



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
"CAMPUS ILHA SOLTEIRA"

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA - CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA DE RESÍDUOS
AGROINDUSTRIAIS EM SUSPENSÕES CAL:RESÍDUO

LUCAS GIL DUARTE

Ilha Solteira – SP

2022



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
"CAMPUS ILHA SOLTEIRA"

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JULIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA - CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA DE RESÍDUOS
AGROINDUSTRIAIS EM SUSPENSÕES CAL:RESÍDUO**

LUCAS GIL DUARTE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha
Solteira – UNESP, como parte dos requisitos
para obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki.

Ilha Solteira – SP

2022

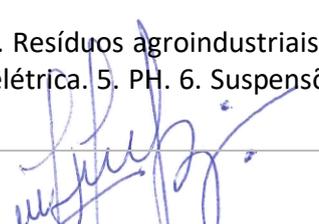
FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

D812a Duarte, Lucas Gil.
Avaliação da atividade pozolânica de resíduos agroindustriais em suspensões cal:resíduo / Lucas Gil Duarte. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2022
94 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2022

Orientador: Jorge Luís Akasaki
Inclui bibliografia

1. Materiais pozolânicos. 2. Resíduos agroindustriais. 3. Reatividade pozolânica. 4. Condutividade elétrica. 5. PH. 6. Suspensões cal:resíduo.



João Josué Barbosa
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação
Diretor Técnico
CRB 8-5642

FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno: LUCAS GIL DUARTE

Título: AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA DE RESÍDUOS
AGROINDUSTRIAIS EM SUSPENSÕES CAL:RESÍDUO

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado como parte dos requisitos para obtenção do grau de Engenheiro Civil, junto ao Curso de Graduação em Engenharia Civil, da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Campus de Ilha Solteira

COMISSÃO EXAMINADORA

**JORGE
LUÍS
AKASAKI**

Assinado de forma
digital por JORGE
LUÍS AKASAKI
Dados: 2022.02.07
16:09:31 -03'00'

Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki
(Orientador)

mauro m. tashima
Prof. Dr. Mauro Mitsuuchi Tashima
(Examinador)

Alex Otávio Sanches
Prof. Dr. Alex Otávio Sanches
(Examinador)

Ilha Solteira

07/02/2022

Dedico a realização deste trabalho à minha família (especialmente à minha mãe, ao meu pai, ao meu irmão e à minha irmã), à minha namorada e aos meus amigos, pelo apoio e por todo o suporte que me forneceram ao longo de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por Ele sempre estar presente, fornecendo-me saúde e ânimo para tornar possível a realização deste trabalho; assim como as demais conquistas em minha vida.

Aos meus pais, Luís Gustavo e Simone, por nunca pouparem e medirem esforços, sempre fazendo o melhor para a minha educação e saúde. Devido ao apoio, suporte e incentivo que me forneceram, fui capaz de chegar até aqui.

Ao meu irmão, Mateus, e à minha irmã, Luisa Maria, por estarem sempre dispostos a me ajudar, encorajando-me em meus objetivos.

À Larissa, pelo companheirismo, auxílio e motivação, sempre me apoiando, independente da situação ser crítica, ou não.

A toda a minha família, que me incentivou e participou de minha educação.

Aos sempre presentes amigos de graduação, que se tornaram minha família durante os anos em que estive em Ilha Solteira – SP.

Ao meu orientar, Prof. Dr. Jorge L. Akasaki, e ao professor Prof. Dr. Mauro M. Tashima, que me auxiliaram desde o instante em que busquei por uma iniciação científica, e sempre compartilharam seus conhecimentos comigo, cobrando-me e me fazendo crescer, tanto profissional, quanto pessoalmente.

A UNESP - Câmpus de Ilha Solteira, por fornecer a possibilidade de realizar esta pesquisa de conclusão do curso de Engenharia Civil, e demais experiências que adquiri ao longo de todo o período de graduação.

A todos os membros do grupo de pesquisa Materiais Alternativos de Construção (MAC), pelo apoio no desenvolvimento da pesquisa, especialmente à Letícia, pela parceria.

Aos técnicos do Laboratório Central de Engenharia Civil da FEIS/UNESP, Gilson, Flávio, Osias e Natália, por sempre estarem dispostos a me auxiliar quando precisei.

Também gostaria de agradecer ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico processo 421182/2018-0.

Por fim, agradeço a todos que auxiliaram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho.

TÍTULO: AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS EM SUSPENSÕES CAL:RESÍDUO.

RESUMO

A indústria da construção civil é caracterizada como uma das maiores consumidoras de recursos naturais e de energias não renováveis. No processo de fabricação do clínquer, importante componente do cimento, o processo de descarbonatação do calcário se encarrega de aproximadamente 52% das emissões de gás carbônico; enquanto o consumo energético produz o resto. Ao todo, esse procedimento contribui entre 5% e 8% das emissões globais anuais de gases do efeito estufa. A agroindústria é responsável pela geração de resíduos, cujos descartes inapropriados têm apresentado impactos ambientais negativos. Por conseguinte, a necessidade de obter alternativas sustentáveis visando, ao menos, mitigar esses prejuízos tem sido tema de diversas pesquisas. Dentre estes, tem-se a substituição do clínquer por materiais cimentícios suplementares que, caso apresentem características pozolânicas, podem ser utilizados para melhorar o desempenho e a durabilidade do cimento Portland, uma vez que apresentam capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio produzido durante a hidratação do cimento. Neste projeto, busca-se avaliar a eficácia de oito cinzas de resíduos agroindustriais, caracterizando a reatividade pozolânica de cada uma destas através de medidas de pH e de condutividade elétrica de suspensões cal:pozolana.

Palavras-Chave: Materiais Pozolânicos; Resíduos Agroindustriais; Reatividade Pozolânica; Condutividade Elétrica; pH; Suspensões Cal:Resíduo.

TITLE: EVALUATION OF POZZOLANIC ACTIVITY OF AGROINDUSTRIAL WASTE IN LIME:WASTE SUSPENSIONS.

ABSTRACT

The construction industry is characterized as one of the biggest consumers of natural resources and non-renewable energy. In the process of manufacturing clinker, an important component of cement, the limestone decarbonation process is responsible for approximately 52% of carbon dioxide emissions; while energy consumption produces the rest. Altogether, this procedure contributes between 5% and 8% of annual global greenhouse gas emissions. The agroindustry is responsible for the generation of waste, whose inappropriate disposal has had negative environmental impacts. Therefore, the need to obtain sustainable alternatives aiming, at least, to mitigate these damages has been the subject of several studies. Among these, there is the replacement of clinker by supplementary cementitious materials which, if they present pozzolanic characteristics, can be used to improve the performance and durability of Portland cement, since they have the ability to react with the calcium hydroxide produced during the cement hydration. In this project, the aim is to evaluate the effectiveness of eight ashes from agro-industry residues, characterizing the pozzolanic reactivity of each one of them through pH and electrical conductivity measurements of lime:pozzolan suspensions.

Keywords: Pozzolanic Materials; Agro-industrial waste; Pozzolanic Reactivity; Electric Conductivity; pH; Suspensions Lime:Waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Figura representativa das etapas de produção do cimento Portland.....	9
Figura 2 - Panteão de Roma	15
Figura 3 - Coliseu de Roma	15
Figura 4 - Usina Hidrelétrica de Itaipu.	16
Figura 5 - Barragem Hungry Horse	17
Figura 6 - Banho termostático com agitação da marca Julabo SW22.	36
Figura 7 - Equipamento pHmetro PG2000 GEHAKA.....	36
Figura 8 - Equipamento Condutivímetro CG2000 GEHAKA.....	37
Figura 9 - Estufa utilizada para desidratar a casca de banana.....	38
Figura 10 - Mufla utilizada no processo de calcinação	38
Figura 11 - Almofariz (gral) de ágata com pistilo	39
Figura 12 - Modelo para a classificação da reatividade pozolânica das cinzas	42
Figura 13 - DRX da CCA	47
Figura 14 - DRX da CBC.....	48
Figura 15 - DRX da CCB.....	49
Figura 16 - DRX da CCC.....	50
Figura 17 - DRX da CCS	51
Figura 18 - DRX da CCL.....	52
Figura 19 - DRX da CPM	53
Figura 20 - DRX da CFBN.	54
Figura 21 - $[\text{OH}^-]$ da CCB.....	56
Figura 22 - Condutividade Elétrica da CCB	57
Figura 23 - $[\text{OH}^-]$ da CCC.....	58
Figura 24 - Condutividade Elétrica da CCC	58
Figura 25 - $[\text{OH}^-]$ da CCS	59
Figura 26 - Condutividade Elétrica da CCS.....	60
Figura 27 - $[\text{OH}^-]$ da CCL.....	61
Figura 28 - Condutividade Elétrica da CCL	62
Figura 29 - $[\text{OH}^-]$ da CPM	63
Figura 30 - Condutividade Elétrica da CPM.....	63
Figura 31 - $[\text{OH}^-]$ da CFBN.	64
Figura 32 - Condutividade Elétrica da CFBN.	65

Figura 33 - [OH ⁻] da CCA.....	66
Figura 34 - Condutividade Elétrica da CCA.....	66
Figura 35 - [OH ⁻] da CBC	67
Figura 36 - Condutividade Elétrica da CBC	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Abreviações dos compostos do cimento Portland.	10
Tabela 2 - Composição química do cimento Portland.	11
Tabela 3 - FRX das cinzas teste (%).....	43
Tabela 4 - FRX das cinzas parâmetro (%).....	44
Tabela 5 - Valores de pH e Condutividade Elétrica para a proporção de 2:8 da CCA	69
Tabela 6 - Classificação da Reatividade Pozolânica das Cinzas Estudadas	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

[OH ⁻]	Concentração de íons hidroxila
a.C.	antes de Cristo
ABNT	Associação Brasileira De Normas Técnicas
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio, Alumina
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
Be	Berlinite
C	Calcita
C2S	Silicato dicálcico, Belita
C3A	Aluminato tricálcico
C3S	Silicato tricálcico, Alita
C4AF	Ferroaluminato tetracálcico
C ₄ ASH ₁₃	Monossulfatos
C ₆ AS ₃ H ₃₂	Etringita
Ca ²⁺	Íon de cálcio
CaO	Óxido de cálcio, Cal
CBC	Cinza do bagaço de cana-de-açúcar
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
CFBN	Cinza da folha de bananeira
CH	Hidróxido de Cálcio, Portlandita
CH/PZ	Cal/pozolana
Cm	Calcita magnesiana
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CO ₂	Dióxido de carbono, Gás carbônico
CPM	Cinza da palha de milho
Cr	Cristobalita
C-S-H	Silicatos de cálcio hidratado
CSH ₂	Sulfato de cálcio, Gipsita

DRX	Difratometria de raios X
F	Fairchildit
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro (III), Ferro
FEIS	Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira
FRX	Fluorescência de raios X
H ₂ O	Água
HF	Ácido fluorídrico
Hi	Hillebrandita
IPCC	<i>International Plant Protection Convention</i>
K	Kutnohorita
K ₂ O	Óxido de potássio
MCS	Material cimentante suplementar
Mg	Magnesita
MgO	Óxido de magnésio, Magnésia
Na ₂ O	Óxido de sódio
OH ⁻	Íon hidroxila
Pp	Pyrophosphite
Pr	Periclase
Q	Quartzo
S	Silvita
Si	Elemento químico silício
SiO ₂	Dióxido de silício, Sílica
SO ₃	Trióxido de enxofre, Anidro sulfúrico
TiO ₂	Dióxido de titânio
Tr	Tridimita
UNESP	Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
W	Wolfeite

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2.	CIMENTO PORTLAND E A AGROINDUSTRIA	2
1.3.	MATERIAL POZOLÂNICO: SOLUÇÃO ALTERNATIVA	4
1.4.	IMPORTÂNCIA DO TEMA.....	4
1.5.	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	6
2.	OBJETIVOS	7
2.1.	OBJETIVO GERAL	7
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
3.1.	CIMENTO PORTLAND.....	8
3.1.1.	Produção do cimento Portland e consequências ao meio-ambiente.....	8
3.1.2.	Processo de hidratação do cimento Portland.....	10
3.2.	MATERIAIS POZOLÂNICOS	12
3.2.1.	Definição.....	12
3.2.2.	Histórico	14
3.2.3.	Reação pozolânica.....	17
3.2.4.	Caracterização da reatividade pozolânica.....	19
3.2.5.	Utilização das cinzas de resíduos agroindustriais como fonte pozolânica para a substituição parcial do cimento Portland	21
3.3.	CINZAS ESTUDADAS.....	25
3.3.1.	Cinza da casca de banana (CCB).....	25
3.3.2.	Cinza da casca de café (CCC)	26
3.3.3.	Cinza da casca de soja (CCS).....	27
3.3.4.	Cinza da casca de laranja (CCL)	27
3.3.5.	Cinza da palha de milho (CPM).....	28
3.3.6.	Cinza da folha de bananeira (CFBN).....	29
3.3.7.	Cinza da casca de arroz (CCA).....	31
3.3.8.	Cinza do bagaço de cana (CBC)	32
4.	MATERIAL E MÉTODOS	35
4.1.	MATERIAIS UTILIZADOS.....	35
4.2.	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	37
4.2.1.	Beneficiamento dos resíduos	37

4.2.2.	Caracterização das cinzas	39
4.2.3.	Avaliação da atividade pozolânica das cinzas	40
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
5.1.	CARACTERIZAÇÃO DAS CINZAS	43
5.1.1.	Fluorescência de raios X (FRX).....	43
5.1.2.	Difratometria de raios x (DRX)	46
5.2.	ANÁLISE DO PH E DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DAS SUSPENSÕES.....	54
5.2.1.	Cinza da Casca de Banana (CCB)	55
5.2.2.	Cinza da Casca de Café (CCC).....	57
5.2.3.	Cinza da Casca de Soja (CCS).....	59
5.2.4.	Cinza da Casca de Laranja (CCL)	60
5.2.5.	Cinza da Palha de Milho (CPM).....	62
5.2.6.	Cinza da Folha de Bananeira (CFBN).....	64
5.2.7.	Cinza da Casca de Arroz (CCA).....	65
5.2.8.	Cinza do Bagaço de Cana-de-Açúcar (CBC).....	67
5.3.	CLASSIFICAÇÃO DA REATIVIDADE POZOLÂNICA DAS CINZAS	68
6.	CONCLUSÃO.....	71
	REFERÊNCIAS.....	72

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O desenvolvimento tanto humano, quanto das sociedades, acarretou o aumento da dependência de recursos naturais e não renováveis para atender às demandas dos consumidores (EL-DIEB; KANAAN, 2018). A indústria da construção é um dos principais consumidores de recursos naturais e de energias não renováveis. A expansão desta ocasiona o aumento das emissões de dióxido de carbono, CO₂, causadas pela produção de cimento, elevando a temperatura da superfície da Terra e, conseqüentemente, nas mudanças climáticas (BASTO; SAVASTANO JUNIOR; MELO NETO, 2019). Além disto, com a expansão da indústria da construção, houve, também, um aumento significativo na quantidade de resíduos (MISTRI *et al.*, 2020).

Essas emissões ocorrem por causa de dois procedimentos: um destes consiste no processo de descarbonatação do calcário, que produz o clínquer, importante componente do cimento; quanto ao outro procedimento, este corresponde à combustão de combustíveis fósseis utilizados para a produção de energia térmica (BASTO; SAVASTANO JUNIOR; MELO NETO, 2019).

Após a Conferência de Estocolmo, que ocorreu no ano de 1972, situações como o meio ambiente e a sua degradação se tornaram importantes preocupações mundiais. O termo desenvolvimento sustentável foi definido e difundido, em 1987, pela Comissão Mundial de Meio Ambiente e Desenvolvimento, que fora criada pelas Nações Unidas. Em 1988, o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (do inglês, *International Plant Protection Convention*, IPCC) foi criado. Feito isto, o efeito estufa se tornou uma preocupação mundial e tema de várias conferências, cujo objetivo era firmar medidas para reduzir os gases causadores do efeito estufa, com foco no CO₂. Devido a estas preocupações, destacou-se a importância da pesquisa na busca de novas alternativas sustentáveis para certos produtos. Dentre estes, tem-se o cimento Portland (MORAES M. *et al.*, 2019).

Diante desse cenário, a substituição parcial do cimento Portland por materiais reciclados, como é o caso do material cimentante suplementar (MCS), surge como uma solução para a mitigação dessas emissões prejudiciais (GUIGNONE *et al.*, 2019). Caso esse MCS apresente características pozolânicas (que consiste na capacidade de ser combinado com o hidróxido de cálcio (CH) liberado na hidratação do cimento Portland, resultando na formação de silicatos de cálcio hidratado (C-S-H), à temperatura ambiente), este poderá apresentar soluções tecnicamente viáveis para melhorar o desempenho, a durabilidade e reduzir os custos de produção (RAASK; BHASKAR, 1975; CORDEIRO L. *et al.*, 2019).

A maioria desses materiais pozolânicos são derivados de resíduos da indústria e da agroindústria. Por exemplo, é possível citar a sílica ativa, a cinza volante, a cinza da casa de arroz e a cinza da folha de bambu (MORAES M. *et al.*, 2019; ISAIA *et al.*, 2017).

Quando esses resíduos são descartados erroneamente, por não apresentarem função apropriada, os danos ambientais acabam sendo ainda mais agravados, provocando problemas ambientais relacionadas à poluição do solo e do ar (MORAES M. *et al.*, 2019; ISMAIL *et al.*, 2020). No entanto, segundo Mota *et al.* (2020), esses resíduos podem possuir grande potencial de uso como biomassa para certas aplicações (por exemplo, para a geração de energia), como é o caso dos resíduos provenientes da cultura da banana, da cana-de-açúcar, do café e do arroz.

Desta maneira, ainda de acordo com Mota *et al.* (2020), a cinza de alguns desses resíduos poderia ser aproveitada no campo da construção civil como fonte pozolânica, por exemplo; promovendo um benefício mútuo do progresso da construção em harmonia com o meio ambiente.

Neste projeto, a atividade pozolânica das cinzas de oito resíduos agroindustriais foi avaliada. As cinzas estudadas foram: cinza da casca de banana (CCB), cinza da casca de café (CCC), cinza da casca de soja (CCS), cinza da casca de laranja (CCL), cinza da palha de milho (CPM), cinza da folha de bananeira (CFBN), cinza da casca de arroz (CCA) e cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC). Para a realização da avaliação da reatividade pozolânica de cada cinza, foram realizadas aferições de pH e de condutividade elétrica em suspensões cal/pozolana, segundo a metodologia proposta por Tashima *et al.* (2014). Alguns destes resíduos agroindustriais já foram avaliados e obtiveram resultados satisfatórios, que consistem na cinza da casca de arroz (HU; HE; ZHANG, 2020), e na cinza do bagaço de cana (AKBAR *et al.*, 2020); sendo que ambas serviram de parâmetro nesta pesquisa.

1.2. CIMENTO PORTLAND E A AGROINDUSTRIA

O cimento consiste no produto mais manufaturado do planeta em massa. Ao ser combinado com água e agregados minerais, o concreto é formado, caracterizado como o material antrópico mais consumido no mundo (EL-DIEB; KANAAN, 2018; SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018). Contudo, no processo de fabricação do clínquer, o processo de decarbonatação do calcário é responsável por aproximadamente 52% das emissões de CO₂, enquanto o consumo de energia se encarrega do resto (COSTA E. *et al.*, 2013). Essa produção contribui entre 5% e 8% das emissões globais anuais de gases de efeito estufa (EL-DIEB; KANAAN, 2018). Essa quantidade substancial é maior que as emissões anuais de CO₂ da

maioria dos países, e um pouco menor que as emissões dos Estados Unidos da América e da China (ABRÃO; CARDOSO; JOHN, 2020).

Na questão energética, a indústria do cimento consome uma média global de energia elétrica equivalente a 85 kWh por tonelada de cimento e 3,1 GJ de energia térmica na fabricação de uma tonelada de clínquer. Por conseguinte, isto torna os setores de construção civil e edifícios responsáveis por consumir mais de um terço do total de energia mundialmente; além de emitir, também, aproximadamente 40% das emissões globais diretas e indiretas de gás carbônico (IEA, 2020a; IEA, 2020b).

No Brasil, as cinzas volantes e as escórias de alto forno (respectivamente, subprodutos das termoeletricas e das siderúrgicas), segundo Abrão (2019), são os materiais mais utilizadas para a substituição do clínquer. Todavia, a disponibilidade desses materiais não tem acompanhado a produção gradual de cimento, fato observado desde os anos 2000 pela estabilização do teor de clínquer na produção de cimento. Conseqüentemente, percebe-se que a estratégia relacionada à substituição do clínquer por apenas esses dois materiais não irá atender as necessidades de redução dos impactos ambientais causados pela indústria do cimento. Logo, há a necessidade de encontrar outros materiais que possam suprir essa demanda. Dentre esses candidatos, é possível citar os materiais pozolânicos provenientes da agroindústria.

A produção agrícola cresceu mais de três vezes nos últimos 50 anos. Os motivos para este acontecimento consistem na expansão dos solos para o uso agrícola, na contribuição tecnológica da revolução verde (que, por sua vez, influenciou a produtividade), e no crescimento acelerado da população. Esse aumento da produção mundial, todavia, tem gerado maior pressão sobre o meio ambiente, causando impactos negativos sobre o solo, o ar e os recursos hídricos, e apresentando conseqüentes influências na saúde das populações e na sustentabilidade dos ecossistemas em risco. Ao todo, a agricultura é responsável por 21% das emissões de gases de efeito estufa (DUQUE-ACEVEDO *et al.*, 2020).

Ainda segundo Duque-Acevedo *et al.* (2020), os resíduos vegetais agrícolas, também conhecidos como biomassa, por outro lado, têm apresentado importante potencial para a produção de energia sustentável a partir de combustíveis renováveis. Quanto às cinzas de certos resíduos agroindustriais, por apresentarem atividades pozolânicas, estas têm sido utilizadas em estudos, sendo adicionadas ao concreto; ganhando destaque e se tornando uma prática frequente (VILLAR-COCIÑA *et al.*, 2003). Dentre os estudos feitos que obtiveram resultados satisfatórios, têm-se a utilização da cinza da casca do arroz (ISAIA *et al.*, 2017), da cinza da folha do bambu (MORAES M. *et al.*, 2019) e da cinza da folha de bananeira (MOTA *et al.*, 2020).

1.3. MATERIAL POZOLÂNICO: SOLUÇÃO ALTERNATIVA

Pozolanas, ou materiais pozolânicos, consistem em materiais siliciosos, ou sílico-aluminosos, que não apresentam propriedades aglomerantes próprias. No entanto, ao reagirem quimicamente com o hidróxido de cálcio na presença de água, e em temperatura ambiente, tem-se a formação de produtos de cimentação semelhantes aos formados durante a hidratação do cimento Portland (PEREIRA *et al.*, 2020; BAUER, 2014).

De acordo com Bauer (2014), os materiais pozolânicos podem ocorrer naturalmente, sendo encontrados como cinzas vulcânicas, ou podem ser produzidos em instalações industriais adequadas, sendo resultantes do beneficiamento de argilas cozidas, cinzas volantes e certas escórias, por exemplo.

A substituição parcial do cimento Portland por pozolana fornece diversos benefícios para esse material. Dentre essas vantagens tecnológicas, têm-se o aprimoramento das propriedades mecânicas e da durabilidade do cimento Portland misturado (PEREIRA *et al.*, 2020). Além disto, é possível citar, também, a melhora na trabalhabilidade, a redução do calor de hidratação, o aumento tanto da impermeabilidade, quanto da resistência aos ataques por águas sulfatadas, águas puras e águas do mar; além de reduzir os custos dos produtos cimentantes (BAUER, 2014; SAKIR *et al.*, 2020).

Percebe-se, assim, a importância de estudar esses materiais, uma vez que auxiliarão na redução da poluição ambiental e irão consumir os subprodutos ou resíduos agrícolas e industriais. Desta maneira, ter-se-á uma contribuição para avanços significativos que busca a metodologia referente à construção sustentável (SAKIR *et al.*, 2020).

1.4. IMPORTÂNCIA DO TEMA

Segundo Guignone *et al.* (2019), a elaboração de cimentos com menores proporções de clínquer tem se caracterizado como uma alternativa viável que pode ser alcançada através da utilização de resíduos como o material cimentante suplementar (MCS) em sua produção. Todavia, de acordo com Abrão (2019), essa alternativa só será uma estratégia eficaz na mitigação dos impactos ambientais se, por exemplo, os materiais apresentarem viabilidade econômica e grande disponibilidade na natureza.

A banana é a fruta mais consumida no Brasil e a segunda no mundo, atrás apenas da laranja. A primeira apresenta uma produção anual equivalente a 144 milhões de toneladas, sendo responsável pela geração de grandes quantidades de resíduos de material vegetal, como folhas, pseudocaules e cascas (MOTA *et al.*, 2020; LAPO *et al.*, 2020). Cada tonelada de

banana gera, aproximadamente, 300 kg de casca (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 café consiste em uma das commodities mais importantes do mundo. A produção total de café, em 2018, foi de 168,093 milhões de sacas de 60 kg, aproximadamente 10,1 milhões de toneladas; sendo que o processo industrial relacionado à conversão da fruta crua da planta do café no café acabado resulta em uma considerável quantidade de resíduos sólidos e águas residuais (BLINOVÁ *et al.*, 2017; NUNES *et al.*, 2020). Para cada quilograma da produção deste grão, é gerado um quilograma de casca (DEMISSEW; FUFA; ASSEFA; 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 em torno de 50 kg de casca desse grão (ROCHA; ROESLER; BURKERT, 2018). Essa cinza, no entanto, ainda não foi avaliada em um estudo que contenha objetivos semelhantes, sendo este presente trabalho, portanto, responsável por fornecer informações referentes a esse material para posteriores utilizações dessa cinza em questão.

A laranja, no ano de 2017, apresentou uma produção global estimada em 89 milhões de toneladas (OLUBAJO; ODEY; ABDULLAHI, 2019). A mesma gera em torno de 42,3 milhões de toneladas de resíduo constituído por casca (ORTIZ *et al.*, 2020).

O milho apresenta uma safra mundial de 1.188,5 milhões de toneladas (DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA DOS ESTADOS UNIDOS, 2020a). Equivalentemente à proporção entre a produção do grão de café e a geração de casca deste, tem-se que uma tonelada seca de milho produzido gera aproximadamente a mesma quantidade de palha seca (RUAN *et al.*, 2019).

