



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA
DE MATERIAIS

PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE CINZAS POZOLÂNICAS
A PARTIR DA BIOMASSA DA CASCA DO COCO VERDE

MATEUS FERREIRA DE OLIVEIRA

MANAUS – AM

2021

MATEUS FERREIRA DE OLIVEIRA

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE CINZAS POZOLÂNICAS A
PARTIR DA BIOMASSA DA CASCA DO COCO VERDE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Amazonas, como requisito obrigatório para obtenção do título de **Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais**.

Linha de pesquisa: Propriedades físicas, mecânicas e modelagem de materiais.

Orientador: Dr. Jean Carlos da Silva Andrade

Co-orientadora: Dra. Samantha Pinheiro Paiva

MANAUS – AM

2021

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

O48p Oliveira, Mateus Ferreira de
Produção e caracterização de cinzas pozolânicas a partir da
biomassa da casca do coco verde / Mateus Ferreira de Oliveira .
2021
101 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Jean Carlos da Silva Andrade
Coorientadora: Samantha Pinheiro Paiva
Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) -
Universidade Federal do Amazonas.

1. Cinza da casca do coco verde. 2. Pozolana. 3. Adição mineral.
4. Lixiviação ácida. 5. Atividade pozolânica. I. Andrade, Jean Carlos
da Silva. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

MATEUS FERREIRA DE OLIVEIRA

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE CINZAS POZOLÂNICAS A
PARTIR DA BIOMASSA DA CASCA DO COCO VERDE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Amazonas, como requisito obrigatório para obtenção do título de **Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais**.

Linha de pesquisa: Propriedades físicas, mecânicas e modelagem de materiais.

Aprovado em 30 de novembro de 2021.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Jean Carlos Silva Andrade
(Presidente da Banca / Universidade Federal do Amazonas)



Prof. Dr. João de Almeida Melo Filho
Universidade Federal do Amazonas



Prof. Dra. Luciane Farias Ribas
Centro Universitário Fametro

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a meus pais Marília Oliveira e Edval Oliveira (*in memoriam*), que sempre estiveram ao meu lado e me incentivaram a estudar mais e mais, a todo momento em busca da melhora profissional e pessoal, obrigado meus velhos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me dar forças diariamente para levantar e continuar a estudar, evoluir e persistir mesmo diante de tantas incertezas e erros.

À minha irmã Meire Jane Magalhães por sempre cuidar de mim e me ajudar em todos os momentos, mostrando-me a importância de cuidarmos uns dos outros.

Ao meu orientador Prof. Dr. Jean Carlos Silva Andrade pela oportunidade cedida a mim, obrigado pelo auxílio e por ser sempre motivador e otimista.

E à minha co-orientadora Prof^a. Samantha Pinheiro Paiva, a senhora realmente é uma luz nos meus dias mais conturbados, obrigado por sempre me iluminar, auxiliar e me acalmar.

Ao Prof, Dr. Otávio Augusto Paiva por ter me permitido a experiência do Estágio Docência, que foi primordial para o meu crescimento como profissional e por me dar acesso ao laboratório de Materiais de Construção Civil da UEA para realizar ensaios quando necessário.

À Prof^a. Dra. Virginia Mansaneres Giacon por me conceder acesso ao Laboratório por me permitir utilizar os equipamentos do Laboratório de Materiais da Amazônia e Compósitos – LaMAC.

Ao Prof. Dr. Lizandro Manzato por me acolher no Laboratório de Síntese e Caracterização de Nanomateriais (LSCN) em meio à pandemia, dando-me todo o suporte possível, local de trabalho, acesso a equipamentos e reagentes, tratando-me como um de seus orientados. Obrigado demais pelos bons conselhos e noites de pizza.

À Fundação de Amparo e Apoio à Pesquisa pela bolsa de estudos, que viabilizou minha dedicação exclusiva a realização deste projeto.

Ao Fabrício e Yassin por terem realizado as análises de fluorescência de raios-X e granulometria à laser na COPEE/UFRJ.

Aos amigos que fiz no IFAM/LSCN, Marcus, Tetê, Juliana, Amanda, Igor, Anézio, Wanison e Xavier, vocês foram essenciais para que eu aguentasse os dias de experimentos dando errados, sempre superando as chateações com um bom bolinho com café nas tardes de trabalho. Um obrigado, em especial, à minha parceira de graduação e pós-graduação, Jéssica Raíssa, que me inseriu no IFAM, me apoiando em inúmeros momentos e que junto comigo passou por perdas difíceis nesse último ano. Você foi de suma importância para que eu prosseguisse nesta pesquisa.

À Valéria por ter tido toda a paciência do mundo para tirar as minhas dúvidas quando o assunto era química! Obrigado ainda minha amiga por ter realizado as análises de fisissorção de nitrogênio no Laboratório para Estudos de Processos de Adsorção e Catálise/UNICAMP. Seu suporte é fundamental para mim.

Ao Gustavo, meu “filho” que foi primordial nesta caminhada, eu não sei o que teria sido de mim sem você. Você que nunca precisava estar lá para me apoiar, fazer rir e me auxiliar quando eu estava “tendo um dia de Mateus”, que é caótico, mas que sempre estava e fazia de tudo para me deixar em bom espírito e falar “bora, que a gente vai terminar é hoje!”.

À Vitória, minha segunda “filha”, que surgiu apenas para somar em um momento inesperado e que juntamente com o Gustavo formamos um trio imbatível! Nunca pensei que iríamos formar uma equipe de trabalho tão boa! Os garotos do moinho, trio da trituração, viciados em trabalho, aqui só tem cabra parrudo! Sem o apoio de vocês eu não teria cumprido metade do que me foi proposto no último ano. Obrigado demais por me aturarem, sabendo que eu sou insuportável, eu os amo muito!

Aos meus amigos que até o momento sempre estiveram me dando suporte nos momentos difíceis e de superação, vocês são indispensáveis para mim, Maria Juliana, Sabrina, Pamela, Danielle, Andreza, Juan, Monique, Júlio, Luana, Ian, Jéssica Vitoriano, Márcio, Emely, Lom, Thiago e Gabriela.

Ao meu pai Edval Oliveira, que mesmo tendo um gênio difícil sempre me incentivou a estudar, do senhor herdei esse humor e o amor pelas exatas. Obrigado pelos ensinamentos meu velho, saiba que o senhor sempre estará presente em minhas memórias.

