

LETÍCIA FREITAS ASSIS

**CARACTERIZAÇÃO DE CINZAS DE BIOMASSA E POTENCIAL DE
APLICAÇÃO COMO MATERIAL POZOLÂNICO OU ATIVADOR
ALCALINO**

Ilha Solteira

2022

**CARACTERIZAÇÃO DE CINZAS DE BIOMASSA E POTENCIAL DE
APLICAÇÃO COMO MATERIAL POZOLÂNICO OU ATIVADOR
ALCALINO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Estadual Paulista – Campus de Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de conhecimento: Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Mauro Mitsuuchi Tashima.

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

A848c Assis, Letícia Freitas.
Caracterização de cinzas de biomassa e potencial de aplicação como material pozolânico ou ativador alcalino / Letícia Freitas Assis. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2022
138 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Estruturas, 2022

Orientador: Mauro Mitsuuchi Tashima
Inclui bibliografia

1. Caracterização. 2. Resíduos agroindustriais. 3. Materiais pozolânicos. 4. Ativação alcalina. 5. Condutividade elétrica e pH.


Raiane da Silva Santos

Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Departamento Técnico de Biblioteca e Documentação
CRB/3 - 0008



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: CARACTERIZAÇÃO DE CINZAS DE BIOMASSA E POTENCIAL DE APLICAÇÃO COMO MATERIAL POZOLÂNICO OU ATIVADOR ALCALINO

AUTORA: LETÍCIA FREITAS ASSIS

ORIENTADOR: MAURO MITSUUCHI TASHIMA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em ENGENHARIA CIVIL, área: Estruturas pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. MAURO MITSUUCHI TASHIMA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / Universidade Estadual Paulista

Profa. Dra. MARCIA REGINA DE MOURA AOUADA (Participação Virtual)
Departamento de Física e Química / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. EVERTON JOSÉ DA SILVA (Participação Virtual)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, Campus Ilhéus / Instituto Federal da Bahia

Ilha Solteira, 05 de abril de 2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus que me proporcionou saúde e ânimo para tornar tudo possível.

A todos que auxiliaram direta ou indiretamente na elaboração desse trabalho.

Aos meus pais, Adenir e Jaqueline, por não pouparem esforços, sempre me apoiando em minhas decisões, os grandes responsáveis por terem me feito chegar até aqui.

Ao meu irmão, Fábio, por estar sempre disposto a me ajudar, pelo exemplo e carinho.

Ao Arthur pelo companheirismo, compreensão e motivação, sempre me apoiando nos momentos difíceis.

A minha avó Guilhermina, por sempre me ter em suas orações, e por todo cuidado.

A tia Alessandra por estar sempre disposta a me auxiliar e por todo o carinho.

A toda a minha família, primos, tios e avós, que de alguma forma me incentivou, me apoiou, e participou da minha educação.

A todos os professores que me incentivaram e me apoiaram durante a faculdade, só assim fui capaz de prosseguir em meus estudos, especialmente a Maria Gabriella, Marcelo Pedreiro, Edson Casarotti, Márcio Evaristo e Carmen.

Aos meus amigos Tatiane, Mateus e toda a família, pela cumplicidade, compartilhando tantos momentos comigo durante a faculdade.

Ao meu orientar Prof. Dr. Mauro, e aos professores Dr. Jorge e Dr. José Luiz Pinheiro Melges, que me auxiliaram desde o começo, e sempre compartilharam seus conhecimentos comigo.

Ao professor Dr. Rogério, principalmente pelo exemplo de professor que foi para mim. Foi com ele que fiz meu estágio docência, tive essa honra, fica meus sinceros agradecimentos.

Aos professores da minha banca, Prof. Dr. Everton e Professora Dra. Márcia, por todas as atribuições e colaborações em busca da melhora do trabalho, e, também por aceitarem o convite de compor a minha banca, momento tão importante em minha vida.

A todos os membros do grupo de pesquisa Materiais Alternativos de Construção (MAC) pelo apoio no desenvolvimento da pesquisa, especialmente ao Lucas, Rodrigo, Matheus, Alan, Marcelo, Josi, Gean e Karina pela parceria.

Agradeço também todos os técnicos do Laboratório Central de Engenharia Civil da FEIS/UNESP, Gilson, Flávio, Osias e Natália, por estarem sempre dispostos a me auxiliar todas as vezes que precisei.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Gostaria também de fazer atribuições a dois sites que utilizei na elaboração da primeira figura apresentada nesta dissertação, os sites são flaticon.com e vecteezy.com.

*A curiosidade busca caminhos, mas
é o empenho que os percorrem...*

*“Comece onde você está. Use o que
você tem. Faça o que você pode”.*

Arthur Ashe.

“Viver é estar em constante aprendizado [...]”.

Rangel C. Rodrigues.

*“Quem não aprende no
amor, aprende na dor”.*

Rodrigo Masí.

RESUMO

O concreto é o material artificial mais utilizado no mundo (10 Gt/ano). Nos primeiros onze meses de 2021, o consumo mundial de cimento aumentou 3,6% em relação a 2020. Estima-se que a fabricação do cimento é responsável por 8% das emissões antropogênicas globais de CO₂, consome 85 kWh de energia elétrica e 3,1 GJ de energia térmica por tonelada de cimento. Quase 30% da emissão de CO₂ já foi reduzida nos últimos 25 anos por meio da adoção de fornos mais eficientes, e, portanto, existe pouca margem para melhorias adicionais. Visando o desenvolvimento sustentável a indústria cimenteira pode utilizar material pozzolânico para fabricação de cimentos com menores proporções de clínquer e, consequentemente, reduzir o consumo de energia e emissões de CO₂. Paralelo a isso, existe a possibilidade da utilização de um aglomerante alternativo que não utiliza o cimento Portland, denominado aglomerante ativado alcalinamente (AAA). Estudos feitos com resíduos agroindustriais (cinzas de biomassa) têm apresentado resultados satisfatórios e são amplamente disponíveis já que grandes quantidades de resíduos são geradas. Nesse contexto, esta pesquisa propõe estudar algumas cinzas de biomassa, e seus potenciais pozzolânicos e alcalinos. Para tal, resíduos da agroindústria (palha de milho, casca de soja, casca de café, casca de laranja, casca de banana, folha de bananeira e folha de bambu) foram calcinados a 600 °C durante 1 hora em mufla, foram moídos e peneirados na peneira 0,75 mm e denominadas cinzas teste. Então, as cinzas teste e as cinzas parâmetro (cinza da casca de arroz e cinza do bagaço de cana) foram caracterizadas por meio da Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX) e Difração de Raios X (DRX). Após a caracterização das cinzas, objetivando analisar a reatividade pozzolânica e o potencial alcalino, foram preparadas suspensões com seis diferentes proporções de cal/cinza (2,0:8,0; 2,5:7,5; 3,0:7,0; 3,5:6,5; 4,0:6,0 e 4,5:5,5), e estas foram monitoradas através de medidas de condutividade elétrica e pH a 60 °C, durante 7 dias consecutivos. Com isto, observou-se uma redução nos valores de pH e condutividade elétrica, no caso das cinzas com propriedades pozzolânicas, e um aumento, no caso das cinzas com potencial alcalino. A cinza da folha de bambu apresentou comportamento pozzolânico. A cinza da casca de café e de banana foram capazes de atuar como ativador alcalino em argamassas, proporcionando resistência média à compressão comparável às obtidas com as argamassas ativadas com reagentes químicos comerciais. A cinza da casca de café proporcionou 34,27 MPa de resistência à compressão, isso corresponde ao aumento de 181,96% quando comparada à resistência atingida pela argamassa padrão sem ativador e 8,53% comparada à argamassa ativada com hidróxido de sódio. Já a cinza da casca de banana, gerou 47,61 MPa de resistência à compressão, que significa um aumento de 16,31% em relação a argamassa padrão ativada com hidróxido de potássio, 50,80% em relação a argamassa ativada com hidróxido de sódio e 291,76% comparada a argamassa controle sem ativador alcalino. A análise de pH e condutividade elétrica das cinzas da casca de café e da casca de banana demonstrou que a liberação de álcalis foi quase instantânea, indicando que os álcalis ficam disponíveis imediatamente para que a cinza atue como ativador alcalino. Sendo assim, foi concluído que a cinza da folha de bambu é uma cinza pozzolânica e as cinzas da casca de café e da casca de banana são cinzas que podem ser utilizadas como ativador alcalino alternativo na elaboração de argamassas e concreto.

Palavras-chave: caracterização; resíduos agroindustriais; materiais pozzolânicos; ativação alcalina; condutividade elétrica e pH.

ABSTRACT

Concrete is the most used artificial material globally (10 Gt/year). In the first eleven months of 2021, world cement consumption increased by 3.6% compared to 2020. It is estimated that cement manufacturing is responsible for 8% of global anthropogenic CO₂ emissions, consumes 85 kWh of electricity, and 3.1 GJ of thermal energy per ton of cement. Almost 30% of CO₂ emissions have already been reduced in the last 25 years through the adoption of more efficient ovens, and therefore there is little scope for further improvement. Aiming at sustainable development, the cement industry can use pozzolanic material to manufacture cement with lower proportions of clinker and, consequently, reduce energy consumption and CO₂ emissions. At the same time, there is the possibility of using an alternative binder that does not use Portland cement, called alkaline activated binder (AAA). Studies carried out with agro-industrial residues (biomass ash) have shown satisfactory results and are widely available since large amounts of residues are generated. In this context, this research proposes to study some biomass ashes and their pozzolanic and alkaline potentials. For this purpose, agro-industry residues (corn husk, soybean hulls, coffee husks, orange peels, banana peels, banana leaves, and bamboo leaves) were calcined at 600 °C for 1 hour in a muffle furnace, ground, and sieved in a 0.75 mm sieve and called test ash. Then, the test ash and the parameter ash (rice husk ash and sugarcane bagasse ash) were characterized using X-Ray Fluorescence Spectrometry (FRX) and X-Ray Diffraction (XRD). After the ashes characterization, aiming to analyze the pozzolanic reactivity and the alkaline potential, suspensions were prepared with six different proportions of lime/ash (2.0:8.0; 2.5:7.5; 3.0:7.0; 3.5:6.5; 4.0:6.0 and 4.5:5.5), and these were monitored through measurements of electrical conductivity and pH at 60 °C, for 7 consecutive days. It was observed a reduction in the values of pH and electrical conductivity, in the case of ashes with pozzolanic properties, and an increase, in the case of ashes with alkaline potential. Bamboo leaf ash showed pozzolanic behavior. Coffee and banana peel ashes were able to act as an alkaline activator in mortars, providing average compressive strength comparable to those obtained with mortars activated with commercial chemical reagents. The coffee husk ash provided 34.27 MPa of compressive strength, which corresponds to an increase of 181.96% when compared to the strength achieved by the standard mortar without an activator and 8.53% compared to the mortar activated with sodium hydroxide. The banana peel ash generated 47.61 MPa of compressive strength, which means an increase of 16.31% in relation to standard mortar activated with potassium hydroxide, 50.80% in relation to mortar activated with sodium hydroxide, and 291.76% compared to control mortar without an alkaline activator. The analysis of pH and electrical conductivity of ashes from coffee husk and banana peel showed that the release of alkali was almost instantaneous, indicating that the alkali is immediately available for the ash to act as an alkaline activator. Therefore, it was concluded that the bamboo leaf ash is a pozzolanic ash and the coffee husk ash and the banana peel ash can be used as alternative alkaline activators in the preparation of mortars and concrete.

Keywords: characterization; agro-industrial waste; pozzolanic materials; alkaline activation; electrical conductivity and pH.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Figura representativa do processo simplificado de produção do cimento Portland.	25
Figura 2 - Silicato de cálcio hidratado (C-S-H).	29
Figura 3 - Grandes cristais com morfologia prismática hexagonal (CH).	29
Figura 4 - Etringita apresentando morfologia de cristais prismáticos aciculares (agulhas).	30
Figura 5 - Cais do porto romano de Cosa, Itália.	32
Figura 6 - Reservatório de água na cidade de Camiros, localizada na ilha de Rodes.	32
Figura 7 - Panteão em Roma.	33
Figura 8 - Termas de Caracalla, Itália.	33
Figura 9 - Calçada feita de concreto de ativação alcalina.	38
Figura 10 - Laje radier em concreto de ativação alcalina.	38
Figura 11 - Concreto ativado alcalinamente sendo transportado em larga escala.	39
Figura 12 - Publicações ao longo dos anos.	41
Figura 13 - Tobermorita.	43
Figura 14 - Ilustração das etapas do Procedimento Experimental.	58
Figura 15 - Estufa utilizada no processo de secagem da casca de banana.	60
Figura 16 - Mufla utilizada no processo de calcinação dos resíduos agroindustriais.	61
Figura 17 - Gral de ágata com pistilo.	61
Figura 18 - Resíduos antes, depois de calcinar e após a moagem.	62
Figura 19 - Espectrofotômetro de fluorescência de raios X (FRX).	63
Figura 20 - Difratorômetro de raios X (DRX).	64
Figura 21 - Banho termostático com agitação.	65
Figura 22 - Equipamento de aferição de pH.	66
Figura 23 - Equipamento de aferição de condutividade elétrica.	67
Figura 24 - Modelo utilizado para a pré-classificação da reatividade das cinzas.	69
Figura 25 - Pastas prontas, vedadas e identificadas.	71
Figura 26 - Banho térmico, 65 °C.	71
Figura 27 - Argamassadeira.	72
Figura 28 - Corpos de prova.	73
Figura 29 - Mesa vibratória.	74
Figura 30 - Argamassa desmoldada e vedada.	75
Figura 31 - Prensa hidráulica.	75
Figura 32 - Corpo de prova submetido ao ensaio de resistência à compressão.	76
Figura 33 - Etapas da apresentação de resultados.	77
Figura 34 - Difratograma da CPM.	81
Figura 35 - Difratograma da CCS.	82
Figura 36 - Difratograma da CCC.	83
Figura 37 - Difratograma da CCL.	84
Figura 38 - Difratograma da CCB.	85
Figura 39 - Difratograma da CFBN.	86
Figura 40 - Difratograma da CFB.	87
Figura 41 - Difratograma da CCA.	88
Figura 42 - Difratograma da CBC.	89
Figura 43 - Concentração de hidroxila, na suspensão de cinza da palha de milho.	91

Figura 44 - Condutividade elétrica da cinza da palha de milho.	92
Figura 45 - Concentração de hidroxila, na suspensão de cinza da casca de soja.	93
Figura 46 - Condutividade elétrica da cinza da casca de soja.	94
Figura 47 - Concentração de hidroxila, na suspensão de cinza da casca de café.	95
Figura 48 - Condutividade elétrica da cinza da casca de café.	96
Figura 49 - Concentração de hidroxila, na suspensão de cinza da casca de laranja.	97
Figura 50 - Condutividade elétrica da cinza da casca de laranja.	98
Figura 51 - Concentração de hidroxila, na suspensão de cinza da casca de banana.	99
Figura 52 - Condutividade elétrica da cinza da casca de banana.	100
Figura 53 - Concentração de hidroxila, na suspensão de cinza da folha de bananeira.	101
Figura 54 - Condutividade elétrica da cinza da folha de bananeira.	102
Figura 55 - Concentração de hidroxila, na suspensão de cinza da folha de bambu.	103
Figura 56 - Condutividade elétrica da cinza da folha de bambu.	104
Figura 57 - Concentração de hidroxila, na suspensão de cinza da casca de arroz.	105
Figura 58 - Condutividade elétrica da cinza da casca de arroz.	106
Figura 59 - Concentração de hidroxila, na suspensão de cinza do bagaço de cana.	107
Figura 60 - Condutividade elétrica da cinza do bagaço de cana.	108
Figura 61 - Pré-classificação de reatividade pozolânica das cinzas.	109
Figura 62 - Resistência média de cada traço.	111
Figura 63 - Aumento/redução de resistência que a CCC conferiu com relação aos traços controle.	112
Figura 64 - Aumento de resistência que a CCB conferiu com relação aos traços controle. .	113
Figura 65 - pH das suspensões elaboradas com pastas e cinzas.	114
Figura 66 - Condutividade elétrica das suspensões elaboradas com pastas e cinzas.	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Porcentagens de cada constituinte.....	27
Tabela 2 - Termos e composição da química do cimento.	27
Tabela 3 – Autores de pesquisas relacionadas ao potencial pozolânico ou alcalino das cinzas.	46
Tabela 4 - Proporções das pastas.....	70
Tabela 5 - Traços das argamassas.....	73
Tabela 6 - Caracterização química das cinzas teste (%).	78
Tabela 7 - Caracterização química das cinzas parâmetro (%).	79
Tabela 8 - Estudos que contém dados de pH/conductividade elétrica.	90

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

a.C. – Antes de Cristo

AAA – Aglomerante ativado alcalinamente

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI – *American Concrete Institute*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

C-25 – Concreto com classe de resistência à compressão de 25 MPa

CBC – Cinza do bagaço de cana

CCA – Cinza da casca de arroz

CCB – Cinza da casca de banana

CCC – Cinza da casca de café

CCL – Cinza da casca de laranja

CCS – Cinza da casca de soja

CFB – Cinza da folha de bambu

CFBN – Cinza da folha de bananeira

CH – Cal hidratada (hidróxido de cálcio)

CPIII – Cimento Portland de Alto Forno

CPIV – Cimento Portland Pozolânico

CPM – Cinza da palha de milho

CPs – Corpos de prova

CZ – Cinza

DRX – Difração de raios X

ESC + CCB – Escória mais cinza da casca de banana

ESC + CCC – Escória mais cinza da casca de café

ESC + H₂O – Escória mais água

ESC + KOH – Escória mais hidróxido de potássio

ESC + NaOH – Escória mais hidróxido de sódio

FRX – Fluorescência de raios X

Lc – Perda de condutividade elétrica

Ltda – Limitada

MAC – Grupo de pesquisa - Materiais Alternativos de Construção

NBR – Norma Brasileira

OPC – Cimento Portland

P.F. – Perda ao fogo

pH – Potencial Hidrogeniônico

rpm – Rotação por minuto

SCBA – *Sugar cane bagasse ash*

SP – São Paulo

UNESP – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

LISTA DE SÍMBOLOS

% – Porcentagem

°/min – Grau por minuto

°C/min – Grau Celsius por minuto

μm – Micrômetro (10^{-6} m)

Al₂O₃ – Alumina, Óxido de alumínio

Al³⁺ – Íon de alumínio

C₀ – Condutividade inicial

C₂S – Belita, Silicato dicálcico

C₃A – Aluminato tricálcico

C₃AH₆ – Aluminato de cálcio hidratado

C₃S – Alita, Silicato tricálcico

C₄AF – Ferroaluminato tetracálcico

C₆A₃H₃₂ – Etringita

C₆AFS_{1.5}H₉ – Ferroaluminato de cálcio hidratado

Ca(OH)₂ – CH, Portlandita, Hidróxido de cálcio, Cal hidratada

Ca⁺² – Íon de cálcio

C-A-H – Aluminato de cálcio hidratado

CaO – Óxido de cálcio, Cal pura

C-A-S-H – Aluminossilicato de cálcio hidratado

cm³ – Centímetro cúbico

CO₂ – Dióxido de carbono

C-S-H – Silicato de cálcio hidratado

C_t – Condutividade elétrica medida após t horas

C_{t,c} – Condutividade elétrica corrigida após t horas (é aproximadamente igual a C_t).

C_{t,poz} – Condutividade elétrica da suspensão só com pozolana após t horas

Fe₂O₃ – Óxido de ferro (III)

GJ/t – Gigajoule por tonelada

H⁺ – Íon hidrogênio

H₂O – Água

K₂O – Óxido de potássio

kg – Quilograma

KOH – Hidróxido de potássio

kWh/t – Kilowatts hora por tonelada

L/g – Litro por grama

m²/g – Metro quadrado por grama

MgO – Óxido de magnésio

MJ/kg – Megajoule por quilograma

mL – Mililitro

mm – Milímetro

mol/L – Mol por litro

MPa – Megapascal

mS/cm – Milisiemens por centímetro

Mt – Milhões de toneladas

Na₂O – Óxido de sódio

NaOH – Hidróxido de sódio

nm – Nanômetro

°C – Grau Celsius

OH⁻ – Hidroxila

P₂O₅ – Óxido de fósforo

Si – Átomo de silício

Si⁴⁺ – Íon de silício

SiO₂ – Sílica, dióxido de silício

–Si–O–Si–O - Cadeia de polissiloxo

–Si–O–Al–O - Cadeia de polissialato

SO₃ – Óxido sulfúrico

t_{ins} – Tempo de insaturação

ΔpH – Variação de pH

θ – Teta

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	19
1.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	19
1.2.	IMPORTÂNCIA DO TEMA	20
1.3.	LIMITAÇÃO.....	22
1.4.	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	23
2.	OBJETIVOS	24
2.1.	OBJETIVO GERAL.....	24
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
3.1.	CIMENTO PORTLAND	25
3.1.1.	Processo de produção do cimento Portland e seu impacto ambiental.....	25
3.1.2.	Hidratação do cimento Portland.....	26
3.2.	MATERIAIS POZOLÂNICOS	30
3.2.1.	Definição.....	31
3.2.2.	Histórico	31
3.2.3.	Classificação.....	33
3.2.4.	Reação pozolânica	34
3.2.5.	Uso de resíduos agroindustriais como fonte de material pozolânico em busca de sustentabilidade	35
3.3.	ATIVAÇÃO ALCALINA.....	37
3.3.1.	Definição.....	39
3.3.2.	Histórico	39
3.3.3.	Mecanismo de reação	42
3.3.4.	Aglomerante ativado alcalinamente - uma alternativa sustentável.....	44
3.4.	ESCÓRIA DE ALTO-FORNO	45
3.5.	CINZAS.....	45
3.5.1.	Cinza da palha de milho (CPM).....	47
3.5.2.	Cinza da casca de soja (CCS)	48
3.5.3.	Cinza da casca de café (CCC)	48
3.5.4.	Cinza da casca de laranja (CCL)	49
3.5.5.	Cinza da casca de banana (CCB).....	50
3.5.6.	Cinza da folha de bananeira (CFBN)	51
3.5.7.	Cinza da folha de bambu (CFB)	52
3.5.8.	Cinza da casca de arroz (CCA).....	54
3.5.9.	Cinza do bagaço de cana (CBC).....	56

4.	METODOLOGIA	58
4.1.	MATERIAIS	58
4.2.	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E EQUIPAMENTOS	59
4.2.1.	Beneficiamento dos resíduos.....	59
4.2.2.	Caracterização das cinzas.....	63
4.2.3.	Potencial pozolânico ou alcalino das cinzas	64
4.2.4.	Elaboração de pastas e argamassas	69
4.2.5.	Análise de liberação de íons de pastas e cinzas.....	76
4.2.6.	Solubilidade das cinzas	76
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	77
5.1.	CARACTERIZAÇÃO DAS CINZAS	77
5.1.1.	Fluorescência de raios X (FRX)	77
5.1.2.	Difratometria de raios X (DRX).....	81
5.2.	CONDUTIVIDADE ELÉTRICA E PH DE SUSPENSÕES.....	89
5.2.1.	Cinza da palha de milho (CPM).....	90
5.2.2.	Cinza da casca de soja (CCS).....	92
5.2.3.	Cinza da casca de café (CCC)	94
5.2.4.	Cinza da casca de laranja (CCL)	96
5.2.5.	Cinza da casca de banana (CCB).....	98
5.2.6.	Cinza da folha de bananeira (CFBN)	100
5.2.7.	Cinza da folha de bambu (CFB)	102
5.2.8.	Cinza da casca de arroz (CCA).....	104
5.2.9.	Cinza do bagaço de cana (CBC).....	106
5.3.	PRÉ-CLASSIFICAÇÃO DE REATIVIDADE POZOLÂNICA	108
5.4.	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS ARGAMASSAS	110
5.5.	ANÁLISE DE LIBERAÇÃO DE ÍONS DE PASTAS E CINZAS.....	113
5.6.	SOLUBILIDADE DAS CINZAS	115
6.	CONCLUSÕES	117
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	119
	REFERÊNCIAS	120
	APÊNDICE A – RELATÓRIO DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	
	DAS ARGAMASSAS (MPa)	138

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Pozolana ou material pozolânico são materiais que possuem alto teor de sílica e/ou alumínio reativos, ou seja, no estado amorfo, que quando finamente divididos e misturados com hidróxido de cálcio na presença de água, hidratam-se, formando compostos resistentes, semelhantes aos formados na hidratação do cimento Portland (BORGES, *et al.*, 2021).

Vários estudos comprovaram a eficiência da utilização de materiais pozolânicos na matriz cimentícia. A reação pozolânica produz silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) adicionais, densificando a matriz, reduzindo o tamanho dos poros da pasta, consequentemente reduzindo a permeabilidade de agentes agressivos, promovendo a durabilidade do concreto.

Paralelo a isso, existe a possibilidade da utilização de um tipo alternativo de aglomerante que não utiliza o cimento Portland, denominado aglomerante ativado alcalinamente (AAA). A escória de alto-forno é um dos precursores mais conhecidos e utilizados, e possui propriedades comparáveis às do cimento Portland. O aglomerante ativado alcalinamente requer uma solução alcalina, que geralmente é uma combinação de hidróxidos de sódio ou hidróxido de potássio com água (FONT, *et al.*, 2020).

Esta alternativa além de evitar toda degradação ambiental relacionada a fabricação do cimento, também colabora com o gerenciamento de resíduos uma vez que os componentes da mistura podem ser de fonte de descarte. A escória de alto-forno é resíduo da indústria do ferro gusa e de forma análoga, a solução alcalina pode também ser composta por resíduo, substituindo o hidróxido de potássio ou de sódio por um material que apresente composição química semelhante.

Nesse trabalho, várias cinzas de resíduos agroindustriais foram caracterizadas e avaliadas como material pozolânico e como material de ativação alcalina; tais cinzas são: da palha de milho (CPM), da casca de soja (CCS), da casca de café (CCC), da casca de laranja (CCL), da casca de banana (CCB), da folha de bananeira (CFBN), da folha de bambu (CFB), da casca de arroz (CCA) e do bagaço de cana (CBC). Esses materiais foram escolhidos considerando o que foi mencionado em Cordeiro *et al.*, (2019); foi reportado pelos autores que resíduos agroindustriais são fonte promissora de material pozolânico devido a sua disponibilidade e sua composição química que geralmente apresenta alto teor de sílica. Como diferencial, a presente pesquisa busca valorizar a natureza individual de cada cinza,

direcionando a aplicação mais adequada, seja ela como material pozolânico ou como material de ativação alcalina. Alguns resíduos agroindustriais já foram avaliados como material pozolânico e obtiveram sucesso, podendo citar, a cinza da casca de arroz (CCA) (HU; HE; ZHANG, 2020), e a cinza do bagaço de cana (CBC) (AKBAR *et al.*, 2020), que serviram de parâmetro de material pozolânico nesta pesquisa. Com relação à ativação alcalina, foram utilizados reagentes químicos comerciais como parâmetro (que são ativadores convencionais), o hidróxido de sódio e o hidróxido de potássio.

1.2. IMPORTÂNCIA DO TEMA

O concreto é o material artificial mais utilizado no mundo, seu consumo é de aproximadamente 10 bilhões de toneladas por ano. Sabe-se que a produção de concreto acarreta problemas ambientais devido a fabricação do cimento, um dos seus principais componentes (HACHE *et al.*, 2020). Estima-se que a produção de clínquer de cimento Portland seja responsável por aproximadamente 8% das emissões antropogênicas globais de CO₂, o que representa um problema ambiental (BENJAMIN, *et al.*, 2021). Em 2018, a produção global de cimento totalizou 4.072 milhões de toneladas, crescendo 1,8% em relação à 2017. O volume total de produção aumentou a uma taxa média anual de +3,6% de 2007 a 2018 (INDEXBOX, 2020). Já nos primeiros 11 meses de 2021, o consumo de cimento aumentou 3,6% em relação 2020 (GLOBAL CEMENT STAFF, 2022).

Atualmente, a indústria do cimento consome uma média global de energia elétrica de 85 kWh por tonelada de cimento e 3,1 GJ de energia térmica na fabricação de uma tonelada de clínquer. Isso contribui para que os setores de construção civil e edifícios, em conjunto, sejam responsáveis por consumir mais de um terço do total de energia consumida mundialmente e, também, por emitir quase 40% das emissões globais diretas e indiretas de CO₂ (IEA, 2020a; IEA, 2020b).

O clínquer, é o principal constituinte do cimento. A proporção utilizada, tem relação direta com a quantidade de emissão de CO₂, referente a fabricação de cimento (devido à queima de combustíveis e à descarbonatação do calcário). Visando o desenvolvimento sustentável, a indústria cimenteira, pode aproveitar as oportunidades de simbiose industrial (utilizar resíduos de outros setores, para produzir outro produto de valor), tornar possível a redução do consumo de energia e, também, reduzir as emissões de CO₂, relacionadas a fabricação do cimento (IEA, 2020a).

O CO₂ resultante da descarbonatação do calcário representa cerca de 60% da emissão associada a produção do cimento Portland (esse CO₂ faz parte da composição química do calcário, portanto não tem potencial de ser reduzido). Os 40% restantes são referentes aos gastos energéticos, em grande parte relacionadas às operações do forno (VAN DEVENTER, 2017). As emissões de CO₂ resultantes da queima de combustível têm sido reduzidas, quase 30% da redução de CO₂ ocorreu nos últimos 25 anos decorrente principalmente da adoção de fornos mais eficientes, e, portanto, existe pouca margem para melhorias adicionais.

Perante o exposto, o potencial de redução concentra-se principalmente na maior utilização de combustíveis alternativos renováveis (derivados de resíduos) e, a produção de cimento misturado com adições minerais em substituição ao clínquer (GHOSH; PARLIKAR; KARSTENSEN, 2022). Cimentos com proporções menores de clínquer se apresentam como uma alternativa viável que pode ser alcançada por meio da utilização de resíduos como material cimentante suplementar (MCS) em sua fabricação (GUIGNONE *et al.*, 2019).

Os cimentos CPIII e CPIV por exemplo, são cimentos comerciais que contém em sua composição materiais cimentantes suplementar em substituição parcial ao clínquer (NATALI, *et al.*, 2021). Estudos feitos com resíduos agroindustriais têm apresentado resultados satisfatórios, muitos desses resíduos foram utilizados como fonte pozolânica, portanto é necessário que uma variedade maior de resíduos seja estudada com essa finalidade.

Além disso, a pesquisa científica também busca novos materiais que possam substituir integralmente o cimento. Exemplo disso é o aglomerante ativado alcalinamente (AAA), o qual fornece outro meio de aglomeração visto que o cimento Portland não é utilizado na mistura. Os componentes deste podem ser resíduos da indústria e da agroindústria e representam uma alternativa para utilização tanto em argamassas quanto em concretos. A escória de alto-forno e cinzas provenientes de descartes são exemplos desses materiais alternativos de construção.

Ademais, grandes quantidades de resíduos são geradas pela agroindústria, quando seus excedentes não são destinados adequadamente, podem provocar problemas ambientais (MOTA *et al.*, 2020). O milho apresenta uma safra mundial de 1.188,5 milhões de toneladas (DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA DOS ESTADOS UNIDOS, 2020a). Cada tonelada seca de milho produzido gera aproximadamente a mesma quantidade de palha seca (RUAN *et al.*, 2019). A soja apresenta uma safra mundial de 362,5 milhões de toneladas (DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA DOS ESTADOS UNIDOS, 2020b). Para cada

tonelada dessa produção, são geradas aproximadamente 50 kg de casca de soja (ROCHA; ROESLER; BURKERT, 2018). O café, com uma produção total, em 2018, de aproximadamente 10,1 milhões de toneladas (NUNES *et al.*, 2020), gera a mesma proporção de casca, ou seja, para cada tonelada de café processado é produzido uma tonelada de casca de café (DEMISSEW; FUFA; ASSEFA; 2019). A laranja, cuja produção global, em 2017, foi estimada em 89 milhões de toneladas (OLUBAJO; ODEY; ABDULLAHI, 2019), gera aproximadamente 42,3 milhões de toneladas de resíduo constituído por casca (ORTIZ *et al.*, 2020). A banana é cultivada em mais de 130 países, tendo uma produção anual equivalente a 144 milhões de toneladas. Cada tonelada desta gera, aproximadamente, 300 kg de casca de banana (LAPO *et al.*, 2020) e tem potencial mundial de gerar cerca de 236,57 milhões de toneladas de folhas secas (MOTA *et al.*, 2020). O bambu, por sua vez, é considerado um dos recursos naturais de crescimento mais rápido e de maior rendimento, abundantemente disponível para construção. A produção anual do mesmo em todo o mundo é de cerca de 20 milhões de toneladas. As folhas de bambu, porém, não são utilizadas, o que gera grandes volumes de resíduos sólidos. Assim como vários dos resíduos apresentados, as folhas de bambu também são incineradas e jogadas em aterro (ASHA; SALMAN; ARUN KUMAR, 2014; RANGARAJ; VENKATACHALAM, 2017; ONIKEKU, *et al.*, 2019).

Diante desse cenário, a pesquisa tem papel importante no sentido de provar a viabilidade técnica da incorporação do resíduo agroindustrial no setor da construção civil, por meio de uma metodologia adequada, tornando possível a fabricação de cimento mais ecológico e com menor teor de clínquer (no caso da utilização de material pozolânico) e possibilitando também a fabricação de concretos alternativos, sem a utilização de cimento (no caso do concreto ativado alcalinamente). Assim, tal inclusão seria uma solução ambiental resolvendo problemas de gerenciamento de resíduos em aterros, protegendo o meio ambiente da poluição e reduzindo tanto o custo, quanto o consumo energético (CORDEIRO *et al.*, 2019; MEDINA, *et al.*, 2017; APRIANTI S, 2017).

1.3. LIMITAÇÃO

Inicialmente, para a caracterização das cinzas, obteve-se aproximadamente 7 gramas de cada uma das cinzas, devido à dificuldade de calcinação e rendimento do processo. Após a seleção dos materiais que apresentaram alto teor de álcalis solúveis, foram preparadas mais 50 gramas de cinza de cada material para a utilização das mesmas na elaboração das argamassas

e pastas. Dessa forma, deve-se considerar a quantidade de material disponível para a realização dos ensaios. Tal dificuldade mencionada poderia ser solucionada com a utilização de muflas de escala industrial ou pela utilização de outro processo de calcinação.

1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação foi organizada em seis capítulos correlacionados. O capítulo **I**, introdução, apresenta o tema proposto por meio de sua contextualização, as considerações iniciais, a importância da realização dessa pesquisa, a limitação e a presente estrutura do estudo.

O capítulo **II** apresenta os objetivos gerais e específicos da dissertação.

O capítulo **III** apresenta a revisão bibliográfica, descreve o processo de produção do cimento e o impacto ambiental relacionado a sua fabricação, ainda no mesmo tópico, é apresentada a hidratação do cimento; definição, histórico, classificação, reação pozolânica e uso de resíduos agroindustriais como fonte de material pozolânico em busca de sustentabilidade; outro tópico sobre ativação alcalina que apresenta definição, histórico, mecanismo de reação e aglomerante ativado alcalinamente – uma alternativa sustentável; um tópico sobre escória de alto-forno; além de uma breve abordagem de cada resíduo no tópico cinzas, apresentando dados de pesquisas já realizadas.

No capítulo **IV**, são descritos os materiais e métodos utilizados, bem como a descrição detalhada de cada um deles.

O capítulo **V** expõe tanto os resultados dos ensaios executados, como também as suas respectivas análises e discussões.

O capítulo **VI** apresenta as conclusões obtidas do trabalho.

O capítulo **VII** apresenta as sugestões para trabalhos futuros.

Finalmente, no capítulo **VIII**, estão as referências bibliográficas utilizadas na elaboração deste trabalho.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral da pesquisa é estudar algumas cinzas de biomassa, e seus potenciais como material pozolânico ou como material de ativação alcalina para possível aproveitamento na elaboração de argamassa ou concreto.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o potencial pozolânico das cinzas;
- Avaliar o potencial alcalino das cinzas;
- Pré-classificar a reatividade pozolânica (dos materiais que apresentarem essa propriedade);
- Avaliar o potencial da cinza como ativador alcalino (quanto a resistência à compressão aos 28 dias de cura);
- Avaliar a solubilidade dos álcalis (liberação de íons) incorporados nas pastas;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

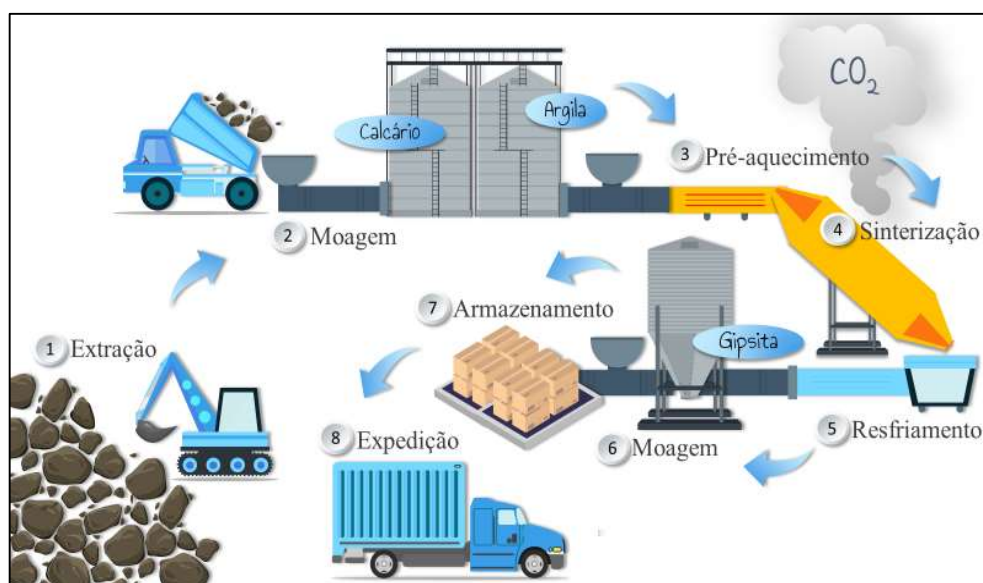
3.1. CIMENTO PORTLAND

3.1.1. Processo de produção do cimento Portland e seu impacto ambiental

Cimento Portland é definido segundo a NBR 16697:2018 como ligante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland com adição de uma quantidade necessária de sulfato de cálcio e outras adições (ABNT, 2018). Esse aglomerante, quando entra em contato com água, reage quimicamente liberando calor de hidratação, formando uma pasta viscosa e densa. Depois de algum tempo, são formados produtos hidratados que conferem resistência principalmente ao esforço de compressão, dando origem a uma pasta endurecida resistente à água (MORAIS, 2020).

Os processos de fabricação de cimento podem variar em relação ao equipamento, método de operação e consumo de combustível. Porém, esse processo inclui basicamente a extração da matéria-prima na pedreira (argila e calcário, materiais não renováveis), seguida pela moagem, momento qual a preparação da farinha crua é feita com a proporção estabelecida. Então, é feito o pré-aquecimento da farinha crua, ela é levada ao forno (sinterização) e, depois, o clínquer é submetido ao resfriamento; em seguida é conduzido novamente à moagem, ao armazenamento e por fim à expedição, como pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Figura representativa do processo simplificado de produção do cimento Portland.