O arroz, no ano de 2018, apresentou uma produção mundial em torno de 533 milhões de toneladas. Estima-se que 200 quilogramas de casca e entre 18% a 22% de cinzas são produzidos para cada tonelada de arroz, embora estas proporções dependam das características geográficas e das condições climáticas do local em que a produção está ocorrendo. A queima de uma tonelada de casca produz 220 quilogramas de cinzas, que atualmente consistem nas mais utilizadas como material pozolânico (MOAYEDI *et al.*, 2019).

Por fim, tem-se que são produzidas aproximadamente 2 bilhões de toneladas de cana-de-açúcar no mundo por ano. O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, apresentando um volume de produção aproximada de 769 milhões de toneladas anual (ATLAS BIG, [20--c]). O processo de geração de energia elétrica em caldeiras a vapor através da utilização do bagaço da cana-de-açúcar acarreta a formação de cinza do bagaço de cana. Para

cada tonelada de bagaço queimada, são geradas em torno de 23,8 quilogramas de cinza (MANSANEIRA, *et al.*, 2017).

O descarte não adequado dos excedentes desses resíduos acarreta consequências maléficas, tais quais problemas ambientais e fitossanitários (MOTA *et al.*, 2020).

Com isto, o presente trabalho busca provar a viabilidade da incorporação desses resíduos agroindustriais no setor da construção civil, através de uma metodologia coerente e buscando, também, tornar possível a fabricação de um cimento mais sustentável e, conseqüentemente, com menor teor de clínquer.

1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi organizado em seis capítulos. O capítulo **I**, correspondente à introdução, apresenta o tema proposto desta pesquisa através de sua contextualização, as considerações iniciais, as informações e problemáticas referentes ao cimento Portland e a agroindústria, a utilização de materiais pozolânicos como solução alternativa a essas problemáticas e a importância relacionada à realização desta pesquisa. Encontra-se ainda neste capítulo informações quanto à estrutura deste trabalho.

O capítulo **II**, por sua vez, fornece os objetivos requisitados nesta pesquisa.

O capítulo **III**, referente à revisão bibliográfica, apresenta uma descrição do processo de produção do cimento e seu respectivo impacto ambiental. Ainda neste capítulo será apresentado o processo de hidratação do cimento Portland. Após isto, ter-se-á uma definição e um histórico para os materiais pozolânicos; assim como uma breve explicação da reação pozolânica e algumas das metodologias propostas para caracterizar a reatividade pozolânica, seguido de algumas bibliografias referentes ao uso de resíduos agroindustriais como fonte pozolânica. Também, este capítulo ainda fornecerá uma breve abordagem de cada resíduo, apresentando dados de pesquisas já realizadas.

O capítulo **IV** consiste em uma descrição detalhada dos materiais e dos métodos utilizados para a realização deste trabalho.

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

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

Por fim, no Capítulo **VII**, é possível encontrar as referências bibliográficas utilizadas para a elaboração deste trabalho de conclusão de curso.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho consistiu em avaliar as reatividades pozolânicas das cinzas da casca de banana, da casca de café, da casca de soja, da casca de laranja, da palha de milho e da folha de bananeira; através de medidas de pH e condutividade elétrica em suspensões cal:pozolana, segundo a metodologia proposta por Tashima et al. (2014). Com isto, os resultados foram comparados com dois resultados de parâmetro: cinzas da casca de arroz e do bagaço da cana.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Produzir as cinzas da casca de banana, da casca de café, da casca de soja, da casca de laranja, da palha de milho e da folha de bananeira;
- Caracterizar as cinzas de forma mineralógica e químicamente;
- Avaliar o potencial pozolânico e, com isto, classificar a reatividade pozolânica de cada cinza estudada;
- Comparar os resultados obtidos com os de parâmetro, que consiste nos dados das cinzas da casca de arroz e do bagaço da cana.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. CIMENTO PORTLAND

3.1.1. Produção do cimento Portland e consequências ao meio-ambiente

O concreto consiste no material de construção elaborado pelo homem mais utilizado no mundo. Isto se deve à sua disponibilidade, capacidade de resistência hídrica e adaptabilidade nas mais diversas formas e dimensões. O mesmo é frequentemente fabricado com quatro componentes primários: cimento, agregados graúdos, agregados finos e água (QUEDOU; WIRQUIN; BOKHOREE, 2021).

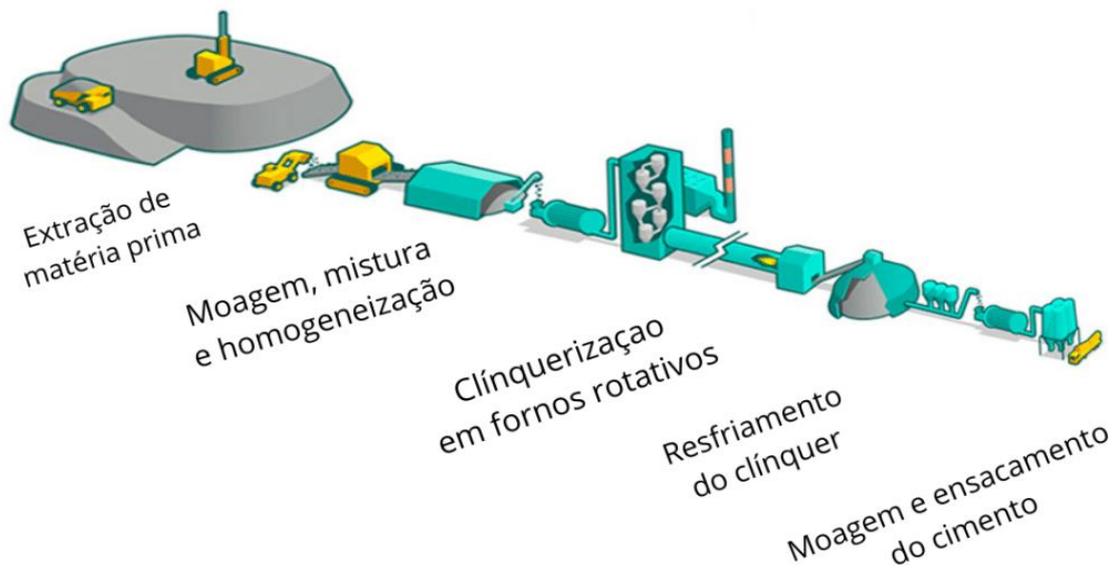
O cimento, por sua vez, é a segunda substância mais consumida no planeta, ficando atrás apenas da água. O consumo desse material deve atingir 5 bilhões de toneladas em 2050. A sua produção, no entanto, contém um efeito danoso tanto para as pessoas, quanto para o meio ambiente, uma vez que seu processo de produção é parte integrante do efeito estufa, além de ser responsável por aproximadamente 10% das emissões mundiais de dióxido de carbono. Consequentemente, visando mitigar essas emissões, pesquisadores têm buscado materiais alternativos que possam ser utilizados para substituir o cimento como o principal componente de ligação no concreto (QUEDOU; WIRQUIN; BOKHOREE, 2021).

De acordo com a norma ABNT NBR 16697:2018, é possível definir o cimento Portland como sendo um ligante hidráulico obtido pelo processo de moagem do clínquer Portland, com adição de quantidade necessária de sulfato de cálcio e outras adições minerais ao longo de sua fabricação (ABNT, 2018). Ao entrar em contato com a água, esse aglomerante reage quimicamente, acarretando a liberação de calor de hidratação e a formação de uma pasta viscosa e densa. Após certo intervalo de tempo, produtos hidratados que conferem resistência principalmente ao esforço de compressão são obtidos, originando uma pasta endurecida resistente à água (MORAIS, 2020).

O cimento Portland é basicamente composto pelo clínquer, que consiste em um material formado pela associação de argila, calcário e minério de ferro. Essas matérias-primas consistem em recursos não renováveis e são extraídas de jazidas, moídas até atingirem uma granulometria fina e, então, são misturadas em proporções pré-determinadas, segundo as características buscadas. Assim, o material é pré-aquecido e, então, é calcinado em forno rotativo a 1450 °C, resultando na obtenção do clínquer. Após o resfriamento deste, são adicionados a gipsita (sulfato de cálcio, ou gesso) e outras adições. Na sequência, o material é moído, resultando no cimento Portland (COSTA L., 2017; MORAES M., 2019).

Este procedimento de fabricação do cimento Portland é exemplificado na Figura 1.

Figura 1 - Figura representativa das etapas de produção do cimento Portland.



Fonte: Adaptado de Ecoassist [21--].

Percebe-se, assim, que a produção do cimento, além de fazer uso de matérias-primas que possam se tornar escassas futuramente, gera grandes quantidades de dióxido de carbono e demais gases do efeito estufa (MORAES M., 2019).

Em relação a essas emissões causadas pela fabricação do cimento, é possível identificar duas fontes como sendo as principais. A primeira consiste nas operações de mineração, processamento e transporte envolvendo agregados, que consomem quantidades consideráveis de energia e, conseqüentemente, acarretam a produção de gases do efeito estufa. Além disto, essas operações também afetam a ecologia das áreas de onde são extraídos esses materiais (ŞANAL, 2018).

Quanto à segunda fonte principal, tem-se a fabricação de cimento, especialmente durante o procedimento de descarbonatação do calcário, que produz o clínquer. É estimado que, para a produção de uma tonelada de cimento Portland, é requisitada cerca de quatro giga-joules de energia. Isto, por sua vez, emite 1,25 toneladas de CO₂ na atmosfera (ŞANAL, 2018; BASTO; SAVASTANO JUNIOR; MELO NETO; 2019).

Desta maneira, uma vez que a produção do clínquer envolve tanto a emissão de gás carbônico, quanto a geração de alto consumo energético, ao realizar a substituição parcial deste por materiais alternativos, isto, além de proporcionar vantagens econômicas, fornecerá uma série de benefícios ambientais (COSTA L., 2017).

3.1.2. Processo de hidratação do cimento Portland

Os principais componentes do cimento Portland consistem na cal (CaO), na sílica (SiO₂), na alumina (Al₂O₃) e no óxido de ferro III (Fe₂O₃), constituindo um percentual total de óxidos de aproximadamente 95%. Todavia, o cimento também apresenta outros óxidos em sua composição, tais quais a magnésia (MgO), o anidro sulfúrico (SO₃), o óxido de sódio (Na₂O), o óxido de potássio (K₂O), o dióxido de titânio (TiO₂), dentre outros casos (PONTES, 2019). Esses compostos, de modo geral, são representados através da utilização de abreviações, com o objetivo de simplificar e encurtar as suas respectivas fórmulas (COSTA L., 2017; FERREIRA *et al.*, 2019); conforme demonstrada pela Tabela 1.

Tabela 1 - Abreviações dos compostos do cimento Portland.

Óxido	Abreviação
CaO	C
SiO ₂	S
Al ₂ O ₃	A
Fe ₂ O ₃	F
MgO	M
SO ₃	Ŝ
H ₂ O	H

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A característica aglomerante do cimento advém do processo de hidratação do clínquer, que consiste na reação química entre este e a água, gerando produtos químicos mais estáveis e com característica de pega e de endurecimento. Basicamente, o clínquer é composto por silicatos e aluminatos (conforme demonstrados na Tabela 2), além de outros tipos de óxidos que se encontram em menores proporções (COSTA L., 2017).

Tabela 2 - Composição química do cimento Portland.

Nome	Composto	Abreviação
Silicato tricálcico (Alita)	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Silicato dicálcico (Belita)	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF
Sulfato de cálcio (Gipsita)	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	CSH_2

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Os aluminatos apresentam uma velocidade de hidratação bem maior do que a dos silicatos (PONTES, 2019). Enquanto a taxa de reação do C_4AF é variável, o C_3A reage rapidamente com a água, acarretando pega rápida e, portanto, perda de mobilidade. Desta maneira, buscando retardar a reação e melhorar a trabalhabilidade do cimento, é adicionada certa quantidade de gipsita (CSH_2) na composição do cimento Portland (FERREIRA *et al.*, 2019; ZHAO *et al.*, 2021). A reação entre esses compostos ocasiona a formação de cristais de etringita ($\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$) e monossulfatos ($\text{C}_4\text{ASH}_{13}$) (COSTA L., 2017).

Quanto aos silicatos, estes apresentam um processo de hidratação mais lento e são subdivididos em duas fases, que consistem na alita (C_3S) e na belita (C_2S). A alita é considerada como sendo o constituinte mais importante do clínquer para o desenvolvimento de resistência, com ocorrência na faixa de 50% a 70%, e apresentando um papel dominante no período inicial de hidratação. A reação desta com a água forma silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) e portlandita (ou hidróxido de cálcio, CH) (BRANDÃO, 2020; ZHAO *et al.*, 2021).

Quanto à belita, com ocorrência na faixa de 15% a 30% do clínquer, é responsável por produzir C-S-H e CH, de modo semelhante à alita. No entanto, o C_2S reage lentamente com a água e, por causa disto, apresenta pouca contribuição para o ganho de resistência da pasta de cimento nos primeiros 28 dias. No entanto, essa contribuição passa a ser significativa em idades mais avançadas (BRANDÃO, 2020; ZHAO *et al.*, 2021).

Os silicatos de cálcio hidratado consistem em um gel amorfo que apresenta uma estrutura em camadas com uma elevada área superficial e que compõem de 50 a 60% do volume de sólidos em uma pasta de cimento totalmente hidratada. Esses cristais são os principais elementos de ligação da pasta de cimento, devido à tendência de aglomeração que os mesmos

apresentam, garantindo ligações que assegurem a união das fases sólidas, assim como a coesão e a adesão (COSTA L., 2017; PONTES, 2019).

A portlandita consiste em 20 a 25% do volume de sólidos da pasta de cimento. Embora também auxilie na coesão e na adesão das partículas da pasta, apresenta uma área superficial menor que a apresentada pelo C-S-H e, por conseguinte, uma contribuição limitada e inferior (PONTES, 2019).

Segundo Costa L. (2017), enquanto a hidratação da alita forma 61% de C-S-H e 39% de CH, a hidratação da belita produz 82% de silicatos de cálcio hidratado e 18% de hidróxido de cálcio. Assim, é possível afirmar que a resistência final de argamassas e concretos produzidos com cimento com altos teores de belita será maior. Entretanto, este não consiste no único ato que permite obter uma pasta de cimento com elevados valores de C-S-H. Outra opção consistiria na adição de materiais pozolânicos capazes de reagir com a portlandita, gerando compostos de C-S-H. Isto também contribuiria para o refinamento dos poros e dos grãos, uma vez que os cristais de silicatos de cálcio hidratado apresentam uma maior área específica do queos de CH, fornecendo à pasta resistência mecânica.

3.2. MATERIAIS POZOLÂNICOS

3.2.1. Definição

Segundo Massazza (2004), o termo “pozolana” contém dois significados distintos. O primeiro destes se trata das rochas piroclásticas (ou rochas volcanoclasticas, que consistem em rochas clásticas, ou depósito gerado devido a erupções vulcânicas), essencialmente vítreas, presentes nas proximidades de Pozzuoli (comuna italiana localizada na região da Campania, província de Nápoles), ou em torno de Roma. Quanto ao segundo significado, este representa todos os materiais inorgânicos, sejam naturais ou artificiais, que apresentam a capacidade de endurecer em água quando misturados com o hidróxido de cálcio, ou com materiais que possam liberar essa mesma substância.

De acordo com Malhotra; Mehta (1996), a pozolana pode ser definida como sendo um material silicoso, ou silicoso e aluminoso, que apresenta pouca, ou nenhuma, propriedade cimentícia. Todavia, uma vez que esse material seja dividido em pequenas partes, e estando na presença de hidratação, é capaz de reagir quimicamente com CH em temperaturas ordinárias, resultando em compostos que contêm propriedades cimentícias.

Bauer (2014) caracteriza pozolanas como sendo substâncias silicosas e aluminosas que, mesmo não apresentando características aglomerantes próprias, reagem com a cal em presença

de água, em temperaturas ordinárias, produzindo compostos cimentantes. Esses materiais podem ser encontrados tanto naturalmente (por exemplo, como cinzas vulcânicas), quanto em instalações industriais adequadas (por exemplo, cinzas volantes e argilas cozidas).

A norma brasileira ABNT NBR 12653:2014, versão corrigida:2015, em conformidade com a norma ASTM C618-19, classificam os materiais pozolânicos como materiais silicosos, ou sílico-aluminosos, que apresentam pouca, ou nenhuma, atividade aglomerante. No entanto, quando finamente moídos e na presença de umidade, estes são capazes de reagir quimicamente com o hidróxido de cálcio, em temperaturas ambientes, produzindo compostos com propriedades cimentícias, semelhantes aos formados na hidratação do cimento Portland (ABNT, 2015; ASTM, 2019).

Ainda segundo as normas, estas realizam certas especificações, como é o caso da exigência de que um material pozolânico deve apresentar uma soma mínima dos óxidos de silício, alumínio e ferro de 70% (ABNT, 2015; ASTM, 2019). Entretanto, Moraes J. (2015), em seu estudo referente ao uso da cinza da folha de cana-de-açúcar como material pozolânico, embora obteve uma soma dos óxidos equivalente a 42,70%, a reatividade da cinza com pastas de cal/pozolana, na proporção de 3:7, foi caracterizada como sendo de alta reatividade ao consumir todo o CH em apenas três dias de cura; demonstrando uma discordância quanto aos critérios impostos pelas diretrizes mencionadas.

Além disto, Moraes M. (2019) também critica essas mesmas regulamentações, argumentando que estas não apresentam menção alguma quanto à importância de os óxidos estarem no estado amorfo. Logo, percebe-se a importância da realização de análises e de ensaios para caracterizar a pozolanicidade dos materiais.

A classificação dos materiais pozolânicos mais comumente utilizada refere-se à origem destes. Assim, a primeira subdivisão é representada entre materiais naturais e artificiais. Com a exceção da moagem, os materiais pozolânicos naturais não exigem nenhum outro tipo de tratamento. Estes originam em rochas ou minerais vulcânicos e apresentam propriedades pozolânicas naturalmente. Contudo, podem conter impurezas que influenciam negativamente na reatividade, fazendo com que seja necessário que passem por um processo de ativação térmica. As cinzas vulcânicas e as rochas sedimentares (terras diatomáceas) são exemplos de pozolanas naturais (Massazza, 2004; JUNCKES, 2015; MORAES M., 2019).

Embora a utilização dos materiais pozolânicos naturais na substituição parcial do cimento Portland possa mitigar as emissões de dióxido de carbono, este ato acarreta outro impacto ambiental, uma vez que essas pozolanas têm que ser extraídas e por estas não serem

recursos renováveis. Logo, esta ação não poderia ser classificada como uma alternativa sustentável (MORAES M., 2019).

Quanto às pozolanas artificiais, estas advêm de modificações químicas e/ou estruturais de materiais que inicialmente apresentam fraca, ou nenhuma, propriedade pozolânica. Dentre exemplos deste tipo de pozolana, têm-se os subprodutos e os resíduos de indústrias e da agroindústria, tais quais a cinza volante, a sílica ativa, a cinza da casca do arroz, a cinza do bagaço da cana e a cinza da folha de bambu (Massazza, 2004; JUNCKES, 2015; MORAES M., 2019).

3.2.2. Histórico

A utilização de pozolanas para a elaboração de aglomerantes hidráulicos data de 5.000 a 4.000 a.C. O registro mais antigo do uso deste material para o ato mencionado consiste na mistura entre uma terra de diatomáceas (que consiste em uma pozolana natural) localizada no Golfo Pérsico e a cal. Em 1500 a.C., as cinzas vulcânicas contribuíram para revestir paredes na ilha de Santorini (ZHOU *et al.*, 2020; KASANYA; THOMAS; MOFFATT, 2021).

Os romanos fizeram bastante uso de pozolanas, que eram misturadas com água e cal, para a construção de diversas edificações do Império Romano. Dentre estas, é possível citar o Panteão (Figura 2) e o Coliseu (Figura 3), ambos localizados em Roma (PAULA, 2020; ZHOU *et al.*, 2020). Para a construção do primeiro exemplo, a pozolona utilizada consistiu em um composto aglomerante de Pozzuoli, da ilha grega de Santorim. Para o caso do Coliseu de Roma, por outro lado, a pozolana utilizada foram as cinzas vulcânicas, que foram aplicadas nas paredes de concreto do Panteão (BARROSO, 2011).

Além disto, a civilização romana também fez uso de materiais pozolânicos para a elaboração de obras costeiras, que têm resistido à erosão da água do mar por mais de vinte séculos.

Figura 2 - Panteão de Roma.



Fonte: Adaptado de Barroso (2011).

Figura 3 - Coliseu de Roma.



Fonte: Adaptado de Barroso (2011).

Todavia, após a invenção do cimento Portland no século XIX, houve um retrocesso do uso de materiais pozolânicos. Contudo, conforme o tempo, o cimento Portland passou a apresentar certos obstáculos, o que fez com que, recentemente, o uso da pozolana voltasse à popularidade. Dentre esses obstáculos, é possível citar o alto custo e a intensidade de energia do cimento e os problemas de degradação de longo prazo apresentados por esse mesmo material; além da questão da sustentabilidade, uma vez que 900 kg de CO₂ são emitidos para a

atmosfera durante a produção de uma tonelada de cimento (KREJCIRIKOVA *et al.*, 2019; ZHOU *et al.*, 2020).

Importantes construções civis dos dias atuais têm feito uso da pozolona em sua construção. Por exemplo, têm-se a Usina Hidrelétrica de Itaipu (Figura 4), que utilizou a cinza volante em seu processo construtivo, e a barragem Hungry Horse (Figura 5), localizada nos Estados Unidos da América, que apresenta uma estrutura que contou com mais de 2,3 milhões de metros cúbicos de concreto, cujo cimento foi substituído por cinzas volantes no teor de 32% (BARROSO, 2011; FARIAS, 2021).

Figura 4 - Usina Hidrelétrica de Itaipu.



Fonte: Adaptado de Barroso (2011).

Figura 5 - Barragem Hungry Horse.



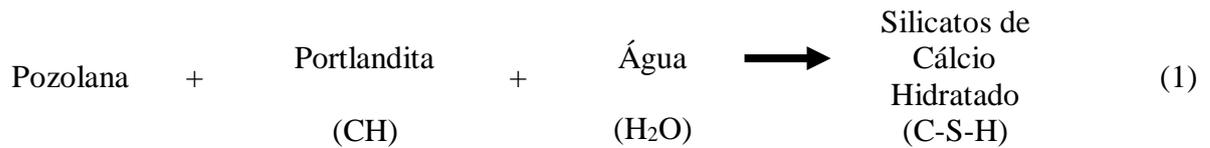
Fonte: Farias (2021).

3.2.3. Reação pozolânica

A reação pozolânica consiste em uma reação ácido-base, em que os óxidos (ácidos) dos materiais pozolânicos reagem quimicamente com a portlandita (base) gerada no processo de hidratação do cimento, resultando em silicatos e aluminatos de cálcio hidratados (C-S-H, C-A-H, C-S-A-H). No entanto, é fundamental que os óxidos apresentem uma configuração amorfa, pois, devido à instabilidade estrutural geométrica, esses materiais se tornariam reativos; ou seja, vulneráveis ao CH. Materiais cristalinos, por apresentarem estrutura geométrica ordenada, consistem em materiais inertes; não sendo, portanto, reativos ao hidróxido de cálcio (COSTA L., 2017; MORAES M., 2019).

A reação entre o clínquer e a pozolana ocorre em diferentes estágios durante o processo de hidratação do cimento Portland. A reação pozolânica é caracterizada por ser uma reação química lenta, uma vez que passa a acontecer entre 7 e 15 dias após o início da hidratação do clínquer. Conseqüentemente, o cimento com adição pozolânica apresenta menor calor de hidratação e desenvolve resistência mecânica mais vagarosamente (COSTA L., 2017).

A Equação 1 demonstra como a reação pozolânica ocorre, produzindo o C-S-H, que consiste no principal produto de hidratação do cimento (BARROSO, 2011; COSTA L., 2017).



Conforme \u00e9 poss\u00edvel notar pela Equa\u00e7\u00e3o 1, a pozolana consome o hidr\u00f3xido de c\u00e1lcio presente no cimento hidratado, resultando no C-S-H como produto da rea\u00e7\u00e3o (COSTA L., 2017). Contudo, al\u00e9m dessa a\u00e7\u00e3o qu\u00edmica que a pozolana causa quando misturada em argamassa ou concreto como uma adi\u00e7\u00e3o ou substitui\u00e7\u00e3o parcial do cimento, a mesma tamb\u00e9m age fisicamente nas matrizes ciment\u00edcias. Todos esses efeitos, qu\u00edmicos ou f\u00edsicos, acarreta a modifica\u00e7\u00e3o da microestrutura do cimento (GARCIA *et al.*, 2015; MORAES M., 2019).

O efeito microfiller se refere a um dos efeitos f\u00edsicos causados pela pozolana no cimento. Este efeito consiste no preenchimento de espa\u00e7os vazios entre as part\u00edculas do cimento e areia pelas part\u00edculas da adi\u00e7\u00e3o pozol\u00e2nica; cujo di\u00e2metro m\u00e9dio deve ser igual, ou inferior, ao di\u00e2metro m\u00e9dio das part\u00edculas do cimento. Conseq\u00centemente, tem-se um aumento da densidade da mistura e melhor empacotamento de suas part\u00edculas. Isto resulta em argamassas e concretos com melhor trabalhabilidade no estado fresco e menor porosidade no estado endurecido (GARCIA *et al.*, 2015; COSTA L., 2017).

Outro efeito consiste no processo de nuclea\u00e7\u00e3o heterog\u00eanea, que ocorre na superf\u00edcie de intera\u00e7\u00e3o entre as part\u00edculas. As adi\u00e7\u00f5es de pozolana agem como pontos de nuclea\u00e7\u00e3o para os produtos de hidrata\u00e7\u00e3o, permitindo uma maior rea\u00e7\u00e3o da part\u00edcula de cimento e, conseq\u00centemente, aumentando os produtos hidratados. Esse processo de nuclea\u00e7\u00e3o das part\u00edculas de CH em torno das part\u00edculas de pozolana acarreta a substitui\u00e7\u00e3o de cristais de grande granulometria e orientados de hidr\u00f3xido de c\u00e1lcio por cristais de pequena granulometria e menos orientados; procedimento este denominado refinamento dos gr\u00e3os (MORAES M., 2019; FARIAS, 2021).

