Trondheim, Normay. *Proceedings...CAMMET, ACI SP-114*, p. 499-516, 1989.

HILLS, C. D.; TRIPATHI, N.; SINGH, R. S.; CAREY, P. J.; LOWRY, F. Valorisation of agricultural biomass-ash with CO₂. *Scientific Reports*, [S. l.], v. 10, 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, <http://www.ibge.gov.br>. Acessado em fevereiro de 2014.

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

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

KRAMAR, S., DUCMAN, V. “Evaluation of ash pozzolanic activity by means of the strength activity index test, frattini test and DTA/TG analysis,” *Tehnicki Vjesnik*, v. 25, n. 6, pp. 1746–1752, 2018.

LIMA, C. P. F. de; CORDEIRO, G. C. Evaluation of corn straw ash as supplementary cementitious material: Effect of acid leaching on its pozzolanic activity. *Cement, Campos dos Goytacazes*, v. 4, 2021.

LUO, T., ZHOU, Y., WANG, Q. “Influence of ultra-fine slag and silica fume on properties of highstrength concrete,” *Magazine of Concrete Research*, v. 72, n. 12, pp. 610–621, 2020.

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.

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>.

MAIA, A. L. F. Escória granulada como material cimentício para melhoria dos parâmetros de durabilidade. (2016).

MARTINS, M. M.; MEDEIROS, R. Investigação da influência do uso de Materiais Cimentícios Suplementares em substituição parcial ao Cimento Portland. In: RIUNI, Repositório Institucional, 2018.

MASUERO, A. B. et al. Utilização de escórias de aciaria e de cobre como adições para concretos. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF CONCRETE TECHNOLOGY. Anais. Buenos Aires, 1998.

MEDEIROS, E. N. M.; SPOSTO, R. M.; NEVES, G. A.; MENEZES, R. R. (2010). Incorporação de cinza de lenha, lodo de estação de tratamento de água e cinza de casca de arroz em massa cerâmica. Utilização da técnica de planejamento. (Grog incorporation in ceramic mass to manufacture of bricks. A study of the physical-mechanical properties). Revista Cerâmica. Nº 56. p. 399-404.

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

MENEZES, R. R., NEVES, G. A., FERREIRA, H. C., LIRA, H. L., “Recycling of granite industry waste from the northeast region of Brazil”, Environmental Management and Health, West Yorkshire, v. 13, n.2, pp. 134-145, 2002.

M. Gori, B. Bergfeldt, J. Reichelt, P. Sirini, Efeito do envelhecimento natural na estabilidade do volume de RSU e resíduos de incineração de resíduos de madeira, Waste Manag. 33 (2013) 850–857

MIZUMOTO, C.; SALLES, F. M. Efeitos da aplicação de escória granulada de alto forno em diferentes finuras em composições de argamassa. Anais do 54o Congresso Brasileiro do Concreto CBC2012, n. 1, p. 1–14, 2012.

NETCERAMICS. Informações Técnicas - processo de fabricação. 2009a. Disponível em: .

NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. 2ed. São Pulo: PINI, 1997. 828p.

NEŽERKA, V., BÍLÝ, P., HRBEK, V., et al. “Impact of silica fume, fly ash, and metakaolin on the thickness and strength of the ITZ in concrete,” Cement and Concrete. Composites, v. 103, n. January, pp. 252-262, 2019.

PANESAR, D. K. Supplementary cementing materials. In: MINDESS, S. Developments in the formulation and reinforcement of concrete. 2. ed. Toronto: Elsevier, 2019. Cap. 3, p. 55–85.

PRADHAN D., DUTTA, D. “Influence of Silica Fume on Normal Concrete,” International Journal of Engineering Research and Applications, v. 3, n. 5, pp. 79-82, 2013.

RESENDE, D. S. (2013). Estudo do efeito da incorporação de cinzas de cavaco de Eucalipto como material suplementar. Tese de doutorado apresentado ao curso de Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Ouro Preto. 166 p. Ouro Preto-MG.

ROSSIGNOLO, J.A. “Avaliação da zona de transição interfacial pasta-agregado leve em concretos com sílica ativa e látex SBR,” *Matéria* (Rio Janeiro), v. 12, n. 3, pp. 532–540, 2007.

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

SALVO, M; RIZZO, S; CALDIROLA, M; BIANCHI, M. FERRARIS, M. Biomass ash as Supplementary cementitious material. *Advances in Applied Ceramics* 114, pp. S3-S10. 2015.

SANJUÁN, M.Á., ARGIZ, C., GÁLVEZ, J.C., et al. “Effect of silica fume fineness on the improvement of Portland cement strength performance,” *Construction and Building Materials*, vol. 96, pp. 55–64, 2015.

S. Chowdhury, M. Mishra, O. Suganya, A incorporação de cinzas de resíduos de madeira como um material de substituição parcial do cimento para fazer concreto de grau estrutural: uma visão geral, *Ain Shams Eng. J.* 6 (2015) 429–437, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2014.11.005>

SENSALE, G. R. B. "Strength development of concrete with rice-husk ash", *Cement and Concrete Composites*, v.28, n.2, p.158-160, USA. (2006).