Fonte: Própria autora.

Neste processo, o carbonato de cálcio (calcário) é aquecido a 900 °C para se decompor em óxido de cálcio (CaO, cal virgem), processo qual o CO₂ é gerado. Depois disso, no forno de cimento, a clínquerização ocorre em altas temperaturas de 1400 a 1500 °C, é essa temperatura que confere à mistura a capacidade de sofrer reações físicas e químicas. Nessa etapa, os óxidos reagem com a sílica e alumina, e formam os silicatos e aluminatos (principais fases do clínquer). Este clínquer é então triturado no moinho de bolas juntos com o sulfato de cálcio (gipsita) e outros aditivos minerais, para então, ter como resultado o cimento. As etapas que consomem mais energia são durante a pré-calцинаção e durante a produção do clínquer no forno, pois grande quantidade de energia térmica é necessária para criar as condições adequadas requeridas nesses processos (SINGH, 2016).

As emissões geradas pela calcinação do calcário, e pela combustão de combustíveis (carvão, coque de petróleo, gás natural, pneu, óleo usado, plástico, combustíveis derivados de resíduos, solventes) usados para a produção de energia térmica (1450 °C), são em torno de 900 kg de CO₂ por tonelada de cimento produzida, liberados por esses dois fatores em conjunto (ANDREW, 2017; NAQI; JANG, 2019; GHOSH; PARLIKAR; KARSTENSEN, 2022); quanto ao consumo energético, estimativas sugerem que a energia térmica utilizada para a produção de cimento varia de 3,5 a 4,5 GJ/t de cimento e a energia elétrica varia de 92 a 141 kWh/t (PRAKASAN; PALANIAPPAN; GETTU, 2020).

A preocupação é que a produção mundial de cimento deverá atingir 5500 Mt até 2050 (PRAKASAN; PALANIAPPAN; GETTU, 2020); isso resultaria em emissões da ordem de 4950 Mt. Além dessas emissões de gases, a produção de cimento consome quantidades significativas de recursos naturais esgotáveis; para fabricar uma tonelada de cimento são necessárias aproximadamente 1,5 toneladas de matéria-prima (NAQI; JANG, 2019).

3.1.2. Hidratação do cimento Portland

Para entender a hidratação do cimento, é necessário antes conhecer a sua composição. A composição do cimento inclui o silicato tricálcico, também chamado de alita (C₃S), hidrata rapidamente, e é responsável pela pega inicial e resistência inicial do cimento. O silicato dicálcico, conhecido como belita (C₂S), hidrata e endurece mais lentamente do que alita e dá ao concreto a resistência tardia (após a primeira semana). O aluminato tricálcico (C₃A), hidrata e endurece mais rapidamente, com uma reação altamente exotérmica que libera uma grande quantidade de calor e, portanto, contribui para a resistência inicial do cimento; é a adição da gipsita que controla essa rápida hidratação do aluminato tricálcico, pois sem o

sulfato de cálcio, o cimento endureceria quase que imediatamente. E o ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) que, devido ao seu teor de óxido de ferro, fornece a cor cinza ao cimento (HARRISSON, 2019; CARDARELLI, 2018). As porcentagens de cada constituinte citado são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Porcentagens de cada constituinte.

Constituintes do cimento	Porcentagens em massa
Alita (C_3S)	50%
Belita (C_2S)	25%
Aluminato tricálcico (C_3A)	10%
Ferroaluminato tetracálcico (C_4AF)	10%
Gipsita	5%

Fonte: Adaptado de Naqi; Jang (2019).

Na notação química do cimento é comum utilizar C para se referir ao CaO , S para SiO_2 , F para Fe_2O_3 , A para Al_2O_3 , para SO_3 e H para H_2O , a Tabela 2 resume as composições químicas dos óxidos (FERREIRA *et al.*, 2019).

Tabela 2 - Termos e composição da química do cimento.

Descrição química	Composição química	Composição dos óxidos
Silicato tricálcico (alita)	Ca_3SiO_5	$3CaO.SiO_2$
Silicato dicálcico (belita)	Ca_2SiO_4	$2CaO.SiO_2$
Aluminato tricálcico	$Ca_3Al_2O_6$	$3CaO.Al_2O_3$
Ferroaluminato tetracálcico	$2(Ca_2AlFeO_5)$	$CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$

Fonte: Adaptado de Harrison (2019).

Quando o cimento entra em contato com água, em minutos várias reações químicas começam acontecer e continuam por semanas. Essas reações de hidratação são responsáveis pela pega e endurecimento do cimento e acontecem por meio do processo de dissolução e precipitação, onde a fase anidra primeiro sofre dissolução e depois as fases hidratadas precipitam (FERREIRA *et al.*, 2019).

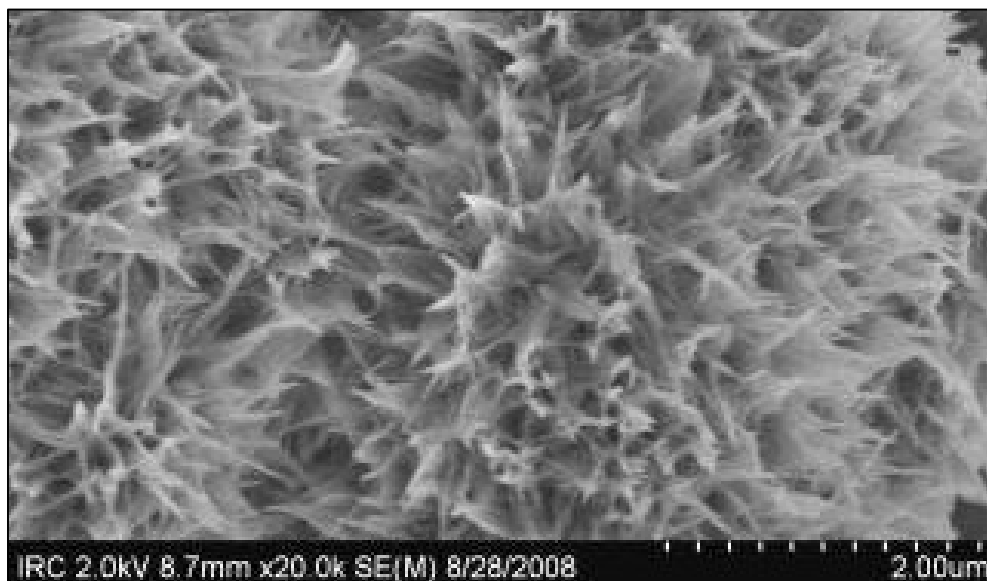
Durante o processo de hidratação ocorre importantes mudanças microestruturais e mineralógicas, a maioria dos compostos se dissolvem parcialmente e a solução se torna alcalina. Dentro de alguns minutos, cristais de etringita ($C_6A_3H_{32}$) se formam. Também

aparecem grandes cristais de portlandita (hidróxido de cálcio). Em seguida, uma fina camada de gel se desenvolve em cada partícula de cimento. O gel consiste principalmente em aluminatos de cálcio hidratados e hidróxido de cálcio. Como regra geral, as propriedades do cimento podem ser obtidas após a cura por 28 dias (CARDARELLI, 2018).

As fases de alita e belita se combinam para formar silicato de cálcio hidratado (C-S-H, o gel coloidal amorfo de estequiometria indefinida) que une coesivamente às partículas de cimento e ao hidróxido de cálcio (CH, cristalino) e precipita. O C-S-H fornece a principal fonte de resistência do concreto. A reação de hidratação começa lentamente a se depositar na periferia externa do núcleo do cimento hidratado. A estrutura do C-S-H é gelatinosa e forma um revestimento na superfície cimentícia que atua como uma membrana semipermeável. À medida que a hidratação prossegue, os produtos de hidratação lentamente começam a se depositar nos grãos de cimento originais, tornando a difusão da água para o núcleo não hidratado cada vez mais difícil, reduzindo assim a taxa de hidratação. Assim, os produtos da hidratação preenchem gradativamente o espaço originalmente ocupado pela água (NAQI; JANG, 2019; SINGH, 2020). Durante a hidratação do cimento, os principais produtos hidratados formados são:

- O silicato de cálcio hidratado (C-S-H) mostrado na Figura 2, considerada a fase mais importante, compõe de 50 a 60% do volume de sólidos da pasta totalmente hidratada, apresenta-se com morfologia de estruturas pequenas e fibrilares pouco cristalinas ou até mesmo de redes reticulares (PONTES, 2019). Sabe-se ainda que, limitada quantidade de alumínio pode ser incorporado na fase de C-S-H, dando origem ao C-A-S-H, (BEAUDOIN; ODLER, 2019).

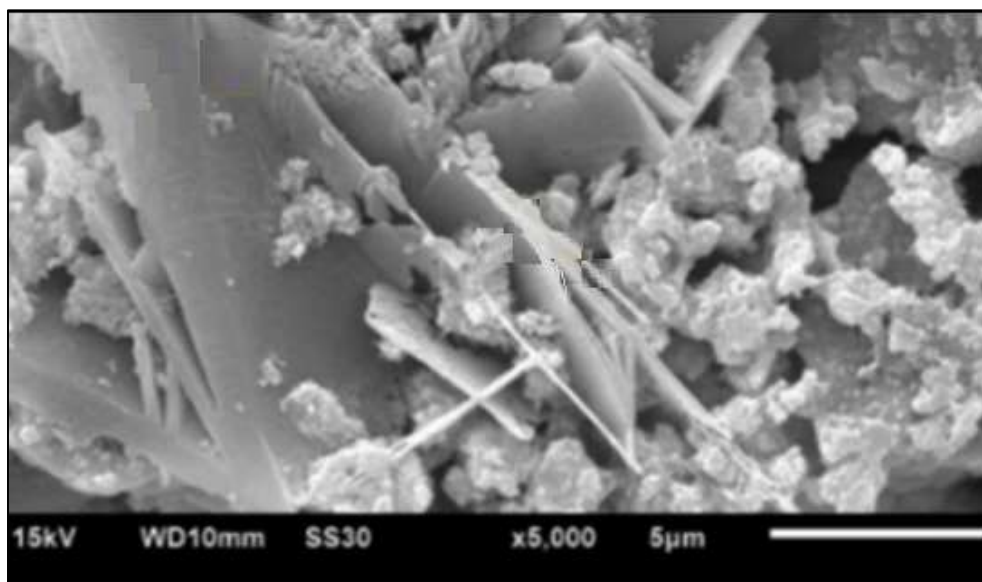
Figura 2 - Silicato de cálcio hidratado (C-S-H).



Fonte: Alizadeh (2020).

- O hidróxido de cálcio (CH) mostrado na Figura 3, também chamado de portlandita, constitui cerca de 20 a 25% do volume de sólidos da pasta. Tem contribuição à resistência limitada, uma vez que sua área superficial é consideravelmente baixa.

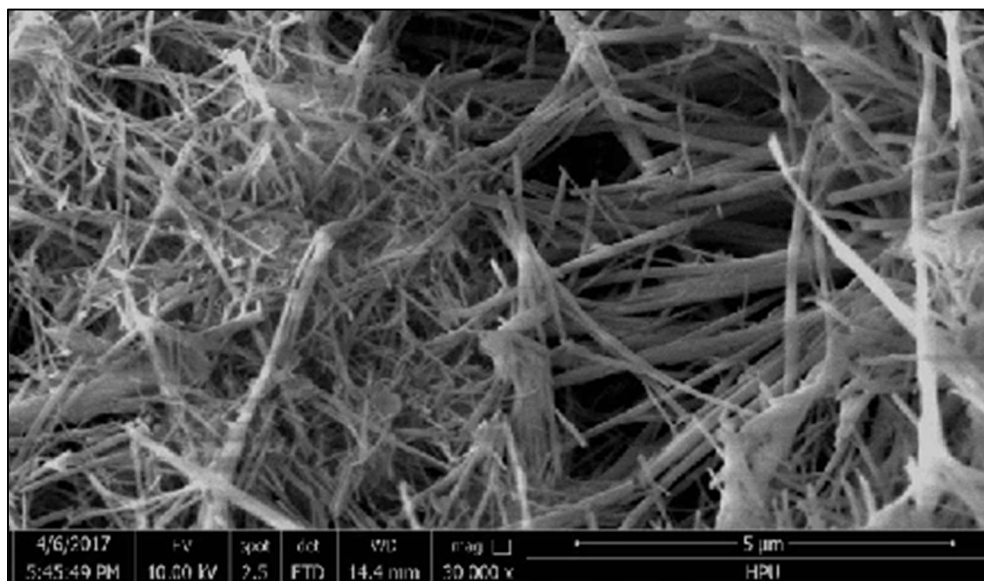
Figura 3 - Grandes cristais com morfologia prismática hexagonal (CH).



Fonte: Cascudo *et al.*, (2018).

- O trissulfoaluminato de cálcio mostrado na Figura 4, também chamado de etringita, eventualmente transforma-se em monossulfato hidratado (placas hexagonais), e ocupa no total o volume de cerca de 15 a 20% (PONTES, 2019).

Figura 4 - Etringita apresentando morfologia de cristais prismáticos aciculares (agulhas).



Fonte: Zhang *et al.*, (2020).

Esses compostos citados acima representam as principais fases do cimento hidratado, sabe-se também, que suas composições podem variar dependendo das condições durante a sua formação na hidratação do cimento. Além das fases já citadas, também é possível observar a formação da fase do aluminato de cálcio hidratado C_3AH_6 e a do ferroaluminato de cálcio hidratado $C_6AFS_{1.5}H_9$, formado pela hidratação de C_4AF na presença de C_3S e CH (FERREIRA *et al.*, 2019; BEAUDOIN; ODLER, 2019).

3.2. MATERIAIS POZOLÂNICOS

O termo pozolana é de origem romana, surgiu pela semelhança da cinza vulcânica encontrada na região de Pozzuoli, próximo ao monte Vesúvio localizado ao sul da Itália. A cinza foi bastante utilizada como material aglomerante pelos antigos romanos, até o Coliseu de Roma possui em sua composição esse material aglomerante.

Atualmente, o termo não se restringe a materiais de origem natural. Resíduos industriais, como a cinza volante (proveniente das termoeletricas) e a sílica ativa (resíduo da produção do ferro silício), são comercializados e utilizados como material pozolânico, assim como incorporados ao cimento CP IV – Cimento Portland Pozolânico.

3.2.1. Definição

De acordo com as normas ABNT (2015) e ASTM (2019), também, em concordância com as terminologias ACI (2013) e ASTM (2020), o material pozolânico é definido como material silicoso ou silicoaluminoso que possui pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente moídos e na presença de umidade, irá reagir quimicamente com hidróxido de cálcio em temperaturas normais para formar compostos com propriedades cimentícias, semelhantes aos formados na hidratação do cimento Portland.

Além disso, as normas estabelecem também, que o percentual da soma dos óxidos de silício, alumínio e ferro deve ser de no mínimo 70%, o que já foi criticado por Moraes M. (2019) pois não é mencionado nas normas que esses óxidos devem estar no estado amorfo. A crítica também é sustentada por resultados positivos de uma cinza estudada por Moraes J. (2015) que não estava de acordo com o critério das normas (apresentando soma dos óxidos mencionados de 42,7%) e mesmo assim, foi capaz de reagir quimicamente com o hidróxido de cálcio e consumi-lo totalmente em apenas três dias, caracterizando uma cinza com alta reatividade. Outra crítica foi reportada por Pourkhorshidi *et al.* (2010), nesse trabalho os autores reportaram que a ASTM C618 pode ter problemas significativos na caracterização de pozolanas naturais, pois os resultados experimentais apresentaram anomalia entre os julgamentos da ASTM e o desempenho real das pozolanas.

Tendo isto em vista, destaca-se, então, a importância da combinação de métodos químicos e físicos de caracterização, posto que assim, munido da avaliação profunda das cinzas estudadas, torna-se possível a comprovação autêntica do desempenho pozolânico, pois os resultados dos ensaios se completam.

3.2.2. Histórico

A utilização das pozolanas não é nada recente, o primeiro relato do uso desse material foi por volta de 5000 a.C. Embora os gregos tenham sido os pioneiros, foram os romanos que desenvolveram e amplamente utilizaram o potencial das pastas de cal-pozolana como ligante nos concretos usados para a construções de edifícios e obras subaquáticas. Eles criaram a pasta a partir da mistura de uma parte de cal, duas partes de cinza vulcânica e água, que era capaz de reagir quimicamente e gerar um material resistente, cujos vestígios podem ser vistos até hoje, mesmo depois de mais de 2100 anos (BLACK, 2016; DEDELOUDIS *et al.*, 2018).

Esse material foi usado na construção de várias obras de infraestrutura e monumentos. O porto romano de Cosa por exemplo, cujo os cais podem ser visto na Figura 5, foi construído dentro da água. Aparentemente foi usado um tubo para inserir a mistura no local permitindo que a água do mar não os destruísse. Também, o reservatório de água na ilha grega de Rhodes Figura 6, em que durante a construção foi utilizada a argamassa de cal-pozzolana como vedante hidráulico (DEDELOUDIS *et al.*, 2018).

Figura 5 - Cais do porto romano de Cosa, Itália.



Fonte: Veja (2017).

Figura 6 - Reservatório de água na cidade de Camiros, localizada na ilha de Rhodes.



Fonte: Dedeloudis *et al.*, (2018).

Outros excelentes exemplos de estruturas feitas com esse concreto e que ainda estão de pé são: a enorme cúpula monolítica do Panteão de Roma Figura 7, e as enormes Termas de Caracalla Figura 8 (MUKHERJEE, 2013).

Figura 7 - Panteão em Roma.



Fonte: Gourmetaly, (2016).

Figura 8 - Termas de Caracalla, Itália.



Fonte: Asdistancias, (2017).

3.2.3. Classificação

As pozolanas geralmente são classificadas quanto sua origem, elas podem ser de origem natural ou artificial. São exemplos de pozolanas naturais as rochas piroclásticas

(formação vulcânica) e as terras diatomáceas (formação sedimentar). E de pozolanas artificiais, as cinzas volantes, argilas e xistos calcinados, sílica ativa, metacaulim e outros materiais que apresentam características pozolânicas após calcinação como a cinza da casca do arroz e a cinza do bagaço de cana (MCCARTHY; DYER, 2019; TRUSILEWICZ, 2020).

Com o objetivo de buscar fontes alternativas, as pozolanas artificiais estão cada vez mais sendo estudadas, pois as pozolanas naturais são recursos não renováveis e essas pozolanas artificiais geralmente estão associadas à algum resíduo ou subproduto industrial proveniente de diversos setores como por exemplo da agroindústria, metalúrgica e termoelétrica (FIDELIS, 2018).

3.2.4. Reação pozolânica

A reação pozolânica abrange efeitos físicos e químicos. O efeito químico acontece pela reação química entre a sílica (SiO_2) e a alumina (Al_2O_3) amorfas presente no material pozolânico e a portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) formada na hidratação do cimento apresentada no item 3.1.2. Essa reação produz 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). Esses hidratos adicionais gerados fazem com que as propriedades mecânicas da matriz sejam melhoradas (MORAES, M. *et al.*, 2019; TASHIMA, 2016).

Como a reação consome a portlandita produzida durante a hidratação do cimento, o progresso da reação pozolânica é comumente avaliada em termos de redução de cal livre (PEREIRA, *et al.*, 2018; MCCARTHY; DYER, 2019). A avaliação da atividade pozolânica inclui o parâmetro de quantidade máxima de hidróxido de cálcio que um material é capaz de incorporar na reação e a taxa em que essa incorporação ocorre. A quantidade de cal incorporada depende da natureza das fases ativas (se a sílica e alumina se encontram no estado amorfo), do conteúdo no material pozolânico (porcentagem desses óxidos), da relação entre cal/pozolana na mistura e do tempo de cura, uma vez que a incorporação tende aumentar com o tempo. Já a taxa de combinação depende da área de superfície específica do material pozolânico (áreas de superfície específica maiores aumentam a taxa de reação), da proporção água/sólidos da mistura e também da temperatura em que a mistura se encontra (MCCARTHY; DYER, 2019).

O efeito físico da utilização de materiais pozolânicos é observado de duas formas, o efeito denominado efeito *filler* e o de nucleação. O efeito *filler* é basicamente a capacidade

que as finas partículas de pozolana têm de preencher vazios na matriz, esse efeito torna o material mais coeso e, conseqüentemente, dificulta a sua ruptura. O efeito de nucleação, por sua vez, proporciona uma cinética de reação mais rápida das partículas de cimento, aumentando, então, a quantidade de produtos hidratados em menos tempo, os quais são responsáveis pela resistência mecânica (MORAES M., 2019; PANESAR, 2019).

3.2.5. Uso de resíduos agroindustriais como fonte de material pozolânico em busca de sustentabilidade

Muitas pesquisas têm apresentado a utilização de diferentes resíduos como fonte de material pozolânico, conferindo-lhes valor econômico e aplicabilidade no setor da construção civil (MITTRI *et al.*, 2018). Subprodutos de safras de commodities são baratos, abundantes, globalmente distribuídos e recursos renováveis adequados para a produção de pozolana (MORAES J. *et al.*, 2015).

A maioria das cinzas de subprodutos agrícolas apresentam uma alta proporção de sílica (principal constituinte das pozolanas) e que após a moagem adequada podem ser usadas como pozolana de boa qualidade. A cinza do bagaço da cana por exemplo, é obtida a partir do uso do bagaço como fonte de combustível nas usinas de açúcar e, como outras cinzas de resíduos agrícolas, pode ser usada com essa finalidade. (CHINDAPRASIRT, CAO, 2015).

Batool, Masood e Ali, (2020) em sua pesquisa demonstraram através de resultados de DRX o alto teor de sílica (>70%) apresentada pela cinza do bagaço de cana. Além disso, concluíram que a substituição do cimento por 10% da cinza proporciona melhora na resistência à compressão, tração e flexão. Payá *et al.* (2018) relata que a atividade pozolânica da cinza do bagaço da cana foi estudada em várias pesquisas e que as propriedades físicas e químicas da cinza desempenham um papel muito importante na reação pozolânica. Composta principalmente por SiO_2 , a cinza colabora para que ocorra a reação química entre a cinza e o hidróxido de cálcio, formando, como principal produto hidratado, o gel de silicato de cálcio hidratado.

Moraes *et al.* (2015) em sua pesquisa realizada com a cinza da folha de cana-de-açúcar, constatou que esse material apresenta uma boa proporção de SiO_2 , indicando ser um material silicoso. Além disso, apresentou também bons resultados referentes à reação pozolânica, apresentando melhores resultados de resistência mecânica com substituição de 30% de cimento Portland pela cinza de folha de cana-de-açúcar.

Tamanna *et al.* (2020) realizou um estudo com resíduos de cinza de madeira, tal material apresentou-se como fonte pozolânica promissora para fraturas substituição do cimento tradicional, promovendo melhoria na durabilidade do concreto e prática ao desenvolvimento sustentável. Em geral, a incorporação da cinza em misturas de concreto resultou em uma trabalhabilidade e resistência reduzidas, porém com a durabilidade estendida a qual pode ser útil para a construção sustentável.

Mota *et al.* (2020) teve como objeto de estudo a cinza da folha de bananeira como aditivo em argamassas e constatou que tal cinza reage de forma positiva na mistura, comportando-se como um material pozolânico. A argamassa com esta cinza apresentou uma maior resistência média à compressão em relação a argamassa sem a cinza, no período de cura de 14 dias. No final dos 28 dias de cura, a argamassa com a cinza obteve praticamente, a mesma resistência que a argamassa sem a cinza, apresentando uma variação de 4% a menos.

Hu, He e Zhang, (2020) confirmaram a alta atividade pozolânica da cinza da casca do arroz, a qual apresentou também contribuição para a resistência à compressão da argamassa em todas as idades de teste, esse efeito de aprimoramento foi mais significativo com um nível mais alto de taxa de substituição. Além disso, a resistência ao sulfato também foi melhorada por meio da estabilização do C-S-H e do refinamento da estrutura dos poros.

Moraes *et al.* (2019) constatou alta reatividade da cinza de folha de bambu produzida por autocombustão. Os resultados da pesquisa indicaram que a cinza como material pozolânico contribuiu para melhorar o comportamento mecânico e a durabilidade das matrizes cimentícias visto que a argamassa com 30% de cinza apresentou ganho de resistência de 56% aos 90 dias de cura. Concluiu-se, com esses resultados, que a cinza da folha de bambu é uma alternativa adequada e sustentável para substituição parcial de cimento Portland em matrizes cimentícias.

Outra cinza estudada é a cinza da palma, resultados de pesquisa feita por Al-Kutti, Islam e Nasir, (2019) mostraram que a substituição do cimento por 10% dessa cinza resultou na menor taxa de absorção de água e, conseqüentemente, uma redução da permeabilidade de substâncias deletérias no concreto. Resultados indicaram que a reação pozolânica consumiu portlandita. Isso porque foi observada uma redução de 29% no teor de hidróxido de cálcio na pasta com cinza quando comparada com a pasta controle. Dessa forma, a cinza apresenta grande potencial e pode ser efetivamente utilizada como material de construção minimizando o custo de construção, sem comprometer a vida útil das estruturas.

Outros resíduos agroindustriais também foram estudados com a finalidade de utilizá-los como fonte de material pozolânico. Apesar de algumas dessas pesquisas não provar a pozolanicidade do material, ainda assim apresentam-se como pesquisa válida, pois amplia os conhecimentos científicos dos resíduos estudados. Um exemplo disso foi apresentado por Lima (2008), estudo qual apresentou resultados negativos referente ao uso da cinza da casca da castanha do caju como material pozolânico, resultado esse que provou que tal cinza não se classifica como pozolana.

A utilização de resíduos agroindustriais como fonte alternativa de material pozolânico confere vantagens tecnológicas e ambientais, pois sua utilização pode aprimorar propriedades mecânicas e de durabilidade. Assim como, pode reduzir o custo, o consumo de cimento e a poluição ambiental atrelada ao descarte dos resíduos que foram deixados de ser descartados (incorporados no setor da construção). Portanto, contribui com avanços significativos em direção à construção sustentável (PEREIRA *et al.*, 2018; SAKIR; RAMAN; KAISH, 2020).

3.3. ATIVAÇÃO ALCALINA

Os aglomerantes ativados alcalinamente e geopolímeros contribuem com a sustentabilidade do setor da construção civil. A produção desse tipo de aglomerante pode reduzir as emissões de CO₂ em até 80%, reduzir o consumo de matérias primas não renováveis e reduzir o consumo de energia quando comparado a produção de cimento Portland, além disso, os produtos formados pelos aglomerantes ativados alcalinamente apresentam boas propriedades mecânicas e de durabilidade (HASSAN; ARIF; SHARIQ, 2019; SORIANO, *et al.*, 2021; ABDEL, *et al.*, 2021).

Esse aglomerante possui grande potencial de aplicação em substituição ao cimento Portland. Mesmo assim, os países em desenvolvimento ainda não utilizam muito este novo material, apesar de existir inúmeras pesquisas destinadas ao seu desenvolvimento. É possível a fabricação de argamassas de concreto, espumas geopoliméricas, tijolos, blocos sólidos, calçadas (Figura 9) e lajes (Figura 10). Além disso, é possível transportar este material em larga escala, assim como é feito com o concreto convencional (Figura 11). A empresa Zeobond criada pelo pesquisador J. Van Deventer, na Austrália, foi uma das pioneiras em comercializar esse tipo de material alternativo (AVILA, 2018).

Figura 9 - Calçada feita de concreto de ativação alcalina.



Fonte: The Zeobond Group (2021).

Figura 10 - Laje radier em concreto de ativação alcalina.



Fonte: The Zeobond Group (2021).

Figura 11 - Concreto ativado alcalinamente sendo transportado em larga escala.



Fonte: The Zeobond Group (2021).

3.3.1. Definição

Ativação alcalina pode ser definida como a reação química que ocorre entre um material sólido em pó, mineralógicamente amorfo rico em silício e alumínio chamado de precursor (geralmente um resíduo como por exemplo a escória de alto-forno) e uma solução alcalina denominada ativador (geralmente solução aquosa de hidróxido ou silicato de sódio ou de potássio). Essa reação dá origem a um material com propriedades cimentantes chamado de aglomerante ativado alcalinamente que pode resistir ainda mais que estruturas de concreto comum contra ataques de fogo e ataques ácidos (FONT, *et al.*, 2017; BATISTA, 2018; HABERT; LACAILLERIE; ROUSSEL, 2011).

O termo "geopolímero" surgiu na década de 1970 pelo Prof. Jo-seph Davidovits e pesquisadores franceses. O termo refere-se a classe de materiais sintetizados pela reação de uma solução alcalina com um pó de aluminossilicato. Existem aqueles que defendem que o geopolímero é uma classe de aglomerante de ativação alcalina e que seu precursor deve ter baixo teor de cálcio (HASSAN; ARIF; SHARIQ, 2019).

3.3.2. Histórico

Historicamente a utilização da ativação alcalina é datada na década de 1930, com o químico e engenheiro alemão Kuhl. Em 1940 Purdon estudou a escória de alto-forno ativada

com hidróxido de sódio e percebeu que o hidróxido atuou como catalisador (BATISTA, 2018).

Nas décadas de 1950 e 1960 sistemas ativados alcalinamente foram desenvolvidos por Victor Glukhovsky na União Soviética. O pesquisador utilizou materiais de origem vulcânica (rochas e cinzas) e soluções ativadoras à base de hidróxido de sódio e obteve materiais com composição semelhante ao cimento Portland após o endurecimento (MARVILA; AZEVEDO; VIEIRA; 2021).

No ano de 1957, foi constatada a possibilidade de utilizar argilas com baixo teor de cálcio para produzir aglomerante. Posteriormente já no ano de 1979, o cientista francês Davidovits (responsável pela terminologia “geopolímero”) patenteou vários materiais silicoaluminosos (GUIMARÃES, 2019). Conforme o cientista, são polímeros porque se polimerizam e endurecem a baixa temperatura, e são geopolímeros porque são inorgânicos, estáveis e duros a elevada temperatura (BATISTA, 2018).

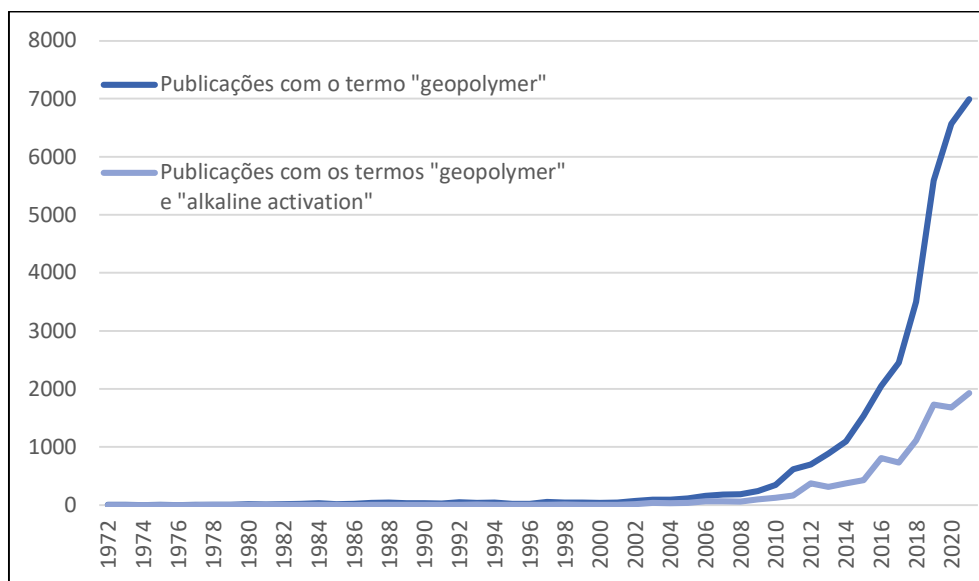
Apesar do destaque apenas das pesquisas de Victor Glukhovsky e Davidovits, vários pesquisadores contribuíram para o desenvolvimento da ciência da ativação alcalina. Nota-se que a preocupação inicial foi caracterizar os materiais extraídos de construções antigas, como os aquedutos romanos (estudados por Malinowski em 1979) e as pirâmides egípcias (estudadas por Davidovits e Sawyer em 1985). Foi descoberto que os materiais utilizados na fabricação dessas construções foram obtidos por meio da ativação alcalina (MARVILA; AZEVEDO; VIEIRA; 2021).

Isto influenciou ainda mais as pesquisas nesta área, então a partir de 1989, mais estudos foram conduzidos, vários artigos publicados sobre processamento, propriedades, aplicações e impactos causados pelos aglomerantes ativados alcalinamente. Mesmo depois de pesquisas como: a de Roy em 1991, de Palomo e Glasser em 1992 e de Krivenko em 1994, ainda não era possível explicar completamente os mecanismos das reações ativadas por álcalis (AVILA, 2018; MARVILA; AZEVEDO; VIEIRA; 2021).

Posteriormente em 1994, Davidovits analisou a complexidade da microestrutura dos geopolímeros por meio de redes dos polissialatos, um ano depois Wang e Scrivener apresentaram análises da microestrutura de aglomerantes ativados por álcalis ricos em cálcio. Provis e Van Deventer no ano de 2007, estudaram a cinética das reações de geopolimerização utilizando análises de difração de raios X e então explicaram as etapas da reação, relacionando as etapas com as estruturas formadas (MARVILA; AZEVEDO; VIEIRA; 2021).

A Figura 12 apresenta um gráfico que descreve o aumento da quantidade de publicações relacionadas com as palavras “*geopolymer*” e “*alkaline activation*” de 1972 até 2020. É notório que até meados de 2010 era pouca a quantidade de publicações sobre esse tema, a partir daí observa-se um aumento das publicações a respeito desse assunto.

Figura 12 - Publicações ao longo dos anos.



Fonte: Dimensions (2021).

Em 2011 foi realizada uma pesquisa que visava avaliar a questão ambiental da produção do concreto geopolimérico por meio da análise do ciclo de vida. Então foi comparado ao ciclo de vida da produção do cimento Portland, comprovando eficiência ambiental, sendo o aglomerante ativado alcalinamente uma alternativa ecológica ao concreto convencional de cimento (HABERT; LACAILLERIE; ROUSSEL, 2011).

Depois que os principais conceitos relacionados aos materiais ativados alcalinamente já estavam consolidados, esses materiais passaram a ser utilizados em construções importantes como a ponte australiana Victoria em 2013 e a expansão do aeroporto de Brisbane West Wellcamp em 2014. Além disso alguns estudos elaborados entre 2016 e 2019 complementaram importantes pesquisas realizadas nas décadas de 1970 e 1980 que comprovaram a durabilidade dos materiais ativados por álcalis (MARVILA; AZEVEDO; VIEIRA; 2021).

Em 2014 foi relatado que em algumas situações quando o ativador utilizado é a base de silicato de sódio as emissões são mais danosas que as dos concretos a base de cimento

Portland (GUIMARÃES, 2019). A maior parte das emissões relacionadas a fabricação do aglomerante ativado alcalinamente é produzida pela solução ativadora, cerca de 70 a 90% (FONT, *et al.*, 2020). Pois, durante a produção dos silicatos alcalinos usados como ativadores, são emitidas grandes quantidades de CO₂ na atmosfera, uma vez que são necessárias temperaturas acima de 1300 °C (GÓMEZ-CASERO, *et al.*, 2021).

Nesse contexto, o novo desafio da comunidade científica é desenvolver pesquisas que visam encontrar materiais alternativos (aos ativadores tradicionais) compatíveis para a produção de ativadores alcalinos (como por exemplo cinzas com alto teor de potássio) com baixa emissão e menor impacto ambiental, para que assim, torne-se uma alternativa realmente sustentável (SORIANO *et al.*, 2021).

3.3.3. Mecanismo de reação

O primeiro processo de reação é a dissolução, as soluções ativadoras proporcionam a liberação dos íons Si e Al quebrando as ligações Si-O-Si e Si-O-Al dos materiais aluminossilicatos, essa quebra é possível graças ao meio fortemente alcalino (pH superior a 14), fornecido pela solução ativadora (SITHOLE; MASHIFANA, 2020; MARVILA; AZEVEDO; VIEIRA; 2021). A redistribuição da densidade eletrônica em torno do átomo de silício proporciona maior suscetibilidade à ruptura da ligação Si-O-Si (GUIMARÃES, 2019).

Em seguida, os aluminatos e silicatos se combinam para formar um gel inicialmente rico em alumínio, uma vez que o alumínio reativo se dissolve mais rápido que o silício. Ocorre a acumulação de produtos aumentando o contato entre eles, formando uma estrutura coagulada. Quanto mais silício se dissolve, a estrutura do gel é reorganizada e torna-se mais estável do que a forma anterior, pois as ligações Si-O são mais fortes do que as ligações Al-O e por conseguinte, ocorre o processo de policondensação (AVILA, 2018; BATISTA, 2018; HASSAN; ARIF; SHARIQ, 2019).

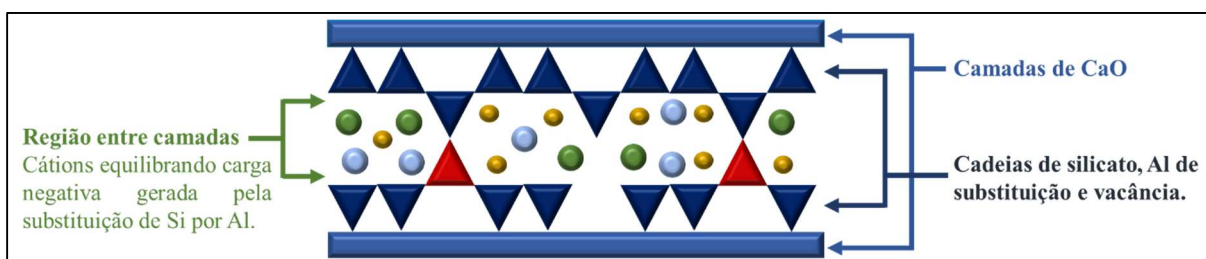
Esses processos de reorganização continuam, as partículas de aluminossilicato condensadas e os materiais ricos em aluminossilicato que não reagiram precipitam-se e ocorre a cristalização da estrutura. Portanto, o gel se une e forma uma massa sólida semelhante à hidratação do cimento (HASSAN; ARIF; SHARIQ, 2019; AVILA, 2018).

Quando são utilizados materiais com alto teor de cálcio, relação entre Ca/(Si + Al) é superior a um, como por exemplo a escória de alto-forno, os principais produtos de hidratação

formados são silicatos de cálcio hidratados com alumínio em sua composição (C-A-S-H), mineral conhecido como tobermorita. A escória é muito mais reativa do que materiais geopoliméricos em pH moderadamente alcalino, isso facilita a utilização de outros materiais como solução ativadora. Os produtos de reação de escória de alto-forno geralmente são géis semelhantes aos obtidos na hidratação do cimento Portland, porém, possuem menor quantidade de Ca e maior quantidade de Al em localizações tetraédricas. Isso leva a um grau mais alto de polimerização e reticulação entre as cadeias (MARVILA; AZEVEDO; VIEIRA; 2021).