À minha mãe Marília Oliveira, sempre presente, que me educou da melhor maneira possível. Eu tenho apenas a agradecer pelas palavras de incentivo e dizer “obrigado por me aturar, sei que sou um filho rabugento, sou filho do Edval!”. Obrigado pela senhora ser dessa maneira, uma mulher que sempre procurou a felicidade nas coisas mais simples, sempre muito humana, de sorriso largo, de bom humor e fazendo palhaçada. Acho que sem essa leveza, em muitos momentos eu teria surtado. E apenas gratidão por todos os doces e comidas boas que a senhora fez!!!! Esse menino aqui chegou até aqui, graças a essa felicidade básica! Obrigado minha velha, meu grande amor.

Por fim, agradeço a todos os que indiretamente também me ajudaram nas conquistas até esse momento.

*“If your Nerve, deny you—
Go above your Nerve—“*

Emily Dickinson

RESUMO

A indústria do cimento é responsável por grande parte das emissões de gases do efeito estufa, especialmente durante a produção de clínquer. Estudos realizados são unânimes ao relatar que a fabricação de cimento é responsável por cerca de 7% da emissão total de CO₂ no mundo. Alicerçado a este fato, tem-se a contínua expansão da construção civil, com o consumo de insumos não renováveis, como os utilizados na produção concreto. Por conta destes fatores, o programa experimental presente neste trabalho objetivou estudar a viabilidade da produção de cinza pozolânica a partir da queima da biomassa da casca do coco verde. A proposição desta pesquisa deu-se pelo fato do Brasil ser o quinto maior produtor mundial de coco e enfrentar problemas de descarte desse resíduo agroindustrial, causando acúmulo nos aterros, somado a isto, tem-se ainda os impactos ambientais provocados pela fabricação do cimento Portland. O programa experimental iniciou-se com a coleta do resíduo do coco verde, seguido da secagem da matéria-prima, moagem e beneficiamento químico da biomassa do coco verde para a produção de cinzas tratadas e não tratadas quimicamente, a 600 °C, 700 °C e 800 °C. As cinzas foram caracterizadas por granulometria a laser, fluorescência de raios-X, difração de raios-X, condutividade elétrica, índice de atividade pozolânica Chapelle e área de superfície BET para a análise das temperaturas onde as cinzas apresentassem reatividade. Os resultados mostraram que as cinzas sem tratamento químico possuíam metais alcalinos indesejáveis para a utilização destas como pozolanas. Por outro lado, as cinzas produzidas após o tratamento químico do coco exibiram somatório de SiO₂, Fe₂O₃ e Al₂O₃ maiores que 50%, além de perda ao fogo menor que 6%, classificando-as como pozolânicas conforme a NBR 12653 (ABNT, 2014), exceto pelo teor de SO₃, o qual foi 2,5% maior. Ao analisar os dados de índice de atividade pozolânica mensurados pela condutividade elétrica e por Chapelle modificado, obtiveram-se resultados de até 0,945 mS/cm e 1263,09 mg Ca(OH)₂, respectivamente. Tais valores demonstram que o material possui atividade pozolânica, de acordo com a classificação de Luxán *et al.* (1989) e Raverdy *et al.* (1980). Por fim, os resultados de caracterização da cinza lixiviada revelaram que há a viabilidade da cinza da casca do coco verde como adição mineral à pasta cimentícia, uma vez que ela possui composição química, perda ao fogo e índice de atividade pozolânica Chapelle interessantes à aplicação desta como pozolana.

Palavras-chave: Cinza da casca do coco verde. Pozolana. Adição mineral. Lixiviação ácida. Atividade pozolânica.

ABSTRACT

The cement industry is responsible for a large part of greenhouse gas emissions, especially during clinker production. Studies carried out are unanimous in reporting that cement manufacturing is responsible for about 7% of the total CO₂ emissions in the world. Based on this fact, there is the continuous expansion of civil construction, with the consumption of non-renewable inputs, such as those used in concrete production. Due to these factors, the experimental program present in this work aimed to study the feasibility of producing pozzolanic ashes from the burning of green coconut shell biomass. The proposal of this research was due to the fact that Brazil is the fifth largest producer of coconut in the world and faces problems with the disposal of this agro-industrial residue, causing accumulation in landfills. In addition, there are also the environmental impacts caused by the manufacture of Portland cement. The experimental program began with the collection of coconut, followed by drying the raw material, grinding and chemical processing of the green coconut biomass for the production of chemically treated and untreated ash at 600 °C, 700 °C and 800 °C. Ashes were characterized by laser particle size, X-ray fluorescence, X-ray diffraction, electrical conductivity, Chapelle pozzolanic activity index and BET surface area for the analysis of temperatures where the ash showed reactivity. The results showed that the ash without chemical treatment had undesirable alkali metals for their use as pozzolans. On the other hand, the ash produced after the chemical treatment of coconut exhibited a sum of SiO₂, Fe₂O₃ and Al₂O₃ greater than 50%, in addition to a loss of ignition less than 6%, classifying them as pozzolanic according to NBR 12653 (ABNT, 2014), except by the SO₃ content. By analyzing the pozzolanic activity index data measured by electrical conductivity and modified Chapelle, results were obtained up to 0.945 mS/cm and 1263.09 mg Ca(OH)₂, respectively. Such values demonstrate that the material has pozzolanic activity, according to the classification by Luxán et al. (1989) and Raverdy et al. (1980). Finally, the results of characterization of the leached ash found that there is the feasibility of green coconut husk ash as a mineral addition to the cementitious paste, since it has chemical composition, loss of ignition and Chapelle pozzolanic activity index that are interesting for the application of this as pozzolan.