Por fim, tem-se a altera\u00e7\u00e3o da microestrutura da zona de transi\u00e7\u00e3o entre a pasta de cimento e o agregado. Na situa\u00e7\u00e3o do concreto sem adi\u00e7\u00e3o pozol\u00e2nica, normalmente h\u00e1 um ac\u00famulo de \u00e1gua livre que se encontra retida sob os agregados gra\u00fados do concreto. Essa \u00e1gua enfraquece a zona de transi\u00e7\u00e3o entre a pasta e o agregado, que consiste praticamente na regi\u00e3o em que ocorre a fratura do concreto. No entanto, ao adicionar pozolana no material, tem-se uma redu\u00e7\u00e3o, ou at\u00e9 mesmo elimina\u00e7\u00e3o, do ac\u00famulo dessa \u00e1gua livre. A adi\u00e7\u00e3o pozol\u00e2nica tamb\u00e9m reduz a quantidade de CH presente em excesso na zona de transi\u00e7\u00e3o, gerando gel de C-S-H e,

consequentemente, elevando o ganho de resistência mecânica do concreto (GARCIA *et al.*, 2015; COSTA L., 2017).

Percebe-se, assim, que esses efeitos apresentados pela reação pozolânica fornecem benefícios às argamassas e aos concretos que apresentem essa adição, uma vez que, em longo prazo, tendem a melhorar a durabilidade e a resistência mecânica desses materiais (COSTA L., 2017).

Ainda segundo Costa L. (2017), uma das principais vantagens da utilização de pozolanas em argamassas e concretos consiste no aumento de suas respectivas durabilidades, uma vez que esses materiais apresentam menor porosidade e, portanto, tem-se uma maior dificuldade de agentes agressivos (por exemplo, o gás carbônico, sulfato, íons cloreto e soluções ácidas) os invadirem. Além disto, a pozolana também atua na inibição da reação álcali-agregado, que ocorre entre a portlandita e o agregado graúdo quando estes apresentam fases mineralógicas reativas, e que produz um gel expansivo no interior do concreto que acarreta a fissuração do mesmo. Assim, uma vez que a pozolana reage quimicamente com o CH, tem-se uma redução de álcalis livres no sistema, impedindo a ocorrência dessa reação prejudicial ao material cimentício.

No entanto, tem-se que a reação do CH com a pozolana pode variar conforme certos fatores, que consistem no teor de SiO_2 ativa presente na mistura, na natureza das fases ativas do material pozolânico, na taxa de reação, na área superficial desse mesmo material, e na relação de sólidos por água e temperatura da mistura (BARROSO, 2011).

3.2.4. Caracterização da reatividade pozolânica

O termo “pozolanicidade” contém uma complexidade elevada ao ponto de que, para a determinação da atividade pozolânica de um determinado material, diversas metodologias têm sido utilizadas ao longo do tempo (LUXÁN; MADRUGA; SAAVEDRA, 1989). Dentre os exemplos de técnicas, é possível citar a avaliação da reatividade de pozolanas com hidróxidos de cálcio medindo o consumo de CH, liberação de calor em pasta e o desenvolvimento de resistência à compressão em argamassas (KASANYA; THOMAS; MOFFATT, 2021).

Entretanto, pesquisadores perceberam que tais métodos não forneciam uma avaliação totalmente exata quanto à reatividade pozolânica dos materiais estudados. Consequentemente, novas metodologias foram surgindo ao longo dos anos (KASANYA; THOMAS; MOFFATT, 2021).

Os primeiros responsáveis em propor um método visando avaliar a atividade pozolânica foram Raask e Bhaskar (1975), propondo uma metodologia através de aferições de

condutividade elétrica. Neste método proposto, determina-se indiretamente a quantidade de sílica dissolvida em uma solução de ácido fluorídrico (HF, a uma concentração de 0,1 M), na qual o material ativo é disperso por meio da medição de condutividade elétrica devido à formação dos íons $(\text{SiF}_6)^{2-}$ e H^+ . Feito isto, calcula-se, então, um índice de pozolanicidade. O método foi desenvolvido para avaliar a atividade pozolânica de cinzas volantes e, então, selecioná-las em misturas de concreto (Payá *et al.*, 2001; VILLAR-COCIÑA *et al.*, 2003; TASHIMA *et al.*, 2014).

Majumdar e Larner (1977) demonstraram que, ao analisar as possibilidades de uso do método proposto por Raask e Bhaskar (1975) para pozolanas, deve-se considerar, também, outros aspectos relativos às características dos materiais pozolânicos, como é o caso do tamanho da partícula, do grau de solubilidade em HF e da escolha da sílica como padrão para a caracterização das pozolanas que não são totalmente siliciosas. Foi proposto, então, uma ampliação do procedimento operatório, variando a concentração de HF de 0,1 M para 0,5 M (LUXÁN; MADRUGA; SAAVEDRA, 1989).

Luxán; Madruga; Saavedra (1989) propuseram um método simples e rápido para a determinação indireta da atividade pozolânica de pozolanas naturais, baseando-se na medição da condutividade elétrica em uma solução saturada de cal hidratada. O método consiste em analisar a redução da condutividade elétrica de uma suspensão de cal hidratada/pozolana, através da interação dos íons Ca^{2+} e OH^- . Esse processo ocorre devido à fixação do hidróxido de cálcio dissolvido pela superfície da partícula de pozolana. A avaliação da pozolanicidade dos materiais analisados teve duração de 120 segundos, sendo tempo suficiente para a obtenção de uma estabilização da curva de condutividade versus tempo em vários materiais estudados. Entretanto, o método só é válido para produtos naturais e, além disso, apresenta dificuldade na preparação da solução saturada de CH (Payá *et al.*, 2001; VILLAR-COCIÑA *et al.*, 2003; TASHIMA *et al.*, 2014).

Tashiro; Ikeda; Inoue (1994) desenvolveram uma metodologia para as pastas de cimento contendo pozolana em que a aferição de resistência elétrica seria utilizada para avaliar a atividade pozolânica de materiais. Caracterizado por ser um método rápido, necessita de 72 horas para concluir o teste (VILLAR-COCIÑA *et al.*, 2003).

Payá *et al.* (2001), visando simplificar o método proposto por Luxán; Madruga; Saavedra (1989), propuseram um método com o objetivo de analisar as cinzas volantes por meio do uso de soluções insaturadas de cal hidratada (VILLAR-COCIÑA *et al.*, 2003; BARROSO, 2011). A preparação das soluções não saturadas teve duração de 1 hora. Além

disto, foi considerada a contribuição, nas medidas de condutividade elétrica e de pH, dos íons liberados no meio aquoso (TASHIMA *et al.*, 2014).

Sinthaworn; Nimityongskul (2009) utilizaram uma solução de cimento Portland nas aferições de condutividade elétrica. A caracterização da atividade pozolânica foi determinada com 200 mL de solução de cimento Portland e 1 grama de pozolana sob agitação contínua a 80 °C e com duração de 24 horas (TASHIMA *et al.*, 2014).

A reação pozolânica abrange dois critérios principais: a taxa de reação e o consumo máximo de hidróxido de cálcio. Estes dependem da natureza do material pozolânico (sua composição química e mineralógica, assim como o tamanho de suas partículas) (TASHIMA *et al.*, 2014).

Considerando esses critérios, neste projeto, o método utilizado consistiu na caracterização da reatividade pozolânica de oito resíduos agroindustriais (cinza da casca de banana, cinza da casca de café, cinza da casca de soja, cinza da casca de laranja, cinza da palha de milho, cinza da folha de bananeira, cinza da casca de arroz e cinza do bagaço de cana), através de medições de pH e de condutividade elétrica em suspensões cal/pozolana; metodologia esta que foi proposta por tashima *et al.* (2014). Para cada resíduo serão preparadas diferentes proporções de CH/pozolana (2:8; 2,5:7,5; 3:7; 3,5:6,5; 4:6; 4,5:5,5). As aferições foram tomadas a cada 24 horas, tendo uma duração total de sete dias.

3.2.5. Utilização das cinzas de resíduos agroindustriais como fonte pozolânica para a substituição parcial do cimento Portland

Estudos relacionados à substituição parcial do cimento Portland por materiais pozolânicos derivados de subprodutos industriais, tais quais a sílica ativa, a escória de alto forno e a cinza volante, já são bem difundidos na área da Construção Civil. No entanto, o mesmo não pode ser dito quanto aos estudos referentes à utilização de materiais pozolânicos derivados de subprodutos agroindustriais (associados principalmente com a indústria alimentícia) para a substituição parcial do cimento Portland. Embora esta temática esteja sendo bastante explorada em diversos estudos, a mesma não ganhou espaço o suficiente na Construção Civil. Isto consiste em um impacto negativo, uma vez que esse tipo de material pozolânico tem apresentado resultados satisfatórios e, também, por causa da situação de que, principalmente em países emergentes, a quantidade de subprodutos produzidos na agroindústria superam os gerados por outras indústrias (MORAES M., 2019).

Moraes J. (2015) analisou a possibilidade da utilização da cinza da folha de cana-de-açúcar como material pozolânico. Realizado o estudo, concluiu que essa cinza apresenta

características pozolânicas, contendo uma boa proporção de SiO_2 e sendo, portanto, um material silicoso. Ao analisar os resultados referentes ao ganho de resistência mecânica, percebeu que os melhores valores foram apresentados pela substituição de 30% do cimento Portland pela cinza da folha de cana-de-açúcar.

Memon; Khan (2018) realizaram um estudo referente à eficácia da cinza do sabugo de milho como material pozolânico, dando atenção especial às condições de queima controlada e ao nível de finura. A cinza foi peneirada e seccionada em três amostras de diferentes tamanhos de partículas retidas. Cada amostra sofreu um tipo processo de beneficiamento. Após os respectivos tratamentos, as amostras foram misturadas, recebendo a nomenclatura de cinza misturada. Esta foi submetida a tempos diferentes de moagem, buscando estudar a influência da finura e da superfície específica na atividade pozolânica. Os autores concluíram que o aumento do tempo de moagem aumentou a reatividade e que as amostras de tempo de moagem igual ou superior a uma hora atingiram a resistência mínima exigida por norma para atividade pozolânica. Assim, segundo os próprios estudiosos, essa aplicação bem-sucedida da cinza do sabugo de milho em materiais cimentícios poderia resolver os problemas relacionados à sustentabilidade do descarte de cinzas e auxiliaria na conservação de energia e de recursos naturais.

Qudoos *et al.* (2018) estudaram o efeito do processamento mecânico na eficiência pozolânica e no desenvolvimento microestrutural de compósitos de cimento misturados com cinza de palha de trigo. Para isto, utilizaram três tipos de cinzas de palha de trigo obtidas por moagem por várias durações. Com isto, concluíram que o processamento mecânico reduziu o tamanho da partícula, aumentou a área superficial específica e amplificou o estado amorfo da cinza. A resistência à compressão das misturas de argamassas aumentou e o incremento que mais se destacou foi a adição de partículas de cinza mais finas; que também melhoraram o processo de hidratação nas primeiras idades. A percepção deste incremento ocorreu até a substituição de cimento de 20%; após isto, notou-se redução de valores.

Silva L. *et al.* (2021) tiveram como objetivo investigar as propriedades físicas e químicas da cinza da folha de bambu para a produção de cimento pozolânico. Além disto, também avaliaram a economia de energia, a emissão de CO_2 e a redução de custos para o uso dessa cinza em argamassas, visando contribuir para a minimização de impactos ambientais decorrentes da fabricação e da utilização do cimento Portland. A cinza produzida foi caracterizada como um ótimo material pozolânico, uma vez que atendeu a todos os requisitos estabelecidos pelas especificações normativas e demonstrou alto potencial de adição aos cimentos, na produção de concretos, argamassas e pastas. Os autores também concluíram que

argamassas com substituição de cimento de até 30% apresentam a capacidade de reduzir o custo em até 23,71% e em aproximadamente 30% as emissões de gás carbônico e energia incorporada.

Ainda na temática quanto à utilização da cinza da folha de bambu, Moraes M. (2019) estudou o potencial dessa cinza como alternativa sustentável para a substituição parcial do cimento Portland através de um processo de autocombustão. Através da análise referente à espectrometria de fluorescência de raios X (FRX), esse material demonstrou um alto teor de sílica, equivalendo a 74,23%, dos quais 92,33% desse óxido se tratou de sílica amorfa. Além disto, o tempo de moagem ótimo da cinza foi de 50 minutos e a mesma foi classificada como altamente reativa, o que contribuiu para melhorar o comportamento mecânico e a durabilidade das matrizes cimentantes com substituição parcial do cimento Portland pela cinza estudada. A argamassa com 30% de cinza obteve um ganho de resistência equivalente a 56% aos 90 dias de cura. Assim, a autora concluiu que a cinza da folha de bambu consiste em um material adequado e sustentável para a substituição parcial do cimento Portland em matrizes cimentantes.

Ikumapayi; Arum; Alaneme (2021) buscou realizar um estudo referente à reatividade e ao comportamento de hidratação em concreto pozolânico à base de cinza da casca de amendoim. Obtidos os resultados do trabalho em questão, os autores notaram que a cinza apresenta a sílica como o principal constituinte químico e que a eficiência de hidratação avaliada (procedimento este que foi feita através da quantidade de C-S-H produzido e da quantidade de calcita presente na pasta hidratada) foi ótima com o uso de 8% de substituição do cimento do que com o uso de 16%. A resistência máxima à compressão (em 7 e 28 dias de hidratação) foi obtida na pasta contendo 8% de cinza da casca de amendoim.

Oliveira M. *et al.* (2021) visaram o incremento da cinza de biomassa de óleo de palma por meio da caracterização microestrutural, mineralógica e da atividade pozolânica a partir da potencialidade de uso em produtos cimentantes. Ao serem retiradas da fornalha da caldeira, as amostras de cinzas foram seccionadas em dois grupos, sendo um caracterizado pela cinza de biomassa de óleo de palma resfriada vagarosamente a temperatura ambiente, e o outro caracterizado pela mesma cinza, porém, resfriada com água logo após sair da fornalha, com o intuito de sofrer choque térmico. Os autores notaram a predominância do elemento silício nas amostras, especialmente para a amostra que sofreu choque térmico. Houve a ocorrência de reação pozolânica com resultados equivalente aos de resistências entre as amostras de referência e as contendo substituição de cimento Portland pela cinza estudada. No entanto, os autores alertaram quanto à necessidade da realização de outras análises para verificar a pozolanidade da cinza de biomassa de óleo de palma. Mesmo assim, os mesmos concluíram que esse mesmo

material pode ser considerado como sendo uma variante tecnológica para o uso em materiais cimentantes.

Outros subprodutos da agroindústria também foram temas de estudos que buscaram analisar a possibilidade da utilização destes como fonte pozolânica. Todavia, nem todos apresentaram resultados satisfatórios. Isto, contudo, ainda consiste em informações válidas, uma vez que fornece conhecimentos científicos de resíduos avaliados, indicando quais destes apresentam características pozolânicas e, portanto, potencial para serem utilizados na substituição parcial do cimento Portland. Tendo a informação de que um desses resíduos não apresentam essas respectivas características, surge a oportunidade de utilizá-los em outras temáticas de estudos que envolvem a sustentabilidade, por exemplo.

Dentre os exemplos existentes de resíduos agroindustriais que não apresentaram resultados satisfatórios, tem-se a pesquisa realizada por Silva R. *et al.* (2015), que teve como objetivo a caracterização da cinza de biomassa gerada em uma indústria de beneficiamento de cacau, visando o seu uso como adição mineral na produção de argamassas, em substituição a 5% do cimento. Dois tipos de cinzas foram coletados, a cinza ciclone e a cinza fornalha, que sofreram beneficiamento com moagem e queima controlada. As cinzas apresentaram textura rugosa e superfície porosa, influenciando o aumento da absorção de água das argamassas. Além disto, nenhum dos dois tipos de cinzas demonstraram compostos químicos que permitiram a ocorrência de atividades pozolânicas com os compostos hidratados do cimento. A estrutura mineralógica das cinzas manteve-se cristalina mesmo após concluído o processo de calcinação a altas temperaturas, o que também limitou a reatividade química. Conseqüentemente, a resistência mecânica das argamassas foi reduzida com a utilização desses materiais estudados.

No entanto, ainda sobre a pesquisa desenvolvida por Silva R. *et al.* (2015), os autores constataram que após um minuto de moagem da cinza ciclone, houve a diminuição do diâmetro média das cinzas, fortalecendo o efeito de empacotamento da mistura e resultando na elevação da resistência mecânica da argamassa, ao ponto de se igualar estatisticamente com os valores de referência. Desta maneira, concluíram que a cinza de biomassa gerada na respectiva indústria de beneficiamento de cacau poderia ser utilizada como elemento inerte em materiais cimentantes.

Cordeiro L. *et al.* (2019) também obtiveram resultados não satisfatórios ao realizarem o estudo referente à caracterização da cinza do caroço de açaí residual. A cinza em questão não atendeu aos parâmetros normativos para ser classificada como material pozolânico. Não foram detectados minerais reativos e, embora houve um aumento na resistência à compressão pela incorporação da cinza estudada, os valores obtidos não foram suficientes para superar os valores

de referência em idades avançadas. Além disso, notou-se aumento na capacidade de absorção de água, devido à estrutura porosa, rugosa e com partículas irregulares apresentadas pela cinza. Desta maneira, os autores concluíram que a cinza do caroço de açaí residual pode ser utilizada como adição não reativa.

3.3. CINZAS ESTUDADAS

Este tópico do capítulo teve a finalidade de apresentar certos trabalhos já realizados que fizeram uso das cinzas estudadas neste trabalho. Embora os objetivos dessas dissertações foram divergentes aos da presente pesquisa, as informações contidas nos mesmos são válidas, por exemplo, para a avaliação da reatividade pozolânica dessas cinzas através dos resultados que os pesquisadores alcançaram quanto à fluorescência de raios X (FRX) e à difração de raios X (DRX).

No caso do estudo de alguns dos resíduos estudados, tem-se que este trabalho buscou resultados inéditos quanto à utilização dessas cinzas como fonte de material pozolânico, uma vez que não foram encontradas bibliografias que apresentassem estudos com a temática em questão.

3.3.1. Cinza da casca de banana (CCB)

Mohamad *et al.* (2018) buscaram analisar os efeitos da incorporação de pó de casca de banana e da cinza de óleo de palma nas propriedades mecânicas do concreto leve. No caso da casca de banana, esta foi seca no forno à temperatura de 105 ° C por 24 horas. As cascas secas foram, então, moídas e peneiradas. Através da técnica de espectrometria de fluorescência de raios X (FRX), os autores notaram que ambos os resíduos estudados apresentavam grande quantidade de sílica presente em suas composições químicas. No caso do pó da casca de banana, este teve um teor de sílica equivalente a 55,98%. Os resultados obtidos através da incorporação de pó de casca de banana na substituição do cimento e da cinza de óleo de palma na substituição de areia indicaram um tênue incremento nas propriedades mecânicas do concreto leve. Mohamad *et al.* (2019) também obtiveram um teor de 55,98% de SiO₂, além de um teor de alumina equivalente a 2,71%. Estes autores concluíram que a resistência à compressão aumentou conforme o aumento da porcentagem de pó de casca de banana e cinza do óleo de palma.

Hills *et al.* (2020) propuseram uma opção de gestão de baixo carbono para resíduos de biomassa, transformando CO₂ em cinza de biomassa de carbonatação mineral. Neste, a casca de banana e os demais resíduos agroindustriais estudados foram calcinados a uma temperatura de 900 ± 25 °C durante quatro horas. Assim, notaram que a cinza da casca de banana apresentou 7,20% de SiO₂, 0,40% de alumina e 0,30% de ferro. Estes resultados, no entanto, entraram em desacordo com os teores obtidos pelo resíduo antes do processo de incineração. Isto pode ser explicado pela variação que pode ocorrer com as quantidades percentuais de compostos químicos devido ao estado do material coletado para o estudo. A perda de nutrientes das plantas (seja por causa do efeito de lavagem por precipitação, seja devido à colheita estar atrasada), o tipo de solo utilizado para o referente cultivo e as condições de colheita influenciam, por exemplo, no teor de sílica presente na cinza estudada.

Manan *et al.* (2021) estudaram o aumento da resistência do concreto utilizando resíduos agrícolas incinerados, que consistiram na cinza da casca da banana como material cimentante suplementar. Além disto, o trabalho em questão também buscou analisar a melhoria da microestrutura no concreto após a integração dessa cinza via zona de transição interfacial (ZTI). Através da técnica de (FRX), foi apresentado que a cinza da casca de banana produzida pelo processo de incineração a 300 °C durante 30 minutos contém aproximadamente 14,62% de sílica, 0,26% de alumina e 0,21% de ferro. Desta maneira, segundo parâmetros normativos, não foi possível classificar a cinza da casca de banana como material pozolânico, uma vez que, segundo esses parâmetros, a somatória dos valores de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ deve ser menor ou igual a 50%. No entanto, a resistência à compressão do concreto aumentou conforme o número de dias de cura. Também, a ZTI melhorou com o aumento da cinza estudada. Com isto, os autores concluíram que a cinza da casca de banana apresenta propriedades pozolânicas.

3.3.2. Cinza da casca de café (CCC)

Lin; Kuo; Hsu (2015) tiveram como objetivo explorar a viabilidade de incorporação de cinzas residuais de café em argamassas de cimento. Os resultados obtidos pelos autores demonstraram que dentre as três temperaturas utilizadas para o processo de incineração (500 °C, 600 °C e 700 °C), a temperatura de combustão de 600 °C foi a mais viável, fornecendo melhores valores quanto à resistência à compressão. Também, a substituição de 10% das cinzas residuais do café foi a que demonstrou as melhores condições. Contudo, em termos de trabalhabilidade, percebeu-se que esta é reduzida gradualmente com o aumento da substituição por essa mesma cinza (tendo reduções mais notáveis com mais de 15% de substituição).

Todavia, o estudo reconheceu a eficácia econômica e ambiental da aplicação do reaproveitamento de resíduos de café e material cimentante.

Demissew; Fufa; Assefa (2019) avaliaram a adequação da cinza da casca de café como substituto parcial do cimento para a produção de concreto C-25. Buscando determinar a temperatura e a duração desta mais apropriadas para obter melhor qualidade de cinza da casca de café, o resíduo foi calcinado durante duas, três e quatro horas a 500 °C, 550 °C e 600 °C. Após comparação, foi selecionada a duração de três horas e a temperatura de 550 °C para o processo de incineração. Os autores concluíram que a substituição por cinza da casca de café de 2% a 10% resultou em melhor resistência à compressão e densidade; sendo a substituição de 10% a proporção ideal para a produção de concreto C-25, e sendo possível a utilização da substituição de 15% para a produção do concreto C-20.

Reta; Mahto (2019) estudaram a incorporação da cinza de casca de café no cimento para a produção de concreto C-25. A cinza apresentou teor 14,65% de sílica, 12,07% de alumina e 4,50% de ferro. Tanto a trabalhabilidade do concreto, quanto à resistência à compressão do mesmo, reduziu conforme o aumento da porcentagem de cinza. Apenas a proporção de substituição de 5% foi adequada para aproveitar ao máximo o benefício do ganho de resistência. A resistência máxima à compressão de 28 dias foi obtida com 10% de substituição.

3.3.3. Cinza da casca de soja (CCS)

No presente momento em que esta pesquisa está sendo elaborada, não foi encontrado um estudo que utilizou a cinza da casca de soja no âmbito da construção civil.

OLIVEIRA A. (2020) realizou um estudo relacionado à substituição de agregados miúdos por resíduos de borracha de pneu, poliestireno expandido e casca de soja em argamassa geopolimérica à base de metacaulim. A casca de soja, todavia, não passou por um processo de calcinação, sendo utilizada para o referente estudo, portanto, a própria casca, e não a cinza (que consiste na temática da presente pesquisa).

3.3.4. Cinza da casca de laranja (CCL)

Sharma; Ameta R.; Ameta S. (2013) realizaram investigações sistemáticas quanto ao uso da casca de laranja como combustível alternativo juntamente com o coque de petróleo para a fabricação de cimento sem afetar negativamente a qualidade deste. Diferentes proporções foram misturadas com o coque de petróleo, e esta mistura foi utilizada no processo de clínquerização; sendo o clínquer produzido foi analisado quanto aos seus parâmetros de

qualidade. Os resultados obtidos demonstraram que quase todos os parâmetros do clínquer permaneceram nos limites permitidos, com a exceção do teor de enxofre, devido à baixa quantidade deste nos resíduos da casca de laranja, comparando-se com a quantidade presente no coque de petróleo. Isto, no entanto, melhorou a qualidade do clínquer e não afetou os demais parâmetros de qualidade.

Vamvuka *et al.* (2014) investigaram o comportamento térmico das cinzas produzidas a partir da combustão em leito fluidizado de resíduos de plantações e processamento de laranjas, assim como o efeito de sua composição nos parâmetros operacionais, o seu impacto ambiental devido ao descarte errôneo e potenciais usos segundo restrições legislativas. A composição química da casca de laranja apresentou teor de 2,40% de SiO_2 , 3,00% de Al_2O_3 e 0,20% de Fe_2O_3 .

Olubajo; Odey; Abdullahi (2019) buscaram analisar os potenciais da utilização de resíduos de casca de laranja calcinada como substituto do cimento em até 10%, a fim de explorar os efeitos nas propriedades físico-mecânicas do cimento misturado com cinza de casca de laranja. A condição ideal para o processo de calcinação da amostra, segundo os autores, foi obtida a 600 °C durante duas horas, uma vez que esta obteve o maior valor referente à somatória de sílica, alumina e ferro, que foi de 27,70%; o que não satisfaz o critério normativo de definição de material pozolânico (cuja somatória tem de ser maior ou igual a 70%). A técnica de FRX também informou que a cinza é composta principalmente por cal. A substituição do cimento pela cinza da casca de laranja atuou como um desacelerador do processo de pega do cimento, apresentando teor significativo de óxido de potássio e alto grau de carbono; sendo este responsável pelo aumento da necessidade de água e pelo endurecimento prolongado do cimento. Os autores também constaram que houve uma diminuição na resistência à compressão e flexão da argamassa conforme o teor da cinza aumentava de 0 a 10%. A substituição ideal foi obtida em 5%, uma vez que as propriedades físico-mecânicas do cimento contendo a cinza não se desviaram significativamente das propriedades do cimento Portland comum.