A Figura 13 mostra uma representação da estrutura da tobermorita, como acontece com os sistemas de cimento Portland, o gel C-A-S-H inclui camadas de CaO, cadeias tetraédricas de silicato coordenadas com Al de substituição e vacâncias. A região entre as lamelas contém cátions Ca^{2+} , álcalis e água de hidratação incorporada quimicamente na estrutura do gel. Alguns cátions alcalinos também equilibram a carga negativa líquida gerada quando Al^{3+} substitui Si^{4+} nas localizações da cadeia tetraédrica (MARVILA; AZEVEDO; VIEIRA; 2021).

Figura 13 - Tobermorita.



Fonte: Adaptado de Marvila, Azevedo, Vieira (2021).

Durante as primeiras 48 horas, a curva de fluxo de calor é muito semelhante à do cimento Portland convencional. A taxa de liberação de calor depende do tipo de ativador utilizado, em soluções com hidróxido de sódio o pH é mais elevado do que em soluções com silicato de sódio, esse aumento de pH reduz a solubilidade do cálcio e aumenta a do silício e do alumínio. Aglomerantes ativados com silicato costumam ter resistências mais elevadas, isso acontece por dois principais motivos, primeiro o ativador fornece silício adicional que reage com os cátions Ca^{2+} da escória, segundo porque a cristalinidade do C-S-H formado é muito pequena comparado ao formado quando a solução utilizada é o NaOH (BATISTA, 2018).

3.3.4. Aglomerante ativado alcalinamente - uma alternativa sustentável

Atualmente, a comunidade científica está bastante motivada em buscar soluções para os problemas ambientais gerados e agravados pelo desenvolvimento não sustentável ao longo de todos esses anos. Materiais de ativação alcalina em comparação ao cimento Portland proporcionam redução de emissão de CO₂ graças a geopolimerização, pois não é necessário a calcinação em altíssimas temperaturas como o que ocorre na produção do clínquer na fabricação do cimento, o qual utiliza grande quantidade de energia advinda de combustíveis fósseis responsáveis por parte da liberação do dióxido de carbono na atmosfera.

Outro fator importante a ser considerado é o de que a ativação alcalina pode ser feita utilizando resíduos como precursor e até mesmo como ativador. Subprodutos como cinza volante, escória de alto-forno, cinza do bagaço de cana-de-açúcar, podem ser utilizados como precursores. Esta diversidade contribui para que a ativação alcalina seja versátil e adaptável em diversas localidades, além disso, proporciona uma solução para o gerenciamento de resíduos evitando o descarte em aterros (BATISTA, 2018).

Como já foi citado, é possível a utilização de resíduos tanto como precursores como ativadores, entretanto, ainda existem poucos resíduos avaliados com a finalidade de servirem como ativador. Seria muito valiosa a descoberta de novos resíduos que podem ser utilizados na preparação da solução de ativação, uma vez que a síntese de reagentes comerciais está relacionada a boa parte dos impactos ambientais atrelado aos materiais de ativação alcalina, principalmente os ativadores a base de silicatos alcalinos (PINHEIRO *et al.*, 2018).

É imprescindível, para um manejo sustentável, desenvolver e otimizar alternativas e tecnologias que permitam o reaproveitamento de cinzas. As cinzas de combustão do bagaço de azeitona, por exemplo, já foi estudada e apresenta elevada alcalinidade em suspensão aquosa (GÓMEZ-CASERO, *et al.*, 2021). A cinza do caroço de azeitona é um resíduo que provou ter alta eficiência como ativador reagente, pois proporcionou resistência semelhante ou superior ao apresentado quando foi utilizado o ativador convencional (PINHEIRO *et al.*, 2018).

Contudo, a bibliografia dispõe de pouca variedade de resíduos estudados com a finalidade de aplicação como ativador alcalino. Os resíduos estudados até agora foram a cinza do resíduo da produção do milho, rica em potássio, a cinza da biomassa do caroço de azeitona por Alonso *et al.* (2019). E, recentemente, Soriano *et al.* (2021b) estudaram também a cinza

da casca do caroço de manga, a cinza da casca de noz e a cinza da casca de avelã. Portanto, pesquisas que buscam encontrar materiais alternativos para esse fim, possibilitam vantagens sustentáveis, no que diz respeito à redução de emissões de gases nocivos ao meio ambiente. Além disso, inclui o resíduo na economia circular, consequentemente, agrega valor ao subproduto que anteriormente seria descartado, causando poluição (BATISTA, 2018).

3.4. ESCÓRIA DE ALTO-FORNO

A escória de alto-forno é um material não metálico que consiste essencialmente em silicatos e aluminossilicatos de cálcio, subproduto da fabricação de ferro. No processo de obtenção de ferro, o minério de ferro é reduzido ao ferro enquanto todos os materiais restantes (impurezas) formam a escória, que é extraída como um líquido fundido e resfriada. A escória moída apresenta boas propriedades cimentantes e é usada como um ligante cimentício secundário para cimento Portland ou como um ligante primário em sistemas ativados por álcalis

(CWIRZEN, 2020; MORANVILLE-REGOURD; KAMALI-BERNARD, 2019). É alegado pela comunidade científica que, embora a escória já seja utilizada na construção civil, a utilização dela como precursor na tecnologia de geopolimerização traz ainda mais benefícios (AVILA, 2018).

Um dos materiais mais utilizados como precursor na ativação alcalina é a escória de alto-forno, a reatividade da escória depende de sua composição e de sua estrutura. Como vantagem, esse precursor não necessita de um ativador alcalino altamente concentrado, além disso, a matriz se mantém estável tanto em cura em temperatura ambiente quanto em elevada temperatura (SORIANO *et al.*, 2021).

Foi observado em pesquisas que, comparada a outros tipos de ativadores alcalinos, a escória de alto-forno é melhor ativada com a solução de silicato de sódio. Testes experimentais apresentaram que a alta resistência inicial ocorre quando a relação em massa de $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ é de aproximadamente 0,75 (HASSAN; ARIF; SHARIQ, 2019).

3.5. CINZAS

A combustão de biomassa têm sido o foco de muitos estudos de laboratório em todo o mundo para substituir os combustíveis fósseis utilizados para gerar energia elétrica. Contudo,

a queima da biomassa dá origem a novos resíduos, cujas propriedades físicas, composições químicas e mineralógicas dependem do tipo de material e da forma que foi gerado (PERNÁ *et al.*, 2019).

Nesse sentido, este trabalho é pioneiro com a pesquisa de alguns desses resíduos como fonte de material pozolânico ou ativador alcalino, sendo que a bibliografia não apresenta estudos feitos com esse objetivo de todas as cinzas, como pode ser observado na Tabela 3. Alguns trabalhos apresentados nesse tópico, foram elaborados com outra finalidade, contudo podem apresentar informações importantes para avaliação, como por exemplo, resultados de fluorescência e difração de raios X.

Tabela 3 – Autores de pesquisas relacionadas ao potencial pozolânico ou alcalino das cinzas.

Cinzas	Estudo como material pozolânico	Estudo como material de ativação alcalina	Outros
CPM	Raheem e Ikotun (2020) Cordeiro G. <i>et al.</i> (2020) Shakouri <i>et al.</i> (2020)		
CCS			Toro-Trochez <i>et al.</i> (2019)
CCC		Lima, Gomes e Moraes (2022)	Lin, Kuo e Hsu (2015) Reta e Mahto (2019) Demissew, Fufa e Assefa (2019)
CCL			Sharma, Ameta e Ameta, (2013) Vamvuka <i>et al.</i> (2014) Olubajo, Odey e Abdullahi (2019)
CCB			Hills <i>et al.</i> (2020)
CFBN	Aqilah (2014) Goyal e Tiwari (2016) Olutaiwo e Olushola (2017) Pawar e Khair (2018) Dhage, Rathi e Kolase (2020)		Nnochiri e Aderinlewo (2016) Elijah (2019)
CFB	Cordeiro G. <i>et al.</i> (2020) Villar-Cociña <i>et al.</i> (2018) Ubachukwu, Nwobia e Onwaekele (2018) Onikeku <i>et al.</i> (2019) Villar-Cociña <i>et al.</i> (2020) Moraes, M. <i>et al.</i> (2019) Rodier <i>et al.</i> (2019) Cordeiro G. <i>et al.</i> (2020)		Hnin, Htet e Kyaw (2018)

Fonte: Própria autora.

3.5.1. Cinza da palha de milho (CPM)

O milho apresenta uma safra mundial de 1.188,5 milhões de toneladas (DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA DOS ESTADOS UNIDOS, 2020a). Cada tonelada seca de milho produzido gera aproximadamente a mesma quantidade de palha seca (RUAN *et al.*, 2019).

Segundo Raheem e Ikotun (2020), a composição química da cinza da palha do milho calcinada a 600 °C durante sete horas, apresenta percentuais de sílica, alumina e óxido férrico somados ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) de 74,97%, que é maior que o exigido pela ASTM C 618 para ser considerado um bom material pozolânico. Nesse trabalho, foi mencionado, também, que a massa específica da cinza, por apresentar-se mais baixa que a do cimento, requer mais água de amassamento, significando uma redução da trabalhabilidade da pasta. Além disso, os autores concluíram que a porcentagem ótima de substituição foi de 5% para ganho de resistência à compressão.

Cordeiro *et al.* (2020) estudou a produção e as principais propriedades físicas e químicas da cinza da palha do milho a partir do processo de otimização da reatividade por meio de processo térmico, químico e mecânico. Nesse estudo, os autores demonstraram em seus resultados que a cinza da palha do milho apresentou elevado teor de sílica amorfa e foi classificada como uma cinza de boa pozolanicidade.

Shakouri *et al.* (2020) investigou a viabilidade do uso de cinza de palha de milho como material cimentício suplementar para substituir o cimento no concreto. No estudo, as cinzas (com e sem tratamentos) foram produzidas e a influência de cada tratamento nas propriedades físicas e químicas das cinzas foram avaliadas. As cinzas tratadas com água e/ou ácido apresentaram teor mais alto de SiO_2 , consequentemente maior reatividade, acelerando o processo de hidratação do cimento afetando positivamente a resistência à compressão. Por outro lado, a cinza não tratada apresentou menor reatividade e retardou a hidratação do cimento reduzindo significativamente a resistência à compressão da amostra, possivelmente, devido aos altos teores de K_2O e P_2O_5 .

3.5.2. Cinza da casca de soja (CCS)

A soja apresenta uma safra mundial de 362,5 milhões de toneladas (DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA DOS ESTADOS UNIDOS, 2020b). Para cada tonelada dessa produção, são geradas aproximadamente 50 kg de casca de soja (ROCHA; ROESLER; BURKERT, 2018).

Toro-Trochez *et al.* (2019) avaliou a casca da soja como alternativa para obtenção de biocombustíveis e bioprodutos por pirólise. Os resultados obtidos revelaram que as cascas de soja apresentam viabilidade para obtenção de energia por processo de pirólise térmica e produz 2,3% de cinzas.

Até o presente momento não foi encontrado nenhum estudo sobre o uso desse material no âmbito da construção civil.

3.5.3. Cinza da casca de café (CCC)

O café, com uma produção total, em 2018, de aproximadamente 10,1 milhões de toneladas, gera a mesma proporção de casca, ou seja, para cada tonelada de café processado é produzido uma tonelada de casca de café (NUNES *et al.*, 2020; DEMISSEW; FUFA; ASSEFA, 2019).

Lin, Kuo e Hsu (2015) avaliaram a cinza do resíduo da casca do café como material de substituição do cimento em argamassa. Os resultados da análise experimental revelaram que dentre as três temperaturas de calcinação (500, 600 e 700 °C) que foram analisadas, a temperatura de 600 °C proporcionou melhores resultados. Mesmo assim, os resultados do teste de compressão exibiram que quanto maior a porcentagem de substituição menor a resistência obtida.

Reta e Mahto (2019) analisaram quimicamente a cinza da casca do café e experimentalmente como substituto parcial do cimento em concreto C-25. A análise química da cinza apresentou 14.65% de sílica e 12.07% de alumina, sendo a soma dessas duas porcentagens baixa comparada a requerida na norma para ser considerada pozolana. Quanto ao resultado experimental da substituição, a cinza provocou redução na trabalhabilidade à medida em que a porcentagem de substituição aumentava e, reduziu a resistência a compressão.

Já na pesquisa de Demissew, Fufa e Assefa (2019), onde foram investigadas as propriedades da cinza da casca de café para possível adequação da cinza como material de substituição parcial do cimento Portland comum na produção de concreto convencional. Os autores concluíram que a substituição de cimento por cinza da casca do café de 2% a 10% resultou em melhora na resistência à compressão.

3.5.4. Cinza da casca de laranja (CCL)

A laranja, cuja produção global, em 2017, foi estimada em 89 milhões de toneladas, gera aproximadamente 43 milhões de toneladas de resíduo constituído por casca (OLUBAJO; ODEY; ABDULLAHI, 2019; ORTIZ *et al.*, 2020).

Com o objetivo de descobrir qual a proporção ideal de substituição que não afetaria a qualidade do cimento, Sharma, Ameta e Ameta (2013) estudaram e analisaram cada amostra do clínquer produzido por meio da utilização do resíduo da casca da laranja como combustível alternativo misturado ao coque de petróleo em várias proporções antes da clinquerização, de modo que o teor de cinzas produzido pelo combustível alternativo também pudesse fazer parte do clínquer. Observou-se que quase todos os parâmetros do clínquer permaneceram nos limites permitidos e que apenas o teor de enxofre foi reduzido devido ao menor teor de enxofre presente, em comparação ao teor presente no coque de petróleo. Isso, além de melhorar a qualidade do clínquer, não afetou adversamente outros parâmetros.

Vamvuka *et al.* (2014) avaliou várias cinzas produzidas a partir da combustão de resíduos de plantações e processamento de laranja. Nesse trabalho, a composição química da cinza da casca da laranja foi apresentada e a porcentagem de sílica foi de 2,4% e 3% de alumina.

Olubajo, Odey e Abdullahi (2019), investigaram a substituição do cimento por cinza de casca de laranja com foco no efeito nas propriedades físico-mecânicas. Os resultados mostraram que a cinza retarda a pega do cimento. Segundo os autores é devido ao teor de óxido de potássio e ao alto grau de carbono não queimado, o qual foi responsável pelo aumento da necessidade de água bem como nos tempos prolongados de pega. Os autores também mencionaram que houve uma redução na resistência à compressão e a flexão à medida que se aumentava a porcentagem de cinza. Além disso, os resultados de fluorescência de raios X, mostraram que a cinza é composta principalmente por cal, e que a porcentagem da soma dos óxidos de silício, alumínio e ferro equivalem a 27,7%. Com essas informações, a

cinza provou não ser um material adequado para uso como material pozolânico pois o teor de sílica e alumina da cinza não foi o bastante para obter qualquer classificação pozolânica.

3.5.5. Cinza da casca de banana (CCB)

A banana é cultivada em mais de 130 países, tendo uma produção anual equivalente a 144 milhões de toneladas. Cada tonelada desta gera, aproximadamente, 300 kg de casca de banana (LAPO *et al.*, 2020).

Gadgihalli *et al.* (2017) analisaram as propriedades do concreto com a mistura de pó de casca de banana seca. Os autores relataram que a resistência a flexão aumentou e a capacidade de transmissão de temperatura foi reduzida.

Mohamad *et al.* (2018) conduziram testes de análise química do pó da casca de banana e estudaram os efeitos de sua incorporação juntamente com a cinza do resíduo da produção do óleo de palma nas propriedades mecânicas do concreto leve. Como resultado foi obtido que o pó da casca de banana é rico em sílica apresentando o teor de 55,98% de SiO₂. A incorporação do pó de casca de banana e da cinza do resíduo da produção do óleo de dendê como substituição de cimento e areia, respectivamente, teve efeitos significativos nas propriedades do concreto, sendo que o aumento da porcentagem de substituição apresentou ligeiro incremento em suas propriedades mecânicas. Mohamad *et al.* (2019a) também apresentaram a porcentagem de 55,98 de sílica presente no pó da casca de banana e concluíram com suas pesquisas que a incorporação do pó da casca de banana resultou em maior efeito na resistência a compressão em comparação a incorporação da cinza do resíduo da produção do óleo de dendê e relacionaram esse resultado com o maior teor de sílica apresentado pelo pó. Mohamad *et al.* (2019b) classificou o pó da casca de banana como material pozolânico de classe F e concluíram que o pó pode ser utilizado como material de substituição de cimento que melhora o desempenho mecânico do concreto, tornando-o econômico, verde e sustentável além de colaborar com a redução do desperdício agrícola.

Em um estudo de valorização de biomassa, conduzido por Hills *et al.* (2020), foi apresentado que a cinza da casca de banana incineradas a 900 ± 25 °C durante quatro horas, contém 7,2% de sílica e 0,4% de alumina. Esses resultados contrapõem as porcentagens de sílica e alumina obtidas pelo resíduo antes de sua queima, indicando que pode existir uma variação alta do teor de sílica dependente do material coletado, pois o cultivo, solo, condições de coleta (pouca ou muita contaminação por partículas de solo), ou até uma variedade

diferente de banana (não foi citado), entre outros fatores, são capazes de influenciar significativamente no teor de sílica da amostra (ANTONANGELO, 2015; TORRES, 2019).

3.5.6. Cinza da folha de bananeira (CFBN)

Como já foi apresentado no tópico 3.5.5 *Cinza da casca da banana*, a produção anual desta equivale a 144 milhões de toneladas e essa produção tem potencial mundial de gerar cerca de 236,57 milhões de toneladas de folhas secas (LAPO *et al.*, 2020; MOTA *et al.*, 2020).

Aqilah (2014) apresenta a composição química da cinza da folha de bananeira, sua pesquisa que tem como objetivo utilizar a cinza da folha de bananeira como material cimentício para a substituição parcial do cimento. As folhas de bananeira foram queimadas à 900 ° C por 24 horas ao ar livre e obtiveram 48,7% de teor de sílica e 2,6% de alumina.

Nnochiri e Aderinlewo (2016) conduziram um estudo de estabilização de solo laterítico utilizando a cinza da folha de bananeira. Neste estudo também foi apresentado o mesmo teor de 48,7% e 2,6% de sílica e alumina, respectivamente, apresentados por Aqilah (2014). O estudo também revelou que a resistência do solo laterítico estabilizado com cinzas de folhas de bananeira foi aumentada, sendo assim, a cinza atuou como agente estabilizador barato para fins de estabilização de subleitos.

Goyal e Tiwari (2016) conduziram um estudo de avaliação da resistência à compressão de concreto feito com substituições de 10, 20 e 30% de cimento por cinza da folha de bananeira. Nesse estudo, foi constatado que a cinza da folha de bananeira exibe propriedades pozolânicas e colabora com o aumento da resistência à compressão, tendo a substituição de 20% como a de melhor resultado, a qual colaborou pelo aumento de 20 a 30% da resistência aos 28 dias.

Já Olutaiwo e Olushola (2017) que investigaram os efeitos da adição da cinza de folha de bananeira no solo laterítico, não obtiveram resultados tão favoráveis. Por mais que a composição dos óxidos presentes na cinza da folha de bananeira tenha indicado 47,24% de sílica e 2,71% de alumina (uma porcentagem considerável), foi mencionado que os resultados implicaram que a cinza é uma pozolana fraca e que não pode ser utilizada como substituição alternativa nem como substituição parcial do cimento na busca por melhorias nas

propriedades do solo analisado. É provável que a sílica presente na cinza estava no estado cristalino, o que pode ter dificultado a reação pozolânica.

Pawar e Khaire (2018) conduziram um estudo experimental da substituição parcial do cimento pela cinza da folha de bananeira, analisando a resistência à tração, à compressão, à flexão e à fissura do concreto. Neste estudo, foram utilizadas as porcentagens de substituições de 0, 15 e 25%. Quanto a composição química apresentada pela cinza de substituição, obteve-se 48,7% de sílica e 2,6% de alumina. A partir dos resultados, foi observado que à medida em que se aumentou a porcentagem de substituição reduziu-se a resistência à compressão, já a resistência à tração e a fissura, aumentando a porcentagem de 0 para 15% houve melhora na resistência, fazendo cair na porcentagem de 25% de substituição. Foi concluído neste estudo que a substituição de 15% do cimento por cinza de folha de bananeira proporcionou melhores resultados sendo esta portanto a porcentagem ideal. Contudo, em um estudo semelhante, Dhage, Rathi e Kolase (2020) concluíram que a porcentagem ótima de substituição parcial é de 30%.

Elijah (2019) realizou um estudo de estabilização de solo laterítico utilizando a cinza da folha de bananeira em comparação a utilização da cinza da folha da palmeira do dendê. Os resultados das várias porcentagens (2, 4, 6, 8 e 10% da massa do solo) e análises realizadas mostram que os valores mais altos foram obtidos com o teor de 4% de cinza de folha de bananeira e 6% de cinza da folha da palmeira do dendê.

3.5.7. Cinza da folha de bambu (CFB)

O bambu é considerado um dos recursos naturais de crescimento mais rápido, de maior rendimento e de disponibilidade abundante para construção. A produção anual do mesmo em todo o mundo é de cerca de 20 milhões de toneladas. As folhas de bambu, porém, não são utilizadas, o que gera grandes volumes de resíduos sólidos. Assim como vários dos resíduos apresentados, as folhas de bambu também são incineradas e jogadas em aterro (ASHA; SALMAN; ARUN KUMAR, 2014; RANGARAJ; VENKATACHALAM, 2017; ONIKEKU, *et al.*, 2019).

Villar-Cociña *et al.* (2018) estudaram a atividade pozolânica da cinza da folha do bambu por meio da análise de condutividade elétrica. Além disso, apresentaram resultados de difração de raios X e reportaram a influência da temperatura de calcinação nas propriedades pozolânicas da cinza. Concluíram que a temperatura analisada que proporcionou melhores

propriedades pozolânicas foi a temperatura de 500 °C. A reatividade mais baixa apresentada pela folha calcinada a 700 °C é relacionada a presença de cristobalita na amostra, a qual indica a possível recristalização da sílica amorfa devido ao aumento de temperatura na calcinação.

Hnin, Htet e Kyaw (2018), Ubachukwu, Nwobia e Onwaekele (2018), Onikeku *et al.* (2019), Villar-Cociña *et al.* (2020) conduziram análises química da cinza da folha do bambu. Os resultados obtidos revelam o teor de sílica presente na cinza, o mesmo varia de 67,78% a 80,40% de acordo com a bibliografia apresentada.

Moraes *et al.* (2019) caracterizaram a cinza da folha do bambu produzida por autocombustão. A reatividade pozolânica e sua influência na porosidade, distribuição de tamanho de poros e comportamento mecânico em matrizes cimentícias também foram analisadas. A caracterização química e mineralógica da cinza foi realizada por meio de fluorescência de raios X e difração de raios X. Os resultados mostraram que a cinza avaliada apresenta alto teor de sílica (74,23%), dos quais 92,33% desse óxido é sílica amorfa. A caracterização mineralógica por meio da difração de raios X indicou a presença de material no estado amorfo ao exibir um desvio da linha de base, além disso, mostrou também a presença de quartzo. Quanto à reatividade, a cinza foi classificada como altamente reativa, o que significa que o método de autocombustão, embora simples (sem controle de temperatura), obteve sucesso. As análises de influência na porosidade, distribuição de tamanho de poros e comportamento mecânico demonstraram que a cinza contribuiu para melhorar o comportamento mecânico e a durabilidade das matrizes cimentícias. As pastas com 20% e 30% de cinza apresentaram menor volume total retido (%) do que a pasta controle. As argamassas com substituição de cimento por cinza apresentaram resistência à compressão muito semelhante após 7 dias de cura; a argamassa com 30% de cinza apresentou ganho de resistência de 56% aos 90 dias de cura. Portanto, os autores concluíram em sua pesquisa que a cinza da folha do bambu é uma alternativa adequada e sustentável para substituição parcial do cimento em matrizes cimentícias.

O trabalho de Rodier *et al.* (2019) apresenta o estudo da investigação das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar e da folha de bambu. A atividade pozolânica e hidratação de pastas cimentícias de misturas binárias e ternárias das cinzas foram investigadas. A análise de fluorescência de raios X apresentou o conteúdo de 36% e 70% de sílica nas cinzas do bagaço de cana-de-açúcar e cinza da folha de bambu, respectivamente. A difração de raios X de ambas as cinzas sugerem a presença de sílica amorfa, representando 32,26% na cinza da folha de bambu e 9,84% na cinza do bagaço de cana. O teste de condutividade elétrica mostrou alta

reatividade da cinza da folha de bambu. As misturas ternárias apresentam maior atividade pozolânica do que a mistura binária de cinza de bagaço de cana-de-açúcar. Argamassas binárias e ternárias têm maiores resistências à compressão do que a argamassa de controle sem aditivos minerais. Também foi concluído neste trabalho que a substituição do cimento por 10% em massa de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e 10% de cinza da folha de bambu proporciona uma redução do teor de hidróxido de cálcio e do calor de hidratação.

Cordeiro *et al.* (2020) submeteu a cinza da folha do bambu aos tratamentos térmico (queima autógena com temperatura monitorada seguida pela queima na mufla a 600 °C durante três horas), químico (via lixiviação com solução de 10% de ácido cítrico anidro) e mecânico (moagem em moinho de atrito de alta energia). Então, obtiveram como resultado uma cinza com alto teor de sílica amorfa classificada com boa pozolanicidade.

3.5.8. Cinza da casca de arroz (CCA)

Um dos resíduos, atualmente, mais utilizados como material pozolânico é a cinza da casca do arroz. Cerca de 533 milhões de toneladas de arroz foram produzidas em todo o mundo em 2018. Estima-se que 200 quilos de casca e 18% a 22% de cinzas são produzidos para cada tonelada de arroz, contudo isso depende das condições climáticas e das características geográficas do local da produção. A queima de uma tonelada de casca produz 220 quilos de cinzas, dos quais cerca de 94 quilogramas são constituídos por sílica (MOAYEDI, *et al.*, 2019).

Zareei *et al.* (2017), avaliaram as propriedades mecânicas e de durabilidade de tal cinza como material pozolânico em várias proporções de substituição no concreto. Os resultados dos testes indicaram que 15% de substituição proporcionou aumento da resistência à compressão em cerca de 20%. Já com relação à permeabilidade, a substituição do cimento por 25% de cinza levou a uma redução de 26% na permeabilidade à água e 78% na permeação de cloreto.

Hu, He e Zhang (2020) estudaram e verificaram a viabilidade da utilização da cinza da casca de arroz altamente reativa como aditivo mineral sustentável em materiais à base de cimento. Os testes de resistência à compressão das argamassas demonstraram que o aumento do teor de cinza da casca de arroz proporcionou melhores resultados. Quanto à degradação por sulfato, os resultados indicaram que a pasta com 15% de cinza de casca de arroz melhorou a resistência ao sulfato por meio da estabilização do C-S-H e do refinamento da estrutura dos

poros. Além disso, a análise de sustentabilidade, incluindo a emissão de dióxido de carbono incorporado e o consumo de energia, confirmou a compatibilidade ambiental da utilização da cinza da casca de arroz.

Henry e Lynam (2020) estudaram a energia incorporada no processo de combustão e transporte da cinza da casca de arroz para uma instalação de mistura de concreto. Nesse estudo tanto a combustão da casca de arroz quanto o transporte da cinza até a concreteira foram considerados. Assumindo que a energia recuperada da queima da casca é usada para secagem na fábrica de arroz onde o forno ciclônico está localizado, os autores descobriram que a produção dessa pozolana é altamente sustentável, com uma energia incorporada de -26 MJ por kg de cinza, ou seja, o sinal negativo indica que a energia é gerada em todo o processo, e não consumida. Comparando a energia incorporada da cinza com a energia incorporada do cimento, encontrado na literatura entre 4,6 MJ/kg e 6,4 MJ/kg, a cinza tem grande potencial para ser incorporada no concreto junto ao cimento como material de construção mais sustentável.

Marangon *et al.* (2021), estudaram experimentalmente o comportamento reológico de argamassas comerciais com alto teor de sílica de casca de arroz. A partir dos resultados foi possível constatar que, com o aumento do teor de cinza na mistura, houve um aumento da rigidez da argamassa e uma redução da trabalhabilidade das argamassas conforme aumentou-se o teor de cinza. Além disso, os autores relataram que as argamassas com maior teor da cinza, possivelmente, são capazes de reter mais água, o que pode aumentar a adesão com o substrato no estado endurecido. Em suma, o estudo mostrou que é possível produzir argamassas ecológicas com alta quantidade de cinza de casca de arroz aumentando o tempo de aplicação.

Depaa *et al.* (2021), fizeram um estudo que avaliou o comportamento mecânico de vigas de concreto armado utilizando a cinza da casca do arroz com 15% de substituição. Além disso, também foram feitos testes de resistência à compressão e flexão aos 28 dias. Os resultados apresentados mostraram que a substituição parcial por cinza de casca de arroz em 15% proporciona melhora na resistência, pois como foi mencionado pelos autores, o tamanho de partícula muito fino da cinza da casca de arroz contribuiu para o efeito de empacotamento dos poros no concreto, aumentando assim a resistência à compressão. E concluíram que a mistura com a cinza da casca de arroz pode ser usada de forma eficaz para garantir práticas de construção sustentáveis sem comprometer os aspectos de resistência.

3.5.9. Cinza do bagaço de cana (CBC)

No mundo são produzidas 1.889.268.880 toneladas de cana-de-açúcar por ano. O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, com volume de produção de 768.678.382 toneladas por ano (ATLAS BIG, [20—c]). No Brasil, 95% do bagaço é utilizado como combustível para geração de energia elétrica em caldeiras a vapor. Esse processo leva a formação de cinza do bagaço de cana, que segundo estimativas são geradas na proporção de 23,8 kg de cinza para cada tonelada de bagaço (MANSANEIRA, *et al.*, 2017).

Esta cinza também está dentre os resíduos agroindustriais mais utilizado como material pozolânico. Yogitha, Karthikeyan e Muni Reddy (2020), realizaram um estudo que testou o desempenho da cinza do bagaço da cana como substituto parcial de cimento em concreto. Comprovou-se que o concreto obtido apresenta trabalhabilidade desejada, ganho de resistência, redução da permeabilidade, o que é uma excelente característica de durabilidade, e resistência à condutividade térmica e elétrica quando comparado ao concreto convencional. Portanto, foi concluído que a cinza de bagaço de cana-de-açúcar pode ser usada para produzir concreto de baixo custo e sustentável que satisfaça os parâmetros de resistência.

Moraes *et al.* (2021), realizaram estudos de reatividade da cinza do bagaço da cana-de-açúcar obtida por processo de combustão autógena, com baixa perda por ignição com três tamanhos de partículas diferentes. Além disso, as cinzas foram caracterizadas quanto à distribuição granulométrica, composição química, difração de raios X, análise termogravimétrica e microscopia eletrônica. A reatividade foi avaliada por meio de testes de perda de condutividade elétrica. Como resultado, foi encontrado que a cinza com menor tamanho de partícula apresentou melhor reatividade e, conseqüentemente, melhor resistência à compressão.

Gupta, Wirquin e Bokhoree (2021) avaliaram o comportamento da cinza do bagaço da cana no concreto por meio de diferentes ensaios utilizando corpos de prova. Foram conduzidos ensaios de resistência à compressão, resistência à flexão, absorção de água, penetração de água, carbonatação e velocidade do pulso ultrassônico. Os resultados obtidos neste estudo retrataram as propriedades da cinza do bagaço da cana como material pozolânico e sua capacidade suplementar. Foi demonstrado que aos 120 dias de cura, a resistência à compressão aumentou 2,6% e 1,7% para o nível de substituição de 5% e 10%, e esse resultado foi atribuído à hidratação pozolânica ao longo do tempo nas amostras de concreto. A absorção de água aumentou 255%, 390%, 438% e 488% para o nível de reposição de 5%, 10%, 15% e

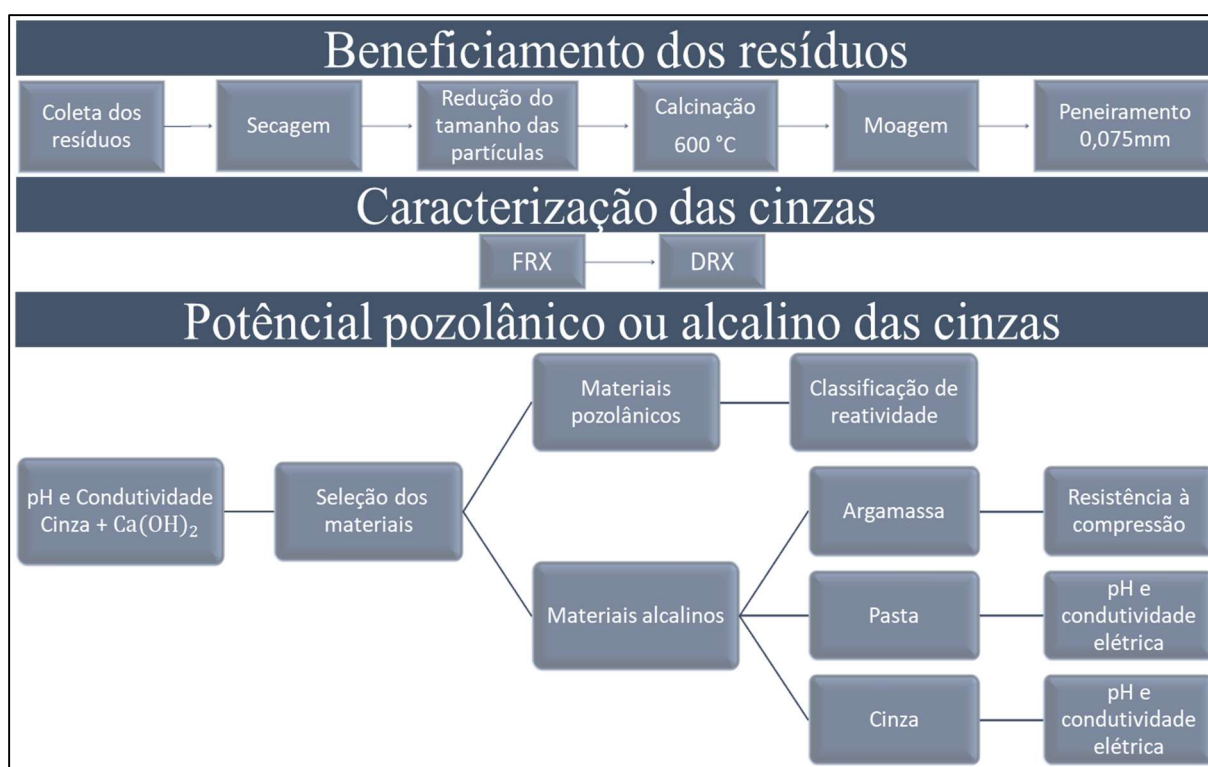
20%. Os outros testes mostraram diminuição da resistência à flexão e velocidade do pulso ultrassônico, aumento da penetração de água e aumento da profundidade de carbonatação. O estudo inferiu que a substituição de 10% do OPC pelo SCBA apresentou desempenhos positivos e pode ser considerado um material cimentício adequado na indústria da construção.

Andrade Neto *et al.* (2021) investigaram a influência da cinza do bagaço da cana na durabilidade do concreto, pois, como foi destacado por eles, existe uma preocupação adicional referente a reação álcali-sílica porque essa cinza geralmente tem um alto teor de álcali. Além disso, a pozolanicidade da cinza foi avaliada e tempos de vida útil foram estimados em termos de entrada de cloreto e carbonatação. As cinzas estudadas demonstraram alta atividade pozolânica, o que provocou a redução da porosidade e a absorção de água por capilaridade, colaborando também para o aumento da resistência mecânica do concreto. Porém, como a reserva alcalina foi reduzida (consumo do hidróxido de cálcio pela reação pozolânica), o concreto com a cinza apresentou maior taxa de carbonatação (até 69%) e menor tempo de vida em relação à carbonatação. No entanto, todos os corpos de prova de concreto tiveram uma vida útil de mais de 50 anos considerando um ambiente industrial, exceto aquele com 15% de cinza. A adição da cinza do bagaço de cana também reduziu os coeficientes de difusão de cloreto, aumentando a vida útil em até 97,3%. Por fim, a adição da cinza em até 5% mitigou a reação álcali-sílica devido à reação pozolânica e à formação adicional de C-S-H.

4. METODOLOGIA

Este capítulo está dividido em dois tópicos, o primeiro descreve os materiais utilizados, já o segundo apresenta o procedimento experimental e os equipamentos utilizados na pesquisa. No segundo tópico é descrito detalhadamente todo o processo, desde a produção das cinzas, as suas caracterizações química e mineralógica. Além disso, descreve os equipamentos utilizados e os princípios dos ensaios realizados. A Figura 14, apresenta um organograma dos processos e ensaios desenvolvidos ao longo do procedimento experimental de análise das cinzas.

Figura 14 - Ilustração das etapas do Procedimento Experimental.



Fonte: Própria autora.

4.1. MATERIAIS

A água deionizada utilizada foi obtida no deionizador de água do Laboratório de Engenharia Civil da UNESP. A água de amassamento utilizada provém do abastecimento público de Ilha Solteira e foi coletada no Laboratório de Engenharia Civil da UNESP. O hidróxido de cálcio utilizado no teste de reatividade pozolânica das cinzas, possui aproximadamente 95% de pureza (Fabricante: Dinâmica química contemporânea Ltda). O

hidróxido de sódio, utilizado na elaboração da solução alcalina de ativação, possui aproximadamente 97% de pureza (Fabricante: Êxodo científica química fina indústria e comércio Ltda). O hidróxido de potássio, utilizado na elaboração da solução alcalina de ativação, possui aproximadamente mínimo de 85% de pureza (Fabricante: Labsynth produtos para laboratórios Ltda). A escória de alto-forno é rica em CaO com teor de 43,5%, 33% de sílica e 11,5% Al_2O_3 . Além disso, apresenta diâmetro médio de aproximadamente 27 μm . A vaselina foi utilizada como desmoldante nas formas metálicas para facilitar a remoção das argamassas. Sua densidade varia entre 0,82 e 0,86 g/mL (Fabricante: Dinâmica química contemporânea Ltda). A acetona com pureza mínima de 99,5% (Fabricante: Labsynth produtos para laboratórios Ltda) foi utilizada para a preparação das amostras que foram submetidas à caracterização física, química e mineralógica. Além disso, também foram utilizados frascos do tipo Erlenmeyer de 125 mL (seis para cada resíduo estudado); balança de precisão e formas metálicas 4x4x16 cm³.

As cinzas de comparação e as cinzas que serão submetidas às análises foram nomeadas cinza parâmetro e cinza teste, respectivamente. As cinzas teste foram produzidas pelo grupo de pesquisa MAC – Materiais Alternativos de Construção através de um processo de queima em laboratório a fim de garantir melhor controle de temperatura e tempo de calcinação, proporcionando a queima total e homogênea da matéria orgânica, além de favorecer o aumento da fração amorfa da cinza. As duas cinzas parâmetro, a cinza de casca do arroz (CCA) e a cinza do bagaço de cana (CBC) foram as mesmas utilizadas na pesquisa de Da Silva *et al.*, (2021).