Keywords: Green coconut shell ash. Pozzolan. Mineral addition. Acid leaching. Pozzolanic activity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Morfologia do <i>Cocos nucifera</i> L.....	25
Figura 2 – Processo de fabricação do cimento Portland.....	34
Figura 3 - Atividades laboratoriais realizadas neste estudo	51
Figura 4 – Limpeza dos cocos para a posterior utilização destes	52
Figura 5 – Casca de coco verde triturada	53
Figura 6 – Moagem da casca do coco verde: a) Moinho de facas utilizado para a moagem da casca de coco triturada; b) Coco verde moído.....	53
Figura 7 – Tratamento químico do pó de coco com ácido cítrico anidro: a) Preparo da solução; b) Pó da casca do coco verde imerso na solução ácida	54
Figura 8 – Cinzas produzidas, sem tratamento químico, conforme a metodologia de queima (i): a) 600 °C; b) 700 °C; c) 800 °C.....	55
Figura 9 – Cinza da casca do coco verde após tratamento químico, utilizando a metodologia de queima (i).....	55
Figura 10 – Cinzas produzidas, após tratamento químico, conforme a metodologia de queima (ii): a) 600 °C; b) 700 °C; c) 800 °C.....	55
Figura 11 – Preparo da moagem das amostras: a) Amostra posicionadas no moinho; b) Esfera utilizada	56
Figura 12 – Difração de raios-x por planos de átomos (A-A' e B-B').....	59
Figura 13 – Diagrama sobre o funcionamento de um difratômetro de raios-X.....	60
Figura 14 – Amostras após o ensaio de perda ao fogo (600 °C, 700 °C e 800 °C, respectivamente).....	61
Figura 15 – Aparelhagem utilizada no ensaio de condutividade elétrica	62
Figura 16 – Ensaio de Chapelle modificado: a) Amostra em agitação a 90 °C ± 5 °C; b) Filtração da solução; e c) Titulação da solução filtrada.....	63
Figura 17 – Equipamento Micromeritics, ASAP 2020 para a realização da fisissorção de nitrogênio.....	64
Figura 18 – Difratoogramas de raios X das cinzas produzidas sem tratamento ácido para as temperaturas de: a) 600 °C, b) 700 °C, c) 800 °C	70

Figura 19 – Difratoogramas de raios X das cinzas produzidas após a lixiviação com ácido cítrico para as temperaturas de: a) 600 °C, b) 700 °C, c) 800 °C	72
Figura 20 – Curvas granulométricas obtidas em diferentes tempos de moagem	74
Figura 21 – Curvas de condutividade elétrica: a) Cinza da casca do coco verde b) Cinza da casca do coco verde lixiviada.....	76
Figura 22 – Curvas de condutividade elétrica corrigidas: a) Cinza da casca do coco verde b) Cinza da casca do coco verde lixiviada	77
Figura 23 – Resultados de índice de atividade pozolânica Chapelle encontrado para as cinzas	79
Figura 24 – Correlação entre a variação da condutividade elétrica aos 2 minutos e o de índice de atividade pozolânica Chapelle da CCCVL	80
Figura 25 – Isotermas de adsorção-dessorção de nitrogênio para as CCCVL 700 °C nos tempos de moagem: a) 30 minutos; b) 60 minutos; c) 120 minutos; d) 240 minutos.....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Produção de coco no mundo em 2018.....	26
Tabela 2 – Produção de coco no Brasil em 2018	27
Tabela 3 – Principais compostos químicos do cimento Portland	35
Tabela 4 – Designação, tipos de cimento Portland e limites de composição	37
Tabela 5 – Requisitos químicos.....	41
Tabela 6 – Comparação da composição química da casca do coco verde e da cinza da casca do coco.....	43
Tabela 7 – Composição química das cinzas de resíduos agrícolas após tratamento com ácido cítrico	44
Tabela 8 – Composição química dos fertilizantes utilizados para o cultivo do coqueiro no Amazonas	45
Tabela 9 – Comparação entre os tempos de moagem e tamanho médio de partículas de cinzas de resíduos agroindustriais	45
Tabela 10 – Comparação entre as áreas superficiais específicas de cinzas de resíduos agrícolas	47
Tabela 11 – Comparação entre a variação da condutividade elétrica de cinzas de resíduos agrícolas.....	48
Tabela 12 – Comparação entre as condutividades elétricas medidas para o pó do coco	49
Tabela 13 – Comparação entre os índices de atividade pozolânica Chappelle medidos para cinzas de resíduos agroindustriais	49
Tabela 14 - Avaliação da atividade pozolânica por medição de condutividade.....	62
Tabela 15 – Rendimento médio das cinzas da casca do coco em diferentes temperaturas	65
Tabela 16 – Composição química da CCCV	66
Tabela 17 – Composição química da CCCVL	68
Tabela 18 – Características das distribuições de tamanho das partículas.....	75
Tabela 19 – Variação de condutividade elétrica medida para as cinzas da casca do coco verde	76
Tabela 20 – Variação de condutividade elétrica medida para as cinzas da casca do coco verde após a correção	78
Tabela 21 – Características obtidas para a CCCVL 700 °C após a fisissorção de nitrogênio..	81

LISTA DE SIGLAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
BET – Área Superficial Específica
C120 – Cinza moída durante 120 minutos
C240 – Cinza moída durante 240 minutos
C30 – Cinza moída durante 30 minutos
C60 – Cinza moída durante 60 minutos
CBCA – Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar
CCA – Cinza da Casca do Arroz
CCCV – Cinza da Casca do Coco Verde
CCCVL – Cinza da Casca do Coco Verde Lixiviado
CCE – Cinza do Capim Elefante
CFB – Cinza da Folha do Bambu
CFCA – Cinza da Folha da Cana-de-Açúcar
CIRSU – Cinza de Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos
CLE – Cinza do Lodo de Esgoto
CPM – Cinza da Palha do Milho
CPMR – Serviço Geológico do Brasil
D₅₀ – O tamanho médio
D_p – diâmetro de poro
DRX – Difração de Raios-X
Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations
FAOSTAT – Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database
FRX – Espectroscopia de Fluorescência De Raios-X
GEE – Gases do Efeito Estufa
NBR – Norma Brasileira
NM – Norma Mercosul
PAM – Produção Agrícola Municipal
PF – Perda ao Fogo

PPGCEM – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria de Cimento

UEA – Universidade do Estado do Amazonas

UFAM – Universidade Federal do Amazonas

V_p – volume de poro

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA	20
1.2 OBJETIVOS	22
1.2.1 Objetivo Geral	22
1.2.2 Objetivos Específicos	22
2. REFERENCIAL TEÓRICO	23
2.1 <i>COCOS NUCÍFERA</i>	23
2.1.1 Utilização, Origem e História	23
2.1.2 Coco: Exigência Climática e Morfologia	24
2.1.3 Produção de Coco	25
2.1.3.1 Cultivo do Coqueiro no Mundo	25
2.1.3.2 Cultivo do Coqueiro no Brasil	27
2.1.4 Propriedades da Fibra do Coco	28
2.1.5 Impacto Socioambiental do Descarte Irregular do Coco	28
2.1.6 Utilização da Fibra e Pó do Coco Verde	30
2.2 CIMENTO PORTLAND	32
2.2.1 Histórico	32
2.2.2 Fabricação do Cimento Portland	33
2.2.3 Composição Química	35
2.2.4 Tipos de Cimento	36
2.2.5 Impactos Causados pela Fabricação de Cimento	38
2.3 ADIÇÕES MINERAIS	39
2.3.1 Fíler	40
2.3.2 Pozolana	41
2.3.3 Caracterização de Cinzas Produzidas a partir de Resíduos Agroindustriais	43
2.3.3.1 Composição Química	43
2.3.3.2 Tamanho Médio das Cinzas e Área Superficial Específica	45
2.3.3.3 Condutividade Elétrica	47
2.3.3.4 Método Chapelle Modificado	49