3.3.5. Cinza da palha de milho (CPM)

Freitas *et al.* (2020) estudaram a produtividade da cinza da palha de milho para a aplicação em compostos cimentantes, buscando classificar o material como adição mineral. A cinza apresentou alta leveza e coloração escura. A mesma também apresentou certo grau de reatividade ao proporcionar o endurecimento das pastas aos 3 dias de cura. Desta maneira, os autores concluíram que a cinza da palha de milho pode ser classificada como um forte indicativo como material pozolânico.

Shakouri *et al.* (2020) analisaram a influência da utilização da cinza da palha de milho, atuando na substituição parcial do cimento, na cinética de hidratação do cimento, na resistência à compressão e na resistividade elétrica do concreto. Os materiais que foram pré-tratados com água apresentam teor de 64,60% de sílica, 3,21% de alumina e 0,94% de ferro, enquanto aqueles que foram pré-tratados com ácidos contiveram 85,70% de SiO_2 , 7,89% de Al_2O_3 e 0,48% de Fe_2O_3 ; quanto às cinzas que não apresentaram tratamentos, estas apresentaram 49,00% de sílica, 3,27% de alumina e 1,07% de ferro. O pré-tratamento da palha de milho com água e/ou ácido reduziu, segundo os resultados obtidos, os conteúdos de Cl e K_2O , a perda ao fogo, o tamanho médio das partículas, aumentou o teor de sílica das cinzas, e aceleraram a hidratação do cimento. Quanto às cinzas que não foram tratadas, estas apresentaram menor reatividade e tenderam a retardar o processo de hidratação do cimento; além de reduzirem a resistência à compressão e a resistividade elétrica (provavelmente devido aos altos teores de K_2O e P_2O_5). No caso das cinzas pré-tratadas, a resistência à compressão e a resistividade elétrica foram afetadas positivamente, principalmente em idades avançadas.

Lima; Cordeiro G. (2021) tiveram como objetivo a produção de cinza pozolânica a partir da palha de milho com alta reatividade através do processo de lixiviação ácida controlada, queima em duas etapas e moagem altamente fina. Segundo a análise da composição química, a cinza lixiviada apresentou 94,20% de SiO_2 e 0,20% de Fe_2O_3 ; quanto à caracterização química da cinza *in natura*, esta apresentou 62,50% de sílica e 0,90% de ferro. A palha de milho tratada com ácido cítrico que passou por todos os procedimentos de calcinação e moagem possibilitou a remoção de contaminantes e o consequente aumento da concentração de sílica amorfa. A cinética de hidratação também foi acelerada para essas cinzas, por apresentarem maior reatividade pozolânica do que as cinzas da palha de milho que não passaram pelo referente procedimento. A substituição parcial do cimento pela cinza que não passou pelo procedimento de lixiviação não reduziu a resistência à compressão da argamassa, independentemente do teor utilizado (de 10 a 30%). Por outro lado, a utilização de 20 a 30% da cinza lixiviada promoveu aumentos significativos de resistência em relação a todas as argamassas avaliadas em 28 dias.

3.3.6. Cinza da folha de bananeira (CFBN)

Maria (2011) estudou a utilização de pozolana oriunda da queima da folha de bananeira como adição em argamassas. A autora notou que o aumento do teor de cinza reduzia a trabalhabilidade da argamassa, sendo necessária a utilização de um aditivo plastificante para corrigir essa situação. No entanto, as argamassas com cinza de folha de bananeira apresentaram menores teores de ar incorporado, assim como valores menores nos ensaios de absorção de água

por capilaridade. Os ensaios de resistência à compressão e à tração na flexão das argamassas resultaram em maiores valores, comparando-se com as argamassas de referência, e indicaram viabilidade de utilização de até 30% de cinza da folha de bananeira sem que haja prejuízos de resistência.

Kanning *et al.* (2014) investigaram a influência da adição de cinzas da folha de bananeira em cimento e concreto, nas proporções de 0%, 5%, 7,5% e 10%, entre os estados fresco e endurecido. Os resultados demonstraram bom desempenho nos parâmetros do estado fresco e do comportamento mecânico no estado da argamassa endurecida. A resistência à compressão até 10% de substituição foi aproximadamente 25% maior do que a amostra de referência; no caso das amostras de concreto com 20% de cinza, foi obtida uma resistência 40% maior do que o concreto sem a presença da cinza.

Curado (2018) realizou um estudo das propriedades físicas do concreto com a adição da cinza da folha de bananeira substituindo parcialmente o cimento Portland. O autor concluiu que a utilização dessa cinza em proporções pequenas não prejudicou a qualidade do concreto. Desta maneira, determinou pela viabilidade de substituição do concreto até a proporção de 16% sem que suas propriedades físicas apresentem alterações, ou limitações. Foi percebido, também, a tendência do aumento da resistência com o aumento do teor da cinza estudada.

Pawar; Khaire (2018) avaliaram a viabilidade da cinza da folha de bananeira como material alternativo para a substituição parcial do cimento através da análise da trabalhabilidade do concreto contendo essa cinza, comparando a resistência à compressão, flexão e tração dividida de 0%, 15% e 25% de substituição, dentre demais atos experimentais. Pela composição química, notou-se que a cinza apresenta um teor de 48,70% de sílica, 2,60% de alumina e 1,40% de ferro. Os autores perceberam que as resistências mecânicas do concreto aumentam com a substituição de 15% do cimento pela cinza da folha de bananeira, enquanto esses valores são reduzidos ligeiramente quando a substituição passa para a proporção de 25%. Assim, concluiu-se que a porcentagem ideal de cimento para substituição parcial é de 15%.

Em relação aos teores de sílica e alumina apresentados por Pawar; Khaire (2018), os mesmos valores também foram encontrados na pesquisa realizada por Nnochiri; Aderinlewo (2016), quem examinaram as propriedades geotécnicas de solo laterítico estabilizado com cinzas de folhas de bananeira. Quanto ao teor de ferro, foi obtido um valor de 3,40%. Os autores constataram que a resistência do solo laterítico estabilizado com a cinza estudada aumentou.

Mota *et al.* (2020) verificou o comportamento da argamassa na presença de resíduo sólido vegetal, que consiste na cinza da folha de bananeira, em sua composição, a fim de melhorar as suas propriedades e características. A argamassa apresentou maior resistência

média à compressão, comparando-se com a argamassas tradicional e industrializada, no período de cura de 14 dias. Todavia, no final dos 28 dias, percebeu-se que a argamassa apresentou um valor 4% inferior à argamassa tradicional. Contudo, os autores concluíram que a argamassa contendo cinzas da folha de bananeira fornece uma resistência média com valores satisfatórios, o que demonstra que a cinza se comporta como um material pozolânico.

3.3.7. Cinza da casca de arroz (CCA)

Cordeiro G; Toledo Filho; Fairbairn (2009) realizaram um estudo referente ao uso em concreto de uma cinza ultrafina da casca de arroz produzida a partir de um subproduto que contém alto teor de carbono (equivalente a 12%). Pela técnica de FRX, a cinza apresentou 82,62% de sílica, 0,38% de alumina e 0,49% de ferro. Os autores notaram que os procedimentos de moagem ultrafina permitiram a produção de cinza da casca de arroz com elevada reatividade pozolânica. O emprego da cinza como substituta parcial do cimento Portland até o teor de 20% proporcionou incrementos significativos nos valores de resistência à compressão, tanto para os concretos de resistência convencional, quanto para os e alta resistência. Os concretos com 20% de substituição foram os que obtiveram os maiores valores de resistência após 180 dias de cura.

Almeida (2017) verificou o desempenho de concretos com substituição parcial do cimento Portland por cinza da casca de arroz. Considerando os resultados obtidos, a autora concluiu que a utilização da cinza estudada como substituta parcial do cimento apresentou desempenho satisfatória em todos os ensaios realizados, com destaque para o traço de 10% de cinza na resistência à compressão simples. Quanto ao traço de 20%, este apresentou melhor desempenho na situação de absorção por capilaridade, uma vez que possui maior teor de pozolana que as demais proporções.

França Neta (2020) analisou a influência da temperatura de calcinação da cinza da casca de arroz na resistência à compressão simples dos tijolos solo-cimento elaborados com 10% de substituição do cimento pela cinza em questão, que fora calcinada a temperatura de 800 °C e 1000 °C. Pela composição química obtida, a cinza calcinada a 800 °C apresentou 91,55% de sílica, 2,11% de alumina e 0,25% de ferro; quanto à cinza calcinada a 1000 °C, esta apresentou 71,81% de SiO₂, 1,98% de Al₂O₃ e 0,64% de Fe₂O₃. Percebeu-se, então, que a cinza calcinada a 800 °C apresentou melhor reatividade pozolânica que a calcinada a 1000 °C; e o mesmo foi possível ser dito quanto à resistência à compressão simples dos tijolos solo-cimento.

Brandão Júnior *et al.* (2020) caracterizaram as cinzas da casca de arroz vermelho, obtidas em diferentes temperaturas e períodos de calcinação, por meio de análises de suas propriedades físicas, mineralógicas e mecânicas. Os autores concluíram que as cinzas

produzidas a partir do processo controlado de incineração a temperatura de 600 °C durante 4 horas forneceu as melhores características de pozolanicidade. Também, notaram que ao incorporar essa cinza nas argamassas, houve uma melhora da resistência mecânica, comparando os valores obtidos com os apresentados por argamassas testemunhas.

Hu; He; Zhang (2020) realizaram um trabalho cujo objetivo consistiu em explorar a viabilidade do uso sustentável da cinza da casca de arroz em materiais à base de cimento. A cinza aumentou a resistência à compressão de barras de argamassa em todas as idades de teste, e melhorou a resistência ao sulfato. A avaliação de sustentabilidade informou que as argamassas contendo a cinza estudada apresentaram menor quantidade de emissão de CO₂ incorporado e de consumo de energia, em comparação com os valores apresentados pelas argamassas de referência. Desta maneira, após a obtenção dos dados, os autores foram capazes de demonstrar o sucesso da viabilidade do uso da cinza da casca de arroz como mistura mineral em materiais cimentantes em termos de desempenho mecânico, de análise de durabilidade e de impacto ambiental.

Vishavkarma; Harish (2021), buscando compreender o efeito da cinza da casca de arroz nas características de permeação, realizaram diversos tipos de testes, sendo estes: resistência à compressão, absorção de água, poros permeáveis e penetração de cloreto. Segundo as composições químicas realizadas, a cinza em questão apresentou 99,50% de sílica e 0,45% de alumina. A substituição de até 12% de cinza estudada acarretou melhores valores quanto às propriedades de permeação da argamassa misturada, apresentando reduções de aproximadamente 52% na permeação de cloreto, 10% na absorção de água e 18% no espaço permeável dos poros.

3.3.8. Cinza do bagaço de cana (CBC)

Costa (2017) avaliou o potencial pozolânico da cinza do bagaço de cana-de-açúcar através da realização de uma mistura ternária com metacaulim e cal hidratada, fazendo-se uso do método de termogravimetria. A cinza, em sua composição química, apresentou 89,20% de sílica, 2,20% de alumina e 1,70% de ferro. Obtidos os resultados, o autor concluiu que tanto pelos critérios químicos, físicos e de caracterização pozolânica, os valores apresentados pela cinza do bagaço da cana-de-açúcar foram satisfatórios, encontrando-se dentro dos padrões exigíveis para ser classificada como material pozolânico.

Mansaneira *et al.* (2017) analisou o potencial de substituição dos teores da cinza de bagaço de cana-de-açúcar no cimento Portland, em função de sua atividade pozolânica, avaliando a viabilidade de aplicações desse resíduo na área da construção civil. Foram

utilizadas duas cinzas: uma que não sofreu o processo de calcinação, e outra que foi calcinada a uma temperatura de 600 °C durante 6 horas (sendo que, após isto, as cinzas que apresentaram maior quantidade de material amorfo foi dividido em dois grupos, sendo moído durante uma hora, e o outro moído durante duas horas). Esta cinza, em sua composição química, apresentou 92,90% de SiO₂, 0,90% de Al₂O₃ e 3,70% de Fe₂O₃. Quanto à cinza *in natura*, esta apresentou 93,10% de sílica, 1,00% de alumina e 3,70% de ferro. No entanto, grande parte da sílica presente nesta cinza se encontrava cristalina e, portanto, apresentou baixa atividade pozolânica. Os ensaios de resistência à compressão da argamassa indicaram que o maior valor médio foi obtido para substituições de até 20% do cimento pelas cinzas calcinadas que foram moídas durante uma hora, e de até 10% pelas cinzas calcinadas que foram moídas durante duas horas.

Pereira *et al.* (2018) apresentaram um estudo referente a uma cinza obtida a partir do processo de autocombustão de bagaço de alto teor de quartzo, sem apresentar controle de temperatura. Pela técnica de FRX, a cinza apresentou 78,60% de sílica, 4,50% de alumina e 4,90% de ferro. Os autores constaram que a trabalhabilidade não apresentou alterações para faixa de reposição de 0 a 20%. Os mesmos também observaram que as argamassas contendo a cinza estudada na faixa de substituição de 15 a 20% ganharam mais resistência à compressão conforme o tempo de cura.

Silva A.; Moraes T.; Machado (2020) utilizaram a cinza do bagaço de cana-de-açúcar na substituição parcial dos teores de cimento Portland utilizado no melhoramento de camadas granulares de pavimentação rodoviária, buscando diminuir o custo da obra e encontrar uma destinação adequada ao resíduo estudado. Os autores concluíram que a cinza em questão forneceu resultados satisfatórios como material de substituição do cimento utilizado na pavimentação rodoviária, comportando-se como um material pozolânico. As amostras contendo essa cinza apresentaram menores valores de expansão. O solo-cimento contendo substituição de 50% de cinza atende ao uso como material em bases, enquanto o solo-cimento e o solo contendo substituições de 25% e 50% de cinza atendem apenas ao uso como material em sub-bases em pavimentos rodoviários de baixo volume de tráfego.

Lyra *et al.* (2021) investigaram os efeitos da extração de potássio na pozolanicidade da cinza do bagaço da cana-de-açúcar pura (não contendo contaminação do solo), com o objetivo de produzir cinza ativa para a utilização em compostos cimentícios. Através da técnica de FRX, as cinzas antes do processo de lavagem (referente à extração do potássio) apresentaram 13,90% de sílica, enquanto as cinzas depois da lavagem apresentaram 50,20% de sílica; demonstrando que a extração do potássio foi benéfica à reatividade pozolânica. A temperatura de calcinação de 600 °C foi adequada para evitar a formação de sílica cristalina nas cinzas.

Moraes J. *et al.* (2021) produziram uma cinza de bagaço de cana-de-açúcar através de um processo de queima autógena, que consiste em um processo que demanda baixa necessidade de energia para produção de uma cinza contendo baixa perda de ignição, e avaliar três diferentes procedimentos de moagem para determinar qual destes fornecerá a maior reatividade pozolânica. Assim, o estudo em questão buscou obter o melhor processo de retificação para aproveitar todo o potencial da cinza em questão. Através da técnica de FRX, notou-se que a cinza apresentou 51,40% de sílica, 9,50% de alumina e 5,10% de ferro. Os resultados obtidos referentes à condutividade elétrica e termogravimetria demonstraram que o menor tamanho de partícula resultou em maior atividade pozolânica e em maiores valores de resistência à compressão.

4. MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais utilizados para a elaboração da pesquisa do presente trabalho (contexto este que será tratado no primeiro tópico deste capítulo), assim como o procedimento experimental realizado (contexto este que será tratado no segundo tópico deste capítulo).

4.1. MATERIAIS UTILIZADOS

O hidróxido de cálcio foi utilizado no teste de reatividade pozolânica das cinzas estudadas, apresentando aproximadamente 95% de pureza e fornecida pela empresa Dinâmica S.A. A água deionizada, também utilizada no mesmo teste citado, foi obtida através do deionizador de água presente no Laboratório de Engenharia Civil da UNESP, campus de Ilha Solteira.

As cinzas utilizadas para comparação (cinzas da casca de arroz e do bagaço da cana) foram nomeadas “cinza parâmetro”. As cinzas submetidas às análises, por outro lado, receberam a nomenclatura “cinza teste”. Estas foram produzidas em laboratório pelo grupo de pesquisa MAC (Materiais Alternativos de Construção) através de um processo de queima (calcinação a 600 °C durante uma hora), buscando garantir melhor controle de temperatura e tempo de calcinação; assegurando, assim, a queima total e homogênea da matéria orgânica, e o favorecimento do aumento da porção amorfa de cada cinza. Válido ressaltar que foram obtidas apenas 7 gramas de cada cinza teste, devido ao baixo rendimento e dificuldade na produção desses materiais na mufla de escala de laboratório. Quanto às cinzas de parâmetro, estas consistem nas mesmas utilizadas na pesquisa de Da Silva *et al.* (2021).

Para a aceleração da reação entre o hidróxido de cálcio e as cinzas estudadas, houve o auxílio de um banho termostático com agitação da marca Julabo SW22 (Figura 6).

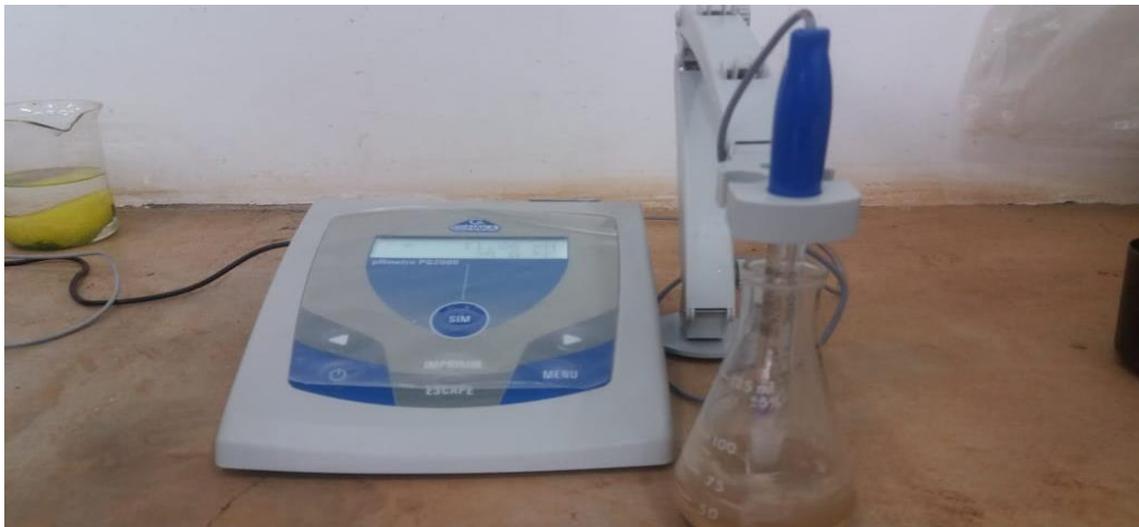
Figura 6 - Banho termostático com agitação da marca Julabo SW22.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Para a caracterização da reatividade pozolânica de cada cinza, foram utilizados os equipamentos pHmetro PG2000 GEHAKA (para as aferições de pH) e Condutivímetro CG2000 GEHAKA (para as aferições de condutividade elétrica). Estes equipamentos estão representados, respectivamente, pela Figura 7 e pela Figura 8.

Figura 7 - Equipamento pHmetro PG2000 GEHAKA.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 8 - Equipamento Condutivímetro CG2000 GEHAKA.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Também foram utilizados os demais materiais:

- Frascos Erlenmeyer de 125 mL (seis para cada resíduo estudado);
- Almofariz de ágata com pistilo;
- Filme plástico;
- Elásticos;
- Balança de precisão;
- Bastão de vidro;
- Pipeta;
- Pinceta.

4.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.2.1. Beneficiamento dos resíduos

Os resíduos agroindustriais estudados nesta pesquisa foram obtidos na região da cidade de Ilha Solteira, SP. Para que fosse evitada a proliferação de fungos, os resíduos foram expostos à luz solar em um intervalo de tempo equivalente a, pelo menos, duas horas por dia durante uma semana. A casca da banana, no entanto, por ter apresentado uma maior umidade em relação aos demais resíduos, teve de ser inserida na estufa (

Figura 9), com temperatura de 60 °C durante doze horas.

Figura 9 - Estufa utilizada para desidratar a casca de banana.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Concluído o processo de desidratação dos resíduos, a folha de bananeira, a casca de banana, a palha de milho e a casca de laranja foram fracionadas, visando um aumento na área superficial e melhor homogeneidade na fase de calcinação do material. Quanto à casca de café e à casca de soja, estas apresentaram tamanhos relativamente pequenos e, por conseguinte, foram diretamente submetidos à calcinação na mufla.

Aos resíduos agroindustriais, então, foi imposta a calcinação a 600 °C durante uma hora, fazendo-se uso da mufla apresentada na Figura 10. Com isto, buscou-se a perda da matéria orgânica da amostra e, também, torná-la amorfa.

Figura 10 - Mufla utilizada no processo de calcinação.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Feito isto, as cinzas foram submetidas a uma moagem manual, fazendo-se uso do almofariz (gral) de ágata com pistilo (Figura 11); a fim de atingir um aumento da superfície específica das mesmas. Com isto, as cinzas foram passadas na peneira 200 (abertura 75 μm), e apenas o material passante foi utilizado para as caracterizações e para a avaliação da atividade pozolânica.

Figura 11 - Almofariz (gral) de ágata com pistilo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

4.2.2. Caracterização das cinzas

Amostras de cada cinza foram preparadas para a realização das caracterizações química e mineralógica. Para o primeiro caso, foi utilizada a técnica de espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) com detector por dispersão de comprimento de onda, buscando determinar quantitativamente o teor de cada óxido presente em cada cinza, especialmente o teor de sílica e alumina no estado amorfo. O equipamento utilizado consistiu no Shimadzu Model XRD 6000.

Essa técnica permite que a mesma amostra seja utilizada em outras técnicas, uma vez que consiste em uma análise não destrutiva. O funcionamento desta se baseia na situação de que os elementos químicos emitem radiações características quando submetidos à excitação adequada. Logo, o equipamento relacionado ao método de FRX emite uma radiação (denominada radiação primária) sob a amostra, ocasionando um acúmulo de energia que faz com que os elétrons das camadas mais internas sejam arrancados. Essa vacância deixada é ocupada por um elétron de um orbital mais externo do material, liberando uma energia característica da diferença de energia de dois níveis. Com isto, têm-se a identificação da espécie

atômica envolvida na transição e a mensuração da abundância desta (SANTOS M.; TEXEIRA, 2017; FERRETI; TIRELLO, 2009; SANTOS E. *et al.*, 2013).

Quanto à caracterização mineralógica, esta foi realizada através da técnica de difratometria de raios X (DRX). Este método é utilizado para identificar fases cristalinas em diferentes materiais e para a análise quantitativa das mesmas (NERGIS *et al.*, 2020). Para isto, faz-se uso de raios X que incidem na amostra estudada. O ângulo (direção) de difração está relacionado com a forma e o tamanho das células cristalinas, enquanto a intensidade de difração está associada com o arranjo dos átomos na célula unitária (YAN *et al.*, 2020).

Neste ensaio, o equipamento utilizado consistiu em um difratômetro Shimadzu XRD-6000 com radiação Cu K α (comprimento de onda de aproximadamente 1.5418 Å). Também, foram tomadas medidas no intervalo de 5° a 80° de 2 θ e passo de 0,02° com velocidade de 1 °/min. O método DRX foi aplicado às cinzas com o objetivo de analisar os minerais presentes e constatar a presença de material no estado vítreo (não-cristalino).

4.2.3. Avaliação da atividade pozolânica das cinzas

Conforme o que fora desenvolvido e proposto por Tashima *et al.* (2014), o método de ensaio utilizado neste trabalho monitorou as suspensões com diferentes proporções de cal/pozolana (CH/PZ), através de medidas de pH e de condutividade elétrica a 60 °C, durante 7 dias consecutivos, sendo tais aferições de todas as proporções tomadas a cada 24 horas. Assim, pretende-se observar uma redução nos valores de pH e de condutividade elétrica, observando o ponto de insaturação da suspensão.

Além disto, também é possível verificar a redução na concentração de íons Ca⁺² e OH⁻, devido à reação pozolânica. Esta provoca uma diminuição de íons cálcio e hidroxila, mas a presença de Ca(OH)₂ sólido sem dissolver faz com que as concentrações desses íons se mantenham mais ou menos constantes, até o instante em que todo o sólido seja consumido, momento à partir do qual se pode notar uma redução significativa de pH e de condutividade elétrica. Desta maneira, é possível identificar e analisar até que proporções CH/PZ as cinzas são capazes de reagir, consumindo completamente o hidróxido de cálcio em fase sólida.

Diferentes proporções de CH/PZ foram preparadas (2:8; 2,5:7,5; 3:7; 3,5:6,5; 4:6; 4,5:5,5), com 50 mL de água deionizada, de maneira que todas as suspensões estivessem saturadas de hidróxido de cálcio, que apresenta uma solubilidade de 0,185 g/ 100 mL a 25 °C, sendo inversamente proporcional à temperatura (CALHEIROS; ZANIN; PACHECO, 2013). Para tais proporções, foi considerado um valor de massa total de sólido (CH + PZ) equivalente a 1,0 g. Adicionada a água deionizada nos frascos, estes foram selados com um filme plástico

e colocados no banho termostático com agitação (130 rpm) da marca Julabo SW22 durante um intervalo de tempo equivalente a trinta minutos, para que a temperatura do teste (60 °C) fosse alcançada.

Encerrado o referido intervalo de tempo, a fim de saturar a solução, o hidróxido de cálcio foi adicionado. Feito isto, os frascos Erlenmeyer foram selados novamente e colocados no banho termostático por mais quinze minutos. Na sequência, 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.

Concluídas as aferições, 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, e assim por diante até o sétimo dia. Durante os momentos em que não estavam sendo realizadas as aferições, as suspensões permaneciam seladas em constante agitação para facilitar a reação pozolânica e evitar qualquer problema (por exemplo, a evaporação de água e a carbonatação da amostra).

A partir dos resultados do ensaio de condutividade elétrica, a perda de condutividade (L_c (%)) foi calculada através da Equação 2 e da Equação 3 (TASHIMA *et al.*, 2014):

$$L_c(\%) = \frac{C_0 - C_{t,poz}}{C_0} * 100 \quad (2)$$

$$C_{t,c} = C_t - C_{t,poz} \quad (3)$$

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.