4.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E EQUIPAMENTOS

4.2.1. Beneficiamento dos resíduos

A proposta desta pesquisa apresenta caráter técnico, mas tem motivação sustentável, portanto, é necessário que se obtenha o menor consumo energético possível relacionado ao beneficiamento dos resíduos estudados. Contudo, na fase de avaliação, o material (que foi transformado em cinza), passou por processos visando garantir melhores reatividades tendo em vista que a incorporação do resíduo no campo da construção civil só será possível caso seja provada sua viabilidade técnica.

Todos os resíduos foram coletados na região da cidade de Ilha Solteira, SP. Visando evitar o apodrecimento por excesso de umidade, os resíduos foram expostos à luz solar em um

intervalo de tempo de, pelo menos, duas horas por dia durante uma semana. Já a casca da banana, como apresentava-se mais úmida, necessitou ser inserida na estufa (Figura 15) com temperatura de 60 °C durante 12 horas. Após a desidratação dos resíduos, a folha de bananeira, a casca de banana, a casca de laranja e a palha de milho foram fracionados (para que a área superficial fosse aumentada); proporcionando melhor homogeneidade na fase de calcinação do material. A folha de bambu, a casca de café e a casca de soja, por outro lado, por apresentarem tamanhos relativamente pequenos, foram diretamente submetidos à calcinação na mufla.

Figura 15 - Estufa utilizada no processo de secagem da casca de banana.



Fonte: Própria autora.

Todas as cinzas teste foram obtidas pela calcinação a 600 °C por uma hora com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min. Foi utilizada a mufla mostrada na Figura 16, com o objetivo de proporcionar a perda da matéria orgânica da amostra. Cabe dizer que, a temperatura de 600 °C foi indicada como temperatura ótima de calcinação da casca de arroz por Brandão Júnior, *et al.*, (2020), da casca de laranja por Olubajo; Odey; Abdullahi, (2019) e da casca de café por Lin, Kuo e Hsu, (2015) para produzir cinzas com melhores propriedade na substituição parcial do cimento.

Figura 16 - Mufla utilizada no processo de calcinação dos resíduos agroindustriais.



Fonte: Própria autora.

Após a calcinação, a cinza foi submetida à moagem manual utilizando o gral de ágata com pistilo mostrado na Figura 17, objetivando o aumento da superfície específica da mesma. Então a cinza foi passada na peneira 200 (abertura 75 μm), e somente o material passante foi utilizado nas caracterizações e análise de potencial pozolânico/alcalino.

Figura 17 - Gral de ágata com pistilo.

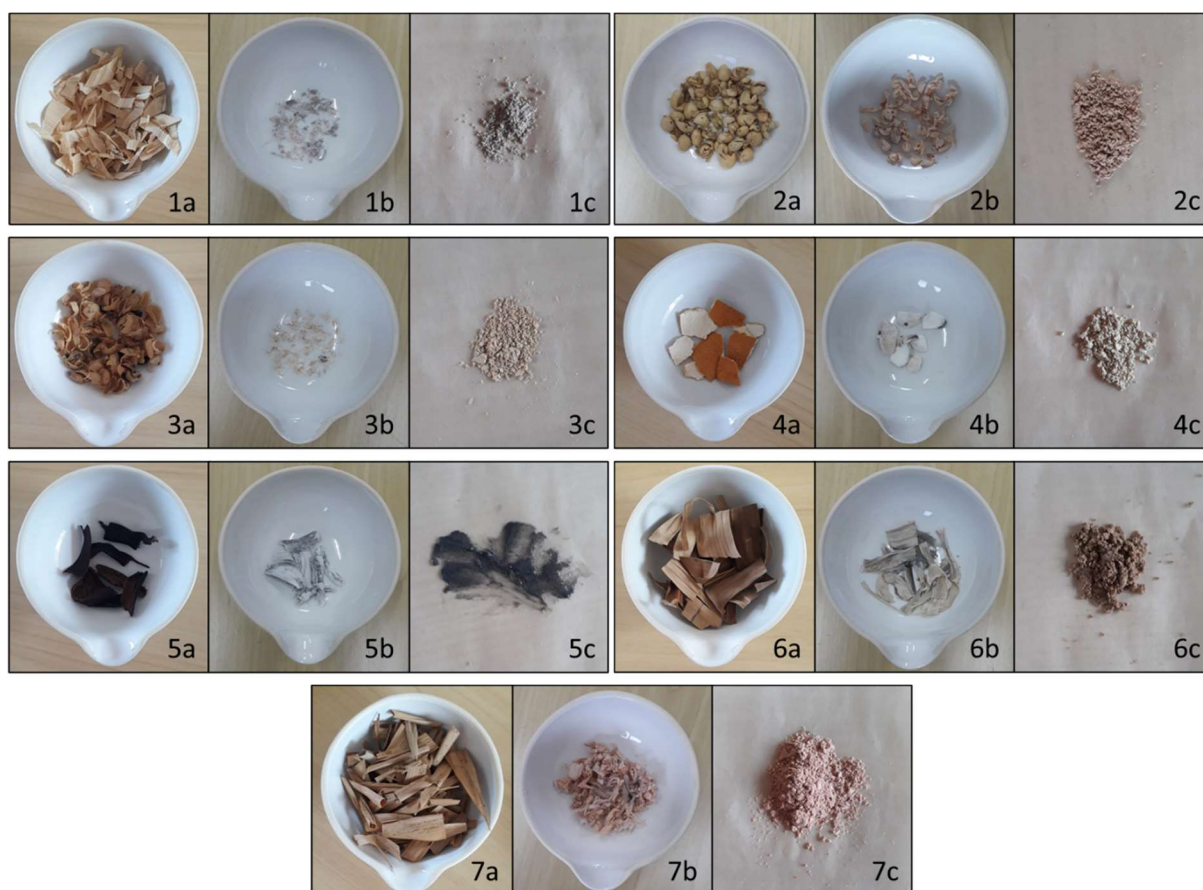


Fonte: Própria autora.

A Figura 18, apresenta os resíduos antes, depois da calcinação e após a moagem. Os números de 1 a 7 representam os resíduos. O número 1 (um) é a palha de milho, 2 (dois) é a casca de soja, 3 (três) é a casca de café, 4 (quatro) é a casca de laranja, 5 (cinco) é a casca de banana, 6 (seis) é a folha de bananeira e 7 (sete) é a folha de bambu. As letras "a", "b" e "c", indicam o estágio do beneficiamento. A letra "a" é referente ao resíduo antes da calcinação. A letra "b", após a calcinação. E, a letra "c", após a moagem.

É importante destacar uma característica da cinza da casca de banana, como pode ser observado na Figura 18 (5c), a cinza está pastosa, a verdade é que ela possui propriedade higroscópica, isso significa que ela absorve umidade do ambiente, e isso ocorre em poucos minutos (menos de cinco). Isso pode ser atribuído à presença de silvita, uma fase que absorve a umidade do ar (HILLS *et al.*, 2020).

Figura 18 - Resíduos antes, depois de calcinar e após a moagem.



Fonte: Própria autora.

4.2.2. Caracterização das cinzas

Foram preparadas amostras de cada cinza para a realização das caracterizações química e mineralógica. Para a primeira, a amostra foi caracterizada por meio da técnica de espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) com detector por dispersão de comprimento de onda (Figura 19). Para a caracterização química da amostra, espera-se que as cinzas apresentem alto teor de sílica e alumina no estado amorfo. Por meio dessa técnica, é possível determinar quantitativamente o teor de cada óxido presente nas cinzas. Essa análise permite que a mesma amostra utilizada seja empregada em outras técnicas, pois é uma análise não destrutiva. Inicialmente, o equipamento emite uma radiação denominada radiação primária sob a amostra, essa radiação por sua vez, acarreta um acúmulo de energia fazendo com que elétrons de camadas internas do material se aproximem da superfície. Então, os elétrons da camada externa migram para os espaços que antes eram ocupados no interior. A energia excedida por conta desta transição de elétrons se dissipa na forma de raios X fluorescentes. Por fim, o equipamento reconhece a radiação liberada por cada elemento do material e mede a concentração do elemento de acordo com a intensidade de cada transição eletrônica.

Figura 19 - Espectrofotômetro de fluorescência de raios X (FRX).



Fonte: UFJ (2021).

Para a caracterização mineralógica, a técnica utilizada foi a difratometria de raios X (DRX). Este equipamento (Figura 20) basicamente mede os desvios dos raios X ao incidirem na amostra analisada. Neste ensaio foram tomadas medidas no intervalo de 5° a 80° de 2 θ e

passo de $0,02^\circ$ com velocidade de $1^\circ/\text{min}$. O método DRX foi aplicado às cinzas com o propósito de verificar os minerais presentes e constatar a presença de material no estado vítreo (não-cristalino). Espera-se encontrar material amorfo, indicando que a queima adequada foi aplicada, pois os minerais constituídos por sílica (óxido desejável) estariam no estado amorfo, não sendo eles identificados como mineral no ensaio.

Figura 20 - Difratorômetro de raios X (DRX).



Fonte: Própria autora.

4.2.3. Potencial pozolânico ou alcalino das cinzas

O método de ensaio utilizado neste trabalho é um método adaptado de Tashima *et al.* (2014). Consiste em monitorar as suspensões com diferentes proporções de cal/cinza (CH/CZ), através de medidas de condutividade elétrica e pH a 60°C , durante 7 dias consecutivos, sendo tomadas medidas de pH e condutividade de todas as proporções a cada 24 horas. O método adaptado é uma condição necessária, porém não suficiente para classificar a reatividade dos materiais pozolânicos, para isso, seria necessário ensaios utilizando as outras temperaturas de 40°C e 50°C (do método original). Com isto, pretende-se observar uma redução nos valores de pH e de condutividade elétrica (no caso do material pozolânico) e um aumento nos valores de pH e condutividade (no material com potencial alcalino).

No material com potencial pozolânico é possível observar o ponto de insaturação da suspensão, verificando a redução na concentração de íons Ca^{+2} e OH^- , devido à reação pozolânica. Isso porque a reação pozolânica provoca uma diminuição de íons cálcio e

hidroxila, mas a presença de Ca(OH)_2 sólido sem dissolver faz com que se mantenha mais ou menos constante as concentrações de Ca^{+2} e OH^- , isto ocorre até que todo o sólido seja consumido, momento à partir do qual pode-se notar uma diminuição significativa de pH e da condutividade elétrica. Com isto, é possível conhecer e analisar até que proporções CH/CZ as cinzas são capazes de reagir, consumindo completamente o hidróxido de cálcio em fase sólida.

Já o material que apresenta alto teor de álcalis solúveis tende a aumentar o pH e a condutividade elétrica ao longo do tempo devido a liberação de íons na suspensão.

Foram preparadas diferentes proporções de CH/CZ (2,0:8,0; 2,5:7,5; 3,0:7,0; 3,5:6,5; 4,0:6,0; 4,5:5,5), com 50 mL de água deionizada, de modo que todas as suspensões estivessem saturadas de hidróxido de cálcio, sendo que a solubilidade de Ca(OH)_2 é de 0,185 g/ 100 mL a 25 °C, diminuindo com o aumento da temperatura (CALHEIROS; ZANIN; PACHECO, 2013). Para essas proporções, considerou-se um valor de massa total de sólido (CH + CZ) equivalente a 1,0 g. Adicionada a água deionizada nos frascos, estes foram vedados com um filme plástico, sendo colocados, então, no banho termostático com agitação (130 rpm) da marca Julabo SW22 (Figura 21) por trinta minutos para que fosse atingida a temperatura do teste (60 °C).

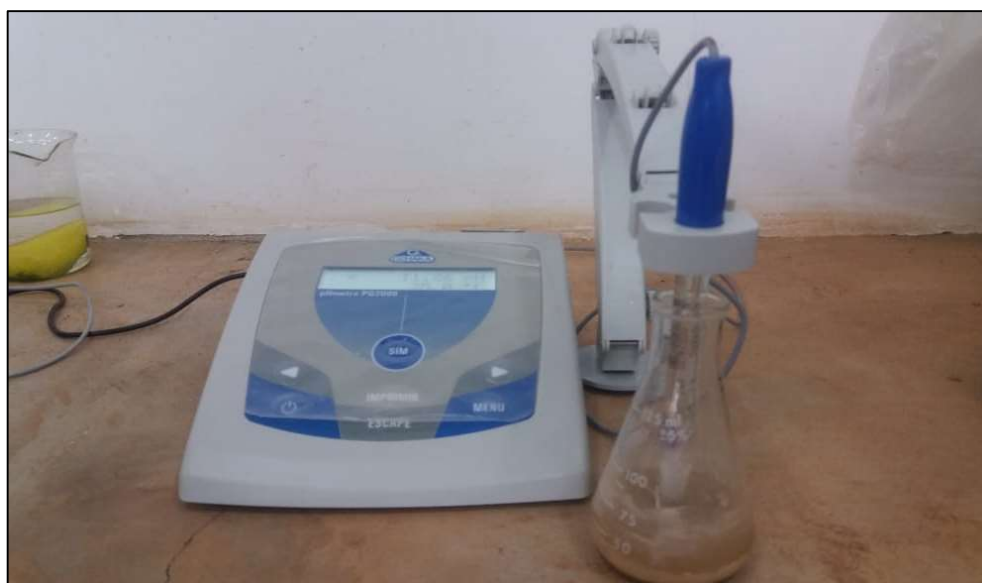
Figura 21 - Banho termostático com agitação.



Fonte: Própria autora.

Após esse intervalo de tempo, o hidróxido de cálcio foi adicionado, a fim de saturar a suspensão. Então, os Erlenmeyers foram, mais uma vez, vedados e colocados no banho termostático por mais 15 minutos. Em seguida, foram realizadas as primeiras aferições de pH e condutividade elétrica em todas as suspensões de CH com o auxílio do equipamento pHmetro PG2000 GEHAKA e do Condutivímetro CG2000 GEHAKA, respectivamente, Figura 22 e Figura 23. Posteriormente, as cinzas foram adicionadas à suspensão e, após quatro horas, a segunda medida foi tomada, continuando o monitoramento com a terceira medida após as primeiras 24 horas a partir da primeira medição, a quarta após 48 horas, assim por diante até o sétimo dia. Quando não se estava tomando medidas, as suspensões permaneciam vedadas em constante agitação a fim de evitar quaisquer problemas, tais quais a evaporação de água e a carbonatação da amostra, também para facilitar a reação pozolânica (cinza pozolânica) ou liberação de íons (cinza alcalina).

Figura 22 - Equipamento de aferição de pH.



Fonte: Própria autora.

Após a elaboração dos ensaios, foram plotados os gráficos referentes ao pH e condutividade elétrica de cada suspensão e proporção. No caso dos gráficos referentes ao pH, a análise foi feita por meio da concentração de hidroxila presente na suspensão.

Uma vez que o pH neutro representa o equilíbrio iônico entre os íons OH^- e H^+ , quando existe um desequilíbrio, a suspensão torna-se ácida, no caso de maior concentração de íon H^+ , ou básica quando existe maior concentração de íons OH^- . Tratando-se da reação

pozolânica, existirá um consumo de OH^- , e, portanto, a suspensão tenderá a redução da concentração de hidroxila, tornando a suspensão menos básica.

Com os valores obtidos através do pHmetro, foi feita uma conversão de pH para pOH, para isto, foi utilizada a Equação 1.

$$\text{pH} + \text{pOH} = 14 \quad (1)$$

Feito isso, a concentração de OH^- foi obtida através da Equação 2.

$$[\text{OH}^-] = 10^{-\text{pOH}} \quad (2)$$

Então, foram plotados os gráficos concentração de hidroxila $[\text{OH}^-]$ (mol/L) x tempo (t = horas) referentes ao pH.

Foi relatado por Tashima *et al.* (2014) que os valores de pH se mantem constantes durante o teste, apresentam apenas pequenas variações em torno de 0,15 unidades em relação ao valor inicial (t = 0). E, portanto, foi fixado que a variação maior que 0,15 unidades indica a insaturação do hidróxido de cálcio o qual pode estar sendo consumido pela reação pozolânica. Então, a variação (ΔpH) é marcada no modelo da Figura 24.

Já nos gráficos referentes à condutividade, não foi necessário fazer nenhuma conversão, portanto, foram plotados os gráficos com condutividade elétrica (mS/cm) x tempo (t = horas).

Figura 23 - Equipamento de aferição de condutividade elétrica.



Fonte: Própria autora.

A partir dos resultados do ensaio de condutividade elétrica é possível verificar quais materiais apresentaram características pozolânicas e quais apresentaram liberação de íons, caracterizando cinza rica em álcalis solúveis. Para o caso da cinza que apresentar consumo de íons, ou seja, uma cinza pozolânica, a perda de condutividade (L_c (%)) é calculada utilizando as Equações 3 e 4 (TASHIMA *et al.*, 2014).

$$L_c(\%)_t = \frac{C_0 - C_{t,c}}{C_0} * 100 \quad (3)$$

$$C_{t,c} = C_t - C_{t,poz} \quad (4)$$

Sendo que:

C_0 = condutividade elétrica da suspensão do hidróxido de cálcio antes da adição da cinza;

C_t = condutividade elétrica medida após t horas;

$C_{t,poz}$ = condutividade elétrica da suspensão só com pozolana após t horas;

$C_{t,c}$ = condutividade elétrica corrigida após t horas (é aproximadamente igual a C_t).

Utilizando esses resultados, é possível fazer a pré-classificação da cinza em três categorias: altamente reativa, de média reatividade, de baixa reatividade. A pré-classificação é feita por meio da marcação no modelo apresentado na Figura 24. Tal marcação é feita quando a perda de condutividade (L_c em %) atinge o valor de 30% ou mais, caracterizando a insaturação do hidróxido de cálcio na suspensão (e o tempo necessário para que isso ocorra é marcado em horas, denominado t_{ins}). Então, a pré-classificação dependerá de quais proporções atingem tal marcação, sendo que a Zona 1 representa as cinzas de baixa reatividade, Zona 2 de média e Zona 3 para as cinzas altamente reativas. Dessa forma, as cinzas que apresentam a marcação somente na Zona 1, ou seja, que somente nas proporções 2,0:8,0; 2,5:7,5 e 3,0:7,0 apresentaram valores de L_c maiores que 30%, são pré-classificadas como cinzas de baixa reatividade. Já para cinzas que apresentarem valores de L_c maiores que 30% em proporções além das situadas na Zona 1, por exemplo, para a proporção de 3,5:6,5, já serão pré-classificadas como de média reatividade.

Figura 24 - Modelo utilizado para a pré-classificação da reatividade das cinzas.

Proporções	Zonas de pré-classificação	ΔpH	t_{ins}
2,0:8,0	Zona 1		
2,5:7,5			
3,0:7,0			
3,5:6,5	Zona 2		
4,0:6,0			
4,5:5,5	Zona 3		

Fonte: Adaptado de Tashima (2014).

Já as cinzas que apresentaram aumento da condutividade elétrica e do pH, caracterizado pela liberação de íons solúveis (álcalis), foram selecionadas para serem utilizadas na elaboração de pastas e argamassas, pois provaram ter potencial para utilização como ativador alcalino.

4.2.4. Elaboração de pastas e argamassas

Foram selecionadas duas cinzas para a elaboração das pastas e argamassas, a cinza da casca de banana (CCB) com rendimento de 15,25% e a cinza da casca de café (CCC) com rendimento de 3,19%. A escolha foi baseada na capacidade de liberação dos álcalis presentes nas cinzas que também foram apresentados nos ensaios de caracterização química e mineralógica. Essa liberação indica que os álcalis eram solúveis e estariam disponíveis para atuar como ativador. Também, é importante mencionar que a cinza da folha de bananeira (CFBN) provou ser bastante promissora, porém, devido à pouca disponibilidade desse material no laboratório, dificuldade em conseguir mais material (devido a pandemia) e, também, devido à dificuldade em produzir as cinzas, foram selecionadas apenas a cinza da casca de banana e a cinza da casca de café.

As cinzas selecionadas para serem utilizadas na elaboração de pastas e argamassas, foram misturadas com água simulando a preparação da solução de ativação alcalina. Além disso, foram preparadas pastas e argamassas controle utilizando ativadores químicos comerciais na preparação das soluções de ativação.

4.2.4.1 Pastas

Para a preparação das pastas controle, primeiramente foram preparadas as soluções ativadoras, uma com hidróxido de sódio, uma com hidróxido de potássio e uma somente com água. Na preparação das pastas com cinza, o procedimento também não foi diferente, preparou-se primeiramente a “solução” (que nesse caso é uma suspensão), que foi a mistura da água mais a cinza a ser estudada e o procedimento seguiu-se da mesma forma. Primeiramente pesou-se a água e o ativador (ou cinza) nas proporções estabelecidas apresentadas na Tabela 4, então o ativador foi diluído na água e o frasco foi vedado com plástico filme para evitar perdas por evaporação. Após a preparação das soluções, foi pesada então a escória para cada uma das soluções. Então, depois da suspensão ter entrado em equilíbrio térmico com o ambiente, misturou-se a escória na suspensão até a obtenção de uma mistura homogênea. O frasco foi vedado, identificado (Figura 25) e mantido no banho térmico por 28 dias a 65 °C (Figura 26).

Tabela 4 - Proporções das pastas.

Pasta	Escória	Água	Ativador	Tipo de ativador
ESC + H ₂ O	15 g	6 g	-	Somente água
ESC + NaOH	15 g	6 g	0,96 g	NaOH
ESC + KOH	15 g	6 g	1,58 g	KOH
ESC + CCC	15 g	6 g	1,58 g	Cinza da casca de café
ESC + CCB	15 g	6 g	1,58 g	Cinza da casca de banana

Fonte: Própria autora.

Figura 25 - Pastas prontas, vedadas e identificadas.



Fonte: Própria autora.

Figura 26 – Banho térmico, 65 °C.



Fonte: Própria autora.

Após a cura de 28 dias, retirou-se amostras de cada pasta para submetê-las ao ensaio de pH e condutividade elétrica descrito em 4.2.5 *Análise de liberação de íons de pastas e cinzas*.

4.2.4.2 Argamassas

O procedimento empregado foi baseado no utilizado por Istuque (2017). Para a preparação das argamassas assim como na elaboração das pastas, também foram preparadas as soluções e, posteriormente, enquanto as soluções atingiam equilíbrio térmico com o ambiente, pesou-se a areia e a escória de cada traço (Tabela 5). Preparada a forma, já com uma fina camada de vaselina sólida, umedeceu-se a cuba e a pá da argamassadeira (Figura 27) com o auxílio de um pano úmido, e então começou-se o processo de mistura. Primeiro colocou-se a suspensão, na sequência adicionou-se a escória, nessa etapa a argamassadeira foi acionada por um minuto na velocidade lenta. Após o primeiro minuto, foi-se adicionando aos poucos a areia. Já no terceiro minuto aumentou-se a velocidade da argamassadeira. Passado o terceiro minuto, desligou-se a argamassadeira e com o auxílio de uma colher foi feita uma homogeneização do material que ficou retido nas bordas e no fundo da cuba. Feito isto, já no quinto minuto ligou-se novamente a argamassadeira na velocidade rápida pelo último minuto, totalizando cinco minutos na argamassadeira.

Figura 27 - Argamassadeira.



Fonte: Própria autora.

Tabela 5 - Traços das argamassas.

Argamassas	Escória	Areia	Água	Ativador	CPs	Tipo de ativador
ESC + H ₂ O	600 g	1200 g	240 g	-	3	Somente água
ESC + NaOH	600 g	1200 g	240 g	38,4 g	3	NaOH
ESC + KOH	600 g	1200 g	240 g	63,3 g	3	KOH
ESC + CCC	400 g	800 g	160 g	42,1 g	2	Cinza da casca de café
ESC + CCB	400 g	800 g	160 g	42,1 g	2	Cinza da casca de banana

Fonte: Própria autora.

Foi realizada a moldagem dos corpos de prova (Figura 28) na forma metálica 4x4x16 cm³, utilizando a mesa vibratória (Figura 29) para o adensamento. Não foram utilizados CPs cilíndricos por conta do maior volume de material que seria necessário. Os corpos de prova prismáticos possibilitam duas rupturas cada, utilizando 256 cm³ de argamassa (quase o mesmo volume de argamassa utilizado em um corpo de prova cilíndrico 196,35 cm³, que possibilita apenas uma ruptura). As dimensões e forma dos corpos de prova para o ensaio é regulamentado pela NBR 13279 e, estabelece um método para determinação da resistência à compressão de argamassas de assentamento e revestimento no estado endurecido (ABNT, 2005). Foram moldados três corpos de prova de cada traço padrão e dois para cada traço teste. Foram moldados apenas dois CPs com as cinzas, devido à dificuldade em produzir a quantidade de cinza necessária para a moldagem de três, como já foi descrito em 1.3 *Limitação*.

Figura 28 - Corpos de prova.

Fonte: Própria autora.

Cada corpo de prova gerou dois resultados de resistência à compressão, conforme procedimento também adotado em Istuque (2017), em concordância com a NBR 13279 (ABNT, 2005).

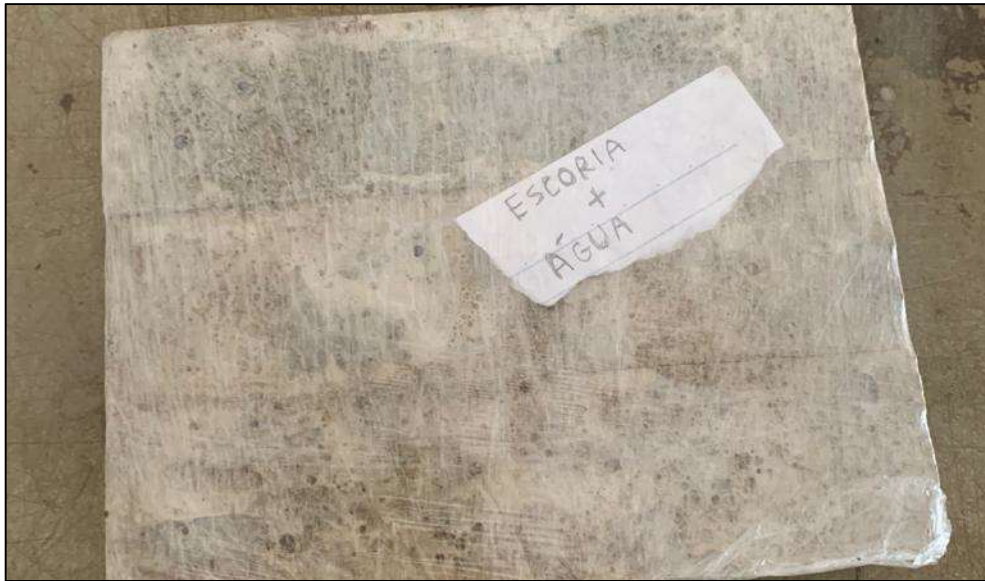
Figura 29 - Mesa vibratória.



Fonte: Própria autora.

Após a moldagem dos corpos de prova, os mesmos foram vedados com plástico filme e colocados no banho térmico a 65 °C, depois de 24 horas de cura (dependendo da “solução” utilizada o prazo estendeu-se um pouco mais) a argamassa foi desmoldada, vedada novamente (Figura 30) e continuou-se o processo de cura de 28 dias, ainda no banho térmico. Após os 28 dias de cura os CPs foram submetidos ao ensaio de compressão através da utilização da prensa hidráulica (Figura 31). O corpo de prova rompido e seu posicionamento pode ser visualizado na Figura 32 (a) e (b).

Figura 30 - Argamassa desmoldada e vedada.



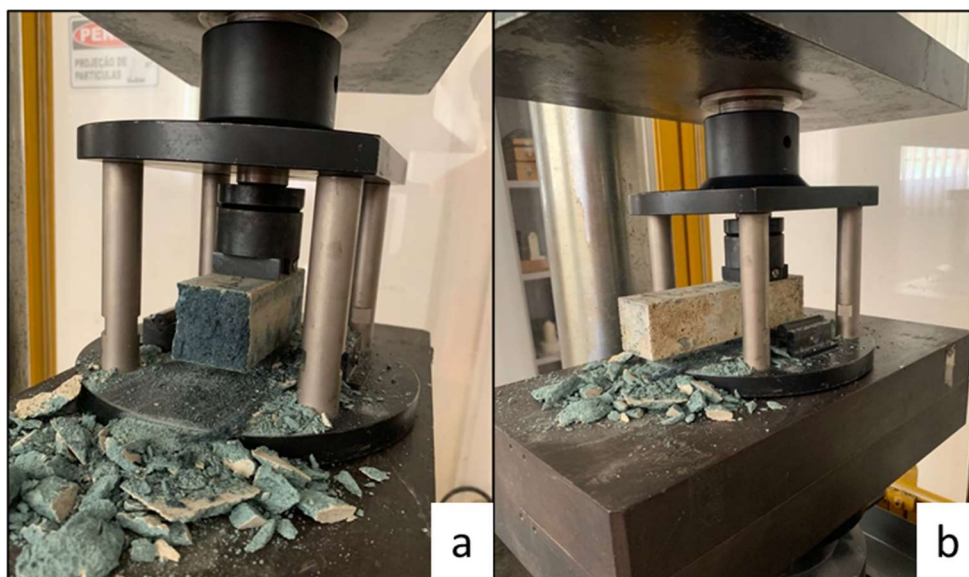
Fonte: Própria autora.

Figura 31 - Prensa hidráulica.



Fonte: Própria autora.

Figura 32 - Corpo de prova submetido ao ensaio de resistência à compressão.



Fonte: Própria autora.

4.2.5. Análise de liberação de íons de pastas e cinzas

Após a cura de 28 dias das pastas, retirou-se amostras de cada pasta para submetê-las a moagem até serem transformadas em pó, então, passou-se o material na peneira 200 (75 μm) e um grama de cada pasta foi utilizado para o ensaio de pH e condutividade elétrica.

Em temperatura ambiente, um grama de pasta moída foi adicionado em dez gramas de água deionizada, essa suspensão foi monitorada até 48 horas, tomando-se oito medidas de pH e condutividade elétrica com a finalidade de gerar uma curva de liberação de íons. O procedimento foi o mesmo para as cinco pastas e de forma semelhante, também foram elaboradas as suspensões com cinza. Foi utilizada uma grama de cinza em dez gramas de água e o procedimento foi o mesmo adotado para as suspensões com pasta.

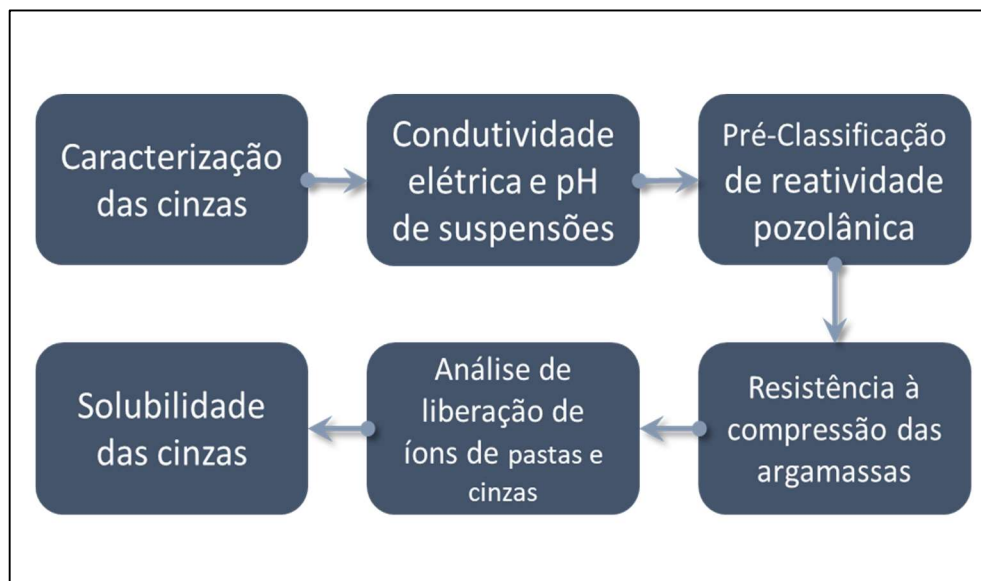
4.2.6. Solubilidade das cinzas

Para o cálculo de solubilidade das cinzas foi utilizado um filtro de papel e um funil. Foi preparada uma suspensão com 10 g de água deionizada mais 1 g de cinza. Após 24 horas, pesou-se o filtro de papel seco, então, filtrou-se a suspensão. O filtro de papel com a parte insolúvel da cinza que ficou retida foi levada à estufa por 24 horas a 65 °C. Após esse período pesou-se o conjunto. A diferença entre a massa da cinza retida e a massa total é obtida, então, é possível calcular a porcentagem solúvel da cinza.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos através dos ensaios e procedimentos descritos no capítulo 4. A apresentação dos resultados foi dividida conforme apresentado na Figura 33.

Figura 33 - Etapas da apresentação de resultados.



Fonte: Própria autora.

Ao longo do capítulo, os resultados obtidos com as diversas cinzas são comparados com os das cinzas do bagaço de cana e da casca de arroz no caso das cinzas com potencial pozolânico. E, o desempenho e características das argamassas e pastas comparadas às pastas controle (elaboradas com ativadores químicos comerciais).

5.1. CARACTERIZAÇÃO DAS CINZAS

5.1.1. Fluorescência de raios X (FRX)

A caracterização química das cinzas foi obtida por meio da técnica de espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) com detector por dispersão de comprimento de onda e está apresentada na Tabela 6. É possível observar que dentre as cinzas caracterizadas, apenas a CFB apresentou teores em concordância aos requeridos na norma NBR 12653 para ser classificada como pozolana segundo critérios químicos. O primeiro critério de classificação pozolânica é o de que a soma dos óxidos SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 deve ser maior ou igual a 50%

para ser da classe E, ou maior ou igual a 70% para ser da classe N. A soma dos óxidos mencionados apresentou teor de 78,84% para a CFB, então a cinza está em conformidade com a norma segundo esse requisito. Além disso, a CFB apresentou natureza silicosa, pois é composta majoritariamente por sílica (74,23%), nesse caso, os produtos resultantes da reação pozolânica serão principalmente silicatos de cálcio hidratado (C-S-H). Com relação ao teor de SO_3 , a norma também estabelece o teor máximo, de 5% para a classe C, 4% para a classe N. O que também está de acordo em todas as cinzas caracterizadas. Já com relação ao teor de perda ao fogo (P.F.), todas as cinzas apresentaram teor superior ao máximo permitido, isso pode estar associado a presença de matéria orgânica (carbono) que não foi eliminada totalmente durante o processo de obtenção das cinzas e, principalmente, devido ao processo de liberação de dióxido de carbono que segundo Bensharada *et al.*, (2022) ocorre entre 550 °C e 950 °C. A matéria orgânica é oxidada a 500-550 °C em dióxido de carbono e cinzas, em sequência, em uma segunda reação, ocorre a descarbonatação dos carbonatos a 900-1000 °C, deixando óxidos; esse processo pode ser afetado pelo tamanho da amostra e posição das amostras no forno (HEIRI; LOTTER; LEMCKE, 2001). A norma exige também que os álcalis disponíveis em Na_2O sejam inferiores ou iguais a 1,5%, o que está de acordo para a CPM, CCS, CCC, CCL e CFB, porém esse teor máximo é bastante ultrapassado na CCB e CFBN.

Tabela 6 - Caracterização química das cinzas teste (%).

Material	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	Na_2O	MgO	K_2O	SO_3	P_2O_5	Outros	P.F.
CPM	25,05	-	0,13	3,82	-	9,14	9,04	1,33	2,34	0,48	48,80
CCS	7,68	3,98	3,58	4,15	-	4,24	14,35	2,29	11,95	1,53	46,72
CCC	0,93	-	-	7,47	-	3,93	13,92	1,63	1,28	0,53	70,48
CCL	0,30	-	0,05	7,60	-	2,28	13,38	1,61	1,68	0,20	72,94
CCB	1,61	-	0,02	0,83	19,50	1,20	15,19	0,21	0,86	2,89	57,78
CFBN	12,81	1,67	0,26	8,92	19,26	4,59	17,98	1,90	2,26	3,54	27,07
CFB	74,23	2,27	2,34	3,30	-	1,46	2,11	0,84	1,02	1,02	11,35

Fonte: Própria autora.

Comparando os resultados obtidos na Tabela 6 com os da Tabela 7 é possível perceber que a cinza que apresentou teores mais semelhantes aos apresentados pelas cinzas parâmetro foi a CFB.

Tabela 7 - Caracterização química das cinzas parâmetro (%).

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	Outros	P.F.
CCA	92,80	2,50	0,10	1,60	0,30	0,60	2,00	-	-	-	0,10
CBC	78,60	4,50	4,90	1,30	0,20	1,00	2,40	0,70	-	1,92	4,42

Fonte: Da Silva *et al.*, (2021).

Raheem e Ikotun (2020) apresentaram dados de caracterização química da CPM calcinada a 600 °C durante sete horas, essa cinza apresentou a soma dos óxidos (SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃) de 74,97%. Apesar da temperatura de calcinação ser a mesma utilizada nesta pesquisa, o tempo de sete horas (em comparação com uma hora, utilizada nessa pesquisa) pode ter sido o responsável pela grande diferença apresentada nos teores dos óxidos presentes na cinza desta pesquisa em comparação aos teores apresentados por Raheem e Ikotun (2020). Além disso, vale ressaltar que o tipo, composição do solo e o clima da região do cultivo do milho interfere na composição química apresentada pela cinza do resíduo (MORAES, M., 2019). Cordeiro G. *et al.* (2020) também apresentaram a composição química da CPM, a soma dos óxidos foi de 89,41%, esse material antes de ser calcinado passou por um processo de tratamento químico por lixiviação com solução de ácido cítrico anidro a 10% (C₆H₈O₇) o que pode ter influenciado na alta concentração de SiO₂ apresentada pela cinza. Além disso a calcinação da cinza foi feita em dois processos, sendo que em um dos processos foi feita a queima por um período de três horas a 600 °C. Shakouri *et al.* (2020) caracterizaram quimicamente a CPM e apresentaram o teor de 49,00% de SiO₂, 3,27% de Al₂O₃ e 1,07 de Fe₂O. Teores maiores comparados ao desta pesquisa, o que provavelmente ocorreu devido ao processo duplo de calcinação utilizado e, também, pela variabilidade da matéria prima, pois como já foi mencionado, o cultivo, solo e condições de coleta da palha, pode influenciar significativamente nos teores de óxidos apresentados pelas cinzas.

Não foram encontrados na literatura resultados de caracterização química por meio da técnica de FRX para a CCS.