3. MATERIAIS E MÉTODOS	51
3.1 OBTENÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA	52
3.2 PROCESSAMENTO DAS CINZA DA CASCA DO COCO VERDE	52
3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS CINZAS	56
3.3.1 Moagem das Cinzas	56
3.3.2 Granulometria a Laser	57
3.3.3 Espectroscopia de Fluorescência de Raios-X	58
3.3.4 Difração de Raios-X.....	58
3.3.5 Perda Ao Fogo.....	60
3.3.6 Condutividade Elétrica	61
3.3.7 Método Chappelle Modificado	62
3.3.8 Área Superficial Específica (BET)	64
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
4.1 RENDIMENTO DAS CINZAS	65
4.2 AVALIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA.....	66
4.3 COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA (DRX).....	69
4.4 CARACTERÍSTICAS DA MOAGEM ULTRAFINA DAS CINZAS DA CASCA DO COCO VERDE.....	74
4.5 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA.....	75
4.6 CHAPELLE MODIFICADO	78
4.7 ÁREA SUPERFICIAL ESPECÍFICA (BET)	81
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	84
5.1 CONCLUSÃO.....	84
5.2 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	86
REFERÊNCIAS	87

1. INTRODUÇÃO

Dado o desenvolvimento de novos procedimentos construtivos, projetos e realização de obras cada vez mais revolucionárias, nota-se a inevitabilidade quanto ao uso de pastas, argamassas e concretos com maior durabilidade e resistência, além de custos economicamente acessíveis. Todavia, sabe-se que para a confecção destes materiais há o emprego de grandes quantidades de cimento como aglomerante hidráulico, considerado como um dos materiais mais utilizados pela indústria da construção civil. À vista disso, percebe-se que o crescimento do consumo de cimento e de sua produção estão contínuos. Segundo Curry (2020), em 2019 a produção mundial de cimento totalizou 4,1 bilhões de toneladas, mostrando um aumento de 1,22% em relação a 2018.

Diante do cenário de produção e consumo de cimento, existe a poluição advinda deste processo, contabilizando 1,435 bilhões de toneladas de CO₂ emitidos em 2015 (OLIVIER *et al.*, 2016). Por conta disso foi imposta a procura por adições minerais como forma alternativa de substituição parcial do cimento na produção de concreto, tornando o descarte de resíduos agrícolas, como casca de arroz, bagaço da cana de açúcar, espiga de milho e casca de coco, materiais potencialmente úteis para minimizar seus efeitos negativos sobre o meio ambiente.

Em se tratando de resíduos agrícolas alternativos, tem-se as árvores *Cocos Nucífera*, também conhecidas como coqueiros, que se desenvolvem amplamente ao longo da costa dos países. Um coqueiro saudável é capaz de produzir cerca de 120 frutos por ano, dos quais possuem três constituintes que podem ser utilizados como fonte energética: a casca verde, a casca de coco (internamente) e o óleo de coco. Ao serem colhidos verdes para o consumo da água, as cascas costumam ser descartadas, visto que são encaradas como resíduos. No entanto, se queimadas a altas temperaturas em um forno controlado, podem gerar cinzas capazes de serem utilizadas como adição mineral (ISAH, 2014).

Em decorrência do que foi apresentado, verifica-se a necessidade da procura por materiais alternativos que possam ser adicionados ao cimento, minimizando os efeitos negativos causados pela produção deste material. Conforme a composição química, que é um dos requisitos, essas adições podem ser classificadas como pozolanas, materiais silicosos ou silicoaluminosos, os quais, isolados, possuem pouca ou nenhuma propriedade aglomerante, entretanto, quando finamente moídos e na presença de água e de hidratos formados na hidratação do cimento formam hidratos adicionais similares aos formados pelo cimento no processo de hidratação (NBR 12653, 2014).

Devido aos fatores supramencionados, os estudos relacionados com a obtenção de cinzas de resíduos agroindustriais como adições minerais são de suma importância, dado que viabilizam a fabricação de artefatos de concreto com igual ou maior resistência, custos reduzidos e minimização dos impactos ambientais menores decorrentes da disposição dos resíduos e da fabricação de cimento.

1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

O *Cocos nucifera* (L.) é uma fruta pertencente à família das palmeiras (*Arecaceae*), comumente nomeado como coco, coco-da-baía ou coco da praia (ARAGÃO, 2002), sendo uma das frutas mais produzidas pelo Brasil, o qual se encontra listado entre o quinto maior produtor de coco do mundo, em 2019, segundo a Global Industry Market Sizing (NATION MASTER, 2021).

Rosa *et al.* (2001) relataram que as cascas do coco verde chegam a corresponder 80% do peso bruto do fruto, dispendo de alta umidade, de aproximadamente 85%, e que as fibras deste não favorecem sua aplicação em vários setores, aumentando ainda mais o descarte do resíduo, que é despejado em aterros e lixões, ocasionando problemas aos serviços municipais de coleta de lixo devido à quantidade de volume gerado.

Segundo Cintra *et al.* (2009) em conjunto com dados coletados da Embrapa Tabuleiros Costeiros indicaram que a cada 125 cocos rejeitados após consumo da água, estes ocupam o espaço de 1 m³ nos aterros. Martins e Jesus Jr (2010) ainda avaliam que, no Brasil, são despejados aproximadamente 7 milhões de toneladas de coco por ano, os quais poderiam ser reutilizados para substrato agrícola, fonte alternativa de energia e fibras em artesanato.