SILVA, A. C. A.; MORAES, T. J.; MACHADO, L. F. M. Proposta para adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar como material pozolânico em pavimentações. *Exatas e Tecnológicas*, [S. l.], v. 4, n. 1, 2020.

TAMANNA, K. et al. Utilization of wood waste ash in construction technology: a review. *Construction and Building Materials*, Amsterdam, v. 237, 2020.

TASHIMA, M. M. Assessment of pozzolanic/hydraulic reactivity of vitreous calcium aluminosilicate (VCAS). *Materials & Design*, London, v. 96, p. 424–430, 2016.

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.

UM MAGUESVARI, M.;SUNDARARAJAN, T. Influência das cinzas volantes e agregados finos nas características do concreto permeável, *International Journal of Applied Engineering Research*, v. 12, (2017), pp. 1598 – 1609

UZBAS, B., AYDIN, A.C. “Microstructural Analysis of Silica Fume Concrete with Scanning Electron Microscopy and X-Ray Diffraction,” *Engineering, Technology & Applied Science Research*, v. 10, n. 3, pp. 5845-5850, 2020.

VASKE, N. R. (2012). Estudo preliminar da viabilidade do aproveitamento da cinza proveniente de filtro multiciclone pela combustão de lenha de eucalipto em caldeira fumotubular como adição ao concreto. Tese de doutorado em Engenharia Civil pela

Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 325 p. Porto Alegre-RS.

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.

ANEXO A – RELATÓRIO DO ENSAIO DE GRANULOMETRIA A LASER

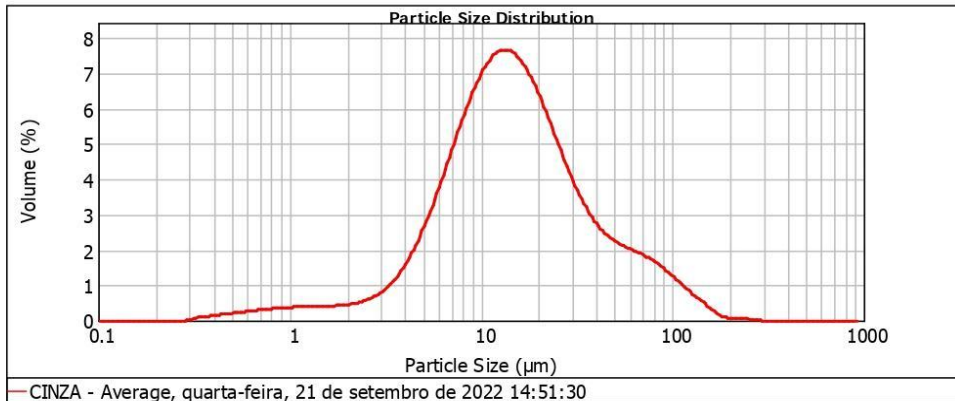


Result Analysis Report

Sample Name: CINZA - Average
Sample Source & type: hytalo.costa
Sample bulk lot ref: Averaged
SOP Name:
Measured by: hytalo.costa
Result Source: Averaged
Measured: quarta-feira, 21 de setembro de 2022 14:51:30
Analysed: quarta-feira, 21 de setembro de 2022 14:51:31

Particle Name: Default	Accessory Name: Scirocco 2000M	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Normal
Particle RI: 1.520	Absorption: 0.1	Size range: 0.100 to 1000.000 um	Obscuration: 2.95 %
Dispersant Name: Dry dispersion	Dispersant RI: 1.000	Weighted Residual: 0.253 %	Result Emulation: Off
Concentration: 0.0007 %Vol	Span : 3.377	Uniformity: 1.04	Result units: Volume
Specific Surface Area: 0.755 m²/g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 7.949 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 23.167 um	

d(0.1): 4.918 um d(0.5): 14.384 um d(0.9): 53.489 um



Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.35	11.482	6.87	120.226	0.67	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.36	13.183	6.90	138.038	0.43	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.37	15.136	6.64	158.489	0.20	1669.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.39	17.378	6.13	181.970	0.07	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.41	19.953	5.46	208.930	0.05	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.48	22.909	4.69	239.883	0.03	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.59	26.303	3.94	275.423	0.00	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.01	2.884	0.77	30.200	3.26	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.09	3.311	1.06	34.674	2.71	363.078	0.00	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.12	3.802	1.47	39.811	2.31	416.869	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.16	4.365	2.03	45.709	2.06	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.20	5.012	2.72	52.481	1.89	549.541	0.00	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.23	5.754	3.53	60.256	1.77	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.26	6.607	4.39	69.183	1.62	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.29	7.586	5.25	79.433	1.43	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.32	8.710	5.99	91.201	1.19	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.34	10.000	6.56	104.713	0.92	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096	0.35	11.482	6.87	120.226	0.67	1258.925	0.00		

Operator notes: 21/09/2022