Reta e Mahto (2019) apresentaram em sua pesquisa resultados de ensaio químico da CCC, sendo composta por 14,65% de SiO₂, 12,07% de Al₂O₃ e 4,50% de Fe₂O₃. A soma desses óxidos resulta em 31,22%, tal porcentagem não é suficiente segundo a norma NBR 12653 para ser classificada como pozolana segundo critérios químicos. Além disso, tais resultados contrastam as porcentagens encontradas nessa pesquisa, tendo como resultado 0,93% de SiO₂ apenas, com porcentagens insignificantes de Al₂O₃ e Fe₂O₃. Pode ter ocorrido

tal variação de resultado devido a forma bastante diferente utilizada na calcinação, enquanto Reta e Mahto (2019) obtiveram a cinza por meio da calcinação ao ar livre durante três horas sem controle de temperatura, a cinza da presente pesquisa foi calcinada durante apenas uma hora, com temperatura constante de 600 °C em mufla.

Vamvuka *et al.* (2014) avaliou a CCL e foi verificado que a cinza apresentou 2,4% de SiO₂, 3,0% de Al₂O₃ e 0,2% de Fe₂O₃. Valores muito inferiores ao requerido na norma, mas ainda assim superiores aos apresentados na presente pesquisa, sendo 0,3% de SiO₂ e valores menos significantes ainda para Al₂O₃ e Fe₂O₃. Olubajo, Odey e Abdullahi (2019) contrastam os resultados acima comentados, a porcentagem de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ foram de 22,47%, 1,94% e 1,29% respectivamente, para a cinza da casca da laranja produzida com a mesma temperatura e período de queima desta pesquisa (600 °C 1 hora).

Em um estudo conduzido por Hills *et al.* (2020), foi apresentado que CCB incineradas a 900 ± 25 °C durante quatro horas, contém 7,2% de sílica, 0,4% de alumina e 0,3% de Fe₂O₃. Apesar de não ser valores muito altos, também existe uma diferença considerável quando comparado ao resultado da presente pesquisa, sendo que foi obtido apenas 1,61% de sílica com valores insignificantes de Al₂O₃ e Fe₂O₃.

Aqilah (2014), Nnochiri e Aderinlewo (2016) e Pawar e Khair (2018), apresentaram a composição química da cinza da folha de bananeira (CFBN). As porcentagens apresentadas foram 48,7% de SiO₂, 2,6% de Al₂O₃ e 1,4% de Fe₂O₃. Já Olutaiwo e Olushola (2017) apresentaram a composição dos óxidos presentes de 47,24% de sílica, 2,71% de alumina e 0,85% de óxido férrico, resultados bastante semelhantes, porém que não se assemelham tanto aos 12,81% de sílica apresentada na presente pesquisa, pode ser relacionado ao diferente método de produção da cinza, pois na bibliografia apresentada a cinza foi obtida por meio da calcinação a 900 °C por 24 horas ao ar livre, contudo nesta pesquisa utilizou-se uma mufla para a calcinação que permaneceu a 600 °C durante uma hora.

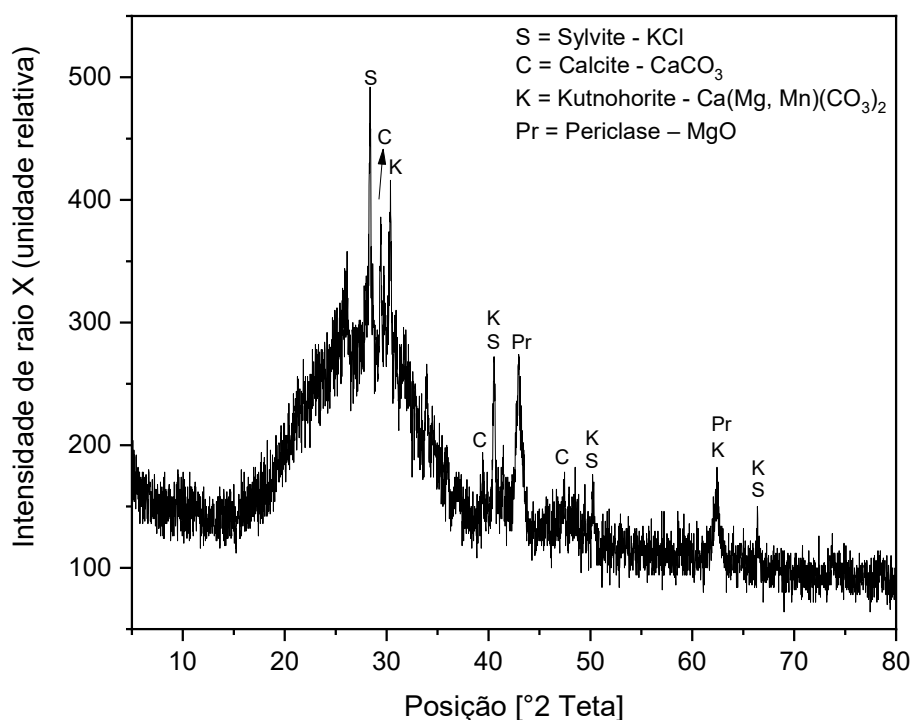
Hnin, Htet e Kyaw (2018), Ubachukwu, Nwobia e Onwaekele (2018), Onikeku *et al.* (2019), Villar-Cociña *et al.* (2020) conduziram análises química da CFB. Os resultados obtidos revelam o teor de sílica, alumina e óxido férrico presente na cinza, o mesmo varia de 67,78% a 80,40% para a sílica, porcentagem insignificante a 4,13% de alumina e de 0,15% a 1,74% de óxido férrico conforme bibliografia apresentada.

5.1.2. Difratometria de raios X (DRX)

Nas Figura 34 a Figura 40 são apresentados os padrões difratométricos das cinzas teste, além das análises os resultados serão discutidos e comparados aos difratogramas apresentados nas Figuras 38 e 39 correspondentes as cinzas parâmetro de material pozolânico. Com relação aos materiais que possivelmente podem ser utilizados como ativador alcalino, espera-se minerais com a presença de potássio ou sódio, confirmando os resultados químicos; além disso é desejável que o difratograma apresente material amorfo.

O difratograma de raios X da cinza da palha de milho está contido na Figura 34, onde é apresentado um halo amorfo entre ângulos 2θ de 15° a aproximadamente 35° , indicando potencial reativo do material (BELLAYER, 2019). O halo amorfo entre os ângulos 2θ de 15° a 30° é típico da sílica, indicando que a calcinação foi adequada para manter a sílica em estado amorfo (CORDEIRO, G. *et al.*, 2020). Além disso, a partir da análise do difratograma picos característicos da silvita (mineral composto por potássio), calcita, kutnohorita e periclase foram identificados. Em comparação, o difratograma da cinza da palha de milho não houve semelhança significativa com os difratogramas das cinzas de comparação.

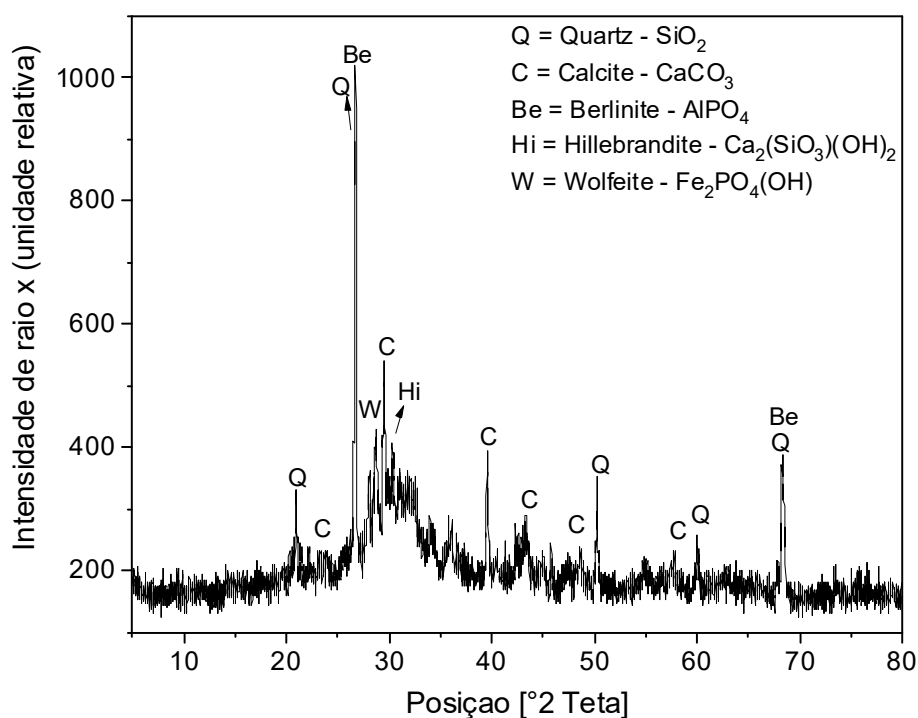
Figura 34 - Difratograma da CPM.



Fonte: Própria autora.

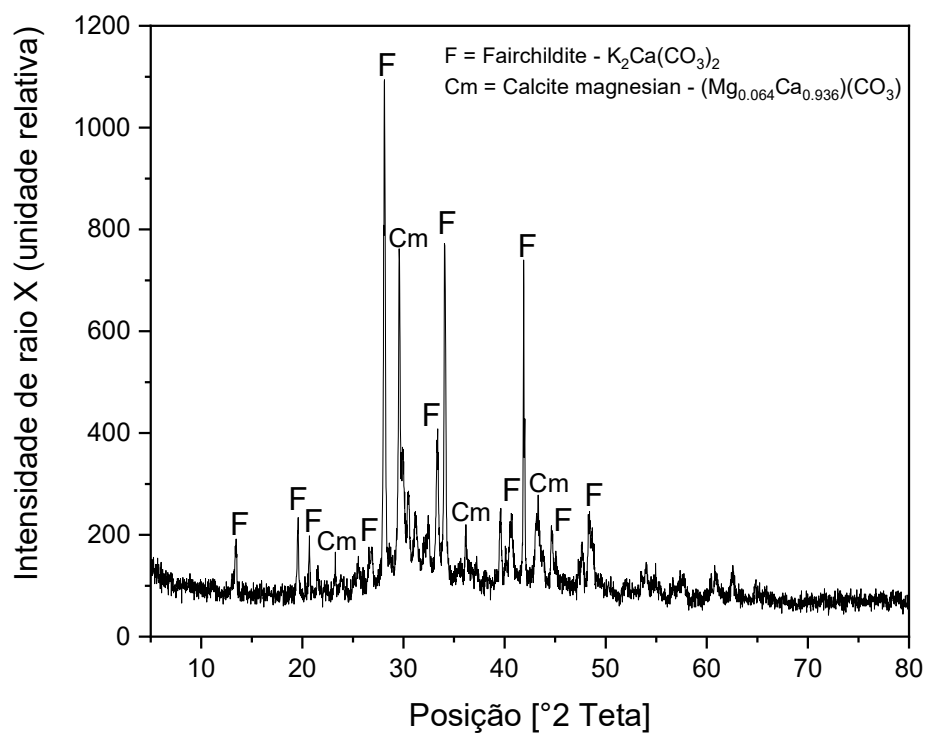
A partir do difratograma da cinza da casca da soja (Figura 35) é possível observar um halo amorfo entre os ângulos 2θ de 20° a 40° , pois as regiões amorfas das amostras apresentam-se por picos largos, enquanto as regiões cristalinas produzem picos agudos (PATEL; PARSANIA, 2018). O halo amorfo apresenta-se sutil devido à alta intensidade dos picos cristalinos. Foram identificados picos de berlinita, quartzo, calcita, hillebrandita e wolfeite. Não foi encontrado na literatura estudos que continham difratogramas desta cinza. O quartzo, provavelmente, é proveniente de contaminação de solo, assim como foi mencionado por Da Silva *et al.*, (2021) referindo-se à CBC. Além disso, os minerais identificados não possuem sódio nem potássio em sua composição, apesar do resultado de fluorescência ter apresentado óxido de potássio.

Figura 35 - Difratograma da CCS.



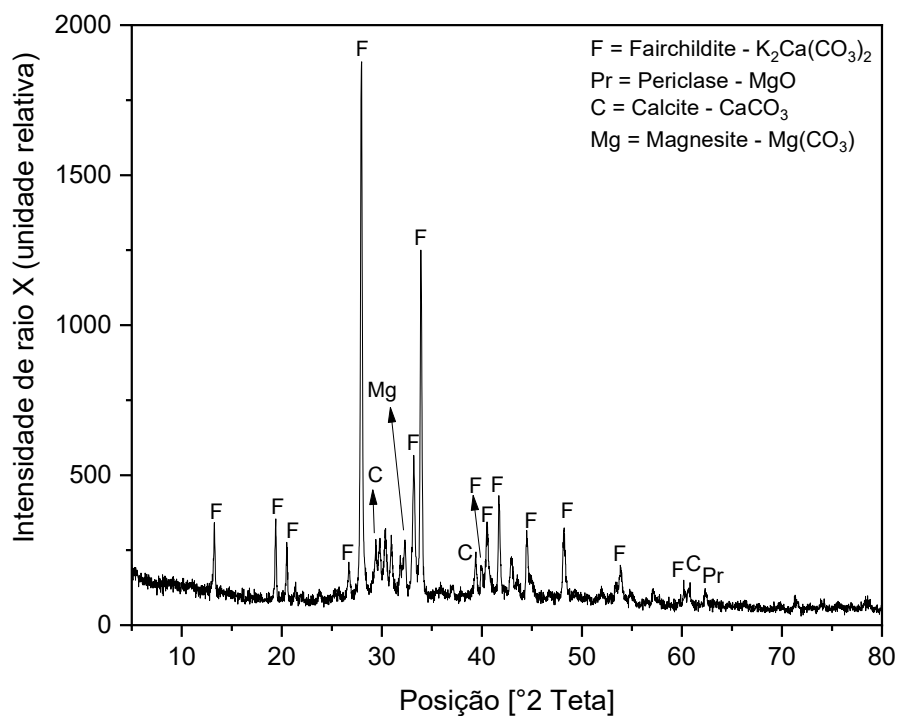
Fonte: Própria autora.

O difratograma da cinza da casca do café é apresentado na Figura 36 e apresenta-se semelhante ao da pesquisa de Lin, Kuo e Hsu (2015). Os minerais identificados foram a fairchildit (mineral composto por potássio) e a calcita magnesiana.

Figura 36 - Difratoograma da CCC.

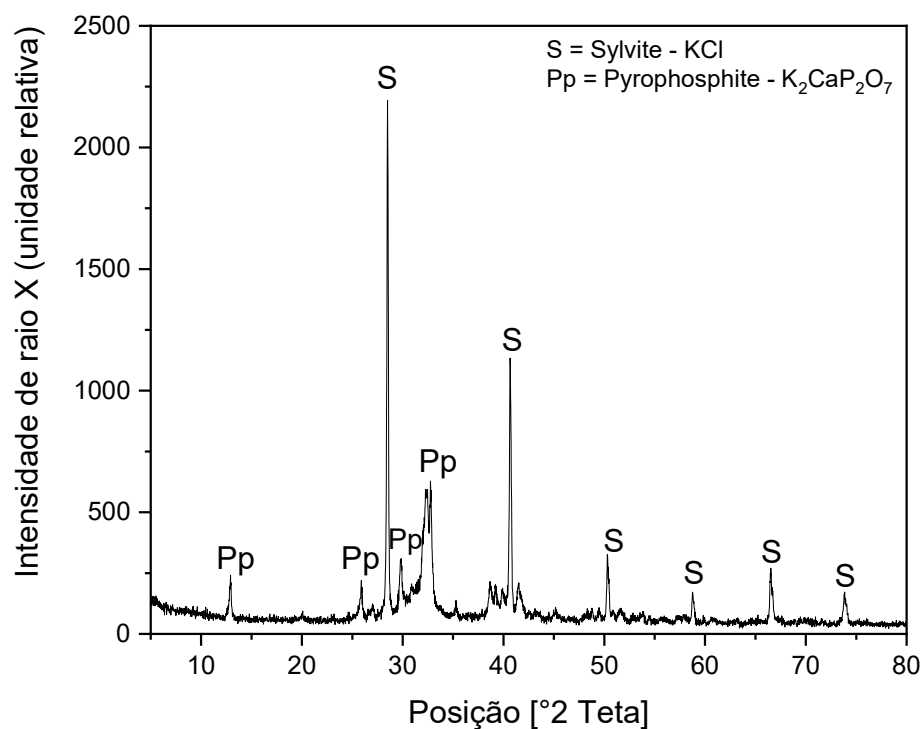
Fonte: Própria autora.

O difratograma da cinza da casca de laranja está apresentado na Figura 37, os minerais calcita, periclase também foram citados na pesquisa de Vamvuka *et al.* (2014). Além destes, também foram identificados picos de fairchildit (mineral composto por potássio) e magnesita.

Figura 37 - Difratoograma da CCL.

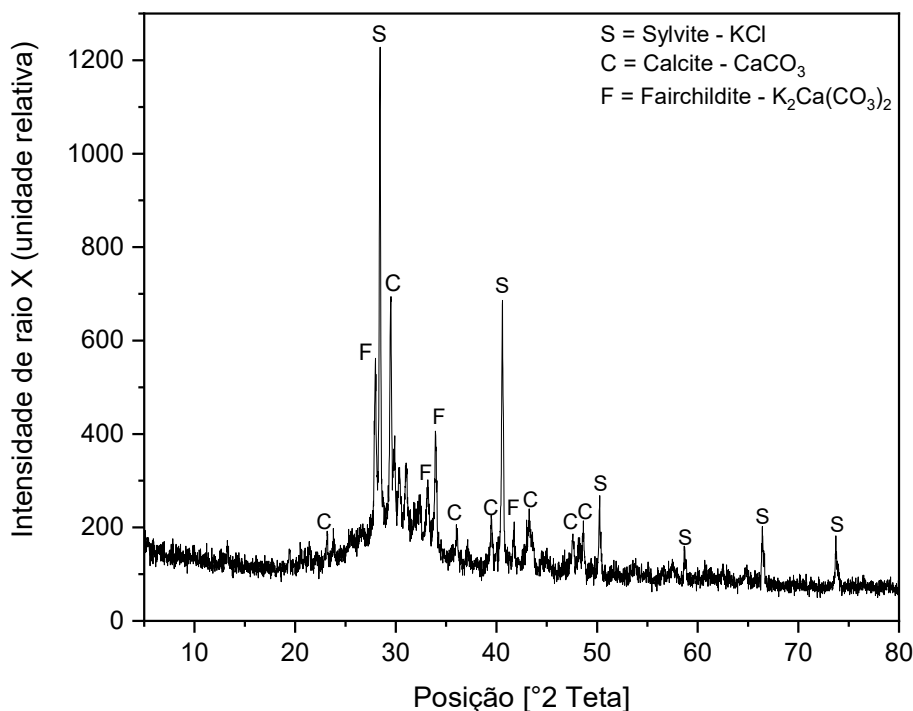
Fonte: Própria autora.

Por meio do difratograma de raios X da cinza da casca de banana (Figura 38) é possível identificar picos referente aos minerais silvita e pirofosfato. Como era previsto pela literatura, por conta da propriedade higroscópica da cinza, a cinza realmente apresentou silvita em sua composição mineralógica (HILLS *et al.*, 2020). Não foi encontrado na literatura difratogramas dessa cinza para uma possível comparação. No que diz respeito aos álcalis, tanto a silvita quanto o mineral pirofosfato possuem o potássio em sua composição.

Figura 38 - Difratoograma da CCB.

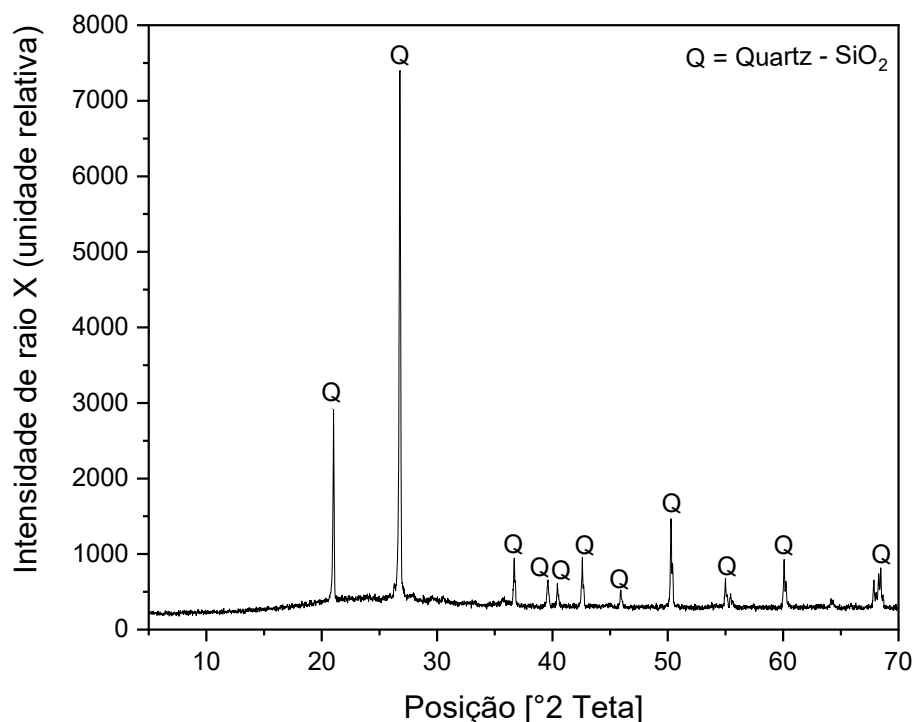
Fonte: Própria autora.

A partir do difratograma da cinza da folha de bananeira apresentado na Figura 39 é possível identificar picos referentes à silvita, calcita e fairchildit. Os estudos encontrados na literatura não apresentaram caracterizações mineralógicas para servirem de comparação. Com relação aos minerais compostos por álcalis, dois dos três minerais possuem o potássio em sua composição.

Figura 39 - Difratoograma da CFBN.

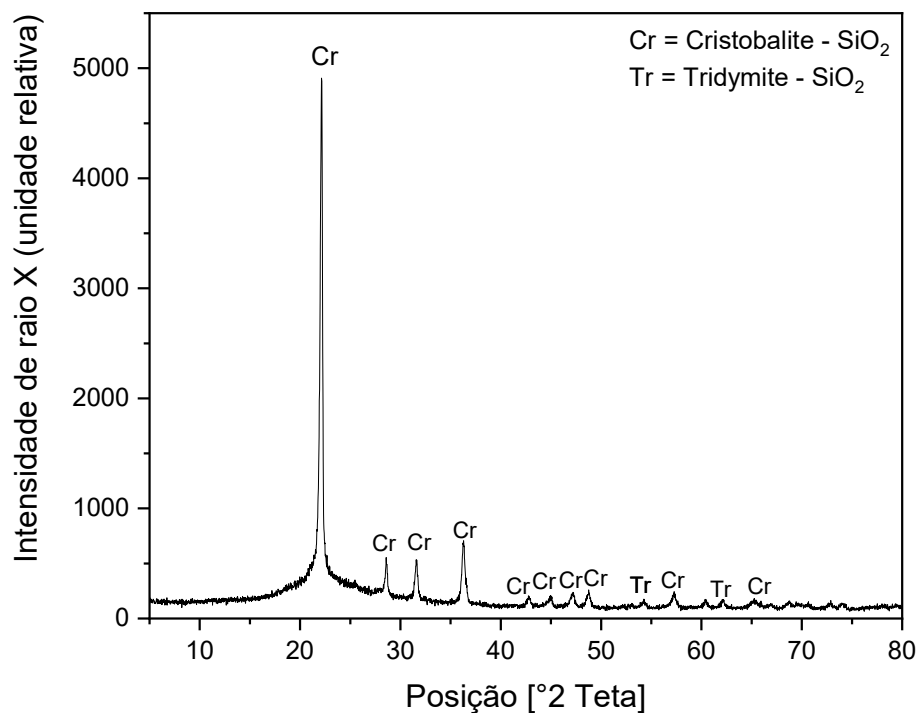
Fonte: Própria autora.

A análise mineralógica da cinza da folha de bambu está demonstrada por meio do difratograma de raios X na Figura 40, foram identificados picos característicos de quartzo. O quartzo também foi identificado na difratometria de raios X da pesquisa de Villar-Cociña *et al.* (2018). Moraes *et al.* (2019) também fez essa análise e, por meio do difratograma, concluiu que existe material no estado amorfo indicado pelo desvio da linha de base, além disso, também identificou a presença de quartzo. Rodier *et al.* (2019) mencionaram que a principal fase cristalina identificada foi quartzo, além disso, também apontaram a banda larga localizada entre os ângulos 2θ de 15° e 35°, característico de material amorfo, o que também foi apresentado na Figura 37. Já em Villar-Cociña *et al.* (2020), no difratograma da cinza da folha de bambu calcinada a 600 °C durante uma hora, não foi identificado pico cristalino, apenas material amorfo. O difratograma da Figura 40 é semelhante ao da cinza parâmetro CBC, apresenta quartzo e um leve desvio da linha base. Foi mencionado em Da Silva *et al.*, (2021) que o quartzo identificado no difratograma da CBC é provavelmente uma impureza, devido a contaminação com solo. Isso sugere que o quartzo identificado na CFB também possa ser proveniente de contaminação com solo.

Figura 40 - Difratoograma da CFB.

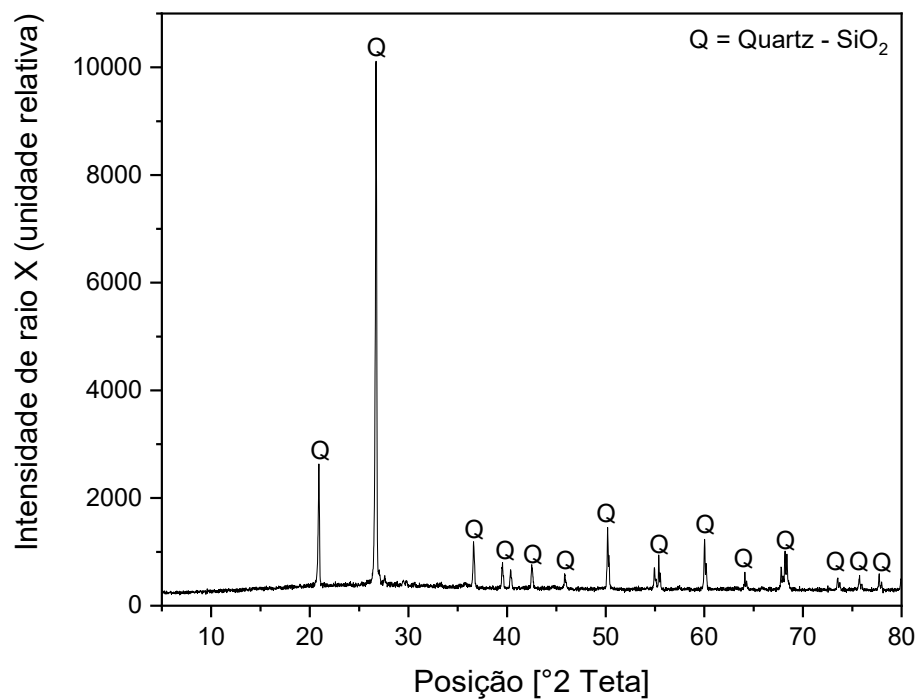
Fonte: Própria autora.

O difratograma da cinza da casca de arroz (cinza parâmetro) é apresentado na Figura 41 e foi analisado por Da Silva *et al.*, (2021), o difratograma apresentou cristobalita e tridimita. Em Brandão Júnior *et al.*, (2020), foi relatado que à medida que a temperatura de calcinação aumentava (além de 500 °C), verificava-se o rearranjo dos compostos cristalinos, reduzindo o halo amorfo, favorecendo a formação do pico de cristobalita (que aumentou a intensidade conforme aumentava-se a temperatura). Silva e Souza (2020), relacionaram os intervalos de temperatura das diferentes fases cristalinas estáveis da sílica, foi mencionado que o quartzo se transforma em tridimita a partir de 870 °C e a tridimita se transforma em cristobalita a partir de 1470° C. Dessa forma, a quantidade de sílica reativa diminuiu, devido à presença dessas fases cristalinas. Existem na literatura cinzas de casca de arroz que não apresentam fases cristalinas, apenas material amorfo, isso foi apresentado em Brandão Júnior *et al.*, (2020), quando as cinzas foram calcinadas a 600 °C durante 4 horas e quando foram calcinadas a 700 °C durante 2 horas. Também existe uma comparação interessante em Tashima *et al.*, (2014), onde são apresentadas duas cinzas de casca de arroz distintas, uma com 90,29% de sílica (denominada RHA-C) e outra com 83,53% de sílica (denominada RHA-A), a partir do difratograma percebe-se que apesar da RHA-C conter uma porcentagem maior de sílica, é cristalina, já a RHA-A possui um halo amorfo.

Figura 41 - Difratoograma da CCA.

Fonte: Da Silva *et al.*, (2021).

O difratograma da cinza do bagaço de cana (cinza parâmetro) foi apresentado na Figura 42. O difratograma foi analisado em Da Silva *et al.*, (2021) e foram identificados picos de quartzo, foi mencionado que o quartzo apresentado é uma impureza devido à presença de contaminantes (solo) no bagaço de cana.

Figura 42 - Difratoograma da CBC.

Fonte: Da Silva *et al.*, (2021).

5.2. CONDUTIVIDADE ELÉTRICA E PH DE SUSPENSÕES

Não foram encontrados na literatura estudos que continham dados (de pH e condutividade elétrica) referente à todas as cinzas para servir de comparação. A Tabela 8 apresenta quais delas é possível comparar e os respectivos autores das pesquisas encontradas.

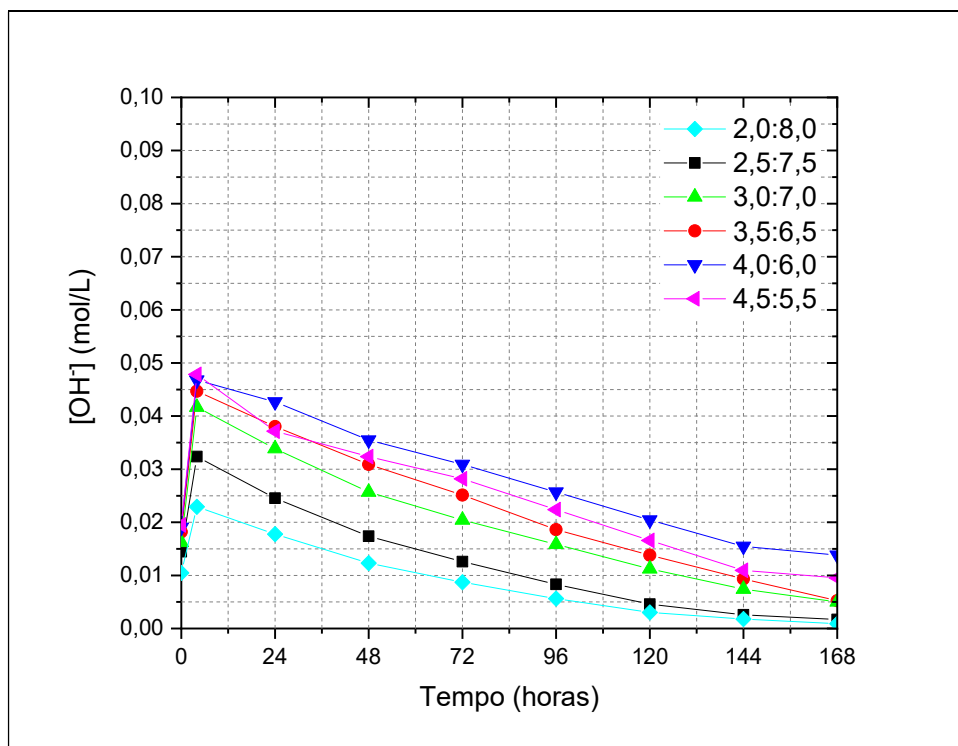
Tabela 8 - Estudos que contém dados de pH/conductividade elétrica.

Cinzas	Autores e ano de publicação
CPM	Qi; Feng; Wang, (2020)
CCS	
CCC	
CCL	
CCB	
CFBN	
CFB	Villar-Cociña, <i>et al.</i> , (2018)
	Moraes, M. <i>et al.</i> , (2019)
	Villar-Cociña, <i>et al.</i> , (2020)
CCA	Tashima <i>et al.</i> , (2014)
	Viet-Thien-Na <i>et al.</i> , (2014)
	Hidalgo, <i>et al.</i> , (2021)
CBC	Rossignolo, <i>et al.</i> , (2018)
	Moraes, J. <i>et al.</i> , (2016)
	Andreão, <i>et al.</i> , (2020)

Fonte: Própria autora.

5.2.1. Cinza da palha de milho (CPM)

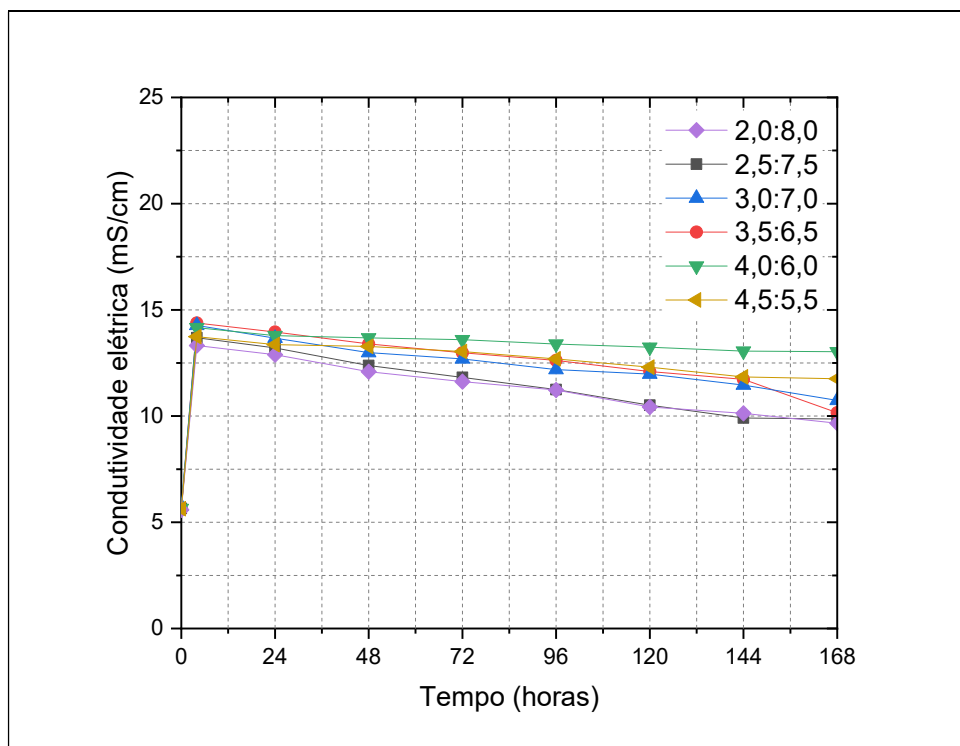
A partir da análise da Figura 43, é possível notar que até aproximadamente quatro horas do ensaio, houve uma ascensão dos valores referentes a concentração de hidroxila, o que indica que estava ocorrendo um processo de liberação de íons na suspensão. No entanto, após esse intervalo de tempo, os valores de concentração de hidroxila começaram a decair, atingindo valores finais menores que os valores iniciais ($t = 0$), em todas as proporções.

Figura 43 - Concentração de hidroxila, na suspensão de cinza da palha de milho.

Fonte: Própria autora.

Conforme apresentado na Figura 44, a curva da condutividade elétrica da suspensão até aproximadamente quatro horas de ensaio, também apresentou um aumento de valores. Estando de acordo com o comportamento inicial da curva de concentração de hidroxila, indicando liberação de íons. Depois disso, houve uma leve redução de condutividade, não sendo muito significativa. Os valores finais (de todas as proporções) não atingiram valores inferiores aos apresentados a zero horas de ensaio e, portanto, a cinza não foi capaz de consumir quantidade suficiente dos íons liberados pelo hidróxido de cálcio para ser classificada como material pozolânico. Isto está de acordo com a análise de fluorescência de raios X, pois a porcentagem de óxidos de silício, alumínio e ferro não correspondem a mais que 50% do conteúdo da cinza. Além disso, não houve liberação de álcalis, portanto, a cinza também não tem potencial de ser utilizada como ativador alcalino. Na pesquisa de Qi, Feng e Wang (2020), foi apresentado uma queda de 20% na condutividade elétrica da suspensão. Contudo, o método não foi o mesmo utilizado nessa pesquisa, a condutividade elétrica foi monitorada durante apenas seis horas, e a razão líquido-sólido foi de 0,13 L/g, enquanto que na presente pesquisa foi utilizado 0,05 L/g.

Figura 44 - Condutividade elétrica da cinza da palha de milho.



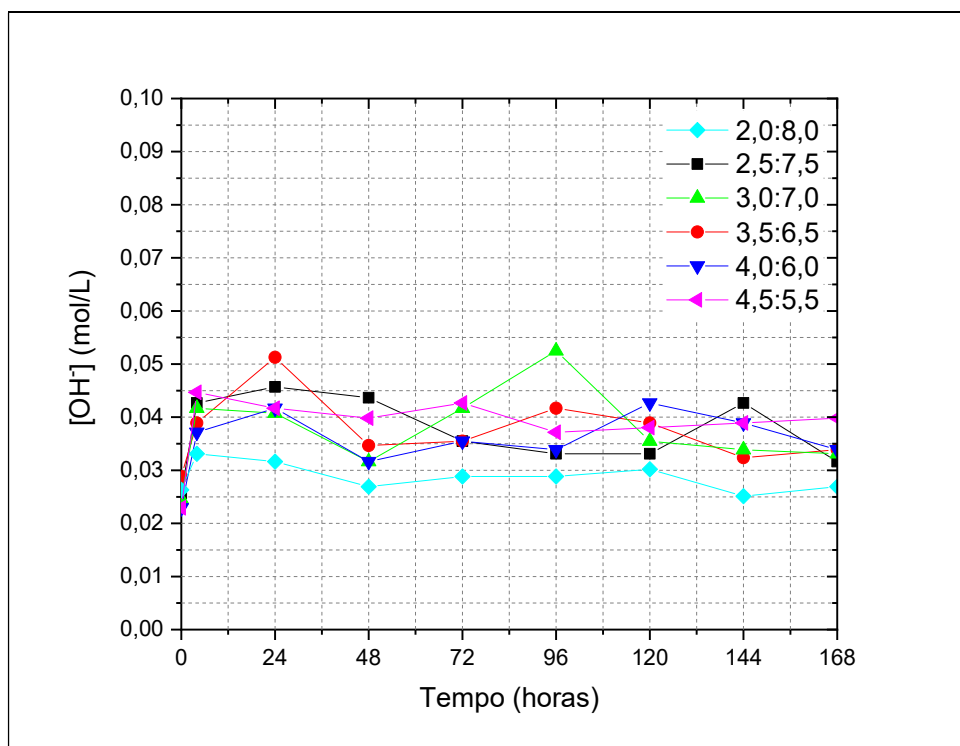
Fonte: Própria autora.