Outra alternativa proposta de reuso das cascas de coco, devido às características físicas e químicas da fruta, é na produção de carvão vegetal (ANDRADE *et al.*, 2004). Este fruto possui poder calorífico superior de cerca de 5.447,38 kcal/kg, sendo que a cinza deste pode apresentar composição química de 69,3% de SiO₂, 8,8 % de Al₂O₃, 8,8% de K₂O, 6,4% de Fe₂O₃, 4,8% de Na₂O e 6,7% de outros compostos (NOGUEIRA; LORA, 2000; BAPAT *et al.*, 1997).

Mesmo tendo maior parte da atenção dos cientistas voltadas para o uso da casca do coco como carvão ativado, existem estudos também relacionados à extração de sílica de resíduos agrícolas. Através dos estudos realizados por Bapat *et al.* (1997), Kumar *et al.* (2018) e Joshua *et al.* (2018), verifica-se que a cinza da casca do coco verde (CCCV) possui considerável teor de sílica e grande potencial de uso como fonte alternativa, visto que 33-35% do coco é composto de casca e atua como mesocarpo do fruto (ANUAR *et al.*, 2019). É importante salientar que a

parede celular das plantas contém silício (Si), encontrado majoritariamente na forma de sílica e outros elementos, tais como cátions metálicos e carboidratos (ILER, 1976). É diante deste contexto de fonte alternativa de sílica, que se avalia a utilização dos resíduos da casca do coco verde, na forma de cinzas, na substituição parcial de cimento.

É durante a fabricação do cimento Portland, que são gerados gases poluentes, dentre os quais se destaca o gás carbônico, principalmente por sua contribuição ao efeito estufa. Andrew (2018) relata que existem dois aspectos da produção de cimento que resultam em emissões de CO₂: (i) a reação química envolvida na produção do principal componente do cimento, o clínquer, à medida que os carbonatos (principalmente CaCO₃) são decompostos em óxidos (principalmente CaO) e CO₂ pela adição de calor. A estequiometria indica diretamente a quantidade de CO₂ liberada para uma determinada quantidade de CaO produzido. Estimativas recentes são de que essas chamadas emissões de "processo" contribuem com cerca de 5% do total de emissões antrópicas de CO₂, excluindo as alterações no uso do solo (BODEN *et al.*, 2017); (ii) a segunda fonte de emissões é a combustão de combustíveis fósseis para gerar a energia significativa necessária para aquecer os ingredientes brutos a mais de 1000 °C, e essas emissões de "energia", incluindo as provenientes da eletricidade comprada, poderiam adicionar mais 60% a mais, das emissões do processo (IEA, 2016). As emissões totais da indústria de cimento podem, portanto, contribuir com até 8% das emissões globais de CO₂.

Benhelal *et al.* (2013) certificam de que é através de estratégias adequadas como a eficiência energética, uso de combustíveis alternativos e substituição do clínquer, que as emissões de CO₂ podem ser minimizadas em até cerca de 1,55 bilhões de toneladas em 2050.

Os diferentes estudos de utilização desse da casca do coco verde, até o momento, provaram a viabilidade da produção de cinza a partir desse resíduo para inserção na indústria da construção civil como substituinte parcial do cimento. Entretanto, ainda há limitação de pesquisas em relação à cinza desses frutos, principalmente no que tange à produção destas em ambiente controlado.

Desta maneira, conforme for apresentada a composição química e reação da CCCV, o coco poderá ser utilizado como um material alternativo que será absorvido pelo setor cimentício como adição mineral, minimizando tanto os impactos ambientais causados pela fabricação de cimento quanto a quantidade de rejeitos gerados pela agroindústria.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa tem por objetivo fundamental estudar a viabilidade da produção de cinza pozolânica a partir da queima da biomassa da casca do coco verde, intencionando incorporar este resíduo em matrizes cimentícias.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Averiguar diferentes procedimentos de queima para a produção das cinzas da casca do coco verde, em laboratório, objetivando determinar as condições ideais de calcinação;
- Realizar pré-tratamento da casca do coco verde com ácido cítrico para remoções de elementos indesejados;
- Analisar a variação das composições químicas (FRX) e mineralógicas (DRX) de diferentes cinzas da biomassa do coco, almejando obter cinzas amorfas e com composição química para serem consideradas como pozolanas, conforme os requisitos da NBR 12653 (2014);
- Avaliar a atividade pozolânica em função da temperatura de queima e dos ensaios de caracterização de FRX, DRX, perda ao fogo, condutividade elétrica, Chapelle modificado e área superficial BET, das cinzas da casca do coco verde, verificando a reatividade destas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 *COCOS NUCÍFERA*

2.1.1 Utilização, Origem e História

O coqueiro é cultivado em 12 milhões de hectares de planícies costeiras tropicais, sendo uma das palmeiras mais valiosas do mundo, contribuindo diretamente para a renda e a subsistência de milhões de agricultores e seus dependentes (FAOSTAT, 2018). A vida útil de um coqueiro pode ser maior que 60 anos em condições ecológicas favoráveis, podendo crescer até uma altura de aproximadamente 25 m (OHLER, 1998).

Largamente designada como a árvore da vida, a semente do coco é convertida em produtos comestíveis, com alto valor nutricional e terapêutico sendo rico em fibras comestíveis, proteínas, lipídios e minerais inorgânicos (FOALE, 2003; DAYRIT, DAYRIT, 2013). Comercialmente, produtos refinados, incluindo óleo virgem, carvão vegetal, fibra de casca e córtex são fabricados regionalmente e exportados. O óleo de coco virgem, que surgiu recentemente como um produto comestível de alta qualidade em comparação com o óleo derivado de polpa, é extraído a baixa temperatura. Existem gêneros de palmeiras relacionados encontrados nas planícies, planaltos e serras da América do Sul continental, mas o coco parece ter evoluído nas praias de atóis e terras do Oceano Índico e Pacífico Ocidental (HARRIES, 1978).

Os frutos do coqueiro possuem a capacidade de atravessar o mar e se dispersar, colonizando as regiões costeiras muito distantes de qualquer uma de suas espécies ancestrais (HARRIES, 1978). Indicadores etnológicos colocam o centro da diversidade do coco no sudeste da Ásia e na Melanésia (HARRIES, 1978; DE TAFFIN, 1998; HARRIES; CLEMENT, 2014). O coco selvagem esteve provavelmente presente nas costas do oceano Índico por alguns milhões de anos antes dos primeiros humanos migrarem da África para a Ásia e da Ásia para a Australásia e Melanésia cerca de 50.000 anos atrás e depois para a Micronésia e Polinésia. Os colonizadores humanos teriam prosperado com a água e os alimentos de coco já presentes nessas terras recém-descobertas (ADKINS *et al.*, 2020).