No entanto, Tashima *et al.* (2014) constataram que as pozolanas que analisaram não contribuíram significativamente para a condutividade elétrica ao serem adicionadas à água deionizada. Isto demonstrou que os valores de $C_{t,poz}$ foram desprezíveis ao serem comparados

com os apresentados pelo C_t . Assim, é possível reescrever a Equação 3 conforme demonstrado a seguir.

$$C_{t,c} = C_t - C_{t,poz} \cong C_t$$

Desta maneira, de posse desses resultados, é possível classificar a cinza em três categorias: altamente reativa, de média reatividade, e de baixa reatividade. Essa classificação é feita por meio da marcação no modelo apresentado na Figura 12. Tal marcação é feita quando a perda de condutividade (L_c em %) atinge o valor de 30% ou mais, o que caracteriza a insaturação do hidróxido de cálcio na solução. Logo, a classificação dependerá de quais proporções atingem tal marcação, sendo que a Zona 1 representa as cinzas de baixa reatividade, a Zona 2 representa as de média reatividade e a Zona 3 representa aquelas de alta reatividade.

Figura 12 - Modelo para a classificação da reatividade pozolânica das cinzas.

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).

Assim, as cinzas que apresentarem 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%), serão classificadas como “cinzas de baixa reatividade”. Por outro lado, para as cinzas que apresentarem valores de L_c maiores que 30% para proporções além das situadas na Zona 1, estas poderão ser classificadas como “cinzas de média reatividade” (caso apenas a proporção 4,5:5,5 não apresente valor de L_c maior que 30%), ou “cinzas de alta reatividade” (caso todas as proporções apresentarem L_c maior que 30%).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. CARACTERIZAÇÃO DAS CINZAS

5.1.1. Fluorescência de raios X (FRX)

A caracterização química de cada cinza foi obtida por meio da técnica de espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) com detector por dispersão de comprimento de onda, conforme fora explicado no capítulo anterior. Os resultados obtidos por esta técnica estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - FRX das cinzas teste (%).

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

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Segundo a norma ABNT NBR 12653:2014, versão corrigida:2015, para que um material seja classificado como sendo pozolânico, este deve apresentar somatória mínima de teores de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ equivalente a 70% para as classes pozolânicas N (que consiste nas pozolanas naturais e artificiais, como materiais vulcânicos, terras diatomáceas e argilas calcinadas) e C (que consiste nas cinzas volantes e nos demais materiais resultantes da combustão do carvão mineral), e equivalente a 50% para a classe pozolânica E (demais casos de materiais que não se enquadram nas classificações anteriores) (ABNT, 2015). Analisando a composição química de cada cinza estudada, notou-se que nenhuma das cinzas teste satisfaz esse critério de soma mínima.

Ainda segundo a normativa, deve-se respeitar uma quantidade máxima de SO₃ de 4% para a classe pozolânica N, e de 5% para as classes pozolânicas C e E. O material também deve apresentar um teor máximo de Na₂O de 1,50% para todas as classes (ABNT, 2015). Segundo os dados contidos na Tabela 3, percebeu-se todas as cinzas respeitaram o critério referente à quantidade máxima de SO₃. Quanto ao critério relacionado à quantidade máxima de Na₂O, apenas as CCC, CCS, CCL e CPM o respeitaram. Quanto às CCB e CFBN, estas apresentaram teor maior que o exigido.

Por fim, outro critério exigido pela norma consiste na porcentagem máxima de perda ao fogo, cujo valor deve ser no máximo 10% para a classe pozolânica N, e 6% para as classes pozolânicas C e E (ABNT, 2015). Neste caso, todas as cinzas apresentaram teor superior ao máximo permitido pela normativa. Isto provavelmente ocorreu, principalmente, devido à situação de não ter ocorrido a decomposição de certos carbonatos presentes nas cinzas estudadas, uma vez que esse processo de descarbonatação, segundo Bensharada *et al.* (2022), acontece entre 550 °C e 950 °C.

A matéria orgânica é oxidada em cinzas e CO₂ a uma temperatura de 500 °C a 550 °C. Após isto, o processo de decomposição dos carbonatos resulta na liberação de dióxido de carbono a temperaturas entre 900 °C e 1000 °C; deixando, então, óxidos. Este procedimento pode ser impactado pelo tamanho da amostra e pela posição destas no forno (HEIRI; LOTTER; LEMCKE, 2001).

A Tabela 4 fornece os resultados obtidos pelo FRX das cinzas parâmetro. Os valores destas, ao contrário dos valores referentes às cinzas teste, respeitam os critérios exigidos pela norma ABNT NBR 12653:2014, versão corrigida:2015 para a classificação de material pozolânico. No entanto, nenhuma das cinzas teste apresentaram valores semelhantes aos das cinzas parâmetro.

Tabela 4 - FRX 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).

No estudo realizado por Hills *et al.* (2020), a composição química realizada constatou que a cinza da casca de banana calcinada a 900 ± 25 °C durante quatro horas apresentou 7,20% de sílica, 0,40% de alumina e, 0,30% de ferro. Embora estes valores não tenham sido significativos para possibilitar a classificação do material como material pozolânico segundo a normativa (uma vez que a somatória desses três compostos químicos foi de 7,90%), os valores apresentados pelo presente trabalho foram ainda menores, consistindo em 1,61% de SiO₂ e 0,02% de Fe₂O₃ (o FRX não obteve valores para o teor de alumina). A diferença de valores pode ter ocorrido devido divergência apresentada entre o trabalho de Hills *et al.* (2020) e o presente estudo quanto à temperatura de calcinação (que no caso desta pesquisa foi equivalente a 600 °C) e à duração desta (que no caso desta pesquisa foi de 1 hora).

Reta; Mahto (2019), ao realizarem a caracterização química da CCC estudada, obtiveram a informação de que a cinza apresentou 14,65% de sílica, 12,07% de alumina e 4,50% de ferro. A somatória destes resultados, cujo valor é equivalente a 31,22%, não satisfaz o critério normativo mínimo. Estes resultados também divergem dos apresentados no presente trabalho, cujos valores foram de 0,93% de sílica e nulos para a alumina e para o ferro. Esta diferença de porcentagens pode ser explicada pelos métodos de calcinação adotados. No caso de Reta; Mahto (2019), a cinza foi obtida através da calcinação ao ar livre durante três horas sem controle de temperatura, enquanto a CCC desta pesquisa foi incinerada durante uma hora a 600 °C em mufla.

No caso da CCS, não foram encontrados na literatura valores referentes à composição química através da técnica de FRX.

Vamvuka *et al.* (2014) realizou a caracterização química da CCL, obtendo 2,40% de SiO₂, 3,00% de Al₂O₃ e 0,20% de Fe₂O₃. Mesmo que estes valores não satisfaçam os critérios normativos para classificar a cinza da casca de laranja como material pozolânico (uma vez que a somatória desses compostos foi de 5,60%), estes ainda são maiores que os obtidos neste trabalho, cujos valores obtidos pelo FRX foram de 0,30% de sílica, nulo para a alumina e 0,05% de ferro. Quanto à pesquisa realizada por Olubajo; Odey; Abdullahi (2019), a cinza calcinada a temperatura de 600 °C durante uma hora apresentou 22,47% de SiO₂, 1,94 % de Al₂O₃ e 1,29% de Fe₂O₃. Percebe-se, assim, que embora os parâmetros de calcinação foram os mesmos adotados por estes últimos autores, os valores se divergiram. Contudo, segundo Hills *et al.* (2020), essa diferença pode ser explicada pelo estado do material coletado para o estudo, uma vez que a perda de nutrientes das plantas, o tipo de solo utilizado para o cultivo e as condições de colheita influenciam nos teores químicos da cinza.

Lima; Cordeiro G. (2021), ao estudarem a produção da cinza da palha de milho com alta reatividade, a composição química do material lixiviado com ácido nítrico apresentou 94,20% de SiO₂ e 0,20% de Fe₂O₃, enquanto a cinza *in natura* apresentou teores de 62,50% de sílica e 0,90% de ferro. No caso do trabalho realizado por Shakouri *et al.* (2020), a cinza que não passou por tratamento algum de água e/ou ácido apresentou teores de 49,00% de sílica, 3,27% de alumina e 1,07% de ferro. Quanto à cinza estudada nesta pesquisa, o FRX demonstrou valores de 25,05% de sílica e 0,13% de ferro. A diferença entre com estes resultados os apresentados por Lima; Cordeiro G. (2021) consiste no procedimento realizados por estes para produzir uma CPM de alta reatividade, fazendo-a passar por um processo de lixiviação ácida controlada, incinerada em duas etapas e moagem altamente fina; quanto aos valores que estes autores apresentaram para a cinza *in natura*, tem-se a diferença da temperatura de calcinação (no caso

destes últimos autores, foi adotada uma temperatura de 800 °C). Comparando-se os dados deste trabalho com os de Shakouri *et al.* (2020), a divergência pode ser explicada pelo processo duplo de incineração ao qual a cinza destes autores passou e devido às condições fornecidas por Hills *et al.* (2020) quanto ao tipo de cultivo, solo e coleta; que podem interferir nos teores de óxidos das cinzas da palha de milho.

Por fim, quanto à situação da CFBN, os estudos realizados por Nnochiri; Aderinlewo (2016) e Pawar; Khaire (2018) obtiveram teores de 48,70% de SiO₂, 2,60% de Al₂O₃ e 1,40% de Fe₂O₃. Os dados, no entanto, entram em desacordo com os obtidos neste trabalho, cujos valores foram de 12,81% de sílica, 1,67% de alumina e 0,26% de ferro. Além das explicações fornecidas por Hills *et al.*, essas diferenças de valores podem ter ocorrido devido aos diferentes métodos adotados pelas pesquisas, uma vez que enquanto a presente pesquisa expôs os resíduos à luz solar em um intervalo de tempo equivalente a, pelo menos, duas horas por dia durante uma semana, Pawar; Khaire (2018), por exemplo, as folhas de bananeira foram secas por um período mínimo de 30 dias.

Entretanto, importante ressaltar a situação apresentada na pesquisa de Moraes J. (2015), em que embora obteve uma soma dos óxidos apresentados pela cinza da folha de cana-de-açúcar equivalente a 42,70%, a reatividade desse material com pastas de cal/pozolana foi caracterizada como sendo de alta reatividade ao consumir todo o CH em apenas três dias de cura; demonstrando uma discordância quanto aos critérios impostos pela norma ABNT NBR 12653:2014, versão corrigida:2015.

5.1.2. Difratomia de raios x (DRX)

Os resultados obtidos pela técnica de difratometria de raios X (DRX) das cinzas estudadas estão apresentadas entre a Figura 13 e a Figura 20; sendo que a Figura 13 e a Figura 14 representam as cinzas parâmetro, e da Figura 15 a Figura 20 têm-se as cinzas teste.

A Figura 13 apresenta o DRX obtido para a cinza casca de arroz, que consiste em uma das cinzas parâmetros. O mesmo foi estudado por Da Silva *et al.* (2021). Note que houve destaque para o mineral cristobalita (representado pela sigla Cr), sendo este também encontrado no pico principal da cinza. Além deste mineral, também foi identificado o mineral tridimita, representado pela sigla Tr.

No entanto, considerando o potencial pozolânico das cinzas da casca de arroz, tem-se que o largo pico entre 15° e 36° no espectro das cinzas produzidas a 500 °C, indicativo de compostos amorfos, é reduzido com o aumento da temperatura, devido ao rearranjo dos compostos cristalinos. Também, a partir do espectro das cinzas produzidas a 800 °C, percebe-

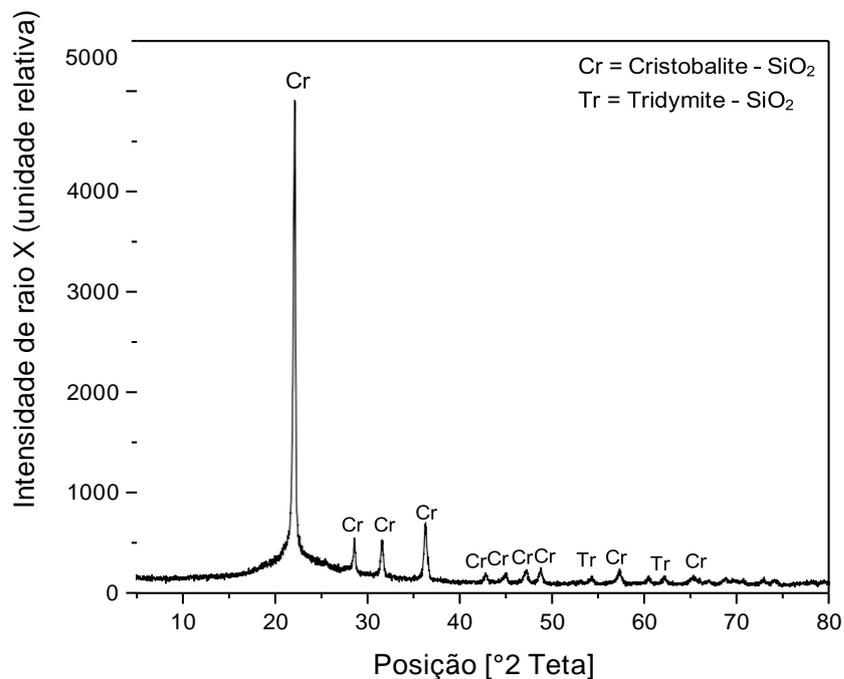
se a redução desse halo amorfo e a formação de pico de cristobalita, que se torna cada vez mais definido conforme o aumento da temperatura. Quanto à quantidade de sílica reativa, esta é reduzida, à medida em que se aumenta a temperatura de calcinação. (BRANDÃO JÚNIOR *et al.*, 2020).

Ainda de acordo com Brandão Júnior *et al.* (2020), as condições apresentadas, todavia, não impedem de a sílica amorfa estar presente, em altas temperaturas, em quantidade suficiente para garantir a reação pozolânica.

Contudo, espera-se que a cinza apresente uma redução em seu rendimento como material pozolânico. Ou seja, embora ainda apresente características pozolânicas, a CCA poderá ter a intensidade de sua reatividade impactada pela quantidade de minerais cristobalita, por exemplo.

Assim, uma vez que a CCA deste trabalho apresentou grandes quantidades de picos de minerais cristobalita e tridimita (mineral que se transforma em cristobalita), esperou-se que a mesma fornecesse resultados de pozolanicidade abaixo dos apresentados nos estudos de Hu; He; Zhang (2020) e de Vishavkarma; Harish (2021), por exemplo.

Figura 13 - DRX da CCA.



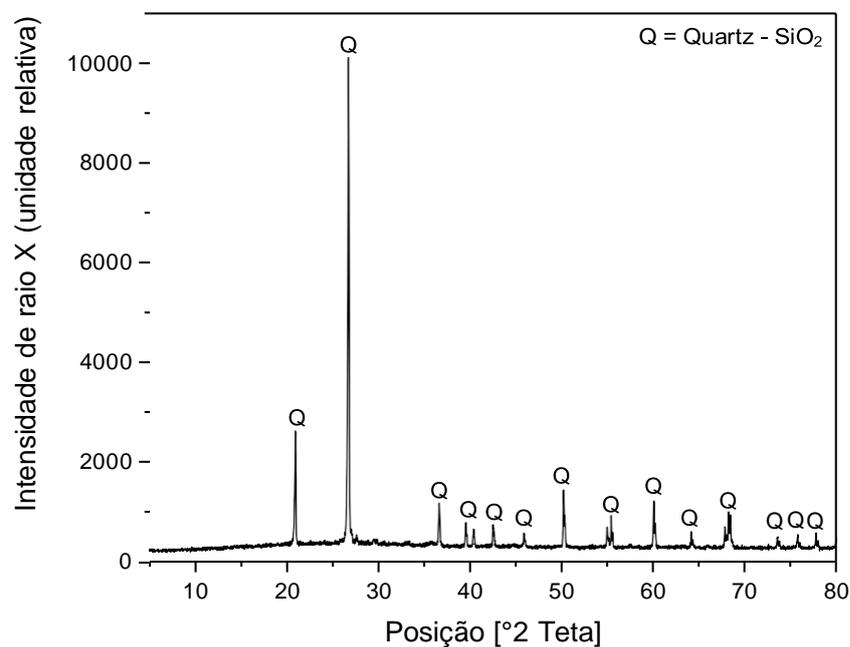
Fonte: Da Silva *et al.*, (2021).

A Figura 14 apresenta o DRX obtido para a cinza do bagaço da cana-de-açúcar, que consiste na outra cinza parâmetro e que também fora estudado por Da Silva *et al.* (2021). Foram

identificados picos de quartzo, representados pela sigla Q, sendo este também encontrado no pico principal da cinza.

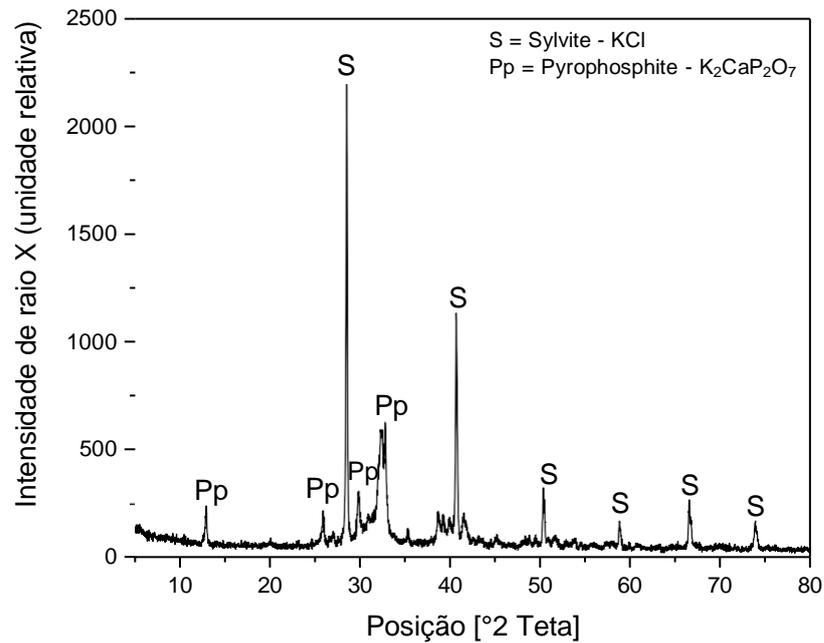
Segundo a análise feita por Da Silva *et al.* (2021), no entanto, alguns picos indicaram a presença de quartzo como sendo uma impureza, devido a contaminantes do solo no bagaço de cana-de-açúcar. Logo, também foi esperada uma menor reatividade apresentada por essa cinza parâmetro, ao se comparar a cinza deste trabalhado com a estudada por Lyra *et al.* (2021), por exemplo.

Figura 14 - DRX da CBC.



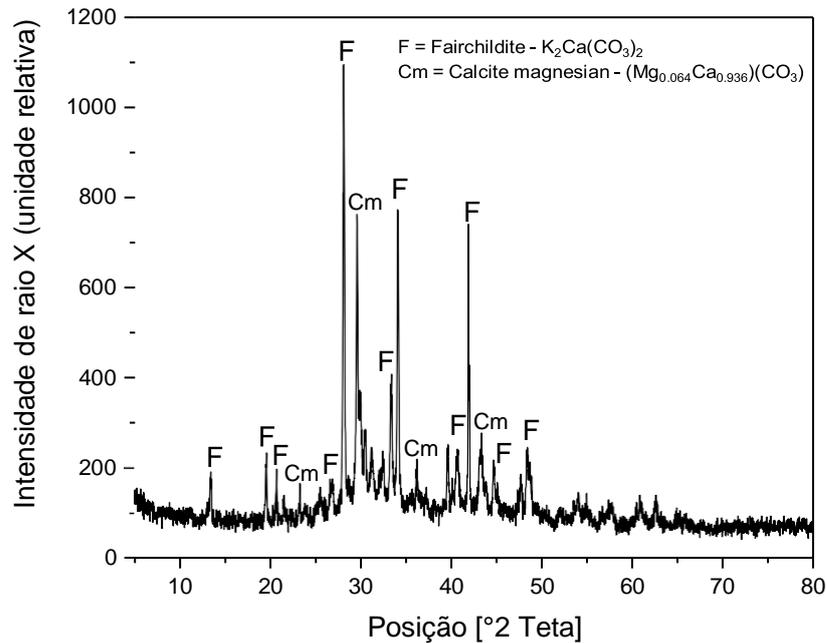
Fonte: Da Silva *et al.* (2021).

A Figura 15 apresenta o DRX obtido para a cinza da casca de banana. Com isto, foram identificados picos referentes aos materiais silvita e pyrophosphate, representados respectivamente pelas siglas S e Pp. O mineral silvita foi o que mais se destacou, sendo encontrado no pico principal da cinza. Não foram encontrados dados na literatura quanto ao DRX da CCB para que fosse possível comparar os resultados. No entanto, relacionando essa cinza com as cinzas parâmetro, têm-se que os resultados de difração de raios X foram divergentes, não apresando semelhanças.

Figura 15 - DRX da CCB.

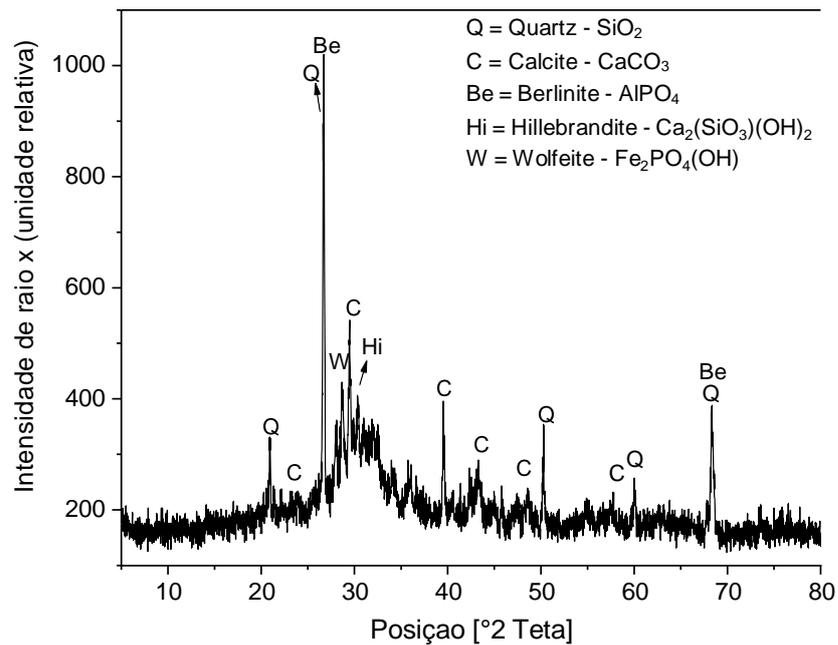
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

O DRX da cinza da casca de café está representado na Figura 16. Os minerais identificados foram a fairchildit (mineral composto por potássio, e representado pela sigla F) e a calcita magnésiana, representada pela sigla Cm. Destas, o mineral F foi o que mais se destacou, sendo encontrado no pico principal da cinza em questão. Comparando esse resultado com os encontrados em literatura, semelhanças foram notadas no difratograma obtido no estudo de Lin; Kuo; Hsu (2015). Contudo, ao realizar uma comparação entre o DRX da CCC com os das cinzas parâmetro, não foi percebida semelhança alguma.

Figura 16 - DRX da CCC.

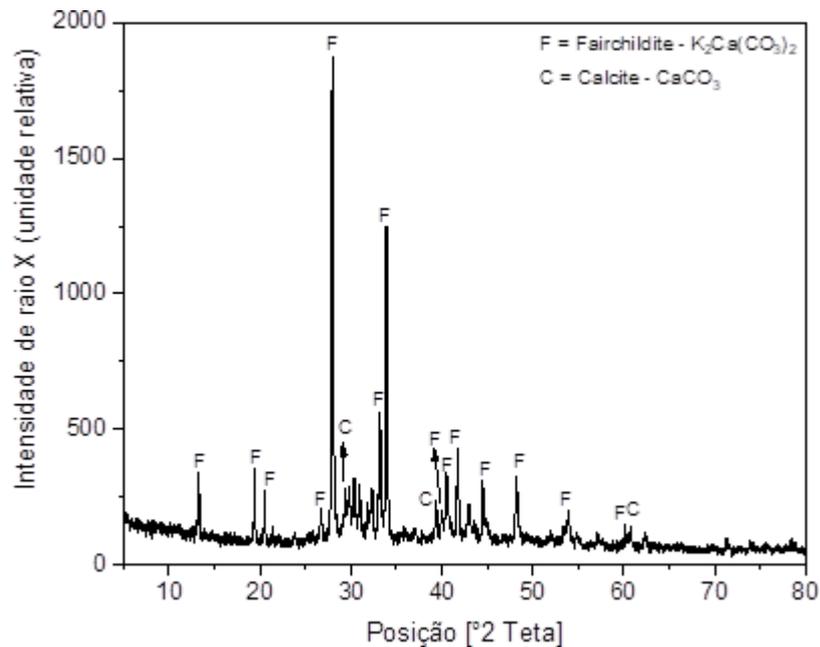
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

O DRX da cinza da casca de soja está representado na Figura 17. Notou-se a presença de um halo amorfo sutil entre os ângulos 2θ de 20° a 40° , uma vez que as regiões amorfas das amostras são representadas por picos largos e as regiões cristalinas estão representados por picos agudos (PATEL; PARSANIA, 2018). A sutileza deste halo refere-se à alta intensidade dos picos cristalinos. Os minerais identificados foram berlinite (representado pela sigla Be), quartzo, calcita (representada pela sigla C), hillebrandita (representada pela sigla Hi) e wolfeite (representada pela sigla W). Destes, o mineral que mais se destacou foi a calcita, seguida pelo quartzo. Todavia, o mineral encontrado no pico principal da cinza foi o Be. Não foram encontrados dados na literatura quanto ao DRX da CCS para que fosse possível comparar os resultados. Relacionando essa cinza com as cinzas parâmetro, tem-se a presença do mineral Q, que também fora identificado nas cinzas parâmetro; todavia, a semelhança entre os difratogramas acaba sendo insignificante.

Figura 17 - DRX da CCS.