5.2.2. Cinza da casca de soja (CCS)

Houve uma oscilação na concentração de hidroxila na suspensão com cinza da casca de soja, conforme

Figura 45. As oscilações podem indicar que não houve liberação nem consumo de hidroxila. Os valores finais foram pouquíssimo maiores que os iniciais, sendo esse aumento insignificante.

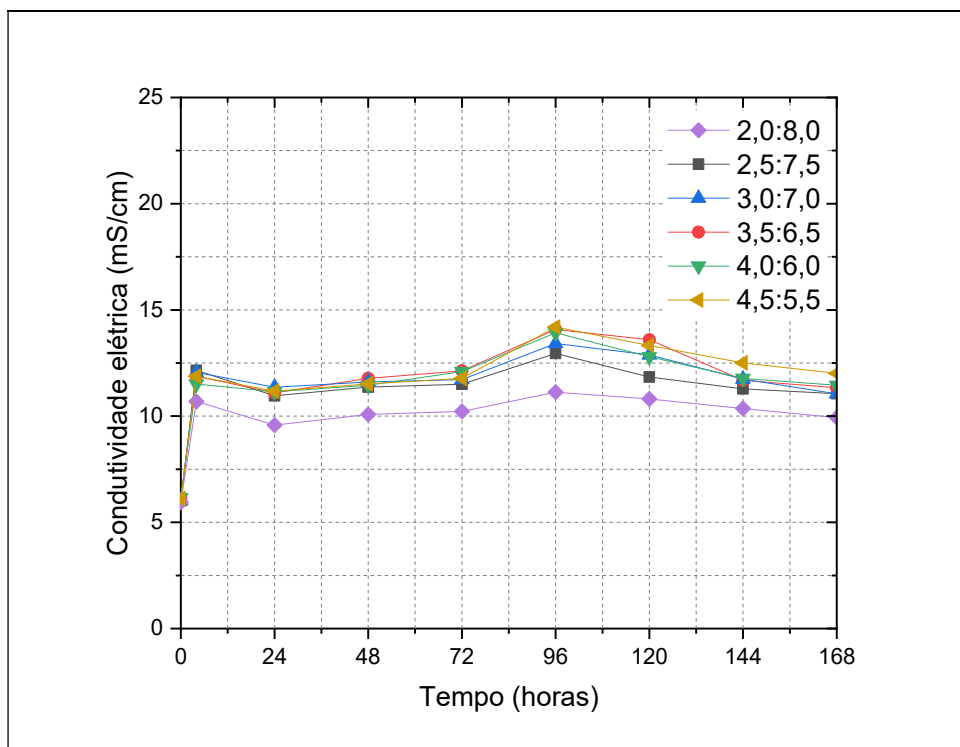
Figura 45 - Concentração de hidroxila, na suspensão de cinza da casca de soja.



Fonte: Própria autora.

A Figura 46 apresenta a curva da condutividade elétrica da suspensão com a cinza da casca da soja. Assim como as duas cinzas já apresentadas, houve uma liberação de íons até as quatro horas, representada pelo aumento de condutividade elétrica. Posteriormente os valores mantiveram-se quase constantes. A curva de condutividade elétrica não apresentou valores finais inferiores aos valores iniciais e, portanto, a cinza não apresentou característica pozolânica.

Figura 46 - Condutividade elétrica da cinza da casca de soja.

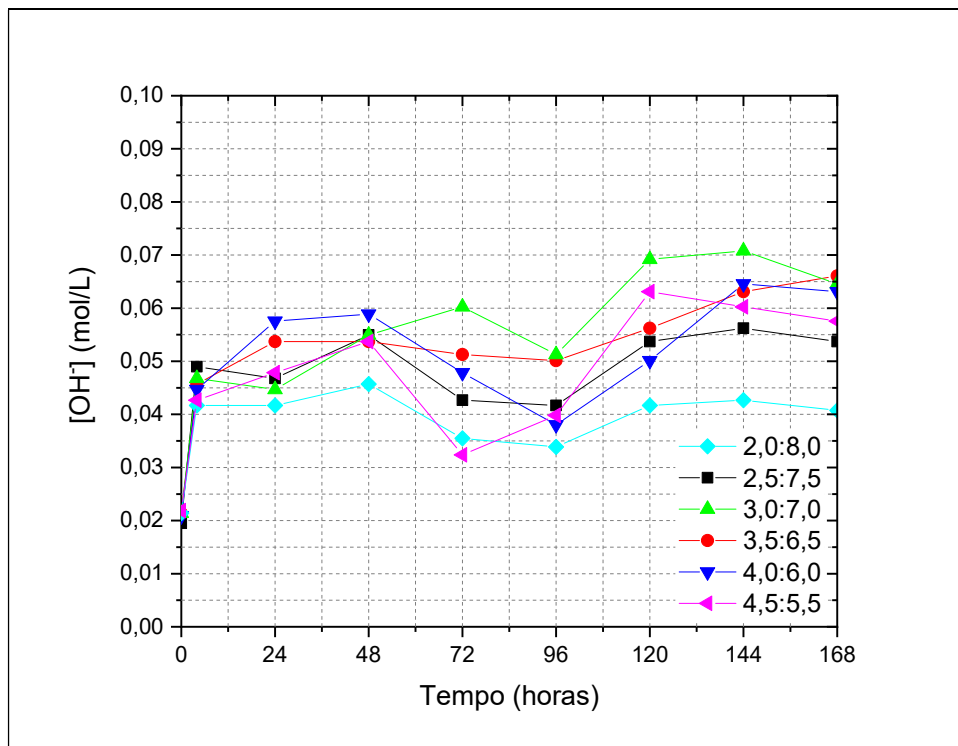


Fonte: Própria autora.

5.2.3. Cinza da casca de café (CCC)

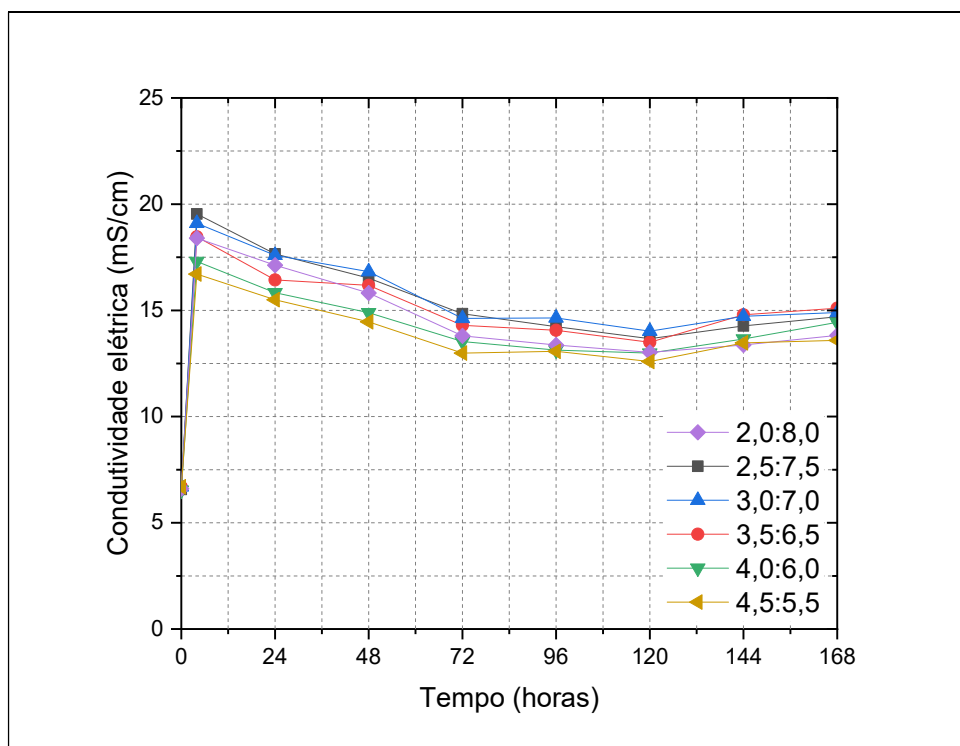
A Figura 47 apresenta o gráfico referente à concentração de hidroxila durante o teste de condutividade elétrica da suspensão com a cinza da casca de café. Ao longo do teste, houve uma oscilação de concentração de hidroxila em todas as proporções e os valores finais apresentaram um pequeno aumento de concentração, indicando que existiu liberação de íons hidroxila.

Figura 47 - Concentração de hidroxila, na suspensão de cinza da casca de café.



Fonte: Própria autora.

A curva da condutividade elétrica da suspensão com a cinza da casca de café foi representada na Figura 48. Nota-se que até as quatro horas houve uma grande liberação de íons marcadas pelo aumento da condutividade elétrica. Esse comportamento está relacionado com a dissolução dos álcalis presentes na cinza, evidenciando o potencial desta cinza como material de ativação alcalina. Com relação ao potencial pozolânico, a cinza não o apresentou, pois os valores finais de condutividade não atingiram valores inferiores aos apresentados a zero horas, portanto, não teve consumo de íons, pelo contrário, existiu liberação.

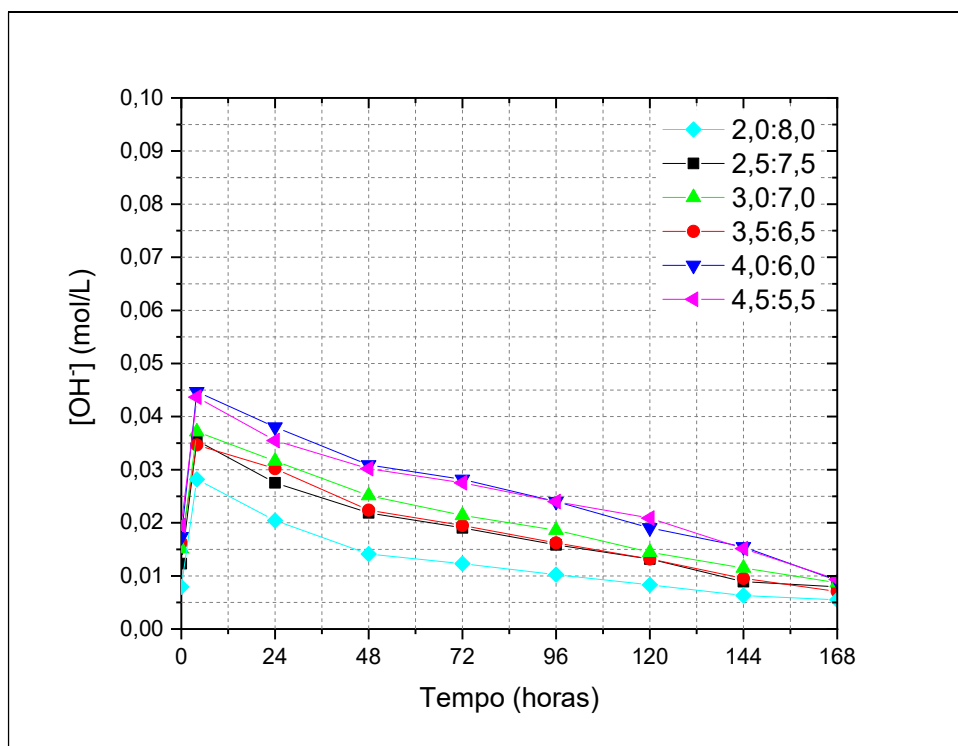
Figura 48 - Condutividade elétrica da cinza da casca de café.

Fonte: Própria autora.

5.2.4. Cinza da casca de laranja (CCL)

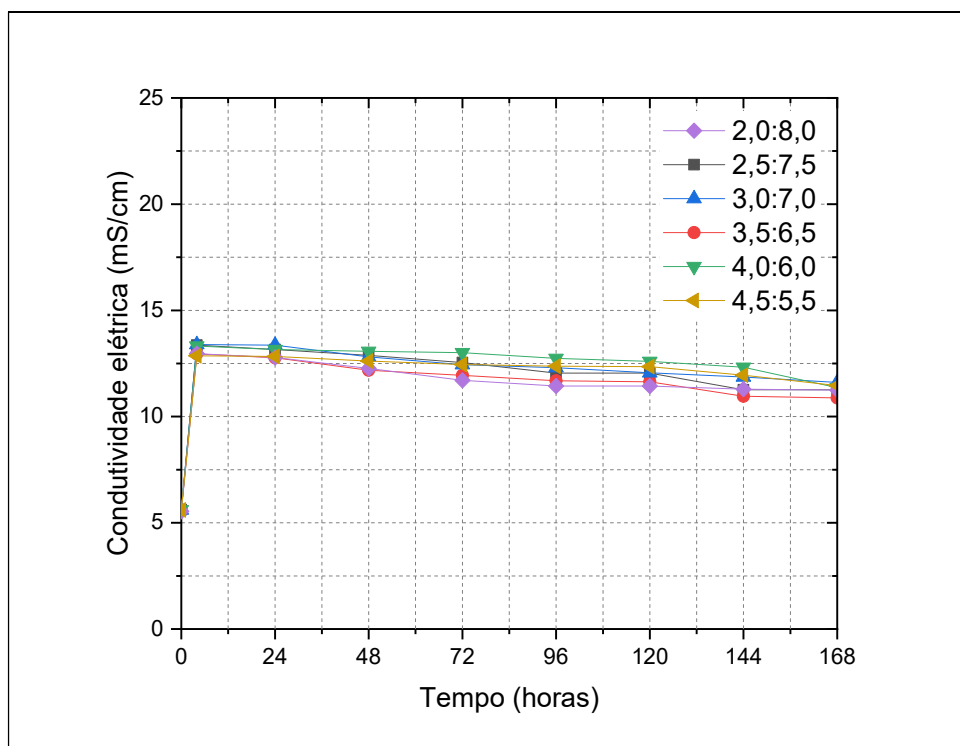
Analisando-se a Figura 49, nota-se que até as quatro horas de teste, houve um aumento da concentração de hidroxila, o que indica que estava ocorrendo um processo de liberação de íons na suspensão. Porém, após esse período, os valores de concentração de hidroxila começaram a reduzir, atingindo valores finais inferiores aos iniciais ($t = 0$), em todas as proporções, contudo a partir da análise química da cinza conclui-se que essa redução da concentração de íons hidroxila não está relacionada à reação pozolânica, já que a cinza apresentou baixo teor de sílica e alumina.

Figura 49 - Concentração de hidroxila, na suspensão de cinza da casca de laranja.



Fonte: Própria autora.

Como pode-se verificar na Figura 50, a curva da condutividade elétrica da suspensão até quatro horas de teste, também apresentou um aumento de valores. Isso também ocorreu na curva de concentração de hidroxila, indicando liberação de íons. Então, reduziu-se levemente a condutividade, mantendo-se quase constante (não sendo significativo). Todas as proporções apresentaram valores finais superiores aos apresentados a zero horas de teste e, portanto, a cinza mostrou-se incapaz de consumir quantidade suficiente dos íons liberados pelo hidróxido de cálcio, logo, não se pode classificar a cinza da casca de laranja como material pozolânico. Concordando com os resultados apresentados pela análise de fluorescência de raios X, pois o teor de óxidos de silício, alumínio e ferro não atingiram porcentagens mínimas requeridas. Com relação aos álcalis, a cinza não apresentou liberação, assim não é promissora para ser utilizada como ativador.

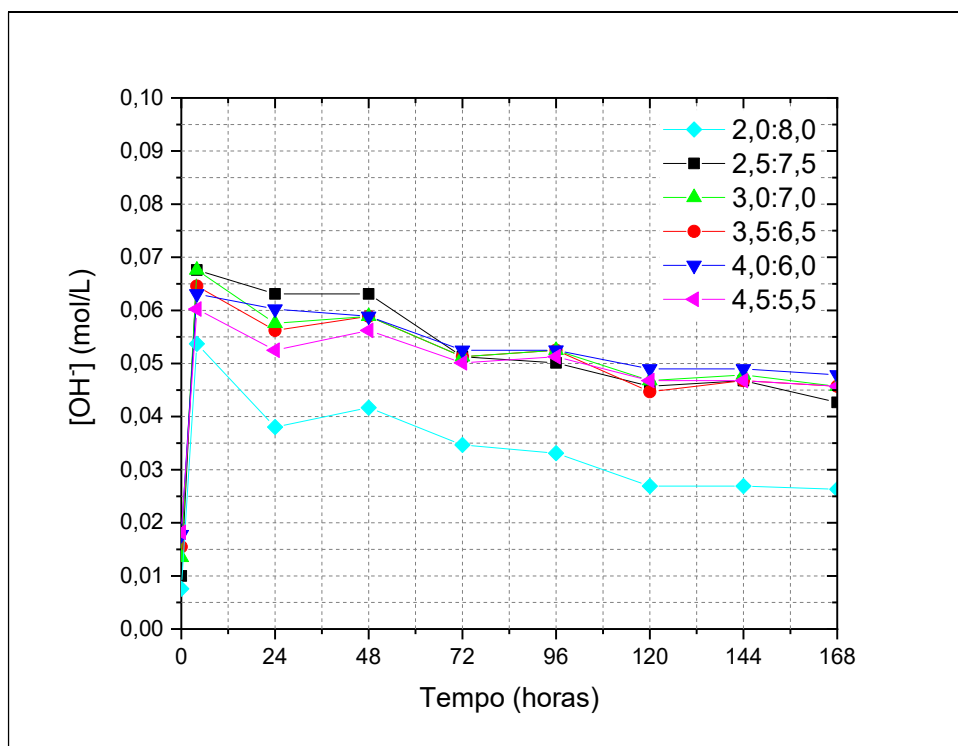
Figura 50 - Condutividade elétrica da cinza da casca de laranja.

Fonte: Própria autora.

5.2.5. Cinza da casca de banana (CCB)

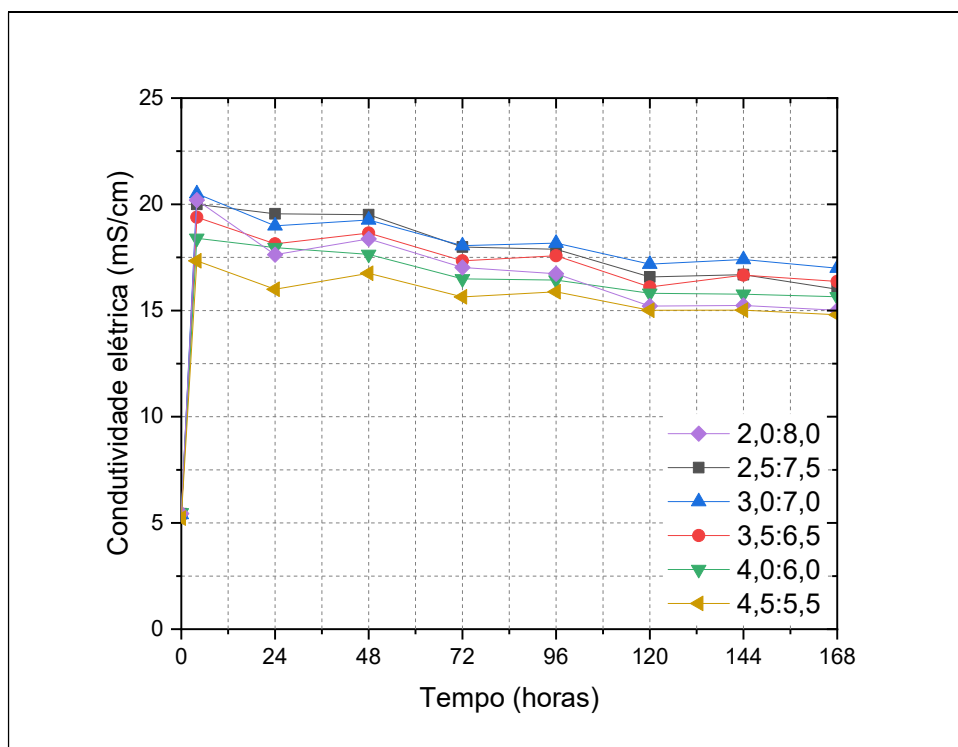
Observa-se a partir da Figura 51, uma ascensão de concentração de hidroxila até as quatro horas de ensaio. Esse comportamento também foi verificado nas outras suspensões que se utilizou outras cinzas. Após as quatro horas, as concentrações oscilaram tendendo a redução, porém em todas as proporções os valores finais não foram inferiores aos valores iniciais. A redução foi pequena comparada à liberação, mesmo a proporção que apresentou maior redução da concentração de hidroxila ao longo do ensaio não alcançou redução comparável aos materiais pozolânicos. Portanto, foi destacado o potencial da cinza da casca de banana como ativador alcalino.

Figura 51 - Concentração de hidroxila, na suspensão de cinza da casca de banana.



Fonte: Própria autora.

Nota-se por meio da análise da curva de condutividade elétrica apresentada na Figura 52, que nas primeiras quatro horas existiu uma liberação de íons muito significativa. Esse comportamento revela que a cinza da casca de banana possui os álcalis bastante solúveis, os álcalis que também foram verificados na caracterização química e mineralógica da cinza. Portanto, a cinza da casca de banana apresentou alto potencial para ser utilizada como material alternativo na ativação alcalina.

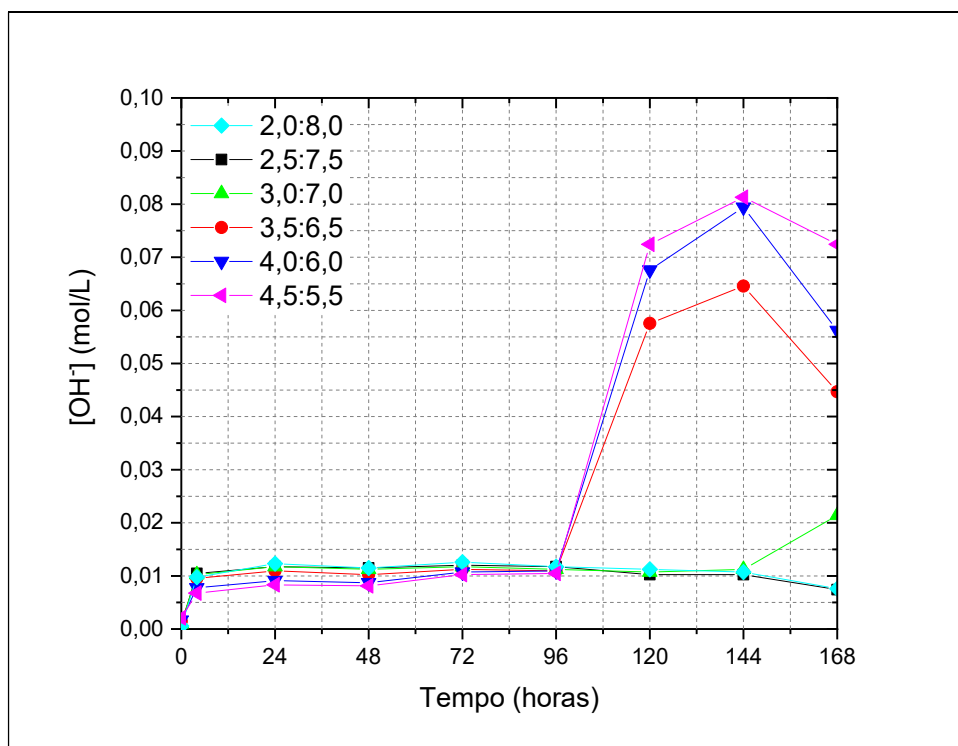
Figura 52 - Condutividade elétrica da cinza da casca de banana.

Fonte: Própria autora.

5.2.6. Cinza da folha de bananeira (CFBN)

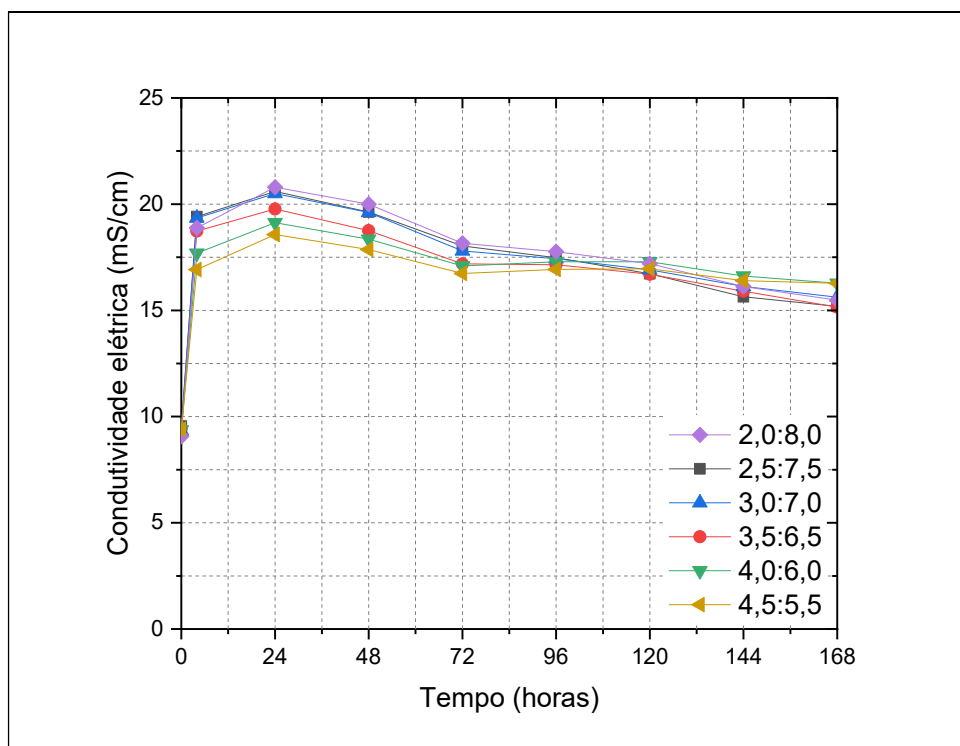
Analisando-se o gráfico da Figura 53, é possível verificar que não existiu variações significativas de concentração de hidroxila até as 120 horas para todas as proporções. A partir daí, as proporções 3,5:6,5, 4,5:6,5 e 4,5:5,5 apresentaram liberação de hidroxila. Já as outras proporções se mantiveram da mesma forma. Não foi descoberto o motivo desse comportamento. A hipótese é a de que sais presente na cinza se dissolveram após as 96 horas, aumentando assim a concentração de hidroxila. Um aumento de concentração de hidroxila foi verificado em Hidalgo *et al.*, (2021), porém, no referido estudo a cinza utilizada foi a cinza da casca do arroz; o aumento ocorreu principalmente nas proporções com maior teor de hidróxido de cálcio e foi mencionado pelos autores que pode estar associado a sais solúveis da cinza.

Figura 53 - Concentração de hidroxila, na suspensão de cinza da folha de bananeira.



Fonte: Própria autora.

A Figura 54 apresenta a curva obtida por meio do ensaio de condutividade elétrica conduzido com a suspensão de hidróxido de cálcio com a cinza da folha de bananeira. Nota-se que a cinza apresentou potencial alcalino, uma vez que a curva apresentou ligeiro aumento de condutividade até as quatro horas de ensaio, indicando dissolução dos álcalis apresentados na análise química da amostra. Os valores finais de condutividade elétrica foram maiores que os valores a zero horas de ensaio, portanto, a cinza não tem potencial pozolânico e possui potencial para ser utilizada como material alternativo de ativação alcalina.

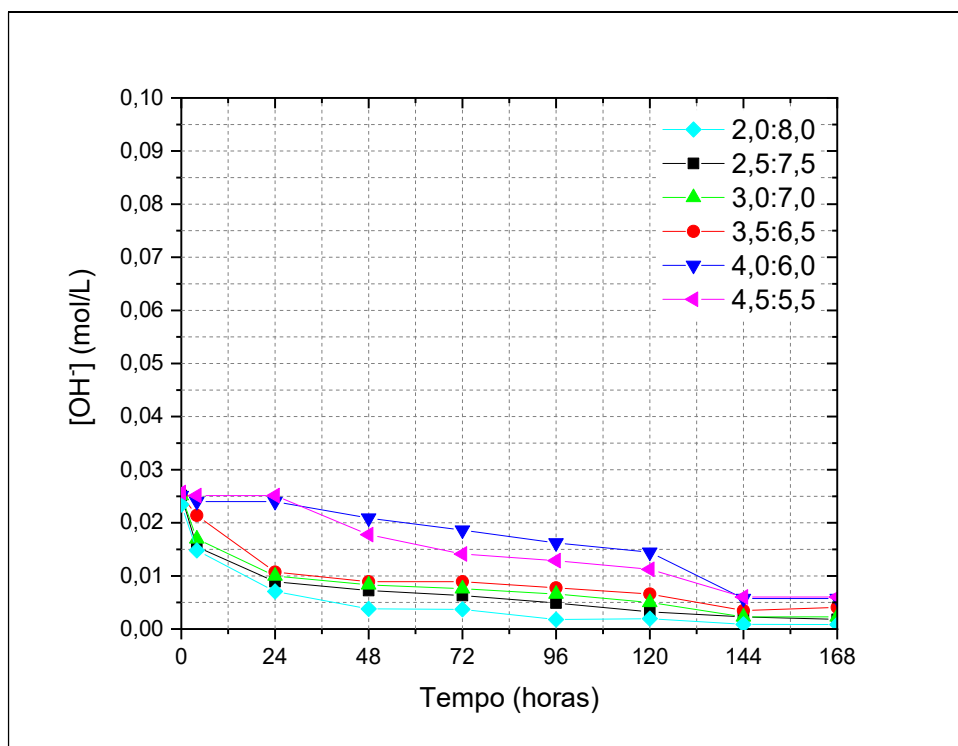
Figura 54 - Condutividade elétrica da cinza da folha de bananeira.

Fonte: Própria autora.

5.2.7. Cinza da folha de bambu (CFB)

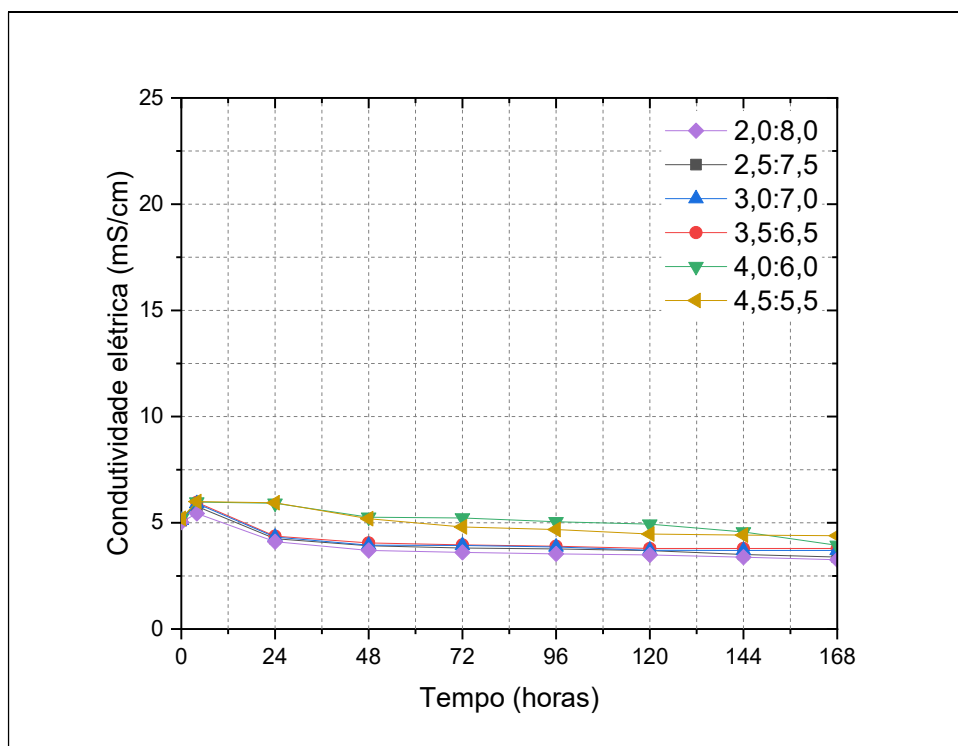
Por meio da Figura 55, é possível perceber que a concentração de hidroxila na suspensão contendo a cinza da folha de bambu foi sendo reduzida ao longo do tempo desde o início do ensaio. Esse comportamento é característico de materiais pozolânicos, uma vez que a reação pozolânica consome os íons hidroxila, incorporando-os nos compostos hidratados.

Figura 55 - Concentração de hidroxila, na suspensão de cinza da folha de bambu.



Fonte: Própria autora.

O comportamento pozolânico da cinza foi confirmado por meio da condutividade elétrica apresentado na Figura 56. Todas as proporções apresentaram redução de condutividade elétrica e, portanto, a cinza da folha de bambu foi pré-classificada como material pozolânico. A redução de pH e condutividade elétrica também foi verificada na pesquisa de Moreaes *et al.* (2019). Também foi apresentado em Villar-Cociña *et al.* (2018) a redução da condutividade elétrica da suspensão com a cinza da folha de bambu com hidróxido de cálcio; a curva obtida a partir da condutividade elétrica da suspensão apresentou queda até às dez horas de ensaio, após esse período a condutividade manteve-se constante. Villar-Cociña *et al.* (2020) também estudaram a cinza da folha de bambu por meio da condutividade elétrica e concluíram que a cinza da folha de bambu calcinada a 600 °C têm propriedades pozolânicas comparáveis com a sílica ativa; a cinza da pesquisa citada apresentou o difratograma da cinza da folha de bambu em que picos cristalinos não foram identificados, dessa forma, a cinza estava em sua forma mais reativa (amorfa).

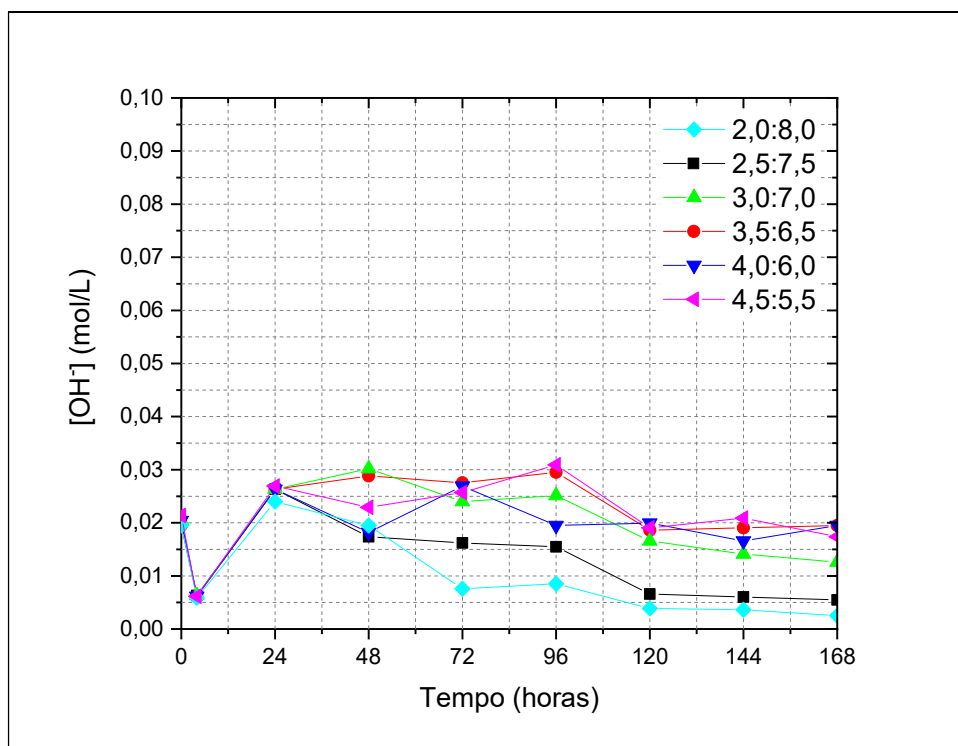
Figura 56 - Condutividade elétrica da cinza da folha de bambu.

Fonte: Própria autora.

5.2.8. Cinza da casca de arroz (CCA)

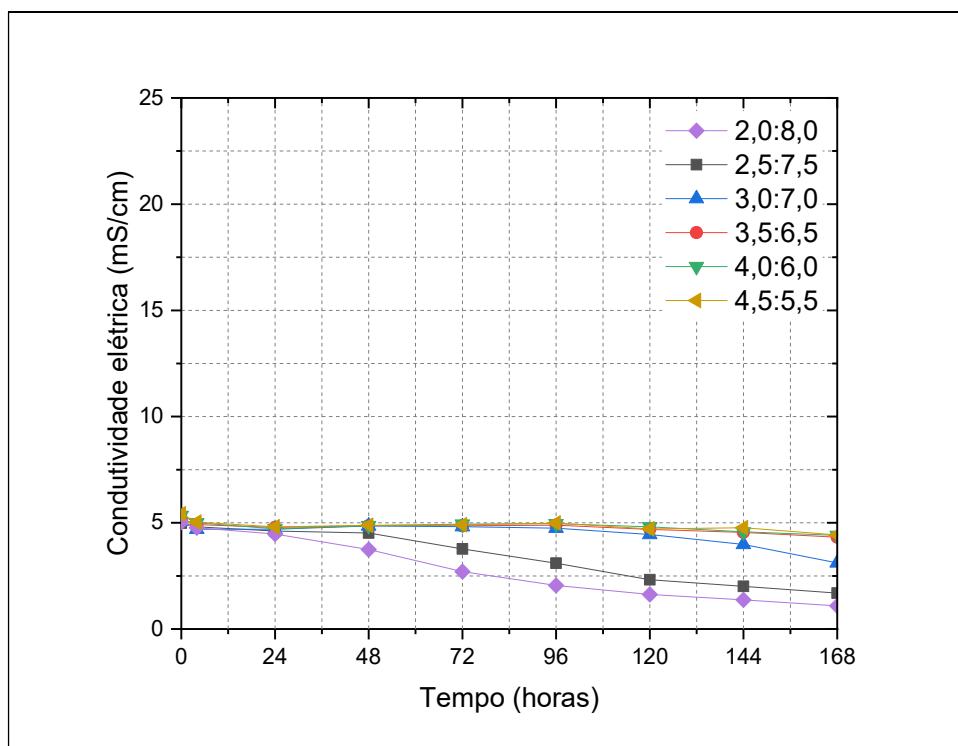
A cinza da casca de arroz é um material pozolânico. O objetivo da elaboração deste teste foi obter dados para possibilitar a pré-classificação dos materiais de acordo com a reatividade de cada cinza estudada. A Figura 57 apresenta a oscilação que ocorreu da concentração de hidroxila na suspensão com a casca de arroz e mostra que até as quatro horas houve uma redução da concentração e, após esse período, existiu uma oscilação que acabou com valores inferiores ou iguais aos apresentados a zero horas do ensaio. Uma oscilação semelhante ocorreu em Hidalgo *et al.* (2021), principalmente nas proporções com maior teor de hidróxido de cálcio, foi relatado pelos autores que o íon hidroxila aumentou significativamente 24 h antes de estabilizar, que este incremento inicial pode estar associado a sais solúveis na cinza e que o consumo de hidroxila começou após 48 h.

Figura 57 - Concentração de hidroxila, na suspensão de cinza da casca de arroz.



Fonte: Própria autora.