Entre 8000 e 14000 anos atrás, uma extensa área terrestre hoje conhecida como Malésia, foi gradualmente inundada pelo aumento do nível do mar. À medida que a plataforma continental rasa entre a atual Península de Malaia, Sumatra, Bornéu e Mindanau foi

submergindo progressivamente, os assentamentos e os palmeirais teriam sido movidos para o interior, à frente do oceano invasor. Durante essa época, ocorreria a seleção humana por maior teor de água e caroço, germinação precoce e outras características de frutos (HARRIES, 1978).

Os ancestrais existentes e que navegaram pela primeira vez para ilhas nos oceanos Índico e Pacífico, levaram suprimentos de frutas grandes em suas canoas para comida e bebida e outras para plantar no lugar em que chegariam, mesmo sem o conhecimento prévio das ilhas onde poderiam desembarcar, como por exemplo Madagascar ou Samoa, os quais seriam colonizados. As pessoas, hoje conhecidas como polinésias, chegaram a Samoa cerca de 4000 anos atrás, com uma quantidade de grandes frutos de coco plantados ao lado dos palmeirais já presentes, tornando-se inevitável formas intermediárias de frutas que surgiram através da introgressão.

Foi somente a partir de 1499 que navegadores portugueses que retornavam do Oceano Índico introduziram o coco nas Ilhas Cabo Verde, na costa oeste da África. Apenas 50 anos depois, os frutos dessas ilhas foram levados para o Brasil e Porto Rico, depois para o continente da África Ocidental, para a costa atlântica das américas e para as ilhas e costas do Caribe (HARRIES, 1978).

2.1.2 Coco: Exigência Climática e Morfologia

Nesta pesquisa, utilizar-se-ão as cascas do coco que são tratadas como dejetos após o consumo da água do mesmo e será avaliado o potencial dessas para a produção de cinzas e posterior inserção na confecção de blocos de concreto, por conta disso, faz-se necessário entender algumas questões acerca da plantação de coqueiros e da morfologia do fruto.

Para a plantação do coqueiro, requerem-se algumas características climáticas, ideais de zonas litorâneas e regiões mais quentes, dentre elas, destacam-se: (i) demanda de clima quente, com temperaturas em média anual em torno de 27 °C, com variações entre 20 °C e 34 °C, tidas como ideais para o crescimento e produção; (ii) a redução da umidade atmosférica que leva a um aumento de absorção de água e de nutrientes pelas raízes, necessidade que é compensada pela irrigação; e (iii) em relação à pluviosidade, a precipitação anual deve ser de 1.500 mm, com pluviosidade mensal nunca inferior a 130 mm (FONTES; FERREIRA, 2006).

À vista disso, sabe-se que o coqueiro (*Cocos nucifera* L.) é a espécie do gênero *cocos* pertencente à família Palmae, a qual é classificada como uma das mais significativas da classe Monocotyledoneae. Este tipo de fruto possui particularidades bem próprias como um só

cotilédone na semente, raiz fasciculada e folhas paralelinérveas. Sua ordem é das *Arecales*, que se encontra na família das *Areaceae* (PANTOJA, 2010).

Devido ao coco ser pertencente aos grupos supracitados, ele possui características de um fruto seco, indeiscente do tipo drupa, por ser formado por um só carpelo e conter em seu interior uma só semente. As camadas do coco incluem: (i) epiderme lisa ou epicarpo, camada de coloração esverdeada ou amarelada caso o fruto não esteja maduro e conforme vai amadurecendo torna-se marrom; (ii) o mesocarpo, que é envolvido pelo epicarpo, sendo a parte mais desenvolvida, composto por um conjunto muito denso de fibras firmes; (iii) há ainda o endocarpo, uma camada interna espessa e dura, que envolve a semente; e (iv) a semente, propriamente dita, a qual é constituída por uma camada fina de cor marrom – o tegumento – que fica entre o endocarpo e o albúmen sólido (FERRI, 1990). O tegumento é uma camada carnosa, branca e muito oleosa, que forma uma grande cavidade onde se encontra o albúmen líquido. (FONTES; FERREIRA, 2006). Salienta-se que para esta pesquisa serão utilizadas apenas as camadas não comestíveis do coco. Na Figura 1 está representada a morfologia da fruta em análise.



Fonte: BARCELOS, 2016

2.1.3 Produção de Coco

2.1.3.1 Cultivo do Coqueiro no Mundo

A cultura mundial do coqueiro aponta amplificação no que tange às áreas de plantio e produção. Conforme os dados apresentados pela FAOSTAT, em 1961, a produção mundial foi de aproximadamente 23,8 milhões de toneladas, numa área colhida de 5 milhões de hectares. No decorrer dos anos, houve um aumento considerável na produção dos frutos juntamente com a expansão da área de colheita, atingindo 51,2 milhões de toneladas de frutas no ano de 2000

numa área plantada de 10 milhões de hectares. Até o ano de 2018, a produção estava em torno de 61,8 milhões de toneladas em uma área colhida ao redor de 12,3 milhões de ha. Com o advento da tecnologia, evidencia-se não só o aumento da área cultivada, mas a expansão do volume da produção de cocos anualmente.

Como pode ser observado na Tabela 1, a maior parte da área de coqueiros plantada encontra-se na Ásia, principalmente na Indonésia, Filipinas, Índia e Sri Lanka, equivalendo a cerca de 70% da área mundial. Ainda na tabela abaixo, o destaque de produção mundial de coco em 2018 foi para a Indonésia, seguido pelos outros países asiáticos já mencionados, salientando-se o Brasil como o único país da América do Sul a estar entre os maiores produtores. Entre as áreas de maior cultivo, Filipinas destaca-se por possuir a maior área cultivada, com 3,6 milhões de hectares de coqueiro, no entanto, tratando-se do rendimento (produção de cocos x área colhida), o Brasil se sobressai entre os demais países, seguido de Myanmar, como os países de maiores rendimentos em t/ha.