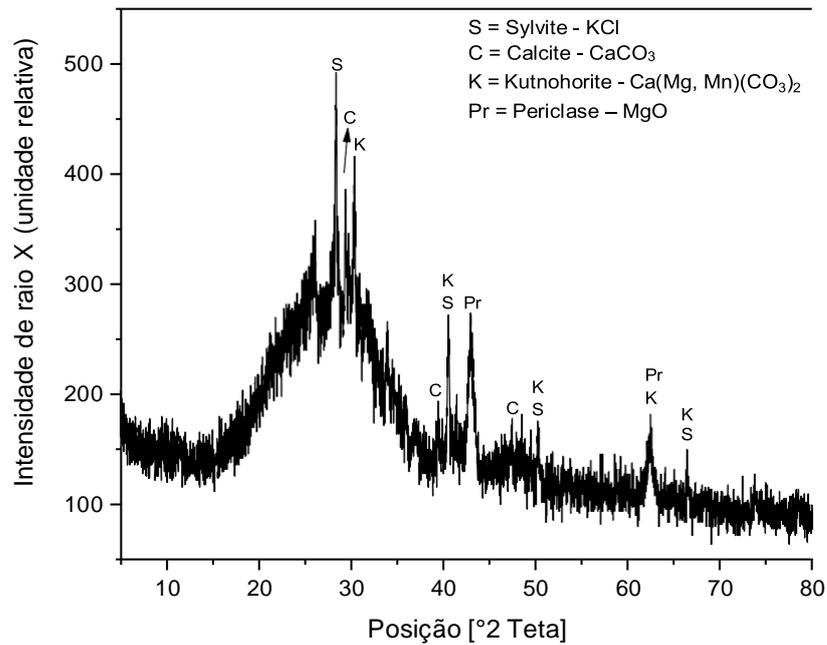
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A Figura 18 apresenta o DRX obtido para a cinza da casca de laranja. Os minerais identificados foram a fairchildit e a calcita. Destas, a que mais se destacou foi a fairchildit, sendo também encontrada no pico principal da cinza. Comparando esse resultado com os encontrados em literatura, o estudo realizado por Vamvuka *et al.* (2014) também identificou picos dos minerais calcita e periclase; no entanto, não foram identificados picos dos demais minerais encontrados na presente pesquisa. Comparando o DRX da CCL com os das cinzas parâmetro, não foi percebida semelhança alguma.

Figura 18 - DRX da CCL.

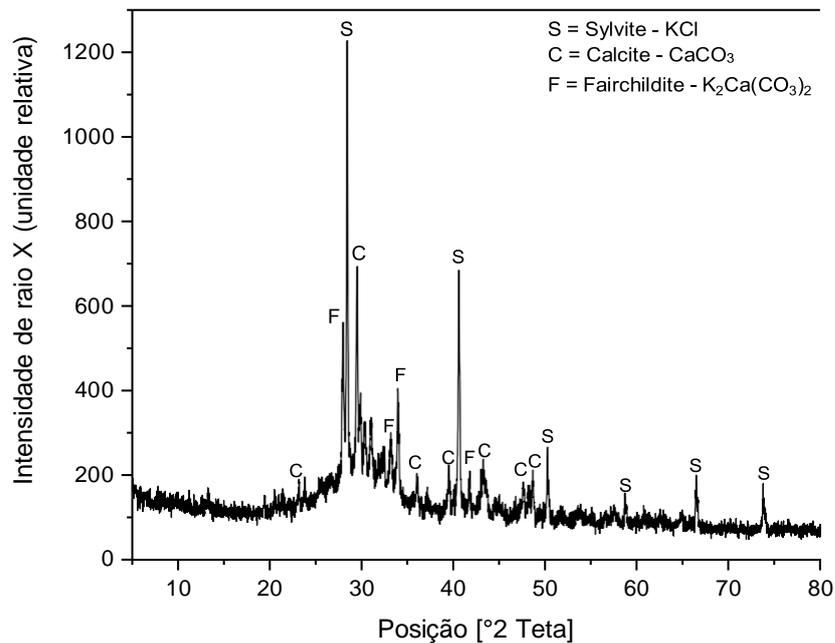
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

O DRX obtido para a cinza da palha de milho está representado na Figura 19. Notou-se a presença de um halo amorfo entre ângulos 2θ de 15° a aproximadamente 35° , o que indica potencial reativo do material (BELLAYER, 2019). Segundo Cordeiro G. *et al.* (2020), o halo amorfo entre os ângulos 2θ de 15° a 30° consiste em uma característica típica da sílica, demonstrando que o procedimento de calcinação foi adequado para manter a sílica em estado amorfo. Os minerais identificados pelo difratograma foram a silvita, a calcita, a kutnohorita (representada pela sigla K) e a periclase. Destes, o mineral silvita foi encontrado no pico principal da cinza. Não foram encontrados dados na literatura quanto ao DRX da CPM para que fosse possível comparar os resultados. No entanto, comparando o difratograma da cinza com os das cinzas parâmetro, não foi constatada semelhança significativa.

Figura 19 - DRX da CPM.

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Por fim, o DRX obtido da cinza da folha de bananeira está representado na Figura 20. Os minerais identificados pelo difratograma foram a silvita, a calcita e a fairchildit. Destes, o mineral que mais se destacou foi a silvita, que também foi encontrada no pico principal da cinza, seguido pelo mineral calcita. Os estudos que foram encontrados na literatura não forneceram informações quanto às caracterizações mineralógicas para possibilitar a realização de comparação. Entretanto, comparando o difratograma da cinza com os das cinzas parâmetro, não foram encontradas semelhanças significativas.

Figura 20 - DRX da CFBN.

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Desta maneira, percebe-se que os resultados de DRX das cinzas teste identificaram minerais com altas concentrações de cálcio e potássio, principalmente. Já a presença de sílica, alumina e ferro, foi praticamente nula, sendo apenas a sílica identificada na cinza da casca de soja. Isto, no entanto, entra de acordo com os resultados de FRX, uma vez que as cinzas teste apresentaram, na maioria dos casos, altas porcentagens para cálcio e potássio, e baixas porcentagens para sílica, alumina e ferro.

Também, notou-se uma considerável presença de carbonatos nas cinzas teste. Isto demonstra que a temperatura de calcinação adotada neste trabalho (600 °C) não foi capaz de causar a decomposição desses carbonatos; o que justifica os elevados valores de perda ao fogo obtidos pela técnica de FRX.

5.2. ANÁLISE DO PH E DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DAS SUSPENSÕES

Elaborados os ensaios, os gráficos referentes ao pH e à condutividade elétrica de cada solução e proporção analisadas foram plotados. Contudo, no caso dos gráficos de pH, foi necessário converter os valores obtidos para dados referentes à concentração de hidroxila presente em cada solução estudada. Este procedimento foi necessário para que fosse possível analisar o consumo de hidroxila (OH^-) como consequência da reação pozolânica do material; o que tornará a solução mais ácida.

Desta maneira, os valores obtidos de pH através do pHmetro foram convertidos de pH para pOH. Para isto, foi utilizada a Equação 4.

$$pH + pOH = 14 \quad (4)$$

Realizada essa conversão de valores, a concentração de OH⁻ foi obtida com o auxílio da Equação 5.

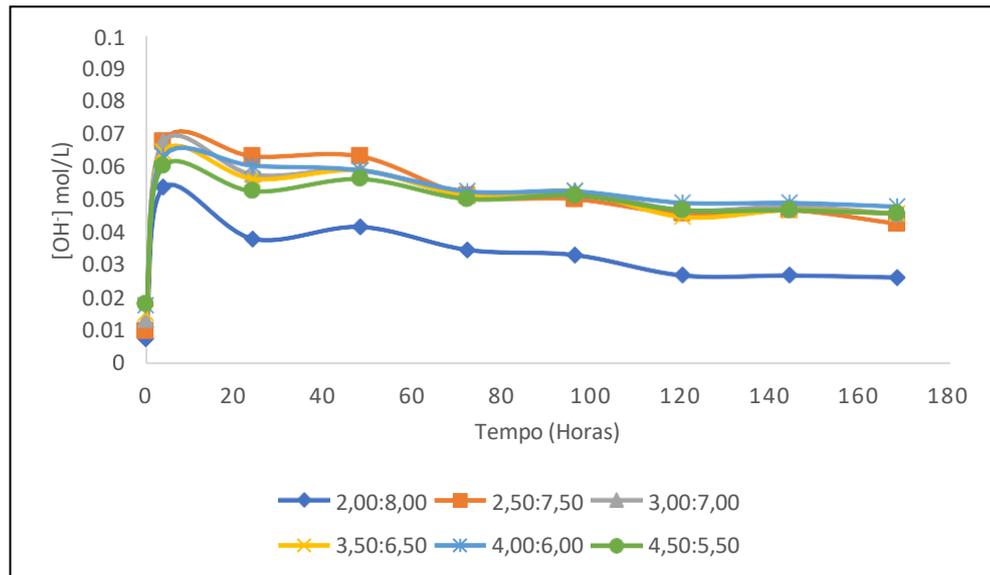
$$[OH]^- = 10^{-pOH} \quad (5)$$

De posse desses dados, foi possível, então, plotar os gráficos referentes à concentração de hidroxila das suspensões, que consistem em [OH⁻] (mol/L) x Tempo (horas).

Quanto aos gráficos referentes à condutividade elétrica, não houve a necessidade de converter os dados obtidos pelo condutivímetro. Assim, foram plotados os gráficos referentes à condutividade elétrica das suspensões, que consistem em Condutividade Elétrica (mS/cm) x Tempo (horas).

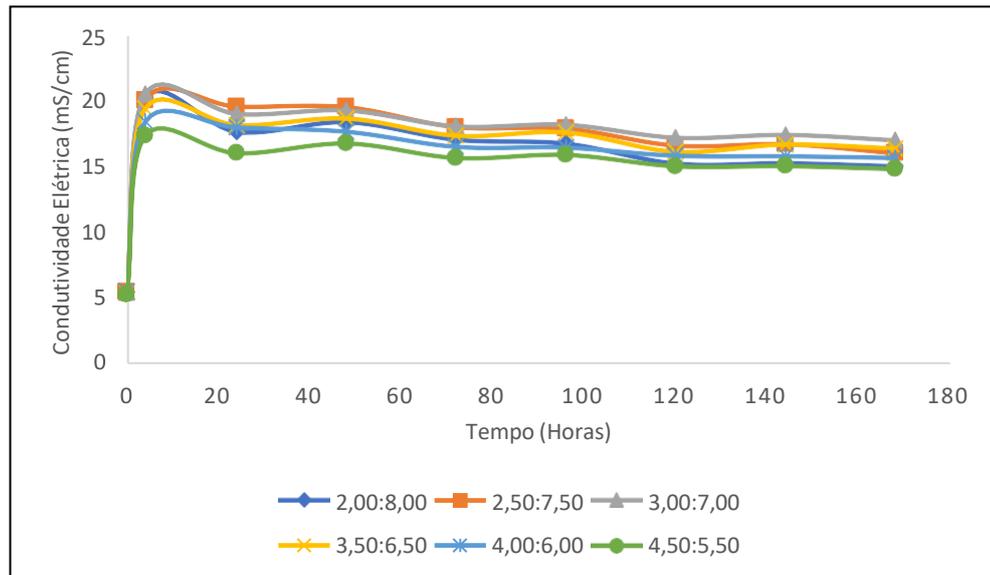
5.2.1. Cinza da Casca de Banana (CCB)

A Figura 21 apresenta o gráfico referente à concentração de hidroxilas das soluções contendo a cinza da casca de banana. Percebe-se uma ascensão dessa concentração até o tempo de ensaio equivalente a aproximadamente quatro horas. Este comportamento de ascensão pode ser explicado pela liberação de íons hidroxila na solução. No entanto, após esse intervalo de tempo, os valores de [OH⁻] oscilaram tendendo à redução. Todavia, no caso apresentado por todas as proporções estudadas, os valores finais foram maiores do que os iniciais. Com isto, concluiu-se que a liberação de íons foi muito mais significativa do que o consumo dos mesmos íons presentes na solução.

Figura 21 - $[\text{OH}^-]$ da CCB.

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Quanto aos valores referentes à condutividade elétrica contendo a CCB, estes estão representados na Figura 22. Notou-se, durante aproximadamente as primeiras quatro horas de ensaio, o aumento da condutividade das soluções, provavelmente devido a uma liberação significativa de íons nas mesmas. Após este intervalo, os valores oscilaram tendendo à redução. Contudo, os valores finais foram superiores aos iniciais, demonstrando que a cinza não foi capaz de consumir quantidade suficiente dos íons liberados pelo hidróxido de cálcio para ser classificada como material pozolânico. Isto concorda com a técnica de FRX, pois a soma das porcentagens de óxidos de silício, alumínio e ferro não satisfaz o critério normativo.

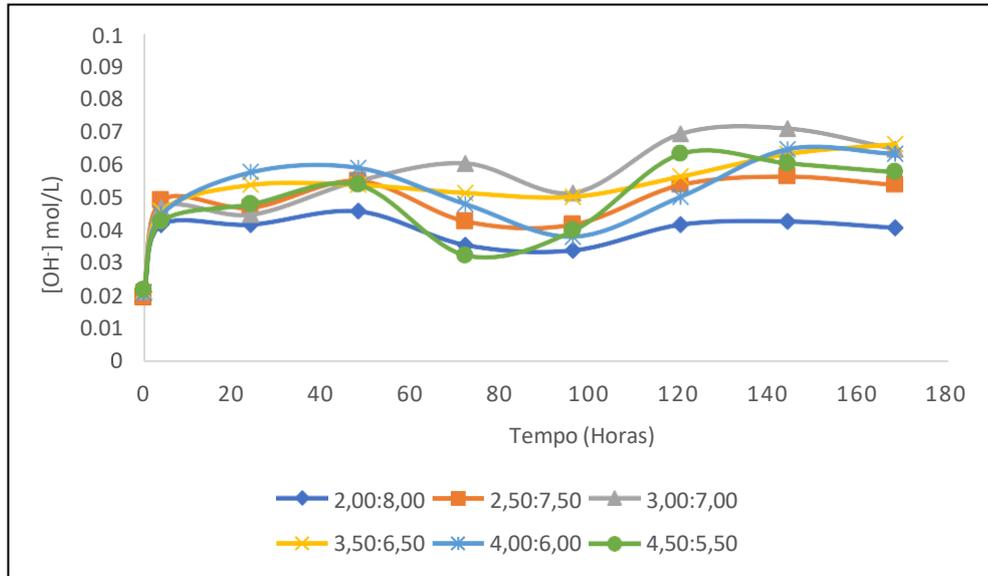
Figura 22 - Condutividade Elétrica da CCB.

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Desta maneira, concluiu-se que a cinza da casca de banana não apresentou características de material pozolânico.

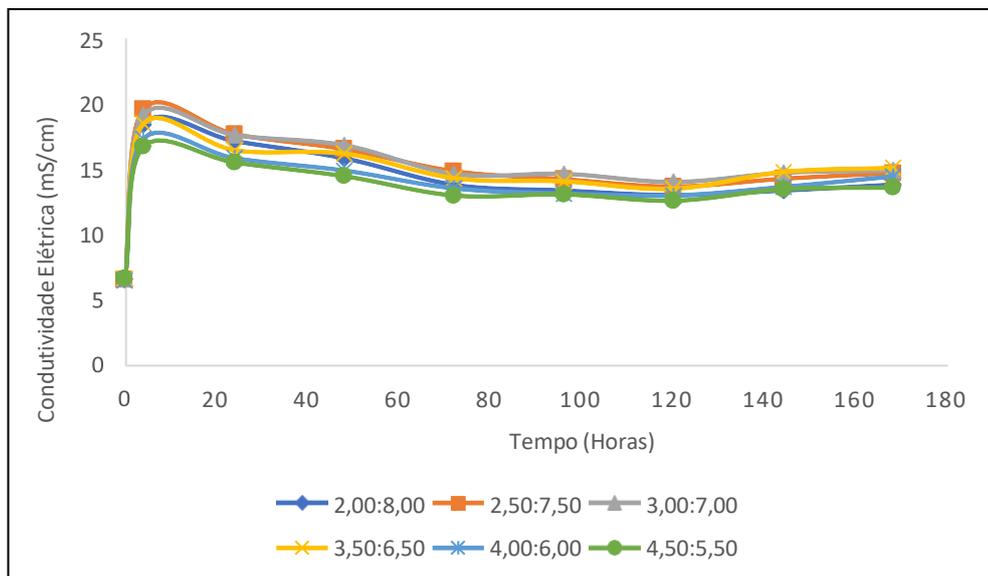
5.2.2. Cinza da Casca de Café (CCC)

A Figura 23 apresenta o gráfico referente à concentração de hidroxilas das soluções contendo a cinza da casca de café. Notou-se que ao longo do teste houve uma oscilação dos valores para todas as proporções analisadas. Quanto aos valores finais, estes foram maiores do que os iniciais, o que indica que houve a liberação de íons hidroxila na solução; e que a taxa desta foi superior a referente ao consumo desses mesmos íons presentes na solução.

Figura 23 - [OH⁻] da CCC.

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A Figura 24 fornece os valores quanto à condutividade elétrica das soluções contendo a CCC. Houve uma liberação significativa de íons durante as quatro horas iniciais de ensaio, conforme pode ser percebido devido ao aumento da condutividade das proporções. Embora os valores tenderam à redução após este intervalo, os mesmos ainda foram superiores aos apresentados inicialmente. Isto se encontra em acordo com o que fora observado pela técnica de FRX realizada, uma vez que a soma dos teores de sílica, alumina e ferro não correspondem a mais que 50% do conteúdo da cinza.

Figura 24 - Condutividade Elétrica da CCC.

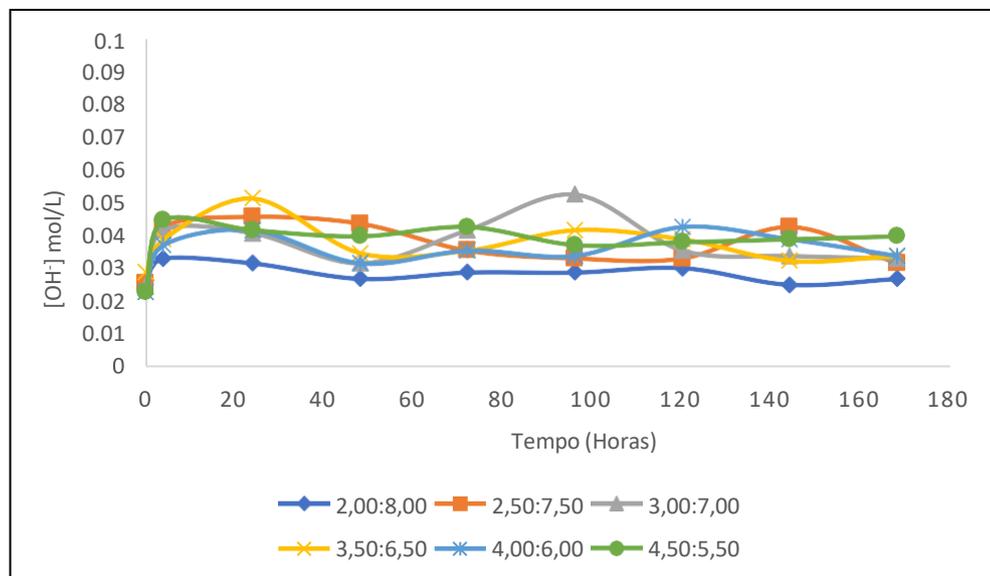
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Desta maneira, concluiu-se que a cinza da casca de café não apresentou características de material pozolânico.

5.2.3. Cinza da Casca de Soja (CCS)

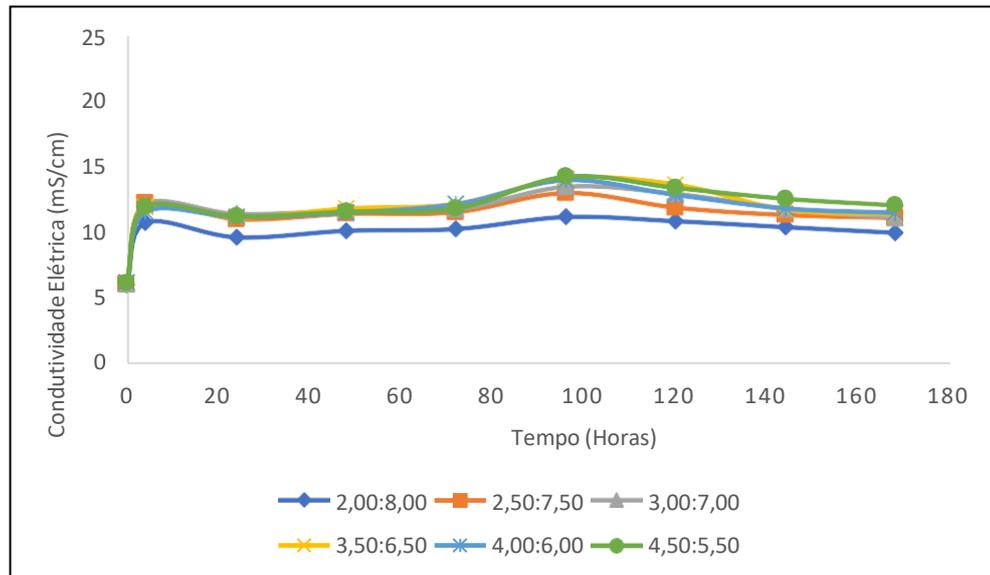
Os valores referentes à concentração de hidroxila das soluções contendo a cinza da casca de soja estão representados na Figura 25. Nesta, observa-se uma oscilação dos valores, o que pode significar que não houve nem liberação de íons hidroxila, nem o consumo destes. Os valores finais foram sutilmente maiores do que os apresentados inicialmente, sendo uma ascensão insignificante.

Figura 25 - $[\text{OH}^-]$ da CCS.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Os valores referentes à condutividade elétrica das soluções contendo a CCS estão representados na Figura 26. Similarmente ao comportamento apresentado pelas soluções contendo a CCB e a CCC, durante as quatro primeiras horas de ensaio, houve um aumento dos valores de condutividade devido à liberação de íons. Após este intervalo, os valores tenderam aproximadamente a uma constância. Os valores finais não foram inferiores aos iniciais. Isto concorda com a técnica de fluorescência de raios X realizada, pois a soma dos teores de óxidos de silício, alumínio e ferro não correspondem a mais que 50% do conteúdo da cinza.

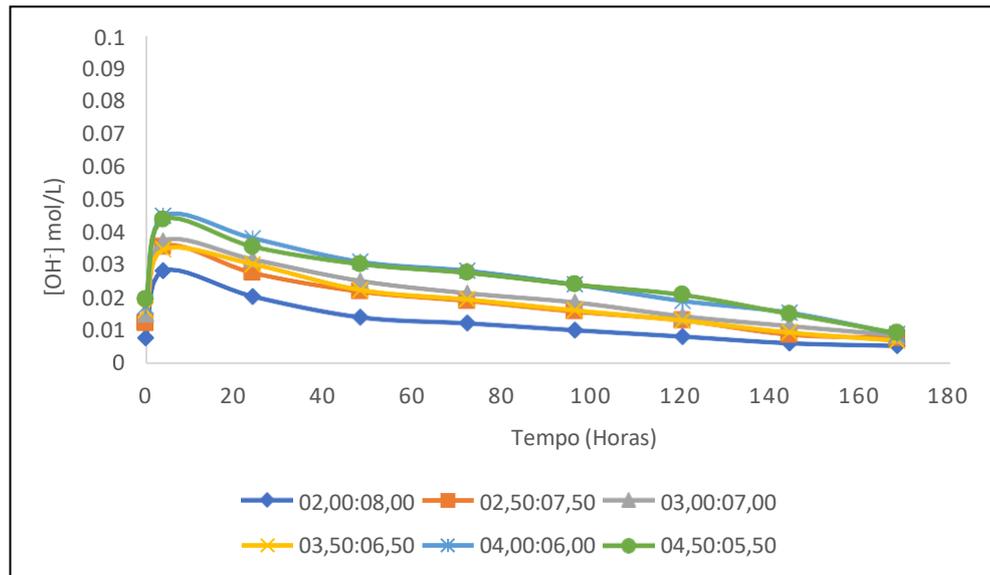
Figura 26 - Condutividade Elétrica da CCS.

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Desta maneira, concluiu-se que a cinza da casca de soja não apresentou características de material pozolânico.

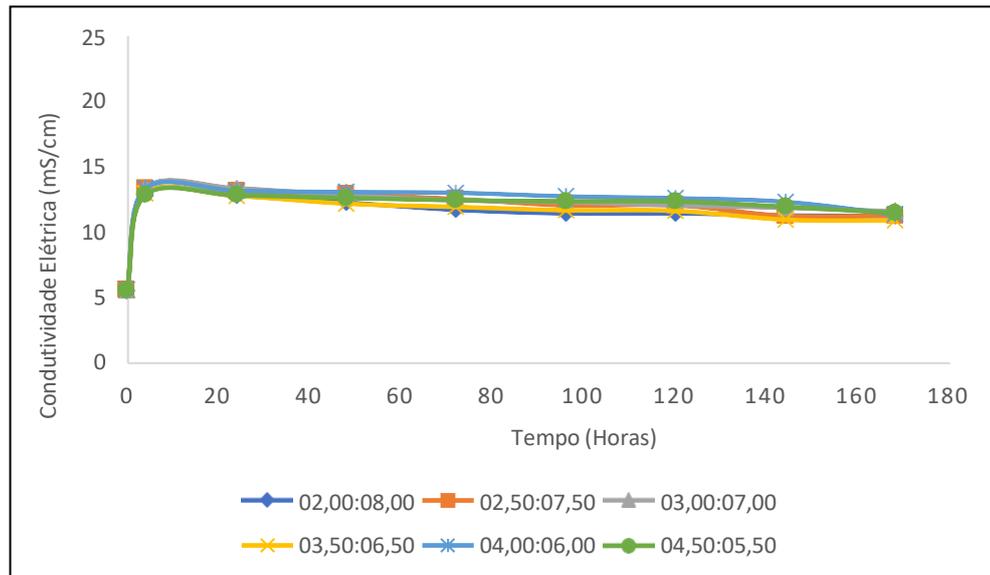
5.2.4. Cinza da Casca de Laranja (CCL)

Os valores referentes à concentração de hidroxila das soluções contendo a cinza da casca de laranja se encontram na Figura 27. Durante as quatro primeiras horas de teste ocorreu um aumento de $[\text{OH}^-]$, indicando um processo de liberação de íons na solução. Todavia, após este período, para a situação de todas as proporções estudadas, os mesmos valores foram reduzidos, atingindo valores finais inferiores aos apresentados inicialmente. Contudo, importante ressaltar que, segundo os dados obtidos pela técnica de FRX, a cinza apresentou baixo teor de sílica, alumina e ferro. Logo, a redução de valores apresentados não se relaciona com a reatividade pozolânica.