Na Figura 58, onde é mostrada a curva de condutividade, é possível perceber que todas as proporções apresentaram redução na condutividade elétrica, sendo que nas proporções com maior teor de cinza foi possível verificar maior redução de condutividade, apresentaram, portanto, melhores resultados no quesito reatividade. Esse comportamento também foi descrito por Tashima *et al.* (2014), as proporções 2,00:8,00 apresentaram maior perda de condutividade. Então, a cinza da casca do arroz também provou ser pozolânica.

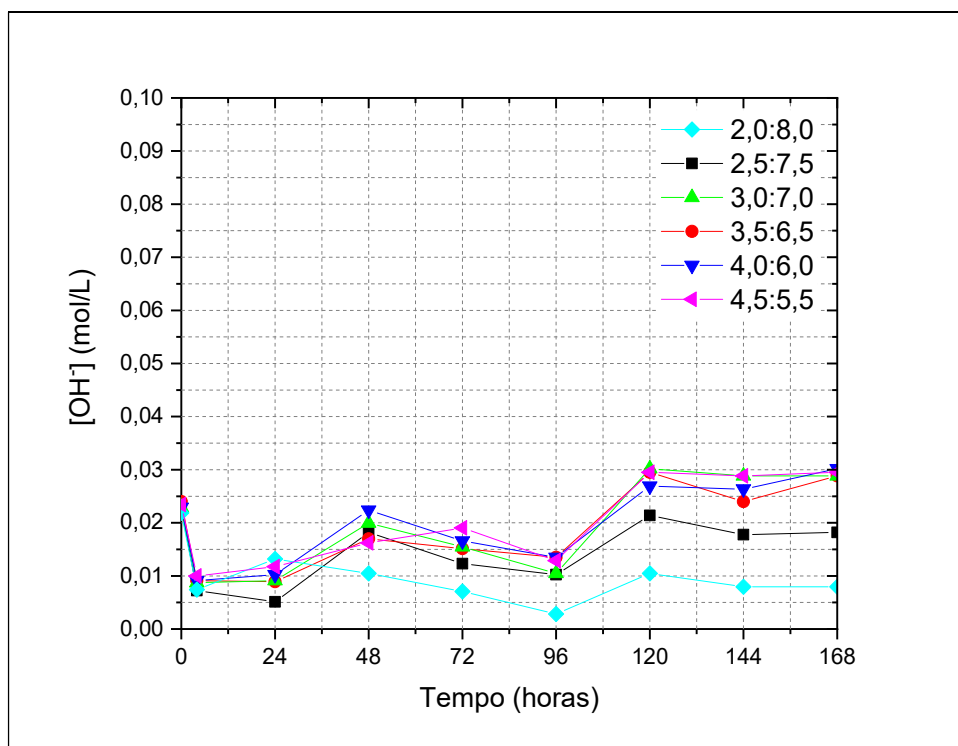
Figura 58 - Condutividade elétrica da cinza da casca de arroz.

Fonte: Própria autora.

5.2.9. Cinza do bagaço de cana (CBC)

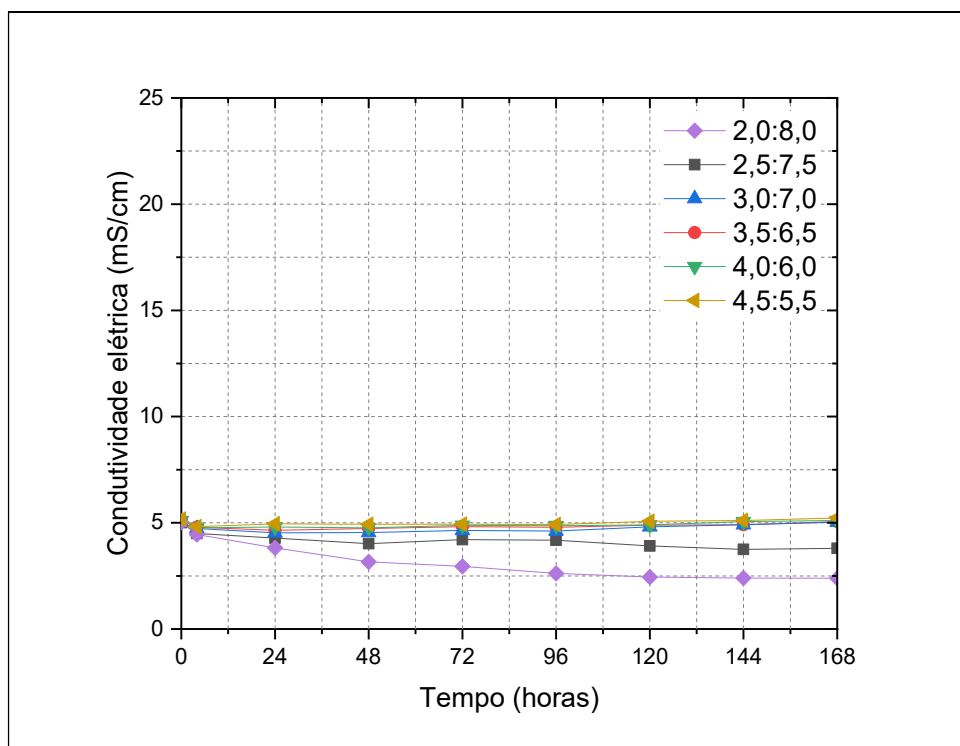
Assim como a cinza da casca do arroz, a cinza do bagaço de cana também é um material conhecido pelo seu potencial pozolânico. A Figura 59 apresenta a concentração de hidroxila ao longo do tempo durante o ensaio. Foi verificado que, além de uma oscilação da concentração de hidroxila, nem todos os valores finais de concentração foram inferiores aos iniciais, contudo a variação não foi muito significativa. Assim como ocorreu com a cinza da casca do arroz, isso pode ter sido devido sais solúveis presentes na cinza, como foi citado por Hidalgo *et al.* (2021).

Figura 59 - Concentração de hidroxila, na suspensão de cinza do bagaço de cana.



Fonte: Própria autora.

Na Figura 60, está contida a curva de condutividade elétrica. Por meio dessa curva foi possível confirmar o potencial pozolânico da cinza, que apresentou redução de condutividade elétrica em quase todas as proporções. A perda de condutividade elétrica também foi relatada em Rossignolo *et al.* (2018) e Moraes J. *et al.* (2016). Os valores finais de condutividade elétrica foram inferiores aos valores apresentados a zero horas de ensaio. Isso indica que a cinza foi capaz de consumir os íons liberados pelo hidróxido de cálcio dissolvido e foi capaz de manter esse consumo conforme o hidróxido continuava a se dissolver, pois a suspensão estava saturada de hidróxido de cálcio. A cinza do bagaço de cana também é pozolânica.

Figura 60 - Condutividade elétrica da cinza do bagaço de cana.

Fonte: Própria autora.

5.3. PRÉ-CLASSIFICAÇÃO DE REATIVIDADE POZOLÂNICA

A avaliação do potencial pozolânico é baseada no método proposto por Tashima *et al.* (2014). Consiste em avaliar a reatividade de misturas minerais de acordo com sua reatividade pozolânica, em termos de variação da condutividade elétrica e do pH. Foi proposto avaliar o tempo necessário para que a suspensão obtivesse a insaturação do hidróxido de cálcio (esse tempo no modelo de pré-classificação é representado por t_{ins}), o qual estaria sendo consumido pela reação pozolânica. Esse tempo está relacionado com a perda de condutividade (Lc) em 30%, sendo que essa porcentagem representa uma porcentagem de segurança uma vez que a suspensão saturada apresentou valores inferiores a esses 30%. E, como foi apresentado em 4.2.3 *Potencial pozolânico ou alcalino das cinzas*, a perda de condutividade (Lc) foi calculada pela Equação 3.

Para a pré-classificação da cinza da folha de bambu (CFB) por exemplo, a suspensão saturada de hidróxido de cálcio a zero horas foi submetida ao ensaio de pH e condutividade elétrica, após essa medida, foi adicionada a cinza de folha de bambu, então, o valor (de condutividade) ao longo do tempo foi sendo reduzido. O tempo necessário para que essa

queda de valor atingisse 30% é o t_{ins} , (que na proporção 2,0:8,0 foi de 105,12 horas). Ou seja, levou 105,12 horas para a cinza consumir o hidróxido por meio da reação pozolânica, isso porque todo o hidróxido que estava saturado foi se dissolvendo e sendo incorporado pela cinza.

Com relação aos valores de pH (utilizando a metodologia mencionada, saindo do exemplo mencionado no parágrafo anterior), para suspensões onde o hidróxido de cálcio apresentava-se saturado, mantiveram-se constantes durante o teste, apresentou apenas pequenas variações em torno de 0,15 unidades em relação ao valor inicial ($t = 0$). E, portanto, foi fixado que a variação maior que 0,15 unidades indica a insaturação do hidróxido de cálcio o qual pode estar sendo consumido pela reação pozolânica. Então, no modelo, foi marcado a variação (ΔpH) apresentada por cada proporção no tempo indicado pelo tempo de insaturação t_{ins} .

A cinza da folha de bambu (CFB), cinza da casca do arroz (CCA) e a cinza do bagaço de cana (CBC) foram pré-classificadas seguindo o critério mencionado. As outras cinzas, por não apresentarem queda de condutividade, não foram sujeitas à pré-classificação, pois não possuem propriedade pozolânica. A Figura 61 apresenta a pré-classificação seguindo o modelo apresentado em 4.2.3 *Potencial pozolânico ou alcalino das cinzas*.

Figura 61 - Pré-classificação de reatividade pozolânica das cinzas.

CFB	ΔpH	t_{ins}	CCA	ΔpH	t_{ins}	CBC	ΔpH	t_{ins}
2,0:8,0	1,08	105,12	2,0:8,0	0,41	53,22	2,0:8,0	0,32	35,13
2,5:7,5	1,04	136,00	2,5:7,5	0,11	81,67	2,5:7,5	-	-
3,0:7,0	-	-	3,0:7,0	0,21	155,70	3,0:7,0	-	-
3,5:6,5	-	-	3,5:6,5	-	-	3,5:6,5	-	-
4,0:6,0	-	-	4,0:6,0	-	-	4,0:6,0	-	-
4,5:5,5	-	-	4,5:5,5	-	-	4,5:5,5	-	-

Fonte: Própria autora.

Todas as cinzas ficaram na zona de baixa reatividade. A cinza mais reativa entre as três analisadas foi em primeiro lugar a cinza da casca de arroz, seguindo pela cinza da folha de bambu e depois, a cinza do bagaço de cana.

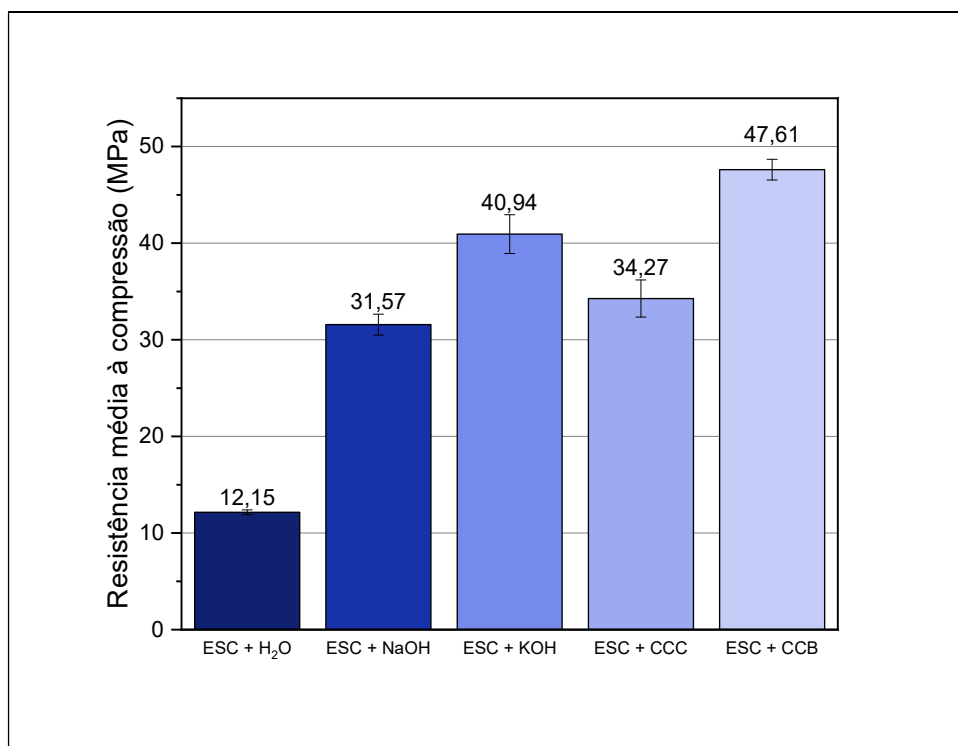
É importante destacar que as cinzas parâmetro (cinza da casca de arroz e cinza do bagaço de cana), apesar de serem bastante conhecidas por suas propriedades pozolânicas, podem apresentar bastante variação em relação a sua reatividade. Como pôde ser observado

nos difratogramas das cinzas, foram identificados picos cristalinos, de alta intensidade (a região amorfa da cinza quase não pôde ser notada).

Isso indica que as cinzas não se apresentam em sua forma mais reativa, pois como foi visto na literatura, um dos critérios para que a cinza seja reativa, é a amorficidade. Provavelmente, a cristalinidade das cinzas foi consequência do processo de calcinação, pois existe uma faixa de temperatura de queima que propicia a cristalização da sílica. Silva e Souza (2020), relacionaram os intervalos de temperatura das diferentes fases cristalinas estáveis da sílica, foi mencionado que o quartzo se transforma em tridimita a partir de 870 °C e a tridimita se transforma em cristobalita a partir de 1470° C.

5.4. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS ARGAMASSAS

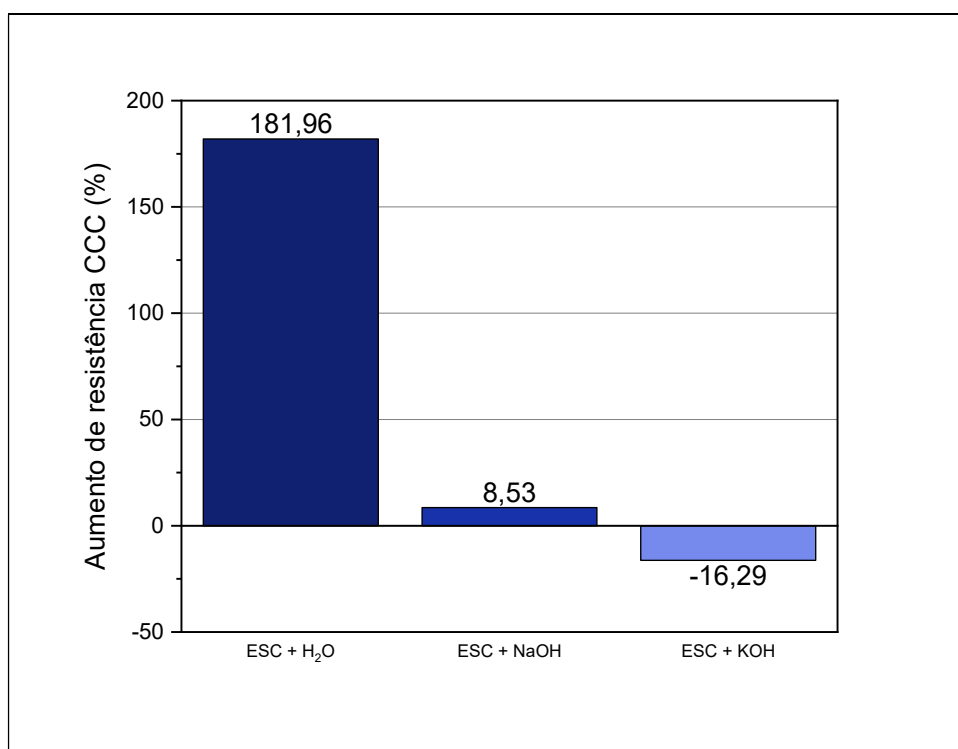
A Figura 62 apresenta os resultados de resistência média à compressão das argamassas controle e argamassas teste utilizando as cinzas da casca de café e da casca de banana. A argamassa controle elaborada sem ativador alcalino obteve resistência média de 12,15 MPa. A argamassa ativada com hidróxido de sódio atingiu resistência média de 31,57 MPa. Já a argamassa ativada com hidróxido de potássio atingiu 40,94 MPa de resistência média à compressão. A resistência média à compressão apresentada pela argamassa teste elaborada com cinza da casca de café apresentou melhor resultado com relação a duas das amostras controle. O valor atingido foi de 34,27 MPa, sendo esse valor inferior apenas ao resultado obtido pela argamassa controle elaborada com ativador de hidróxido de potássio. Já a argamassa elaborada com a cinza da casca de banana apresentou resultados ainda melhores, atingindo resistência média superior às apresentadas por todas as argamassas controle, a resistência média apresentada foi de 47,61 MPa.

Figura 62 - Resistência média de cada traço.

Fonte: Própria autora.

Conforme Figura 63, a utilização do resíduo (a cinza da casca de café), foi capaz de ativar a escória de forma equivalente e até superior à ativação elaborada com reagentes químicos comerciais. Nota-se, um aumento de resistência à compressão (181,96%) conferida a argamassa elaborada com cinza de casca de café como ativador alcalino quando comparada à resistência atingida pela argamassa controle sem ativador. Além disso, quando comparada à argamassa ativada com hidróxido de sódio, ainda assim a cinza de casca de café proporcionou um aumento de 8,53% de resistência à compressão. Quando comparada à argamassa elaborada com o ativador químico de hidróxido de potássio, a argamassa ativada com a cinza da casca de café (resíduo) apresentou uma queda de resistência de 16,29%. Segundo Lima, Gomes e Moraes (2022), a resistência à compressão da argamassa elaborada com escória ativada com cinza da casca de café apresentou melhor resultado comparado às argamassas controle (elaborada com cimento e elaborada com escória sem ativador) então, foi concluído pelos autores que a cinza da casca de café pode ser empregada como ativador alcalino.

Figura 63 - Aumento/redução de resistência que a CCC conferiu com relação aos traços controle.



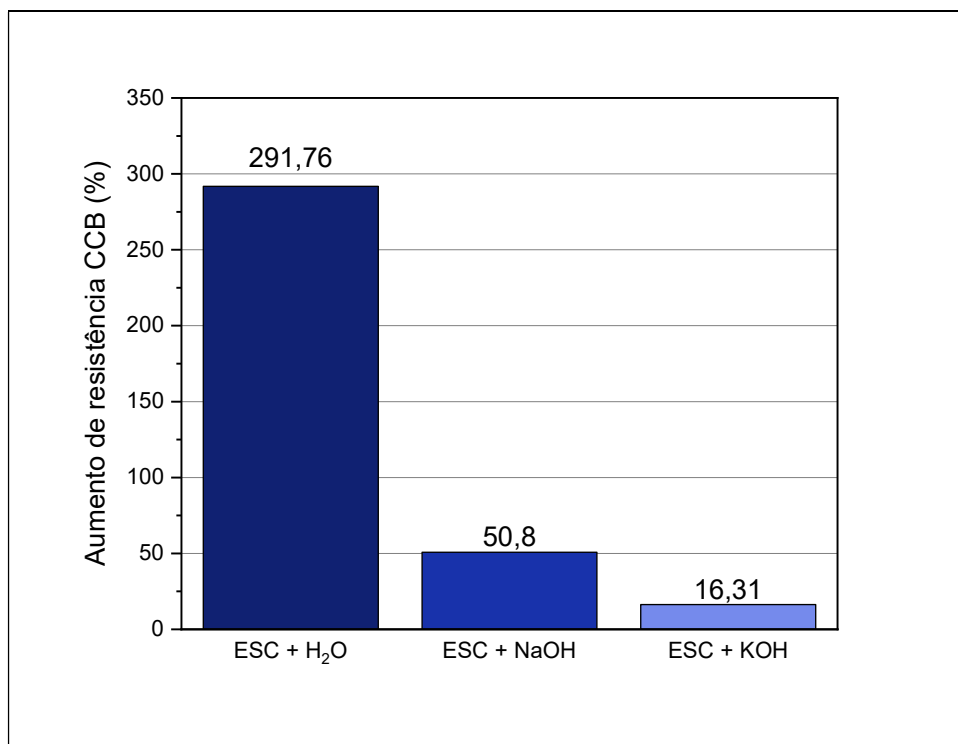
Fonte: Própria autora.

Percebe-se analisando a Figura 64 que a utilização do resíduo (a cinza da casca de banana), foi capaz de ativar a escória de forma superior à ativação elaborada com os reagentes químicos comerciais (hidróxido de sódio e hidróxido de potássio). Houve aumento de resistência conferida a argamassa teste utilizando a cinza da casca de banana como ativador alcalino em relação aos traços controle. Obteve-se um aumento de 16,31% de resistência à compressão comparado ao traço controle com ativador de hidróxido de potássio. Um aumento de 50,8% comparado ao traço controle com ativação de hidróxido de sódio. E um aumento de 291,76% de resistência à compressão comparado ao traço controle sem ativador.

Parte desse aumento da resistência à compressão também pode estar associado ao efeito físico da utilização das cinzas (CCC e CCB) como ativador alcalino. Isso porque a parte insolúvel das cinzas pode atuar tanto com o efeito *filler* (preenchendo vazios na matriz tornando o material mais coeso e, consequentemente, dificultando a sua ruptura) como com locais de nucleação, proporcionando uma cinética de reação mais rápida das partículas de escória, aumentando, então, a quantidade de produtos hidratados em menos tempo, os quais são responsáveis pela resistência mecânica. Esses efeitos foram observados em materiais

pozolânicos, o que foi citado por Moraes (2019) e Panesar (2019), contudo, é possível e provável que também ocorra com as cinzas ativadoras.

Figura 64 - Aumento de resistência que a CCB conferiu com relação aos traços controle.

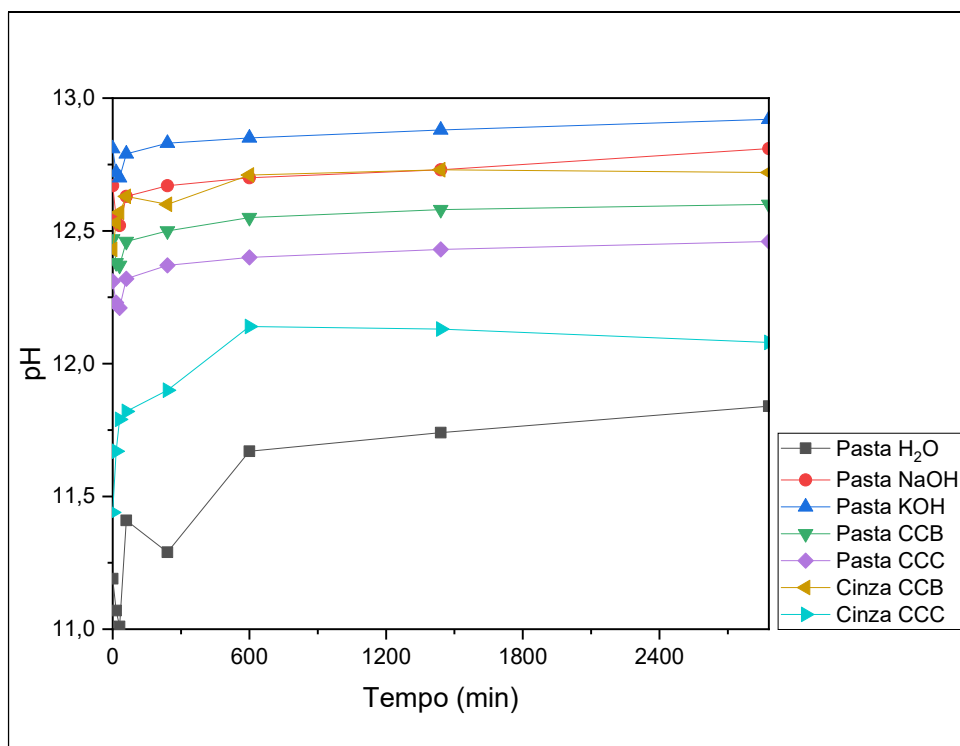


Fonte: Própria autora.

5.5. ANÁLISE DE LIBERAÇÃO DE ÍONS DE PASTAS E CINZAS

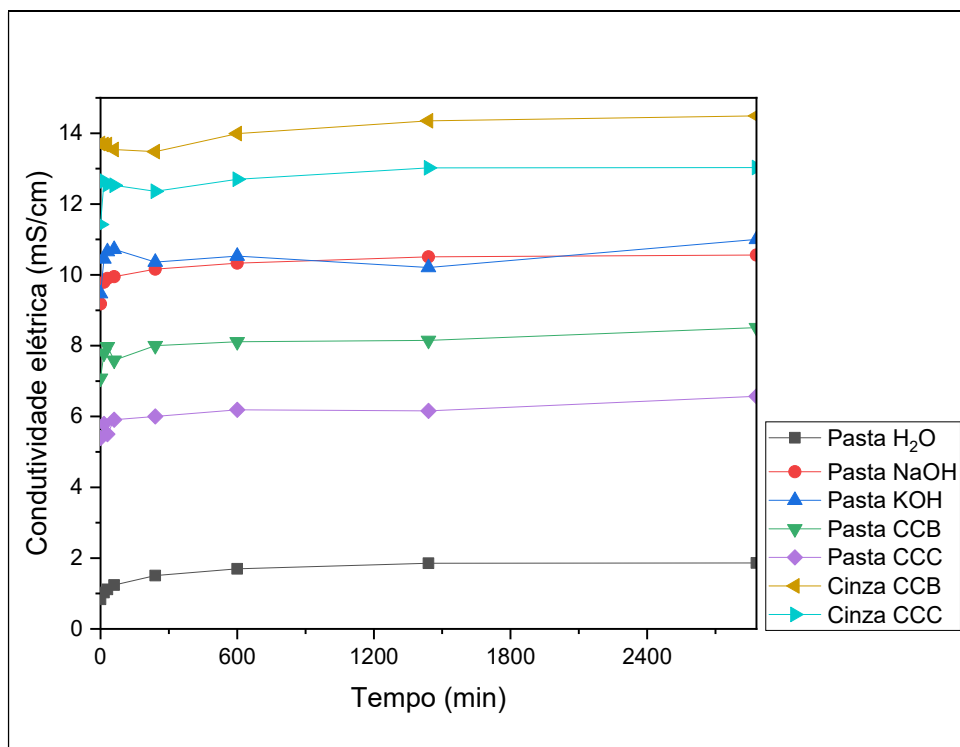
Na Figura 65 é apresentado o gráfico de pH ao longo do tempo (até 48 horas) das suspensões elaboradas com 1 g de cinza ou 1 g de pasta. É possível notar que não houve variação significativa no pH uma vez que os valores de pH se mantiveram quase constantes (apenas um pequeno aumento) ao longo de todo o ensaio.

Figura 65 - pH das suspensões elaboradas com pastas e cinzas.



Fonte: Própria autora.

Já na Figura 66 é apresentado o gráfico de condutividade elétrica ao longo do tempo (até 48 horas) das suspensões elaboradas com 1 g de cinza ou 1 g de pasta. Nota-se que, assim como o pH, a condutividade de todas as suspensões manteve-se quase constantes (apenas um pequeno aumento) ao longo de todo o ensaio, indicando que os íons presentes nas cinzas/pastas foram liberados quase instantaneamente.

Figura 66 - Condutividade elétrica das suspensões elaboradas com pastas e cinzas.

Fonte: Própria autora.

No caso das cinzas, essa liberação de íons de forma instantânea indica que os álcalis ficam disponíveis para a reação química acontecer já nos primeiros instantes em que entra em contato com a água, ou seja, para que a cinza atue como ativador alcalino. No que diz respeito às pastas, a liberação de íons indica que existe álcalis livre, que não reagiu quimicamente. Nota-se que a suspensão da cinza da casca de banana apresentou os maiores valores de condutividade elétrica, evidenciando seu alto teor de álcalis e sua boa solubilidade. Em segundo lugar, foi a cinza da casca de café, seguindo pelas pastas elaboradas com os ativadores químicos comerciais, então as pastas ativadas com as cinzas e por último a pasta sem ativador. Com isso, é possível perceber também que, as pastas elaboradas com os ativadores químicos comerciais apresentaram mais álcalis livres (que não estão presos quimicamente na estrutura) comparado às pastas elaboradas com as cinzas de casca de café e de casca de banana.

5.6. SOLUBILIDADE DAS CINZAS

A cinza da casca de café apresentou solubilidade de 24,17% e a cinza da casca de banana de 54,20%. A solubilidade das cinzas influencia diretamente na capacidade de

atuarem como ativador alcalino, uma vez que os álcalis só estarão disponíveis para ativarem o precursor caso sejam solúveis. A cinza da casca de banana apresentou maior solubilidade comparada à cinza da casca de café, isso contribuiu para que a resistência à compressão da argamassa elaborada com a cinza da casca de banana tenha atingido resistências superiores à argamassa ativada com a casca de café. Ademais, a parte insolúvel das cinzas podem atuar com os efeitos físicos de nucleação e efeito *filler*.

6. CONCLUSÕES

Por meio do ensaio de caracterização química (fluorescência de raios X) já foi possível notar que apenas a cinza da folha de bambu, dentre as cinzas teste, apresentou teores de óxidos em concordância com a norma para ser classificada como material pozolânico. Por meio do ensaio de pH e condutividade elétrica foi possível constatar o potencial da cinza da folha de bambu como material pozolânico, além disso, foi possível pré-classificar e comparar a reatividade pozolânica da cinza da folha de bambu, com as duas cinzas parâmetro (cinza da casca de arroz e cinza do bagaço de cana). Tanto a cinza da folha de bambu quanto as duas cinzas parâmetro foram pré-classificadas como pozolanas pouco reativas. Como foi visto nos difratogramas, tais cinzas apresentaram picos cristalinos ao invés de estarem totalmente amorfas, o que pode explicar a baixa reatividade das cinzas. A cinza mais reativa entre as três analisadas foi a cinza da casca de arroz, seguindo pela cinza da folha de bambu e a menos reativa foi a cinza do bagaço de cana.

Mediante a caracterização química percebeu-se quais as cinzas apresentaram maior teor de álcalis. Então, no ensaio de condutividade elétrica, foi possível verificar a solubilidade destes álcalis. Por conseguinte, por meio do ensaio de resistência a compressão das argamassas foi possível constatar que tanto a cinza da casca de café quanto a cinza da casca de banana foram capazes de atuar como ativador alcalino, proporcionando resistência média à compressão comparável às obtidas com os ativadores químicos comerciais. As resistências médias atingidas foram 34,27 MPa e 47,61 MPa para as argamassas teste elaboradas com as cinzas da casca de café e casca de banana respectivamente. Enquanto que as argamassas controle atingiram resistência média a compressão de 12,15 MPa, 31,57 MPa e 40,94 MPa para as argamassas sem ativador, ativada com hidróxido de sódio e ativada com hidróxido de potássio respectivamente.

Foi possível notar a partir do ensaio de pH e condutividade elétrica das suspensões com as cinzas da casca de café e da casca de banana que os íons presentes foram liberados quase que instantaneamente. Essa liberação de íons de forma instantânea indica que os álcalis ficaram disponíveis para a reação química acontecer já nos primeiros instantes em que entraram em contato com a água, ou seja, para que as cinzas atuassem como ativador alcalino.

Por meio da análise de liberação de íons das pastas, foi possível notar que as pastas elaboradas com os ativadores químicos comerciais apresentaram mais álcalis livres comparado às pastas elaboradas com as cinzas de casca de café e de casca de banana. Mesmo

assim, as cinzas apresentaram bom desempenho atuando como ativadores. Dessa forma, conclui-se que o teor de álcalis do ativador não garante seu bom desempenho. Além disso, é possível dizer que além do efeito químico da ativação alcalina, as partes insolúveis das cinzas também podem ter contribuído para o aumento da resistência à compressão das argamassas por meio dos efeitos físicos de nucleação e *filler* (de preenchimento).

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No decorrer do desenvolvimento deste trabalho, outras possibilidades de pesquisa surgiram, dentre as quais considera-se relevante:

- Avaliar a cinza da folha de bananeira como ativador alcalino em argamassas;
- Utilizar a mistura binária de escória com a cinza da folha de bambu como precursor e ativá-lo com:
 - Cinza da casca de café,
 - Cinza da casca de banana;
 - E cinza da folha de bananeira.

REFERÊNCIAS

ABDEL, D. M. M. *et al.* An initial study about the effect of activated carbon nano-sheets from residual biomass of olive trees pellets on the properties of alkali-activated slag pastes.

Journal of Building Engineering, Oxford, v. 44, 2021. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102661>. Acesso em: 30 out. 2021.

AKBAR, A. *et al.* Sugarcane bagasse ash-based engineered geopolymer mortar incorporating propylene fibers. **Journal of Building Engineering**, Oxford, v. 33, 2020. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710219328311>. Acesso em: 13 maio 2020.

ALIZADEH, R. **Lab cement: cement and art**. Ottawa: Institute for Research in Construction, 2020. Disponível em:

<https://web.archive.org/web/20200129195607/http://cementlab.com:80/cement-art.htm>.

Acesso em: 22 out. 2020.

AL-KUTTI, W.; ISLAM, A. B. M. S.; NASIR, M. Potential use of date palm ash in cement-based 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>. Acesso em: 05 nov. 2020.

ALONSO, M. M. C. *et al.* Olive biomass ash as an alternative activator in geopolymer formation: A study of strength, radiology and leaching behaviour. **Cement and Concrete Composites Journal**, Oxford, n. 104, 2019. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946519305451>. Acesso em: 29 out. 2021.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Standards CT-13: concrete terminology**.

Farmington Hills: ACI, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 125: standard terminology relating to concrete and concrete aggregates**. [s. l.]: ASTM, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 618: standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete**. [s. l.]: ASTM, 2019.

ANDRADE NETO, J. S. *et al.* Effects of adding sugarcane bagasse ash on the properties and durability of concrete. **Construction and Building Materials**, Salvador, v. 266, 2021.

Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820329640>.

Acesso em: 15 abr. 2021.

ANDREÃO, P. V. *et al.* Beneficiation of sugarcane bagasse ash: pozzolanic activity and leaching behavior. **Waste Biomass Valorization**, Dordrecht, v. 11, p. 4393–4402, 2020.

Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12649-019-00721-x#citeas>. Acesso em: 21 fev. 2022.

ANDREW, R. M. Global CO₂ emissions from cement production. **Earth System Science Data Discussions**, Oslo, p. 1–52, 2017. Disponível em: <https://essd.copernicus.org/articles/10/195/2018/>. Acesso em: 12 ago. 2020.

ANTONANGELO, J. A. **Formas de silício e de alumínio num latossolo sob semeadura direta tratado com calcário e silicato de cálcio e de magnésio**. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11140/tde-21092015-164502/publico/Joao_Arthur_Antonangelo-versao_revisada.pdf. Acesso em: 10 fev. 2021.

APRIANTI, E. A huge number of artificial waste material can be supplementary cementitious material (SCM) for concrete production: a review part II. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 142, p. 4178–4194, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652616000305>. Acesso em: 11 ago. 2020.

AQILAH, A. K. N. **Strength performance of banana fiber ash as cementitious material with different temperature**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil e Recursos Terrestres, UNIVERSITY MALAYSIA PAHANG, 2014. Disponível em: <http://umpir.ump.edu.my/id/eprint/11536/1/NUR%20AQILAH%20BT.%20ABD%20KARIM.PDF>. Acesso em 19 dez. 2020.

AS DISTÂNCIAS. **Assistindo a uma ópera em uma ruína romana**: noite nas termas de Caracalla. Itália: [s. n.], 2017. Disponível em: <https://asdistancias.com/2017/09/06/opera-nas-termas-de-caracalla/>. Acesso em: 26 out. 2020.

ASHA, P.; SALMAN, A.; ARUN KUMAR, R. Experimental study on concrete with bamboo leaf ash. **International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)**, Bhopal, v. 3, n. 6, 2014. Disponível em: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.675.2772&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em: 03 mar. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 12653**: 2014 versão corrigida: materiais pozolânicos: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 13279**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 16697**: cimento portland: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ATLAS BIG. **World Sugarcane Production**. [s. l: s. n.], [20--c]. Disponível em: <https://www.atlasbig.com/en-us/countries-sugarcane-production>. Acesso em: 12 abr. 2021.

ATLAS BIG. **World's Leading Peanut Producing Countries**. [s. l: s. n.], [20--a]. Disponível em: <https://www.atlasbig.com/en-in/countries-by-peanut-production>. Acesso em: 10 out. 2020.

AVILA, T. C. **Estudo da utilização da mistura de cinza da casca de arroz com hidróxido de sódio na produção de argamassas ativadas alcalinamente**. 2018. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2018. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/180872/avila_tc_me_ilha.pdf?sequence=3&isAllowed=y. Acesso em: 29 out. 2021.

BATISTA, J. P. B. **Estudo da cinza de folha de cana-de-açúcar em aglomerantes ativados alcalinamente baseado no resíduo de cerâmica vermelha**. 2018. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2018. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/157495/batista_jpb_me_ilha_int.pdf?sequence=4&isAllowed=y. Acesso em: 28 out. 2021.

BATOOL, F.; MASOOD, A.; ALI, M. Characterization of Sugarcane Bagasse Ash as Pozzolan and Influence on Concrete Properties. **Arabian Journal for Science and Engineering**, Heidelberg, v. 45, n. 5, p. 3891–3900, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13369-019-04301-y>. Acesso em: 05 nov. 2020.

BEAUDOIN, J.; ODLER, I. Hydration, setting and hardening of portland cement. *In*: PETER, C. H.; LISKA, M. **Lea's chemistry of cement and concrete**. 5. ed. London: Elsevier, 2019. Cap. 5, p. 157–250.

BELLAVER, G. B. **Influência da temperatura de calcinação da casca de aveia para utilização como material cimentício suplementar**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/219361/001123942.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 09 out. 2021.

BENSHARADA, M. *et al.* Loss on ignition vs. thermogravimetric analysis: a comparative study to determine organic matter and carbonate content in sediments. **Journal of Paleolimnology**, Dordrecht, v. 67, p. 191–197, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10933-021-00209-6#citeas>. Acesso em: 03 fev. 2022.

BENJAMIN, A. R. E. *et al.* Impact of electrodialytic remediation of MSWI fly ash on hydration and mechanical properties of blends with Portland cement. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 309, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821029378#b0165>. Acesso em: 10 fev. 2021.

BLACK, L. Low clinker cement as a sustainable construction material. *In*: KHATIB, J. M. **Sustainability of construction materials**. 2. ed. London: Elsevier, 2016. Cap. 17, p. 415–457.

BORGES, A. L. *et al.* Evaluation of the pozzolanic activity of glass powder in three maximum grain sizes. **Materials Research**, São Carlos, v. 24, n. 4, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/mr/a/X9VCnLXXNt5wcX9PgCrDths/?format=pdf&lang=em>. Acesso em: 01 fev. 2022.

BRANDÃO JÚNIOR, J. R. *et al.* Caracterização da cinza da casca de arroz vermelho para aplicação como material pozolânico. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 35, n. 1, p. 80–88, 2020. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/energia/article/view/2736/2656>. Acesso em: 03 jan. 2022.