Tabela 1 – Produção de coco no mundo em 2018

Maiores Produtores de Coco em 2018	Produção (t)	Área Colhida (ha)	Rendimento (t/ha)
Indonésia	18555371	3247986	5,71
Filipinas	14726165	3628134	4,06
Índia	11706343	2098946	5,58
Sri Lanka	2623000	455330	5,76
Brasil	2346750	198715	11,81
Vietnã	1571709	154684	10,16
Papua-Nova Guiné	1221080	204986	5,96
México	1158471	185708	6,24
Tailândia	885751	194448	4,56
Myanmar	557240	49118	11,34
Total Mundial	61865423	12381051	5,00

Fonte: FAOSTAT, 2018

Para Martins e Jesus Junior (2011), o Brasil obteve destaque na produção de cocos por conta, não somente, do acréscimo das áreas de cultivo, mas também pelo desenvolvimento tecnológico na condução e manejo dos coqueirais em termos de adubação, utilização de sistemas intensivos de cultivos, variedades de plantação de coqueiros do tipo Anão e híbridos, que associadamente propiciaram aumento da produtividade e avanço do cultivo de coqueiros em novas fronteiras agrícolas.

2.1.3.2 Cultivo do Coqueiro no Brasil

O coqueiro foi disseminado no Brasil na década de 50 por meio do estado da Bahia, devido a isso, uma das denominações dada ao coco no país é de “coco-da-baía”. Sendo assim, a fruta foi espalhando-se pelo litoral nordestino, principalmente devido às suas características de plantação serem típicas de clima tropical, como já mostrado no tópico 2.1.2. Em 1990, o cultivo de coqueiro era restrito apenas às regiões Norte e Nordeste. No entanto, atualmente, verifica-se a expansão do cultivo por todo o país (MARTINS; JESUS JUNIOR, 2014).

O Brasil possui cerca de 198 mil hectares cultivados com coco e produção próxima dos 2,3 bilhões de frutos (FAOSTAT, 2018). Conforme a Produção Agrícola Municipal (PAM, 2018) a partir de 1990, a produção de cocos no país teve um salto de 477.372 de frutas para 2.346.750 em 2018. Com essa evolução, áreas como o Paraná, que não possuíam produção, passaram a ter cultivos de coqueirais.

Na Tabela 2, mostram-se as produções do coqueiro, a área colhida e o rendimento dos estados brasileiros mais ativos na participação dessa cultura, entretanto, verifica-se o fato de estados de outras regiões possuírem um rendimento maior que o dos estados nordestinos, devido à tecnologia empregada, das variedades de coco exploradas e de sua utilização. Para os autores Fontes e Wanderley (2006), este fato se dá por conta do sistema de cultivo com variedades de coqueiro gigante destinado à produção coco seco, ao tempo que as demais regiões cultivam coqueiros-anões e híbridos para produção de cocos verdes destinado à água de coco, coqueiros, esses, que são naturalmente mais produtivos que o coqueiro gigante.

Tabela 2 – Produção de coco no Brasil em 2018

Produtores Brasileiros	Produção (t)	Área Colhida (ha)	Rendimento (t/ha)
Bahia	344782	44287	7.79
Ceará	254161	38328	6.63
Pará	191825	18511	10.36
Sergipe	174364	25328	6.88
Espírito Santo	150089	9655	15.55
Pernambuco	139516	7398	18.86
Alagoas	77448	21343	3.63
Rio Grande do Norte	70347	16030	4.39
Rio de Janeiro	38445	2360	16.29
Paraíba	34594	6041	5.73

Fonte: PAM, 2018

Outra dificuldade que se encontra no litoral nordestino são os diversos coqueirais abandonados, com produtores desestimulados, em consequência dos baixos preços do coco seco

no mercado, bem como ausência de políticas governamentais de incentivo ao cultivo, baixa fertilidade natural dos solos, não adoção de práticas de manejo cultural, incidência de pragas e doenças e déficit hídrico, que isoladamente ou agrupados, retratam a queda de produção e qualidade dos frutos colhidos (MARINHO *et al.*, 2006; FONTES, 2010). Mesmo enfrentando tais problemas, a maioria dos estados nordestinos ainda detém significativo valor em termos de área plantada, visto que a região detém cerca de 81% da área total de coqueiros cultivados no Brasil (PAM, 2018).

2.1.4 Propriedades da Fibra do Coco

As fibras vegetais são constituídas por celulose, hemicelulose, lignina, pectina e minerais, dentre os quais a celulose, principal constituinte estrutural, é incumbida pela firmeza e resistência desses filamentos. Para Mohanty *et al.* (2000), mesmo que as fibras de coco verde apresentem teores de celulose reduzidos e maiores teores de lignina se comparados com outras fibras lignocelulósicas, tais como fibra de juta e sisal, isso lhe confere, um adicional frente às outras, como resistência.

Devido às características supramencionadas, existem vários estudos que são desenvolvidos com o intuito de reutilização da fibra e do pó oriundos das cascas de coco verde, que incluem: substrato agrícola no cultivo de hortaliças; composição em matrizes poliméricas; produção de mantas, retentores de sedimentos, briquetes, enzimas, isolantes térmicos e acústicos e confecção de telhas.

2.1.5 Impacto Socioambiental do Descarte Irregular do Coco

Como pôde ser visto na seção 2.1.3, o constante crescimento do consumo de água de coco e polpa de coco verde vem causando a ampliação dos dejetos de cascas de coco (AYRILMIS *et al.*, 2011), que em algumas regiões são propensos a tornarem-se resíduos, constituindo impactos sociais, econômicos e ambientais negativos (BIGGS *et al.*, 2015). Santana *et al.* (2014) comentam que por causa da falta de gestão e investimento por parte do setor público ou privado, as cascas de cocos verde, após o consumo da água, não são reutilizadas como matéria-prima para produção de novos itens no Brasil.

Segundo Ayrilmis *et al.* (2011) e Arena *et al.* (2016), a casca de coco apresenta em sua composição quantias de 33,30% de lignina, 30,58% de celulose, 26,70% de hemicelulose, 8,86% de água e 0,56% de cinza, representando aproximadamente 85% do peso da fruta. Outros

trabalhos também foram realizados com o intuito do emprego das cascas do coco verde em diversos outros setores, salientando o potencial do seu uso, na forma de fibra ou pó, para: produção de papel (SENHORAS, 2004) e filtros orgânicos (IGWE *et al.*, 2008; MONACO *et al.*, 2009); na agregação de compósitos de cimento (ASASUTJARIT *et al.*, 2007) ou concreto (ALI *et al.*, 2012) para construção civil; cobertores para proteção do solo (BABU; VASUDEVAN, 2008); substratos para o plantio de vegetais e frutas, como tomate (RAMOS *et al.*, 2008), berinjela (MOREIRA *et al.*, 2010) e melão (DIAS *et al.*, 2011); painéis (AYRILMIS *et al.*, 2011); em isolamento térmico (ARAÚJO *et al.*, 2015); como reforço nas matrizes poliméricas (DAS; BISWAS, 2016) e biossorventes para sorção de íons Ag (STARON *et al.*, 2017).