Figura 27 - [OH⁻] da CCL.

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A Figura 28 fornece os valores quanto à condutividade elétrica das soluções contendo a CCL. O mesmo aumento apresentado na curva de concentração de hidroxila ocorreu na curva de condutividade durante o mesmo intervalo de tempo; o que indica o processo de liberação de íons. Entretanto, os valores foram sutilmente reduzidos posteriormente, mantendo-se uma situação de valores aproximadamente constantes (uma vez que a redução não foi significativa). Todas as proporções estudadas apresentaram valores finais maiores do que os iniciais, demonstrando que a cinza foi incapaz de consumir quantidade suficiente de íons liberados. Isto está de acordo com a análise de FRX, uma vez que a soma das porcentagens de sílica, alumina e ferro não satisfaz o critério normativo.

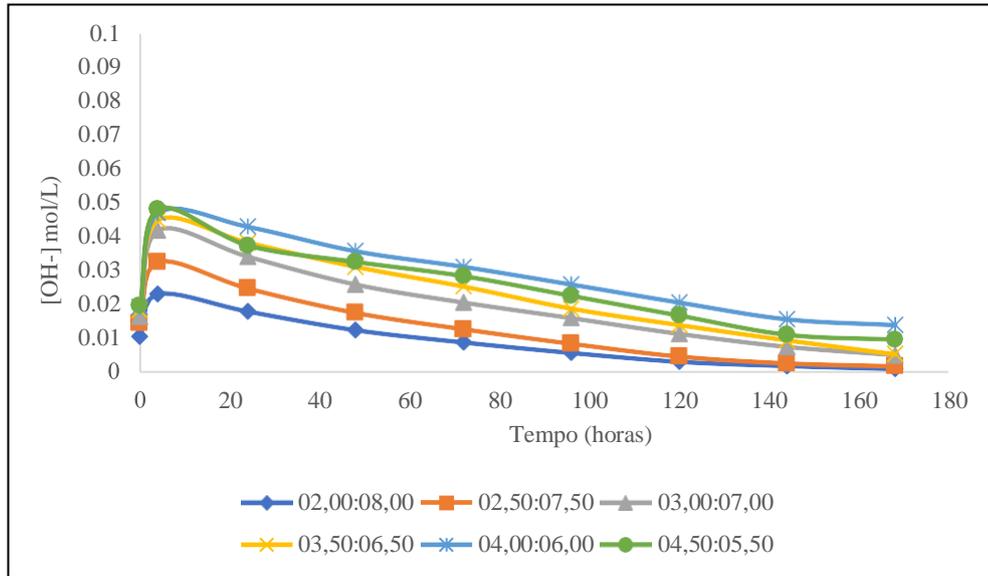
Figura 28 - Condutividade Elétrica da CCL.

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Desta maneira, concluiu-se que a cinza da casca de laranja não apresentou características de material pozolânico.

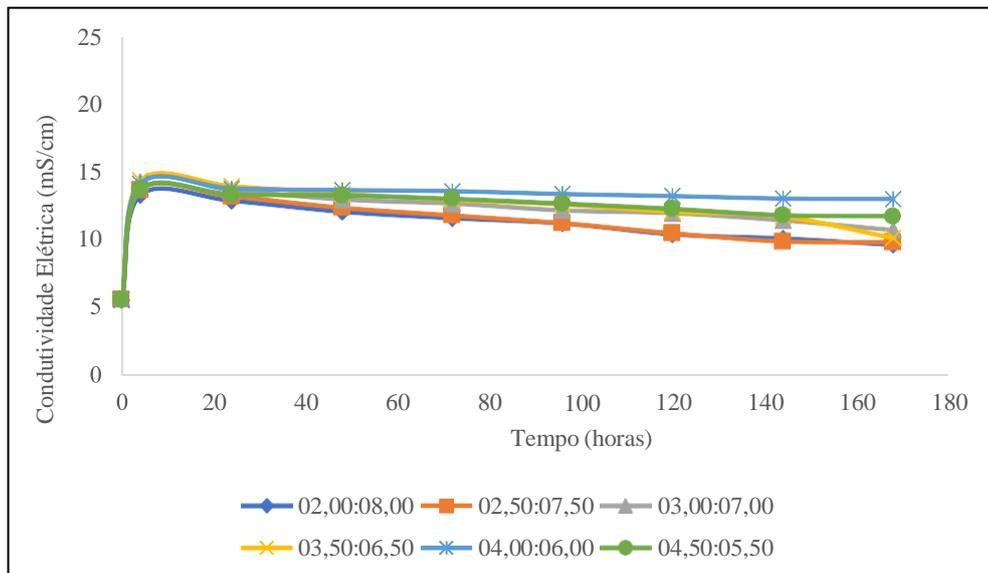
5.2.5. Cinza da Palha de Milho (CPM)

A Figura 29 apresenta o gráfico referente à concentração de hidroxilas das soluções contendo a cinza da palha de milho. Verificou-se a ascensão dos valores de concentração nas quatro horas iniciais do teste. Posteriormente, contudo, a concentração de todas as proporções foi reduzida, obtendo valores finais inferiores aos iniciais.

Figura 29 - [OH⁻] da CPM.

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Quanto aos valores referentes à condutividade elétrica contendo a CPM, estes estão representados na Figura 30. A curva apresentou aumento de valores até aproximadamente quatro horas de ensaio, conforme também foi apresentado pela curva de concentração de hidroxila. Após isto houve uma redução não muito significativa da condutividade, ao ponto que os valores finais não atingiram valores inferiores aos iniciais. Isto se encontra em acordo com a análise de fluorescência de raios X, pois a soma das porcentagens de óxidos de silício, alumínio e ferro não correspondem a mais que 50% do conteúdo da cinza.

Figura 30 - Condutividade Elétrica da CPM.

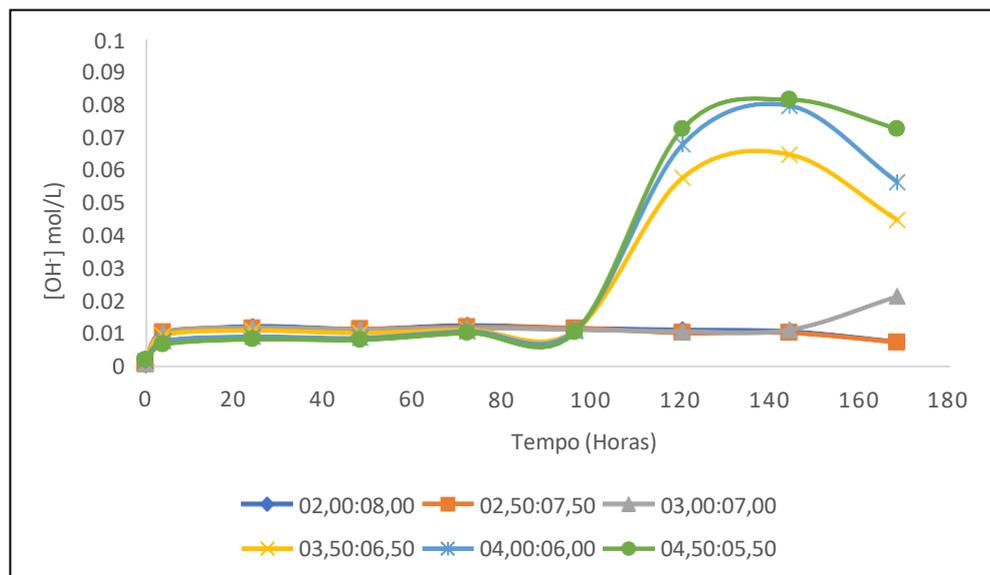
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Desta maneira, concluiu-se que a cinza da palha de milho não apresentou características de material pozolânico.

5.2.6. Cinza da Folha de Bananeira (CFBN)

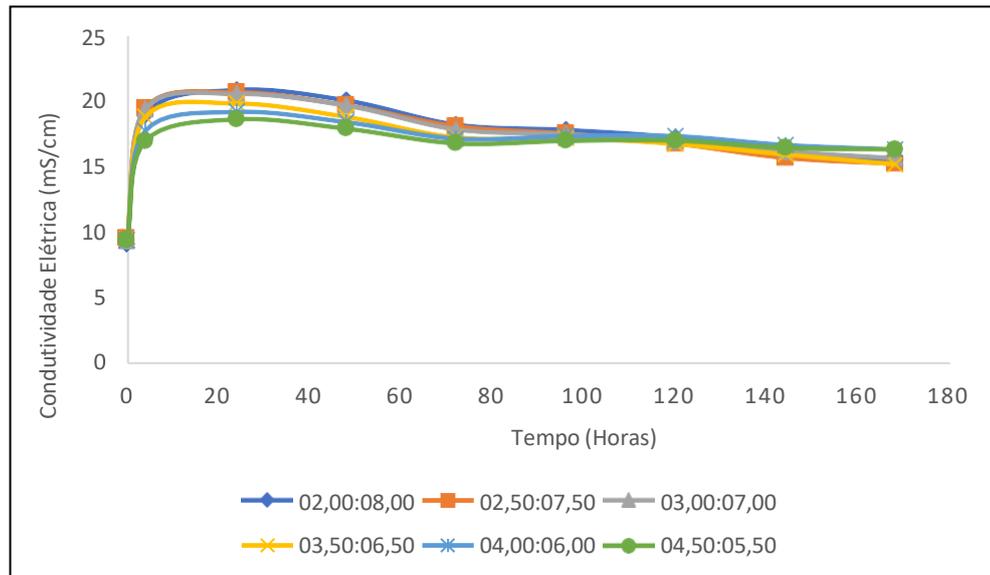
A Figura 31 apresenta o gráfico referente à concentração de hidroxilas das soluções contendo a cinza da folha de bananeira. Não foram observadas variações significativas de valores na concentração até as 120 horas de ensaio, para a situação de todas as proporções. Posteriormente, contudo, as proporções 2:8, 2,5:7,5 e 3:7 apresentaram liberação de íons de OH^- , conforme percebe-se pelo aumento de concentração. Não foi encontrada uma explicação razoável para justificar essa ascensão apresentada. Quanto às demais proporções, estas mantiveram valores praticamente constantes.

Figura 31 - $[\text{OH}^-]$ da CFBN.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A curva de condutividade elétrica das soluções contendo a CFBN está representada pela Figura 32. Esta apresentou um aumento da condutividade nas quatro horas iniciais de teste. Após isto, houve um comportamento de redução. Porém, os valores finais foram maiores que os iniciais. Isto se encontra em acordo com a análise de FRX, uma vez que a somatória dos teores de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 não satisfaz o critério normativo.

Figura 32 - Condutividade Elétrica da CFBN.

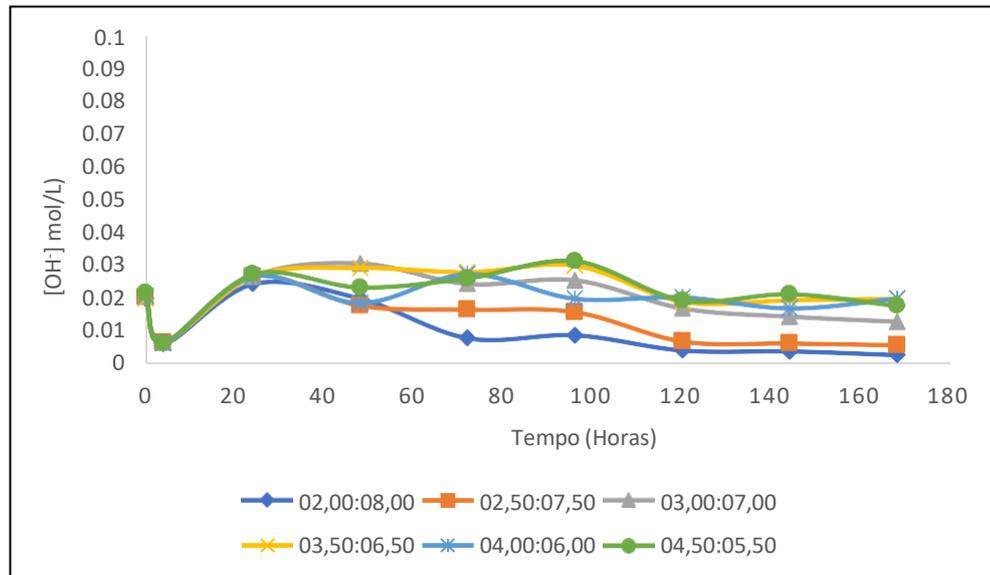
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Desta maneira, concluiu-se que a cinza da folha de bananeira não apresentou características de material pozolânico.

5.2.7. Cinza da Casca de Arroz (CCA)

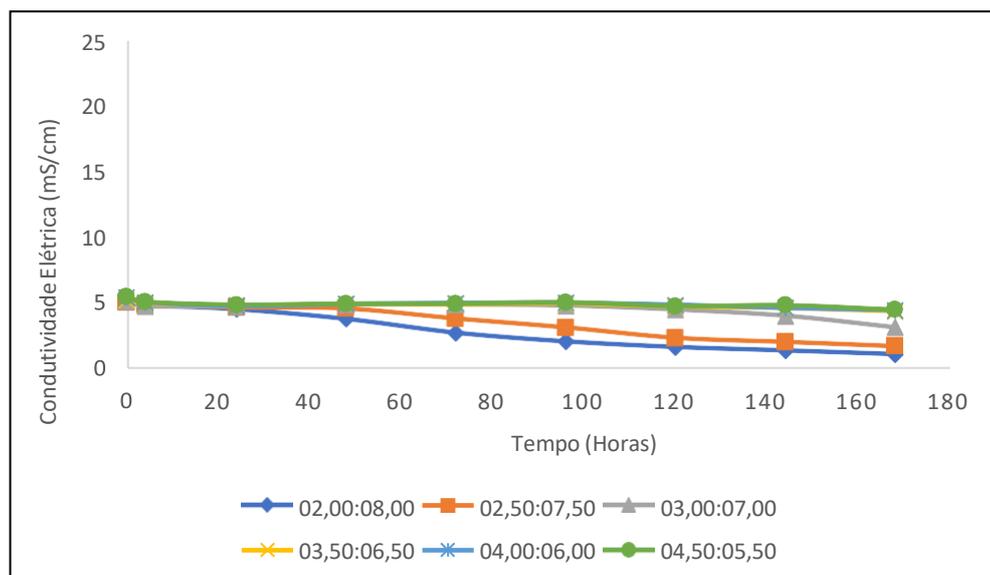
Embora já se tenha a informação de que a CCA é um material pozolânico, o objetivo da presente análise consistiu em obter dados que possibilitassem classificar essa cinza segundo a sua reatividade pozolânica. O mesmo pode ser dito quanto à análise feita para a cinza do bagaço de cana-de-açúcar.

A curva de concentração de hidroxila das soluções contendo a cinza da casca de arroz está representada na Figura 33. Percebeu-se uma redução de $[OH^-]$ aproximadamente nas quatro primeiras horas de ensaio. Após isto, houve uma oscilação de valores. No entanto, os valores finais foram inferiores ou iguais aos apresentados inicialmente.

Figura 33 - [OH⁻] da CCA.

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A curva de condutividade elétrica das soluções contendo a CCA está representada pela Figura 34. Nesta, observou-se que todas as proporções apresentaram redução na condutividade, com destaque para as proporções com maior teor de cinza (que apresentaram, portanto, melhores resultados de reatividade pozolânica). Isto demonstra que a cinza foi capaz tanto de consumir os íons liberados pelo hidróxido de cálcio dissolvido, quanto de manter esse consumo conforme o hidróxido continuava a ser dissolvido, uma vez que a solução se encontrava saturada de CH.

Figura 34 - Condutividade Elétrica da CCA.

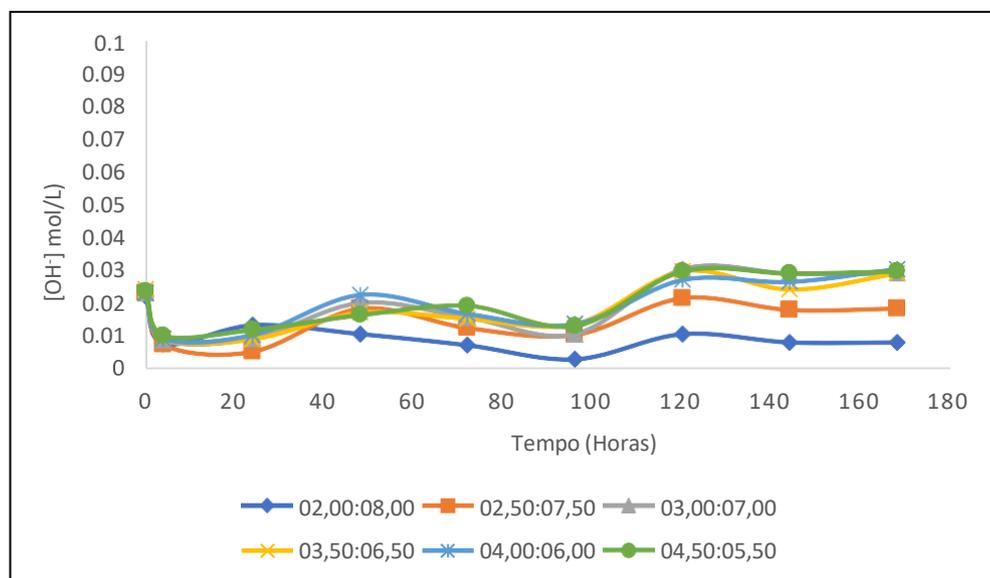
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Desta maneira, a cinza da casca de arroz apresentou características de material pozolânico e, portanto, será classificada no subtópico seguinte.

5.2.8. Cinza do Bagaço de Cana-de-Açúcar (CBC)

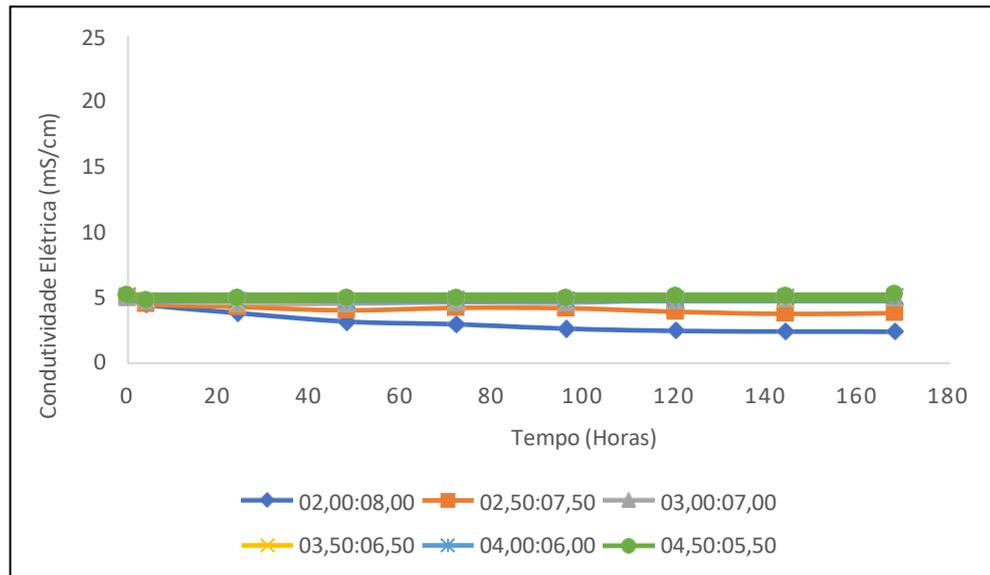
A Figura 35 apresenta o gráfico referente à concentração de hidroxilas das soluções contendo a cinza do bagaço da cana-de-açúcar. Notou-se uma oscilação dos valores de concentração ao longo da duração do ensaio. Quanto aos valores finais obtidos, nem todos foram inferiores aos iniciais; todavia, a diferença entre esses valores extremos (inicial e final) não foi significativa.

Figura 35 - [OH⁻] da CBC.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A Figura 36 fornece os valores quanto à condutividade elétrica das soluções contendo a CBC. Constatou-se a redução da condutividade na maioria das proporções estudadas; ou seja, quase todos os valores finais foram inferiores aos iniciais. Isto demonstra que a cinza foi capaz de consumir os íons liberados pelo CH dissolvido, assim como foi capaz de manter esse consumo conforme o hidróxido continuava a ser dissolvido, uma vez que a solução se encontrava saturada de hidróxido de cálcio.

Figura 36 - Condutividade Elétrica da CBC.

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Desta maneira, a cinza do bagaço de cana-de-açúcar apresentou características de material pozolânico e, portanto, será classificada no subtópico seguinte.

5.3. CLASSIFICAÇÃO DA REATIVIDADE POZOLÂNICA DAS CINZAS

A avaliação do potencial pozolânico é baseada no método proposto por Tashima *et al.* (2014), cujo objetivo consistiu em avaliar a reatividade pozolânica de misturas minerais através da análise do pH e da condutividade elétrica.

Com isto, propôs-se avaliar o tempo necessário para que a solução alcançasse a insaturação do hidróxido de cálcio, que seria consumido pela reação pozolânica do material de estudo. Este tempo está relacionado com a perda de condutividade em 30%, sendo que esta consiste em uma porcentagem de segurança devido à situação de que a solução saturada apresentou valores inferiores a esses 30%.

Quanto aos valores referentes ao pH para suspensões em que o hidróxido de cálcio se encontrava saturado, estes permaneceram praticamente constantes durante a realização do ensaio, apresentando apenas variações em torno de 0,15 unidades em relação ao valor inicial. Logo, determinou-se que a variação maior que 0,15 unidades corresponderia à insaturação do hidróxido de cálcio.

Diante estas considerações, foram classificadas as reatividades pozolânicas da cinza da casca de arroz e da cinza do bagaço de cana-de-açúcar.

Tomando como exemplo a proporção 2:8 da cinza da casca de arroz, a Tabela 5 apresenta os valores obtidos quanto ao pH e à condutividade elétrica.

Tabela 5 - Valores de pH e Condutividade Elétrica para a proporção de 2:8 da CCA.

Horas	pH	[OH ⁻]	Condutividade Elétrica
0	12,29	0,01950	5,02
4	11,77	0,00589	4,77
24	12,38	0,02399	4,47
48	12,29	0,01950	3,74
72	11,88	0,00759	2,70
96	11,93	0,00851	2,05
120	11,59	0,00389	1,63
144	11,56	0,00363	1,37
168	11,4	0,00251	1,09

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Assim, fazendo-se uso da Equação 2, obtém-se a perda de condutividade entre o início do ensaio (t = 0 hora) e durante t = 4 horas.

$$Lc(\%)_{0-4} = \frac{5,02 - 4,77}{5,02} * 100$$

$$Lc(\%)_{0-4} = 4,98\%$$

Nota-se que a perda de condutividade obtida foi menor que a porcentagem de segurança de 30%. Desta maneira, repete-se o cálculo, agora entre o início do ensaio (t = 0 horas) e durante t = 24 horas.

$$Lc(\%)_{0-24} = \frac{5,02 - 4,47}{5,02} * 100$$

$$Lc(\%)_{0-24} = 10,96\%$$

O valor obtido ainda se encontra abaixo da porcentagem de segurança. Desta maneira, repete-se o procedimento utilizando a Equação 2 até que seja obtido um valor superior à porcentagem de 30%. No caso da proporção 2:8 da CCA, este resultado foi obtido com os dados referentes ao início do ensaio (t = 0 horas) e durante t = 72 horas; conforme é possível observar no cálculo a seguir.

$$Lc(\%)_{0-72} = \frac{5,02 - 4 = 2,70}{5,02} * 100$$

$$Lc(\%)_{0-72} = 46,22\%$$

Percebe-se que a perda de condutividade obtida já ultrapassou a porcentagem de segurança de 30%. Também, a diferença entre o pH no tempo inicial de teste e o apresentado após 72 horas de ensaio é equivalente a 0,41; valor este superior à variação de 0,15 unidades em relação ao valor inicial. Logo, conclui-se que a insaturação do CH já ocorreu.

Feito isto, para obter o tempo de insaturação, basta realizar a seguinte relação:

$$72 \text{ horas} - 48 \text{ horas} \text{ --- } 46,22\% - 25,50\%$$

$$t_{\text{ins}} - 48 \text{ horas} \text{ --- } 30\% - 25,50\%$$

Realizando o cálculo referente a essa interpolação, obtém-se um tempo de insaturação equivalente a 53,22 horas.

Seguindo a sequência de cálculos demonstrados para as demais proporções da CCA e para as proporções da CBC, obtém-se os valores encontrados na Tabela 6.

Tabela 6 - Classificação da Reatividade Pozolânica das Cinzas Estudadas.

CCA	ΔpH	t_{ins} (horas)	CBC	ΔpH	t_{ins} (horas)
2,0:8,0	0,41	53,22	2,0:8,0	0,32	35,13
2,5:7,5	0,11	81,67	2,5:7,5	-	-
3,0:7,0	0,21	155,70	3,0:7,0	-	-
3,5:6,5	-	-	3,5:6,5	-	-
4,0:6,0	-	-	4,0:6,0	-	-
4,5:5,5	-	-	4,5:5,5	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Concluiu-se, assim, que todas as cinzas ficaram na zona de baixa reatividade. Isto se deve, conforme fora comentando após analisar os resultados de DRX, à grande quantidade de picos de minerais cristobalita e tridimita identificados para a CCA e a contaminantes do solo para a CBC.

A cinza mais reativa foi a cinza da casca de arroz, seguida pela cinza do bagaço de cana-de-açúcar.

6. CONCLUSÃO

A caracterização química das cinzas, realizada através da técnica de espectrometria de fluorescência de raios X (FRX), constatou que todas as cinzas teste (cinza da casca de banana, cinza da casca de café, cinza da casca de soja, cinza da casca de laranja, cinza da palha de milho e cinza da folha de bananeira) apresentaram baixo teor de sílica, alumina e ferro. A somatória desses teores não satisfaz o valor mínimo de 50% requerido pela norma ABNT NBR 12653:2014, versão corrigida:2015 para que fosse possível classificar as cinzas como materiais pozolânicos. As cinzas parâmetro (cinza da casca de arroz e cinza do bagaço de cana-de-açúcar), por outro lado, apresentaram alto teor de sílica, obtendo uma somatória de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 maior do que a requerida pelo critério normativo.