CALHEIROS, J. E.; ZANIN, T.; PACHECO, M. T. T. Hidróxido de cálcio: revisão bibliográfica das aplicações clínicas e ações curativas na prática endodôntica. **Revista Odontologia e Ciência**, Porto Alegre, v. 25, n. 4, p. 1662-1665, 2013.

CARDARELLI, F. Cements, concrete, building stones, and construction materials. *In*: CARDARELLI, F. **Materials handbook**. 3. ed. Montréal: Springer, 2018. Cap. 15, p. 1421–1439.

CASCUDO, O. *et al.* Contribuição à caracterização nanoestrutural de pastas de cimento por meio da técnica de microscopia de força atômica. **Revista Materia**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 1, 2018. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762018000100408. Acesso em: 22 out. 2020.

CHINDAPRASIRT, P.; CAO, T. The properties and durability of high-pozzolanic industrial by-products content concrete masonry blocks. *In*: PACHECO-TORGAL, F. *et al.* **Eco-efficient masonry bricks and blocks**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2015. Cap. 8, p. 191–214.

CORDEIRO, G. C. *et al.* Production of agroindustrial ashes with pozzolanic activity via acid leaching, conjugated burning and ultrafine grinding. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 189–203, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/ac/v20n4/1678-8621-ac-20-04-189.pdf>. Acesso em: 07 dez. 2020.

CORDEIRO, L. de N. P. *et al.* Caracterização da cinza de caroço de açaí residual para adição ao concreto. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 1, p. 45–55, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/331441382_Caracterizacao_da_cinza_de_caroco_de_acai_residual_para_adicao_ao_concreto. Acesso em: 11 ago. 2020.

CWIRZEN, A. Properties of SCC with industrial by-products as aggregates. *In*: SIDDIQUE, R. **Self-compacting concrete: materials, properties and applications**. Lulea: Woodhead Publishing, 2020. p. 249–281.

DA REDAÇÃO. **Por que o concreto romano é mais resistente do que o moderno?** [São Paulo]: Veja, 2017. Disponível em: <https://veja.abril.com.br/ciencia/por-que-o-concreto-romano-e-mais-resistente-do-que-o-moderno/>. Acesso em: 26 out. 2020.

DA SILVA, R. G. *et al.* Effect of wastes from sugar cane industry on the mechanical and hydraulic properties of pervious concrete. **Road Materials and Pavement Design**, Abingdon, p. 1–19, 2021. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/figure/10.1080/14680629.2021.1927156?scroll=top&needAccess=true>. Acesso em: 24 ago. 2021.

DEDELOUDIS, C. *et al.* Natural pozzolans. In: *BELIE, N.; SOUTSOS, M.; GRUYAERT, E. Properties of fresh and hardened concrete containing supplementary cementitious materials*. Cham: Springer, 2018. Cap. 6, v. 25, p. 181–231.

DEMISSEW, A.; FUFA, F.; ASSEFA, S. Partial replacement of cement by coffee husk ash for C-25 concrete production. **Journal of Civil Engineering, Science and Technology**, Sarawak, v. 10, n. 1, p. 12–21, 2019. Disponível em: <http://publisher.unimas.my/ojs/index.php/JCEST/article/view/1433>. Acesso em: 08 dez. 2020.

DEPAA, R. B. *et al.* Assessment of strength properties of concrete made with rice husk ash. **Materials Today: Proceedings**, Amsterdam, p. 12–15, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320403220?via%3Dihub>. Acesso em: 15 abr. 2021.

DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA DOS ESTADOS UNIDOS. **Safra mundial de milho 2020/21**: 2º Levantamento do USDA. São Paulo: FIESP, 2020a. Disponível em: <https://www.fiesp.com.br/indices-pesquisas-e-publicacoes/safra-mundial-de-milho-2/>. Acesso em: 25 jul. 2020.

DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA DOS ESTADOS UNIDOS. **Safra mundial de soja 2020/21**: 3º Levantamento do USDA. São Paulo: FIESP, 2020b. Disponível em: <https://www.fiesp.com.br/indices-pesquisas-e-publicacoes/safra-mundial-de-soja/>. Acesso em: 25 jul. 2020.

DHAGE, B.; RATHI, V.; KOLASE, P. Experimental study on partial replacement of cement by fly ash. **The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis**, Loni, v. 12, n. 9, p. 1869–1876, 2020. Disponível em: <http://www.ijaema.com/gallery/219-ijaema-september-4654.pdf>. Acesso em: 21 dez. 2020.

DIMENSIONS. **Digital science & research solutions Inc.** [s. l.: s. n.], 2021. Disponível em: https://app.dimensions.ai/discover/publication?search_mode=content&search_text=geopolymers%20alkaline%20activation&search_type=kws&search_field=full_search&viz-st:aggr=total&and_facet_year=1978. Acesso em: 29 out. 2021.

ELIJAH, A. O. Comparison between strength properties of lateritic soils stabilized with banana leaf ash and oil palm frond ash. **International Research Journal of Innovations in Engineering and Technology**, Ado-Ekiti, v. 3, n. 1, p. 20–23, 2019. Disponível em: https://irjiet.com/common_src/article_file/1564470664_87f1bd4396_3_irjiet.pdf. Acesso em: 21 dez. 2020.

FAGUNDES, L. P. *et al.* Improvement of collapsible soil behavior of a lateritic soil using rice husk ash. **Key Engineering Materials**, Baech, v. 668, p. 290–296. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/168293/2-s2.0-84954194896.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 29 mai. 2021.

FERREIRA, E. G. A. *et al.* 10000 years cement: can hydrated cement last as much as long-lived radionuclides? **Cement and Concrete Composites**, Oxford, v. 103, p. 339–352, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.05.016>. Acesso em: 15 ago. 2020.

FIDELIS, R. J. A. **Estudo da aplicação de rejeitos de fosfatos como material pozolânico**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Faculdade de Engenharia, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2018. Disponível em: <http://www.eng-minas.araxa.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/170/2018/05/Rayanne-de-Jesus-Andrade-Fidelis.pdf>. Acesso em: 26 out. 2020.

FONT, A. *et al.* Design and properties of 100% waste-based ternary alkali-activated mortars: Blast furnace slag, olive-stone biomass ash and rice husk ash. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 243, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652619334389?via%3Dihub>. Acesso em: 01 nov. 2021.

FONT, A. *et al.* A 100% waste-based alkali-activated material by using olive-stone biomass ash (OBA) and blast furnace slag (BFS). **Materials Letters**, Amsterdam, v. 203, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2017.05.129>. Acesso em: 27 out. 2021.

GADGIHALLI, V. *et al.* Analysis of properties of concrete using dried banana peel powder as admixture. **International Journal of Research-Granthaalayah**, Indore, v. 5, n. 11, p. 351–354, 2017. Disponível em: http://granthaalayah.com/Articles/Vol5Iss11/39_IJRG17_JU11_006.pdf. Acesso em: 15 dez. 2020.

GHOSH, S. K.; PARLIKAR, U. V.; KARSTENSEN, H. K. Emission Considerations in Cement Kiln Co-processing. *In*: GHOSH, S. K.; PARLIKAR, U. V.; KARSTENSEN, H. K. **Sustainable management of wastes through co-processing**. Singapore: Springer Nature, 2021. Cap. 9, p. 179–195.

GLOBAL CEMENT STAFF. **Portland cement association reports 3.6% rise in cement consumption to november 2021**. [s. l.]: Global cement, 2022. Disponível em: <https://www.globalcement.com/news/item/13572-portland-cement-association-reports-3-6-rise-in-cement-consumption-to-november-2021>. Acesso em: 30 jan. 2022.

GÓMEZ-CASERO, M. A. *et al.* Synthesis of clay geopolymers using olive pomace fly ash as an alternative activator. Influence of the additional commercial alkaline activator used. **Journal of Materials Research and Technology**, Rio de Janeiro, v. 12, p. 1762-1776, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S223878542100329X>. Acesso em: 29 out. 2021.

GOURMETALY. di C. D. **Gourmetaly**. [s. l.: s. n.], 2016. Disponível em: <https://www.gourmetaly.com/what-to-do-and-where-to-eat-in-rome-pantheon/>. Acesso em: 26 out. 2020.

GOYAL, R. K.; TIWARI, A. Use of Banana Leaves Ash in Concrete. **International Journal for Scientific Research & Development**, Ahmedabad, v. 4, n. 3, p. 1696–1697, 2016. Disponível em: <http://www.ijssrd.com/articles/IJSSRDV4I31599.pdf>. Acesso em: 19 dez. 2020.

GUIGNONE, G. C. *et al.* Analysis of the chloride diffusion coefficients by different test methods in concrete mixtures containing metakaolin and high-slag blast-furnace cement. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 4, 2019. Disponível em:

https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762019000400331. Acesso em: 13 jul. 2020.

GUIMARÃES, P. V. C. **Estudo da aderência de concretos ativados alcalinamente à base de cinza da casca de arroz e metacaulim**. 2019. Dissertação (mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2019. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/182264/guimaraes_pvc_me_ilha.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 28 out. 2021.

GUPTA, P.; WIRQUIN, E.; BOKHOREE, C. Case studies in construction materials sustainable concrete: potency of sugarcane bagasse ash as a cementitious material in the construction industry. **Case Studies in Construction Materials**, Amsterdam, v. 14, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509521000607>. Acesso em: 15 abr. 2021.

HABERT, G.; LACAILLERIE, J. B. d'E. de; ROUSSEL, N. An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends. **Journal of Cleaner Production Journal**, Amsterdam, n. 19, p. 1229-1238, 2011. Disponível em: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0959652611000886?token=1759EED82F7FDB1C786A3076D49FFD1C24C63AF861AAD3DFA00B0E7371615D9E9DFBC466510E8AB8E83EE889926EEA18&originRegion=us-east-1&originCreation=20211029173019>. Acesso em: 29 out. 2021.

HACHE, E. *et al.* The impact of future power generation on cement demand: an international and regional assessment based on climate scenarios. **International Economics**, Amsterdam, v. 163, p. 114–133, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2110701719303439>. Acesso em: 13 maio 2020.

HARRISSON, A. M. Constitution and specification of Portland cement. *In*: PETER, C. H.; LISKA, M. **Lea's chemistry of cement and concrete**. 5. ed. London: Elsevier, 2019. cap. 4, p. 87–155.

HASSAN, A.; ARIF, M.; SHARIQ, M. Use of geopolymer concrete for a cleaner and sustainable environment: a review of mechanical properties and microstructure. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 223, p. 704–728, 2019. Disponível em: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0959652619307401?token=8B6EA67E57C40695C1436C89233A100654EAF2FD2C15EDFB4532F50C831DC10A04BF00311921063F77AAB1F9D43DD548&originRegion=us-east-1&originCreation=20211028123341>. Acesso em: 28 out. 2021.

HEIRI, O.; LOTTER, A.; LEMCKE, G. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. **Journal of Paleolimnology**, Dordrecht, v. 25, n. 1, 2001. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/27702348_Loss_on_Ignition_as_a_Method_for_Estimating_Organic_and_Carbonate_Content_in_Sediments_Reproducibility_and_Comparability_of_Results. Acesso em: 03 fev. 2022.

HENRY, C.S.; LYNAM, J. G. Embodied energy of rice husk ash for sustainable cement production. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, Louisiana, v. 2,

2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666016420300025>. Acesso em: 13 abr. 2021.

HIDALGO, S. *et al.* Evaluation of rice straw ash as a pozzolanic addition in cementitious mixtures. **Application of Biomass Ashes in Cement-Based Materials**, Basel, v. 11, n. 2, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/2/773#cite>. Acesso em: 21 fev. 2022.

HILLS, C. D. *et al.* Valorisation of agricultural biomass-ash with CO₂. **Scientific Reports**, London, v. 10, n. 1, 2020. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-70504-1#Tab3>. Acesso em: 19 dez. 2020.

HNIN, T. T.; HTET, K. L.; KYAW, N. N. M. Experimental investigation on effect of bamboo leaf ash replacing cement on compressive strength. **International Journal of Science and Engineering Applications**, Chennai, v. 7, n. 10, p. 406–410, 2018. Disponível em: <https://ijsea.com/archive/volume7/issue10/IJSEA07101015.pdf>. Acesso em: 03 jan. 2021.

HU, L.; HE, Z.; ZHANG, S. Sustainable use of rice husk ash in cement-based materials: environmental evaluation and performance improvement. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 264, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620317911>. Acesso em: 7 abr. 2020.

INDEXBOX. **Global cement market reached \$305B, with China leading the expansion**. [s. l.]: Global trade, 2020. Disponível em: <https://www.globaltrademag.com/global-cement-market-reached-305b-with-china-leading-the-expansion/>. Acesso em: 30 jan. 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Buildings**. [s. l.]: IEA, 2020b. Disponível em: <https://www.iea.org/topics/buildings/>. Acesso em: 15 jun. 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Cement**. [s. l.]: IEA, 2020a. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/cement>. Acesso em: 15 jun. 2020.

ISTUQUE, D. B. **Estudo da influência da cinza de lodo de esgoto como material não-convencional na produção de geopolímeros à base de metacaulim**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2017. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/150356/istuque_db_me_ilha.pdf?sequence=3&isAllowed=y. Acesso em: 09 fev. 2022.

KREIKER, J. *et al.* Study of peanut husk ashes properties to promote its use as supplementary material in cement mortars. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 7, n. 6, p. 905–912, 2014. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-41952014000600001&lng=en&tlng=en. Acesso em: 10 dez. 2020.

LAPO, B. *et al.* A potential lignocellulosic biomass based on banana waste for critical rare earths recovery from aqueous solutions. **Environmental Pollution**, Oxford, v. 264, 2020. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749119365388?via%3Dihub>. Acesso em: 03 mar. 2021.

LIMA, F. S.; GOMES, T. C. F.; MORAES, J. C. B. Novel one-part alkali-activated binder produced with coffee husk ash. **Materials Letters**, São José dos Campos, v. 313, n. 15, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167577X22000866?via%3Dihub>. Acesso em: 13 abr. 2022.

LIMA, S. A. **Análise da viabilidade do uso de cinzas agroindustriais em matrizes cimentícias**: estudo de caso da cinza da casca da castanha de caju. 2008. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18141/tde-10072008-172206/publico/SofiadiSSERTACAOfinal.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2020.

LIN, L.; KUO, T.; HSU, Y. The application and evaluation research of coffee residue ash into mortar. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, Tokyo, v. 18, n. 3, p. 541–551, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/273306791_The_application_and_evaluation_research_of_coffee_residue_ash_into_mortar. Acesso em: 08 dez. 2020.

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>. Acesso em: 12 abr. 2021.

MARANGON, E. *et al.* Mortars produced with an environmentally sustainable rice husk silica: rheological properties. **Journal of Cleaner Production**, Rio Grande do Sul, v. 287, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620356079>. Acesso em: 14 abr. 2021.

MARVILA, M. T.; AZEVEDO, A. R. G.; VIEIRA, C. M. F. Reaction mechanisms of alkali-activated materials. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 14, n. 3, p. 1-26, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/riem/a/7kfhK6CRXpnKhY7wztyDxMK/abstract/?lang=en>. Acesso em: 28 out. 2021.

MCCARTHY, M. J.; DYER, T. D. Pozzolanas and pozzolanic materials. *In*: PETER, C. H.; LISKA, M. **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**. 5. ed. London: Elsevier, 2019. Cap. 9, p. 363–467.

MEDINA, J. M. *et al.* Characterisation and valorisation of biomass waste as a possible addition in eco-cement design. **Materials and Structures**, Dordrecht, v. 50, n. 5, p. 1–13, 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-017-1076-9>. Acesso em: 11 ago. 2020.

MITTRI *et al.* Assessment of the pozzolanic activity of ornamental stone waste after heat treatment and its effect on the mechanical properties of concretes. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 11, n. 6, p. 1186–1207, 2018. Disponível em:

https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-41952018000601186. Acesso em: 05 nov. 2020.

MITTRI *et al.* Assessment of the pozzolanic activity of ornamental stone waste after heat treatment and its effect on the mechanical properties of concretes. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 11, n. 6, p. 1186–1207, 2018. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-41952018000601186. Acesso em: 05 nov. 2020.

MOAYEDI, H. *et al.* Applications of rice husk ash as green and sustainable biomass. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 237, p. 117851, 2019. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619327210?casa_token=oz_xsutzB_QAAAAA:-zdDDRlBxKfbr7MgQ9dAeqCC6mcuc9mXyc2OeVsxVqMasQ3mH3gJWQqTPXu0m6HsKdtD6DB2fw. Acesso em: 12 abr. 2021.

MOHAMAD, N. *et al.* Effects of incorporating banana skin powder (BSP) and palm oil fuel ash (POFA) on mechanical properties of lightweight foamed concrete. **International Journal of Integrated Engineering**, Johor, v. 10, n. 9, p. 169–176, 2018. Disponível em: <https://publisher.uthm.edu.my/ojs/index.php/ijie/article/view/3104/2010>. Acesso em: 15 dez. 2020.

MOHAMAD, N. *et al.* Flexure behaviour of foamed concrete incorporating banana skin powder and palm oil fuel ash strengthened with carbon fibre reinforced plate. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, Bristol, v. 601, n. 1, 2019a. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/601/1/012025/pdf>. Acesso em: 15 dez. 2020.

MOHAMAD, N. *et al.* Innovative and sustainable green concrete-A potential review on utilization of agricultural waste. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, Bristol, v. 601, n. 1, 2019b. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/601/1/012026/pdf>. Acesso em: 15 dez. 2020.

MORAES, J. C. B. *et al.* Assessment of sugar cane straw ash (SCSA) as pozzolanic material in blended Portland cement: microstructural characterization of pastes and mechanical strength of mortars. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 94, p. 670–677, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.108>. Acesso em: 05 nov. 2020.

MORAES, J. C. B. *et al.* Improving the reactivity of a former ground sugarcane bagasse ash produced by autogenous combustion through employment of two different additional grinding procedures. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 270, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820334759>. Acesso em: 15 abr. 2021.

MORAES, J. C. B. *et al.* Pozzolanic reactivity studies on a biomass-derived waste from sugar cane production: sugar cane straw ash (SCSA). **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, Washington, v. 4, n. 8, p. 4273–4279, 2016. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acssuschemeng.6b00770>. Acesso em: 21 fev. 2022.

MORAES, J. C. B. de. **Utilização da cinza de folha de cana-de-açúcar como material pozolânico em matrizes cimentantes**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2015. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/124469/000837061.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 24 out. 2020.

MORAES, M. J. B. de. **Estudo do potencial da cinza de folha de bambu para sua utilização como material pozolânico e sustentável em matrizes cimentantes**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2019. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/180946/moraes_mjb_me_ilha.pdf?sequence=3&isAllowed=y. Acesso em: 24 out. 2020.

MORAES, M. J. B. de. *et al.* Production of bamboo leaf ash by auto-combustion for pozzolanic and sustainable use in cementitious matrices. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 208, p. 369–380, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.007>. Acesso em: 03 nov. 2020.

MORAIS, B. B. *et al.* Análise das propriedades do concreto com variação dos tipos de cimento. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, São Paulo, v. 1, p. 5–25, 2020. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/tipos-de-cimento>. Acesso em: 12 ago. 2020.

MORANVILLE-REGOURD, M.; KAMALI-BERNARD, S. Cements made from blastfurnace slag. In: PETER, C. H.; LISKA, M. **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**. 5. ed. London: Elsevier, 2019. Cap. 10, p. 469–507.

MOTA, D. M. P. *et al.* Adição da cinza da folha de bananeira na argamassa. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, Florianópolis, v. 9, p. 55–69, 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/339803782_ADICAO_DA_CINZA_DA_FOLHA_DE_BANANEIRA_NA_ARGAMASSA. Acesso em: 13 jul. 2020.

MUKHERJEE S. Clays and Associated Minerals in Cement and Plasters. In: MUKHERJEE S. **The science of clays**. Calcutá: Springer, 2013. Cap. 13, p. 197–207.

NAQI, A.; JANG, J. G. Recent progress in green cement technology utilizing low-carbon emission fuels and raw materials: a review. **Sustainability**, Switzerland, v. 11, n. 2, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/330538842_Recent_Progress_in_Green_Cement_Technology_Utilizing_Low-Carbon_Emission_Fuels_and_Raw_Materials_A_Review. Acesso em: 13 ago. 2020.

NATALI, J. F. *et al.* A review on the evolution of portland cement and chemical admixtures in brazil. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 14, n. 6, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/riem/a/JRSsh8ySggyJXQHh7Zb9Gwz/?lang=en#>. Acesso em: 30 jan. 2022.

NNOCHIRI, E. S.; ADERINLEWO, O. Geotechnical properties of lateritic soil stabilized with banana leaves ash. **FUOYE Journal of Engineering and Technology**, Ekiti State, v. 1,

n. 1, p. 116–119, 2016. Disponível em:

<https://pdfs.semanticscholar.org/c222/7ab8a7a59a0939342ac02597f42ff7188577.pdf>. Acesso em: 19 dez. 2020.

NUNES, C. L. C. *et al.* Performance, carcass traits and meat quality of lambs fed coffee hulls treated with calcium oxide. **Animal Feed Science and Technology**, Amsterdam, v. 264, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114471>. Acesso em: 03 mar. 2021.

OLUBAJO, O. O.; ODEY, O. A.; ABDULLAHI, B. Potential of orange peel ash as a cement replacement material. **Path of Science**, Kosice, v. 5, n. 7, p. 2009–2019, 2019. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/334888552_Potential_of_Orange_Peel_Ash_as_a_Cement_Replacement_Material/fulltext/5d44342592851cd0469a5f7a/Potential-of-Orange-Peel-Ash-as-a-Cement-Replacement-Material.pdf. Acesso em: 13 dez. 2020.

OLUTAIWO, A. O.; OLUSHOLA, L. A. Effect of banana leaf ash on cement: modified lateritic soil. **International Journal of Engineering and Technical Research**, Lagos, v. 869, n. 6, p. 25–28, 2017. Disponível em: <https://media.neliti.com/media/publications/264983-effect-of-banana-leaf-ash-on-cement-modi-c3e3280c.pdf>. Acesso em: 21 dez. 2020.

ONIKEKU, O. *et al.* Evaluation of characteristics of concrete mixed with bamboo leaf ash. **The Open Construction & Building Technology Journal**, Sharjah, v. 13, n. 1, p. 67–80, 2019. Disponível em:

<https://openconstructionbuildingtechnologyjournal.com/VOLUME/13/PAGE/67/FULLTEXT/>. Acesso em: 03 jan. 2021.

ORTIZ, D. L. *et al.* Sustainable management of peel waste in the small-scale orange juice industries: A Colombian case study. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 265, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121587>. Acesso em: 03 mar. 2021.

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.

PATEL, J. P.; PARSANIA, P. H. Characterization, testing, and reinforcing materials of biodegradable composites. In: SHIMPI, N. G. **Biodegradable and biocompatible polymer composites**, Rajkot: Woodhead Publishing, 2018. p. 55–79.

PAWAR, J. R.; KHAIRE, A. S. Experimental investigation on properties of concrete by partial replacement of cement with banana leaves ash. **International Journal for Research in Engineering Application & Management**, Nashik, p. 789–794, 2018. Disponível em: <https://www.ijream.org/papers/ICRTET0155.pdf>. Acesso em: 21 dez. 2020.

PAYÁ *et al.* Bagasse ash. In: SIDDIQUE, R.; CACHIM, P. **Waste and supplementary cementitious materials in concrete**. [New York?]: Woodhead Publishing, 2018. Cap. 17, p. 559–598.

PEREIRA, A. M. *et al.* Valorisation of sugarcane bagasse ash (SCBA) with high quartz content as pozzolanic material in Portland cement mixtures. **Materiales de Construcción**, Madrid, v. 68, n. 330, p. 1–10, 2018. Disponível em: <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/view/2216>. Acesso em: 05 nov. 2020.

PEREIRA, A. M. **Análise da viabilidade da utilização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como aglomerante para a produção de matrizes cimentantes**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira 2014. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/113845/000801735.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em 29 maio 2021.

PERNÁ, I. *et al.* The synthesis and characterization of geopolymers based on metakaolin and high LOI straw ash Ivana. **Construction and Building Materials**, Praga, v. 228, 2019. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181932183X?casa_token=uhbED1SQcqoAAAAA:fDMQB9cLMx95nsksZIGveFD9rCWKfAUuXJTZC1XaWI9i01Js6pLQYnYdTICi2E2redMvfu-KRg. Acesso em: 05 dez. 2020.

PINHEIRO, S. M. de M. *et al.* Olive-stone biomass ash (OBA): An alternative alkaline source for the blast furnace slag activation. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 178, p. 327–338, 2018. Disponível em: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0950061818312339?token=9C3C5E64532E2290BC307824B2A318C52E63DBB71A8F0CC57707F8DC8B09466937F4776DA087610A4079CCB29FC5FEA5&originRegion=us-east-1&originCreation=20211027153039>. Acesso em: 27 out. 2021.

PONTES, V. C. P. **Efeitos dos sulfatos na degradação do concreto**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual de Paraíba, João Pessoa, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/17082/1/VCPP21102019.pdf>. Acesso em: 21 out. 2020.

POURKHORSHIDI, A. R. *et al.* Applicability of the standard specifications of ASTM C618 for evaluation of natural pozzolans. **Cement and Concrete Composites**, Oxford, v. 32, n. 10, p. 794–800, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.08.007>. Acesso em: 24 out. 2020.

PRABU, M. *et al.* A study on the mechanical properties of banana stem ash concrete made using straw dipped water. **International Research Journal of Engineering and Technology**, Puducherry, v. 6, n. 3, p. 3369–3374, 2019. Disponível em: <https://www.irjet.net/archives/V6/i3/IRJET-V6I3633.pdf>. Acesso em: 21 dez. 2020.

PRAKASAN, S.; PALANIAPPAN, S.; GETTU, R. Study of energy use and co2 emissions in the manufacturing of clinker and cement. **Journal of The Institution of Engineers**, West Bengal, v. 101, n. 1, p. 221–232, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/337333610_Study_of_Energy_Use_and_CO2_Emissions_in_the_Manufacturing_of_Clinker_and_Cement. Acesso em: 13 ago. 2020.

QI, T.; FENG, G.; WANG, H. Pozzolan activity of corn straw leaf ash produced at different temperatures and treated with portlandite solution. **BioResources**, Raleigh, v. 15, n.4, p. 8708-8727, 2020. Disponível em:

<https://www.proquest.com/docview/2519352774?fromopenview=true&pq-origsite=gscholar>. Acesso em: 21 fev. 2022.

RAHEEM, A. A.; IKOTUN, B. D. Incorporation of agricultural residues as partial substitution for cement in concrete and mortar: a review. **Journal of Building Engineering**, Johannesburg, v. 31, 2020. Disponível em:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710219312501?casa_token=O1cWKkkCqYQAAAAA:8-uCXkZMVXOBu3df7g31V3ikjS1vDIDGKdxJOISonegDtNB42ySrpSPgWQYB5zKTLisNSvYSoRU. Acesso em: 05 dez. 2020.

RANGARAJ, S.; VENKATACHALAM, R. A lucrative chemical processing of bamboo leaf biomass to synthesize biocompatible amorphous silica nanoparticles of biomedical importance. **Applied Nanoscience (Switzerland)**, v. 7, n. 5, p. 145–153, 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13204-017-0557-z>. Acesso em: 03 mar. 2021.

RETA, Y.; MAHTO, S. Experimental investigation on coffee husk ash as a partial replacement of cement for C-25 concrete. **Cikitusi Journal For Multidisciplinary Research**, Pune, v. 6, n. 6, p. 152–158, 2019. Disponível em: <http://www.cikitusi.com/gallery/22-june-866.pdf>. Acesso em: 08 dez. 2020.

ROCHA, K. R.; ROESLER, B. C. S.; BURKERT, C. A. V. **Optimization of soybean (glycine max) hulls acid hydrolysis to produce sugars for microbial cultivation**. São Paulo: Blucher, 2018. p. 3414–3417, 2018. Disponível em: <https://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/optimization-of-soybean-glycine-max-hulls-acid-hydrolysis-to-produce-sugars-for-microbial-cultivation-29289>. Acesso em: 10 ago. 2020.

RODIER, L. *et al.* Potential use of sugarcane bagasse and bamboo leaf ashes for elaboration of green cementitious materials. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 231, p. 54–63, 2019. Disponível em:

https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652619317421?casa_token=7-dPBvUu_bMAAAAA:yMdbGldnOZv2j53yaiDF_QKFDtkDIWQjuqm5nKHcFCcVJUM_EPbIcYQJ1DymcdvTCft5g-hu0rD. Acesso em: 03 jan. 2021.

ROSSIGNOLO, J. A. *et al.* Influence of microwave oven calcination on the pozzolanicity of sugar cane bagasse ashes (SCBA) from the cogeneration industry. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 187, p. 892–902, 2018. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818319561>. Acesso em: 21 fev. 2022.

RUAN, Z. *et al.* Corn. In: PAN, Z.; ZHANG, R.; ZICARI, S. **Integrated processing technologies for food and agricultural by-products**. London: Academic Press, 2019. Cap. 3, p. 59–72.

SAKIR, S.; RAMAN, S. N.; KAISH, A. B. M. A. Utilization of by-products and wastes as supplementary cementitious materials in structural mortar for sustainable construction.

Sustainability, Basel, v. 12, n. 9, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/9/3888>. Acesso em: 05 nov. 2020.

SALES, C. P. **Produção e caracterização de cinza de capim elefante com vistas à sua aplicação como pozolana**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2012. Disponível em: https://uenf.br/posgraduacao/engenharia-civil/wp-content/uploads/sites/3/2015/09/Caroline-Pess%C3%B4a-Sales_.compressed.pdf. Acesso em 10 fev. 2021.

SHAKOURI, M. *et al.* Pretreatment of corn stover ash to improve its effectiveness as a supplementary cementitious material in concrete. **Cement and Concrete Composites**, Oxford, v. 112, 2020. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946520301505?casa_token=TmohGtCjG50AAAAA:l64MPCCDmEKghns2ZEP7prB3X15Zufsd3lNGUoLiNLS-mt7_WS7w-F1ODzAtXGCAS1SxHEldntg. Acesso em: 07 dez. 2020.

SHARMA, A.; AMETA, R.; AMETA, S. C. Orange peel as alternate fuel in clinkerization. **Scientific Reviews & Chemical Communications**, Hyderabad, v. 3, n. 2, p. 110–119, 2013. Disponível em: <https://www.scholarscentral.com/pdfs/80749/orange-peel-as-alternate-fuel-in-clinkerization.pdf>. Acesso em: 13 dez. 2020.

SHUBHAM; KHANDELWAL, E. V. Strength parameters of concrete using groundnut shell ash and recycled concrete aggregate as partial substitution of opc-43 and coarse aggregate. **International Journal of Civil Engineering and Technology**, New Delhi, v. 10, n. 9, p. 102–110, 2019. Disponível em: http://www.iaeme.com/MasterAdmin/Journal_uploads/IJCIET/VOLUME_10_ISSUE_9/IJCIET_10_09_011.pdf. Acesso em: 03 mar. 2021.

SILVA, A. F. P. L.; SOUZA, J. O. P. Geoquímica e mineralogia dos depósitos aluviais na bacia do riacho do Tigre, semiárido paraibano. **GEOgraphia**, Niterói, v. 22, n. 49, 2020. Disponível em: <https://periodicos.uff.br/geographia/article/view/40840/26713>. Acesso em: 03 jan. 2022.

SINGH, P. Waste handling in liquid absorbent-based post-combustion capture processes. *In*: Paul H. M. F. **Absorption-based post-combustion capture of carbon dioxide**. Australia: Woodhead Publishing, 2016. Cap. 21, p. 505-517.

SINGH, R. Understanding the role of hydration water and nano C-S-H colloids in concrete. *In*: LIEW, M. S. **Smart nanoconcretes and cement-based materials**: properties, modelling and applications. London: Elsevier, 2020. Cap. 6, p. 157–182.

SITHOLE, N. T.; MASHIFANA, T. Geosynthesis of building and construction materials through alkaline activation of granulated blast furnace slag. **Construction and Building Materials Journal**, Ghaziabad, v. 264, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120712>. Acesso em: 01 nov. 2021.

SORIANO, L. *et al.* Almond-shell biomass ash (ABA): A greener alternative to the use of commercial alkaline reagents in alkali-activated cement. **Construction and Building**

Materials, Amsterdam, v. 290, 2021. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123251>. Acesso em: 28 out. 2021.

SORIANO, L. *et al.* Biomass ashes to produce an alternative alkaline activator for alkali-activated cements. **Materials Letters**, Amsterdam, v. 308, pt. B, 2021. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167577X21018966?via%3Dihub>. Acesso em: 09 nov. 2021.

TAMANNA, K. *et al.* Utilization of wood waste ash in construction technology: a review. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 237, 2020. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117654>. Acesso em: 05 nov. 2020.

TASHIMA, M. M. Assessment of pozzolanic/hydraulic reactivity of vitreous calcium aluminosilicate (VCAS). **Materials & Design**, London, v. 96, p. 424–430, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.036>. Acesso em: 03 nov. 2020.

TASHIMA, M. M. *et al.* New method to assess the pozzolanic reactivity of mineral admixtures by means of pH and electrical conductivity measurements in lime:pozzolan suspensions. **Materiales de Construcción**, Madrid, v. 64, n. 316, 2014. Disponível em: <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/view/1563/1888>. Acesso em: 03 nov. 2020.

THE ZEOBOND GROUP. **Projects**: e-crete pre-mixed concrete. Austrália: [s. n.], 2021. Disponível em: <http://www.zeobond.com/projects-lyndarum-estate.html>. Acesso em: 11 nov. 2021.

TORO-TROCHEZ J. L. *et al.* Thermogravimetric characterization and pyrolysis of soybean hulls. **Bioresource Technology Reports**, Oxford, v. 6, p. 183–189, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589014X19300453>. Acesso em: 07 dez. 2020.

TORRES, S. M. **Aplicação da difração de raios x na análise do potencial pozolânico da cinza do bagaço da cana-de-açúcar para adição ao cimento portland**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019. Disponível em:
<https://www.ufpe.br/documents/1466569/1804469/Aplica%C3%A7%C3%A3o+da+difra%C3%A7%C3%A3o+de+raios-x+na+an%C3%A1lise+do+potencial+pozol%C3%A2nico+da+cinza+do+baga%C3%A7o+da+cana-de-a%C3%A7%C3%BAcar+para+adi%C3%A7%C3%A3o+ao+cimento+Portland.pdf/6abf1173-a708-4573-85b4-76c02743be59>. Acesso em: 10 fev. 2021.

TRUSILEWICZ, L. N. Clays in cement production from the nanoscale. *In*: CAVALLARO, G.; FAKHRULLIN, R.; PASBAKHSH, P. **Clay nanoparticles**. London: Elsevier, 2020. Cap. 10, p. 225–256.

UBACHUKWU, O. A.; NWOBIA, I. L.; ONWAEKELE, A. P. **Potentials of bamboo leaf ash as supplementary cementitious material for concrete in southern nigeria**. 2018. Disponível em:
https://www.researchgate.net/profile/Samuel_Nta/publication/327559441_EXPERIMENTAL

PRODUCTION AND EVALUATION OF CEMENT-BONDED COMPOSITE CUBES FOR CONSTRUCTION MATERIAL/links/5b96a5f892851c78c4105c6f/EXPERIMENTAL-PRODUCTION-AND-EVALUATION-OF-CEMENT-BONDED-COMPOSITE-CUBES-FOR-CONSTRUCTION-MATERIAL.pdf#page=61.

Acesso em: 03 jan. 2021.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JATAÍ - UFJ. **Fluorescência de raios-X**. Jataí: UFJ, 2021. Disponível em: <https://www.fisica.jatai.ufg.br/p/19497-fluorescencia-de-raios-x?locale=em>. Acesso em: 08 mar. 2021.

VAMVUKA, D. *et al.* Evaluation of ashes produced from fluidized bed combustion of residues from oranges' plantations and processing. **Renewable Energy**, New York, v. 72, p. 336–343, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.07.029>. Acesso em: 10 dez. 2020.

VAN DEVENTER, J. S. J. Progress in the adoption of geopolymer cement. *In*: NAZARI, A.; SANJAYAN, J. G. **Handbook of low carbon concrete**. Butterworth-Heinemann: Elsevier, 2017. Cap. 10, p. 217–262.

VIET-THIEN-NA, V. *et al.* Pozzolanic reactivity of mesoporous amorphous rice husk ash in portlandite solution. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 59, p. 111–119, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814002086>. Acesso em: 21 fev. 2022.

VILLAR-COCIÑA, E. *et al.* A comparative study on the pozzolanic activity between bamboo leaves ash and silica fume: kinetic parameters. **Waste and Biomass Valorization**, Dordrecht, v. 11, n. 4, p. 1627–1634, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12649-018-00556-y#Tab1>. Acesso em: 03 jan. 2021.

VILLAR-COCIÑA, E. *et al.* Pozzolanic characterization of cuban bamboo leaf ash: calcining temperature and kinetic parameters. **Waste and Biomass Valorization**, Dordrecht, v. 9, n. 4, p. 691–699, 2018. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12649-016-9741-8>. Acesso em: 03 jan. 2021.

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. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320344278>. Acesso em: 15 abr. 2021.

ZAREEI, S. A. *et al.* Rice husk ash as a partial replacement of cement in high strength concrete containing micro silica: Evaluating durability and mechanical properties. **Case Studies in Construction Materials**, Amsterdam, v. 7, p. 73–81, 2017. Disponível em: https://scholar.google.com.br/scholar?hl=pt-BR&as_sdt=0%2C5&q=Rice+husk+ash+as+a+partial+replacement+of+cement+in+high+strength+concrete+containing+micro+silica%3A+Evaluating+durability+and+mechanical+properties&btnG=. Acesso em: 12 abr. 2021.

ZHANG, Y. *et al.* Effects of temperature on performances and hydration process of sulphoaluminate cement-based dual liquid grouting material and its mechanisms. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, Budapest, v. 139, n. 1, p. 47–56, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-019-08426-y#Fig10>. Acesso em: 22 out. 2020.

**APÊNDICE A – RELATÓRIO DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À
COMPRESSÃO DAS ARGAMASSAS (MPa)**

Nº do corpo de prova	Argamassas				
	ESC + H₂O	ESC + NaOH	ESC + KOH	ESC + CCB	ESC + CCC
CP 1	12,11	31,11	41,62	46,92	32,63
CP 2	11,86	33,21	40,95	48,01	34,14
CP 3	11,94	31,62	37,17	48,94	33,30
CP 4	12,11	32,37	41,96	46,58	37,00
CP 5	12,45	30,19	40,87	-	-
CP 6	12,45	30,94	43,05	-	-
Média	12,15	31,57	40,94	47,61	34,27
Desvio Padrão	0,23	0,99	1,83	0,93	1,67
Coeficiente de variação	1,87%	3,13%	4,48%	1,96%	4,86%
Variância	0,05	0,97	3,36	0,87	2,78