Quanto à caracterização mineralógica das cinzas, realizada através da técnica de difratometria de raios X (DRX), observou-se o destaque dos elementos químicos potássio e cálcio presentes nas mesmas, enquanto a presença do elemento químico silício foi insignificante (sendo apenas identificado sutilmente no DRX da cinza da casca de soja); concordando, assim, com os resultados apresentados pela técnica de FRX. No caso das cinzas parâmetro, entretanto, houve destaque para a presença do elemento Si na composição mineralógica de ambas. No entanto, a presença dos minerais cristobalita e tridimita influenciaram na reatividade pozolânica da cinza da casca de arroz, reduzindo-a. Quanto o caso da cinza do bagaço de cana-de-açúcar, a presença de contaminantes do solo também impactou negativamente a reatividade pozolânica dessa mesma cinza.

Os ensaios de pH e de condutividade elétrica demonstraram que nenhuma das cinzas teste estudadas neste trabalho apresentaram características pozolânicas para que pudessem ser classificados como materiais pozolânicos. Estes ensaios também auxiliaram na classificação da reatividade pozolânica apresentada por cada cinza parâmetro; classificando ambas as cinzas como pozolanas pouco reativas. A cinza da casca de arroz foi a que apresentou maior reatividade, sendo seguida pela cinza do bagaço de cana-de-açúcar.

Embora as cinzas teste não apresentaram características de materiais pozolânicos, a utilização destas poderia ser considerada, por exemplo, na aplicação de estudos de temática referente à atividade alcalina, uma vez que essas cinzas apresentaram elevadas porcentagens de cálcio e potássio, segundo os resultados das técnicas de FRX e de DRX.

REFERÊNCIAS

ABRÃO, P. C. R. A.; CARDOSO, F. A.; JOHN, V. M. Efficiency of Portland-pozzolana cements: Water demand, chemical reactivity and environmental impact. **Construction And Building Materials**, [S. l.], v. 247, 2020.

ABRÃO, P. C. R. A. **O uso de pozolanas como materiais cimentícios suplementares: disponibilidade, reatividade, demanda de água e indicadores ambientais**. Orientador: Vanderley Moacyr John. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 143. 2019.

AKBAR, A.; FAROOQ, F.; SHAFIQUE, M; ASLAM, F.; ALYOUSEF, R.; ALABDULJABBAR, H. Sugarcane bagasse ash-based engineered geopolymer mortar incorporating propylene fibers. **Journal of Building Engineering**, [S. l.], v. 33, 2020.

ALMEIDA, A. T. L. de. **Análise do concreto produzido com cinza de casca de arroz e a influência sob altas temperaturas**. Orientador: Lucas Fernando Krug. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Ijuí, 2017.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653 Versão Corrigida: Materiais Pozolânicos: Requisitos**. Rio de Janeiro, p. 6. ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: Cimento Portland: Requisitos**. Rio de Janeiro, p. 12. ABNT, 2018.

ATLAS BIG. **World Sugarcane Production**. [S. l.: s. n.], [201-?].

BARROSO, T. R. **Estudo da atividade pozolânica e da aplicação em concreto de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar com diferentes características físico-químicas**. Orientador: Guilherme Chagas Cordeiro. Dissertação (Mestrado) - Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense. Campos dos Goytacazes, 2011.

BASTO, P. de A.; SAVASTANO JUNIOR, H.; MELO NETO, A. A. de. Characterization and pozzolanic properties of sewage sludge ashes (SSA) by electrical conductivity. **Cement And Concrete Composites**, [S. l.], v. 104, 2019.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. 1.5ª ed. Revisada. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

BELLAVER, G. B. **Influência da temperatura de calcinação da casca de aveia para utilização como material cimentício suplementar**. Orientadora: Denise Carpena Coitinho Dal Molin. Orientadora: Ângela Borges Masuero. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul. Porto Alegre, 2019.

BENSHARADA, M.; TELFORD, R.; STERN, B.; GAFFNEY, V. Loss on ignition versus thermogravimetric analysis: a comparative study to determine organic matter and carbonate content in sediments. **Journal of Paleolimnology**, Bradford, v. 67, p. 191-197, 2022.

BLINOVÁ, L.; SIROTIK, M.; PASTIEROVA, A.; SOLDÁN, M. Review: utilization of waste from coffee production. **Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology**, [S. l.], v. 25, n. 40, p. 91-101, 2017.

BRANDÃO, A. S. **Análise microestrutural da hidratação do cimento Portland com águas residuárias provenientes de estações de tratamento de esgoto predominantemente doméstico**. Orientador: Enio Pontes de Deus. Co-orientador: Antonio Eduardo Bezerra Cabral. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais) - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2020.

BRANDÃO JÚNIOR, J. R.; LOPES, F. F. de M.; OLIVEIRA, H. C. M.; LOPES, J. N. P.; SILVINO, G. S. 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.

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

CORDEIRO, G. C.; LEMOS, M. N.; XAVIER, K. V.; LIMA, C. P. F. de. 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.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. de M. R. Influência da substituição parcial de cimento por cinza ultrafina da casca de arroz com elevado teor de carbono nas propriedades do concreto. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 99-107, 2009.

CORDEIRO, L. de N. P.; PAES, I. N. L.; SOUZA, P. S. L.; AZEVEDO, C. M. Caracterização da cinza de caroço de açaí residual para adição ao concreto. **Ambiente Construído**, [S. l.], v. 19, n. 1, p. 45–55, 2019.

COSTA, E. B. da; NOBRE, T. R. S.; GUERREIRO, A. Q.; MANCIO, M.; KIRCHHEIM, A. P. Clínquer Portland com reduzido impacto ambiental. **Ambiente Construído**, [S. l.], v. 13, n. 2, p.75-86, jun. 2013.

COSTA, L. F. **Estudo do bagaço da cana de açúcar como material para construção civil no estado de Pernambuco: sistema ternário com metacaulim e cal hidratada**. Orientador: Antônio Acacio de Melo Neto. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental) - Centro Acadêmico do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco. Caruaru, 2017.

CURADO, D. N. **Estudo de adição de cinza da folha de bananeira em concreto substituindo parcialmente o cimento Portland**. Orientador: Fernando Moreno Suarte Júnior. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Centro Universitário Luterano de Palmas. Palmas, 2018.

DA SILVA, R. G.; BORTOLLETO, M.; BIGOTTO, S. A. M.; AKASAKI, J. L.; SORIANO, L.; THASIMA, M. M. Effect of wastes from sugar cane industry on the mechanical and hydraulic properties of pervious concrete. **Road Materials and Pavement Design**, [S. l.], 2021.

DEMISSEW, A.; FUFU, F.; ASSEFA, S. Partial replacement of cement by coffee husk ash for c-25 concrete production. **Journal Of Civil Engineering, Science And Technology**, [S. l.], v. 10, n. 1, p. 12-21, 2019.

DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA DOS ESTADOS UNIDOS. **Safra Mundial de Milho 2020/21: 2º Levantamento do USDA**. São Paulo: FIESP, 2020a.

DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA DOS ESTADOS UNIDOS. **Safra Mundial de Soja 2020/21: 3º Levantamento do USDA**. São Paulo: FIESP, 2020b.

DUQUE-ACEVEDO, M.; BELMONTE, L. J.; CORTÉS-GARCIA, F.; CAMACHO-FERRE, F. Agricultural waste: Review of the evolution, approaches and perspectives on alternative uses. **Global Ecology and Conservation**, [S. l.], v. 22, 2020.

EL-DIEB, A. S.; KANAAN, D. M. Ceramic waste powder an alternative cement replacement – Characterization and evaluation. **Sustainable Materials and Technologies**, [S. l.], v. 17, 2018.

FARIAS, G. T. de. **Influência do grau de maturação de folhas de bambu na produção de cinzas pozolânicas e seus efeitos na hidratação e resistência à compressão de pastas de cimento**. Orientador: Romildo Dias Toledo Filho. Orientadora: Amanda Pereira Vieira. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2021.

FERREIRA, E. G. A.; MARUMO, J. T.; FRANCO, M. K. K. D.; YOKAICHIYA, F.; VICENTE, R. 10000 years cement: can hydrated cement last as much as long-lived radionuclides? **Cement and Concrete Composites**, [S. l.], v. 103, p. 339–352, 2019.

FERRETI, M.; TIRELLO, R. A. Princípios e aplicações de espectroscopia de fluorescência de Raios X (FRX) com instrumentação portátil para estudo de bens culturais. **Revista CPC**, São Paulo, v. 7, p.74-98, 2009.

FRANÇA NETA, M. de L. X. de. **Influência da temperatura de calcinação da casca de arroz no comportamento de tijolos ecológicos**. Orientadora: Sâmea Valensca Alves Barros. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Angicos, 2020.

FREITAS, P. G. P.; SANTIN, R. B.; DA SILVA, W. J.; FAZZAN, J. V. Estudo da produção da cinza da palha do milho como material alternativo em substituição ao cimento Portland. *In*: Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP, 11., 2020, Presidente Epitácio. **Anais...** Ilha Solteira: [s. n.], 2020.

GARCIA, E.; CABRAL JUNIOR, M.; QUARCIONI, V. A.; CHOTOLI, F. F. Avaliação da atividade pozolânica dos resíduos de cerâmica vermelha produzidos nos principais polos ceramistas do Estado de S. Paulo. **Cerâmica**, São Paulo, v. 61, p. 251-258, 2015.

GUIGNONE, G. C.; VIEIRA, G. L.; ZULCÃO, R.; MION, G.; BAPTISTA, G. Analysis of the chloride diffusion coefficients by different test methods in concrete mixtures containing metakaolin and high-slag blast-furnace cement. **Revista Materia**, [S. l.], v. 24, n. 4, 2019.

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**, [S. l.], v. 25, p. 101-110, 2001.

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

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**, [S. l.], v. 264, 2020.

IKUMAPAYI, C. M.; ARUM, C.; ALANEME, K. K. Reactivity and hydration behavior in groundnut shell ash based pozzolanic concrete. **Materials Today: Proceedings**, Akure, v. 38, p. 508-513, 2021.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Buildings. [S. l.]: IEA, 2020a.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Cement. [S. l.]: IEA, 2020b.

ISAIA, G. C.; ZERBINO, R. L.; GASTALDINI, A. L. G.; SENSALÉ, G. R. Viabilidade do emprego de cinza de casca de arroz natural em concreto estrutural (parte II): durabilidade. **Ambiente Construído**, [S. l.], v. 17, n. 2, p. 233–252, 2017.

ISMAIL, A. H.; KUSBIANTORO, A.; CHIN, S. C.; MUTHUSAMY, K.; ISLAM, M.; TEE, K. F. Pozzolanic reactivity and strength activity index of mortar containing palm oil clinker pretreated with hydrochloric acid. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 242, 2020.

JUNCKES, R. **Influência da adição de cinza volante na elevação de temperatura de concretos aplicados em blocos de fundação**. Orientador: Luiz Roberto Prudêncio Junior. Dissertação (Pós-Graduação de Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2015.

KASANIYA, M.; THOMAS, M. D. A.; MOFFATT, E. G. Pozzolanic reactivity of natural pozzolans, ground glasses and coal bottom ashes and implication of their incorporation on the chloride permeability of concrete. **Cement and Concrete Research**, [S. l.], v. 139, 2021.

KANNING, R. C.; PORTELLA, K. F.; BRAGANÇA, M. O. G. P.; BONATO, M. M.; SANTOS, J. C. M. dos. Banana leaves ashes as pozzolan for concrete and mortar of Portland cement. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 54, p. 460-465, 2014.

KREJCIRIKOVA, B.; OTTOSEN, L. M.; KIRKELUND, G. M.; RODE, C.; PEUHKURI, R. Characterization of sewage sludge ash and its effect on moisture physics of mortar. **Journal of Building Engineering**, [S. l.], v. 21, p. 396-403, 2019.

LAPO, B.; BOU, J. J.; HOYO, J.; CARRILLO, M.; PEÑA, K.; TZANOV, T.; SASTRE, A. M. A potential lignocellulosic biomass based on banana waste for critical rare earths recovery from aqueous solutions. **Environmental Pollution**, [S. l.], v. 264, 2020.

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

LIN, L.-K.; KUO, T.-M.; HSU, Y.-S. The application and evaluation research of coffee residue ash into mortar. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, [S. l.], v. 18, n. 3, p. 541-551, 2015.

LUXÁN, M. P.; MADRUGA, F.; SAAVEDRA, J. Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. **Cement And Concrete Research**, [S. l.], v. 19, n. 1, p.63-68, 1989.

LYRA, G. P.; BORRACHERO, M. V.; SORIANO, L.; PAYÁ, J.; ROSSIGNOLO, J. A. Comparison of original and washed pure sugar cane bagasse ashes as supplementary cementing materials. **Construction and Building Materials**, v. 272, 2021.

MAJUMDAR, A. J.; LARNER, L. J. The measurement of pozzolanic activity. **Cement and Concrete Research**, [S. l.], v. 7, n. 2, p. 209-210, 1977.

MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K. **Pozzolanic and Cementitious Materials**. 1 ed. [S. l.]: CRC Press, 1996.

MANAN, T. S. B. A.; KAMAL, N. L. M.; BEDDU, S.; KHAN, T.; MOHAMAD, D.; SYAMSIR, A.; ITAM, Z.; JUSOH, H.; BASRI, N. A. N.; MOHTAR, W. H. M. W.; ISA, M. H.; SHAFIQ, N.; AHMAD, A.; RASDI, N. W. Strength enhancement of concrete using incinerated agricultural waste as supplementary cement materials. **Scientific Reports**, [S. l.], v. 11, 2021.

MANSANEIRA, E. C.; SCHWANTES-CEZARIO, N.; BARRETO-SANDOVAL, G. F.; MARTINS-TORALLES, B. Sugar cane bagasse ash as a pozzolanic material. **DYNA**, Colombia, v. 84, n. 201, p. 163–171, 2017.

MARIA, S. P. **Estudo da adição de cinza de folha de bananeira em argamassas**. Orientador: Rodrigo César Kanning. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2011.

MASSAZZA, F. Pozzolana and pozzolanic cements. *In*: HEWLETT, P.; BENSTED, J.; BLEZAR, R. G.; BROWN, B.; CAPMAS, A.; EDMEADES, R. M.; EGLINTON, M.; FIDJESTEL, P.; GLASSER, F. P.; JACKSON, P. T.; LACHOWSKI, E. E.; LAWRENCE, C. D.; LEWIS, R.; MACPHEE, D. E.; MASSAZZA, F.; MORANVILLE-REGOURD, M.; ODLER, I.; SCRIVENER, K. L.; SIMS, I. **Lea's chemistry of cement and concrete**. 4. ed. [S. l.]: Elsevier Science & Technology Books, 2004. Cap. 10, p. 471–502.

MEMON, S. A.; KHAN, M. K. Ash blended cement composites: Eco-friendly and sustainable option for utilization of corncob ash. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 175, p. 442-455, 2018.

MISTRI, A.; BHATTACHARYYA, S. K.; DHAMI, N. K.; BARAI, S. V.; MUKHERJEE, A. A review on different treatment methods for enhancing the properties of recycled aggregates for sustainable construction materials. **Construction And Building Materials**, [S. l.], v. 233, 2020.

MOAYEDI, H.; AGHEL, B.; ABDULLAHI, M. M.; NGUYEN, H.; RASHID, A. S. A. Applications of rice husk ash as green and sustainable biomass. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 237, 2019.

MOHAMAD, N.; SAMAD, A. A. A.; LAKHIAR, M. T.; MYDIN, M. A. O.; JUSOH, S.; SOFIA, A.; EFENDI, S. A. 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**, [S. l.], v. 10, n. 9, p. 69-76, 2018.

MOHAMAD, N.; IMAN, M. A.; SAMAD, A. A. A.; MYDIN, M. A. O.; JUSOH, S. M.; SUFIAN, A. S.; AZIZ, S. K. A.; LEE, B. 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**, [S. l.], v. 601, 2019.

MORAES, J. C. B. de. **Utilização da cinza de folha de cana-de-açúcar como material pozolânico em matrizes cimentantes**. Orientador: Mauro Mitsuchi Tashima. Co-Orientador: José Luiz Pinheiro Melges. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, 2015.

MORAES, J. C. B. de; CORDEIRO, G. C.; AKASAKI, J. L.; VIEIRA, A. P.; PAYÁ, J. 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**, [S. l.], v. 270, 2021.

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**. Orientador: Jorge Luís Akasaki. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, 2019.

MORAES, M. J. B.; MORAES, J. C. B.; TASHIMA, M. M.; AKASAKI, J. L.; SORIANO, L.; BORRACHERO, M; V.; PAYÁ, J. Production of bamboo leaf ash by auto-combustion for pozzolanic and sustainable use in cementitious matrices. **Construction And Building Materials**, [S. l.], v. 208, p. 369-380, 2019.

MORAIS, B. B.; DA SILVA, L. P.; LIMA, L. R.; INÁCIO, R. F.; SANTOS, R. S.; PRADO, R. A.; SOUSA, W. I. C. de. Análise das propriedades do concreto com variação dos tipos de cimento. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, [S. l.], v. 1, p. 5–25, 2020.

MOTA, D. M. P.; DINIZ, S. J. da S.; REIS, A. C. M.; ALCÂNTARA, D. S.; COSTA, E. H. G.; CAMPOS, G. S.; ABREU, L. de O.; CARVALHO, N. de. Adição Da Cinza Da Folha De Bananeira Na Argamassa. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, [S. l.], v. 9, p. 55-69, 2020.

NERGIS, D. D. B.; ABDULLAH, M. M. A. B.; SANDU, A. V.; VIZUREANU, P. XRD and TG-DTA study of new alkali activated materials based on fly ash with sand and glass powder. **Materials**, [S. l.], v. 13, n. 2, 2020.

NNOCHIRI, E. S.; ADERINLEWO, O. Geotechnical properties of lateritic soil stabilized with banana leaves ash. **FUOYE Journal of Engineering and Technology**, [S. l.], v. 1, n. 1, p. 116–119, 2016.

NUNES, C. L. C.; GARCIA, R.; CHIZZOTTI, M.; ROSEIRA, J. P. S.; RIBEIRO, E. T.; VELOSO, C. M. Performance, carcass traits and meat quality of lambs fed coffee hulls treated with calcium oxide. **Animal Feed Science and Technology**, [S. l.], v. 264, 2020.

OLIVEIRA, A. L. B. de. **Estudo da substituição de agregados miúdos por resíduos de borracha de pneu, poliestireno expandido e casca de soja em argamassa geopolimérica à base de metacaulim**. Orientadora: Leila Aparecida de Castro Motta. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2020.

OLIVEIRA, M. A. B. de; UMBUZEIRO, C. E. M.; ASSUNÇÃO, W. R. de; DA CUNHA, B. B.; FERNANDES, R. da S.; MACÊDO, A. N. Potencialidades da cinza de biomassa do beneficiamento de óleo de palma para materiais à base de cimento. Parte I: caracterização microestutural, mineralógica e atividade pozolânica. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 7, n. 3, p. 27972-27986, 2021.

OLUBAJO, O. O.; ODEY, O. A.; ABDULLAHI, B. Potential of orange peel ash as a cement replacement material. **Path of Science**, [S. l.], v. 5, n. 7, p. 2009–2019, 2019.

O que é coprocessamento e como ele ajuda o meio ambiente. **Ecoassist**, [S. l.], [21--].

ORTIZ, D. L.; BATUECAS, E.; ORREGO, C. E.; RODRÍGUEZ, L. J.; CAMELIN, E.; FINO, D. Sustainable management of peel waste in the small-scale orange juice industries: A Colombian case study. **Journal of Cleaner Production journal**, [S. l.], v. 265, 2020.

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.

PAULA, S. de. **Análise do comportamento mecânico de concretos em situações de incêndio com a substituição parcial de cimento por cinza de casca de arroz**. Orientadora: Débora Pedroso Righi Kohler. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade do Vale do Taquari. Lajeado, 2020.

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.

PAYÁ, J.; BORRACHERO, M. V.; MONZO, J.; MORA, E. P.; AMAHJOUR, F. Enhanced conductivity measurement techniques for evaluation of fly ash pozzolanic activity. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 41-49, 2001.

PEREIRA, A. M.; MORAES, J. C. B.; AKASAKI, J. L.; THASIMA, M. M.; SORIANO, L.; MONZÓ, J.; PAYÁ, J. Valorisation of sugarcane bagasse ash (SCBA) with high quartz content as pozzolanic material in Portland cement mixtures. **Materiales de Construcción**, [S. l.], v. 68, n. 330, p. 1–10, 2018.

PONTES, V. C. P. **Efeitos dos sulfatos na degradação do concreto**. Orientador: Paulo Germano Toscano Moura. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2019.

QUDOOS, A.; KIM, H. G.; REHMAN, A.-u.; RYOU, J.-S. Effect of mechanical processing on the pozzolanic efficiency and the microstructure development of wheat straw ash blended cement composites. **Construction and Building Materials**, Seongdong Gu, v. 193, p. 481-490, 2018.

QUEDOU, P. G.; WIRQUIN, E.; BOKHOREE, C. Sustainable concrete: Potency of sugarcane bagasse ash as a cementitious material in the construction industry. **Case Studies in Construction Materials**, [S. l.], v. 14, 2021.

RAASK, E.; BHASKAR, M. C. Pozzolanic activity of pulverized fuel ash. **Cement And Concrete Research**, [S. l.], v. 5, n. 4, p.363-375, 1975.

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**, [S. l.], v. 6, n. 6, p. 152-158, 2019.

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. **Blucher**, São Paulo, p. 3414-3417, 2018.

RUAN, Z.; WANG, X.; LIU, Y.; LIAO, W. Corn. *In*: PAN, Z.; ZHANG, R.; ZICARI, S. **Integrated Processing Technologies for Food and Agricultural By-Products**. 1. ed. [S. l.]: 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**, [S. l.], v. 12, n. 9, 2020.

SANTOS, E. S. Espectrometria de fluorescência de raios-x na determinação de espécies químicas. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v. 9, n. 17, 2013.

SANTOS, M. J. L.; TEXEIRA, C. M. de L. Importância dos métodos analíticos de DRX e FRX para caracterização das argilas. **Revista FENEC**, João Pessoa, p. 339-345, 2017.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. **Cement And Concrete Research**, [S. l.], v. 114, p.2-26, 2018.

SHAKOURI, M.; EXSTROM, C. L.; RAMANATHAN, S.; SURANENI, P.; VAUX, J. S. Pretreatment of corn stover ash to improve its effectiveness as a supplementary cementitious material in concrete. **Cement and Concrete Composites**, [S. l.], v. 112, 2020.

SHARMA, A.; AMETA, R.; AMETA, S. C. Orange peel as alternate fuel in clinkerization. **Scientific Reviews & Chemical Communications**, [S. l.], v. 3, n. 2, p. 110-119, 2013.

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

SILVA, L. H. P.; TAMASHIRO, J. R.; PAIVA, F. F. G. de; SANTOS, F. L. dos; TEIXEIRA, S. R.; KINOSHITA, A.; ANTUNES, P. A. Bamboo leaf ash for use as mineral addition with Portland cement. **Journal of Building Engineering**, Presidente Prudente, v. 42, 2021.

SILVA, R. B.; FONTES, C. M. A.; LIMA, P. R. L.; GOMES, O. da F. M.; LIMA, L. G. L. M.; MOURA, R. C. de A.; TOLEDO FILHO, R. D. Cinzas de biomassa geradas na agroindústria do cacau: caracterização e uso em substituição ao cimento. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 15, n. 4, p. 321-334, 2015.

SINTHAWORN, S.; NIMITYONGSKUL, P. Quick monitoring of pozzolanic reactivity of waste ashes. **Waste Management**, [S. l.], v. 29, p. 1526-1531, 2009.

TASHIMA, M. M.; SORIANO, L.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V.; AKASAKI, J. L.; PAYÁ, J. 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**, [S. l.], v. 64, n. 316, 2014.

TASHIRO, C.; IKEDA, K.; INOUE, Y. Evaluation of pozzolanic activity by the electric resistance measurement method. **Cement And Concrete Research**, [S. l.], v. 24, n. 6, p. 1133-1139, 1994.

VAMVUKA, D.; TRIKOUVERTIS, M.; PENTARI, D.; ALEVIZOS, G. Evaluation of ashes produced from fluidized bed combustion of residues from oranges' plantations and processing. **Renewable Energy**, Crete, v. 72, p. 336-343, 2014.

VILLAR-COCIÑA, E.; MORALES, E. V.; GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ, R.; HERNÁNDEZ-RUIZ, J. E. Kinetics of the pozzolanic reaction between lime and sugar cane straw ash by electrical conductivity measurement: A kinetic–diffusive model. **Cement And Concrete Research**, [S. l.], v. 33, n. 4, p. 517-524, 2003.

VISHAVKARMA, A.; HARISH, K. V. Effect of rice husk ash on permeation characteristic of cementitious mortar. **Materials Today: Proceedings**, Kanpur, 2021.

YAN, J.; LEI, Z.; LI, Z.; WANG, Z.; REN, S.; KANG, S.; WANG, X.; SHUI, H. Molecular structure characterization of low-medium rank coals via XRD, solid state ¹³C NMR and FTIR spectroscopy. **Fuel**, [S. l.], v. 268, 2020.

ZHAO, K.; ZHANG, P.; XUE, S.; HAN, S.; MÜLLER, H. S.; XIAO, Y.; HU, Y.; HAO, L.; MEI, L.; LI, Q. Quasi-elastic neutron scattering (QENS) and its application for investigating the hydration of cement-based materials: State-of-the-art. **Materials Characterization**, [S. l.], v. 172, 2021.

ZHOU, Y.-F.; LI, J.-S.; LU, J.-X.; CHEESEMAN, C.; POON, C. Sewage sludge ash: A comparative evaluation with fly ash for potential use as lime-pozzolan binders. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 242, 2020.

ŞANAL, I. Significance of concrete production in terms of carbon dioxide emissions: social and environmental impacts. **Journal of Polytechnic**, Turquia, n. 2, p. 369-378, 2018.