Araújo *et al.* (2015) ressaltam que mesmo que haja tantos destinos para o uso do coco, como supramencionado, a sua capacidade acaba por não ser explorada em muitos países. Segundo a Embrapa (2020), contabilizam-se que seja perdido 1,5 kg de casca de cada coco consumido no país, sendo assim, pode haver um montante de até três milhões de toneladas de coco verde não utilizado por ano. Mesmo assim, Santos *et al.* (2019) reafirmam o fato de que não se faz possível mensurar a quantidade exata de cascas de coco verde que são jogadas fora no local de consumo, dificultando o gerenciamento dos resquícios produzidos em cada região.

Associado à circunstância dos dejetos de coco verde não serem quantificáveis, ocorrendo usualmente em ambientes inadequados, como praias e terrenos baldios (CORRADINI *et al.* 2009), tem-se poluição de espaços públicos, onde as cascas chegam a levar até dez anos para completar o processo de degradação, ocasionando em um ambiente urbano desagradável, com foco de criação de mosquitos e transmissão de doenças (BANERJEE *et al.*, 2013).

Para Rosa *et al.* (2001), mesmo que não se possa contabilizar a geração de resíduo de coco verde, sabe-se que ele constitui cerca de 70% de todo lixo gerado nas praias brasileiras, e que tal material se faz correntemente destinado a aterros ou vazadouros sendo, como toda matéria orgânica, fonte potencial na emissão de gás metano, diminuindo a vida útil projetada para esses depósitos, e, ainda, sendo fonte de vetores transmissores de doenças, mau cheiro, possíveis contaminação do solo e corpos d'água, além da inevitável destruição da paisagem urbana.

Os autores Salamai *et al.* (2019) e Moritz *et al.* (2016) destacam que a avaliação da incerteza do quantitativo de resíduos de cascas de coco verde, nas localidades produtoras e de consumo, e o estudo das possibilidades do destino desses dejetos são averiguações necessárias para o gerenciamento de riscos de uma, possível, nova cadeia produtiva.

Silveira (2008) alega que para determinar os impactos ambientais do resíduo de coco verde no meio ambiente, é imprescindível estudar a quantia que cada local é capaz de gerar, propiciando a compreensão acerca do reaproveitamento nas comunidades. Simon *et al.* (2018) asseguram que ao reutilizar os recursos naturais, move-se a economia com geração de empregos diretos e indiretos, além de reduzir a poluição ambiental.

Devido ao Brasil ser o quarto país com maior produção de coco no mundo (FAOSTAT, 2018), aqui, o seu agronegócio é especializado, principalmente, em consumo de água de coco verde (CARRIJO *et al.*, 2002). Uma investigação feita por Passos (2005) indica que o uso de cascas de coco verde na fabricação de novos produtos conduz à minimização nas emissões de GEE, posto que as cascas geram metano (CH₄) quando sujeitas a situações de decomposição anaeróbica em lixões.

Devido aos problemas expostos nesta seção, faz-se necessário estudar as quantidades de resíduos gerados e verificar um destino para estes, conforme este trabalho propõe, visando assim, minimizar os impactos dos dejetos de coco e, conseqüentemente, as contaminações geradas por esses.

2.1.6 Utilização da Fibra e Pó do Coco Verde

A fim de obter a fibra e o pó do coco verde, a fruta é coletada, rasgada, secada, moída e depois peneirada. Rosa *et al.* (2009) acrescentam que o aumento da demanda por fibra e pó de coco nos mercados têm ocorrido por conta dos seus muitos usos, baixo custo, fonte renovável e a preocupação atual com produtos ecologicamente seguros. Por conta disso, esta seção objetiva listar trabalhos, os quais reutilizaram este material em outras aplicações.

Como já foi visto na seção 2.1.2, a casca de coco verde é formada pelo mesocarpo e endocarpo da fruta. Essa ao passar pelo processo de esmagamento e prensagem, libera um líquido, o líquido da casca do coco verde, utilizado na formulação de resinas fenólicas, em processos fermentativos, na geração de biogás e na fertilização de culturas agrícolas (ROSA *et al.* 2011).

As cascas do coco verde ainda podem ser utilizadas em produtos de jardinagem e artesanato, onde se apresentam como ótimas opções para a substituição de vasos feitos com a planta xaxim, em risco de extinção (ZANOTTI *et al.*, 2015). Além de ter sua aplicação também na fabricação de vasos e tubos com fibra de coco, visando minimizar os impactos ambientais e substituir os vasos de plástico para o plantio de mudas (DIAS *et al.*, 2011).

Na jardinagem, os substratos que incluem pó de coco verde e fibra favorecem a permanência de água na planta (CARRIJO *et al.*, 2002); melhoram a limpeza; ajudam a eliminar fungos, moscas e algas (MORITZ *et al.*, 2016); contribuindo para uma germinação mais rápida (RAMOS, 2008), permitindo a adição de enzimas e nutrientes que favorecem o plantio de diversas culturas (DIAS *et al.*, 2011). Esses tipos de substratos ainda são capazes de reduzir a periodicidade de irrigação do solo, economizando água e melhorando a condição física e biológica do solo (MOREIRA *et al.*, 2010).

Outra finalidade seria para a fabricação de briquetes, que substituem a lenha e são uma forma de carvão (SEBRAE, 2017). Através do processo de briquetagem, há a transformação da biomassa ou matéria orgânica em um material de forma regular e que será utilizado como combustível em caldeiras ou fornos industriais. Mortiz *et al.* (2016) afirmam que a produção de briquetes a partir das cascas de coco verde já é realizada, porém, ainda em fase de desenvolvimento, para César *et al.* (2009) esta produção só pode ser realizada se a fibra for compactada em blocos, sem o uso de carbonização e ligantes. Para Silveira (2008), a quantidade média diária de casca de coco verde necessária para fornecer um depósito de briquete na alta temporada corresponde a um volume de 56 m³. Quantidades essas, que quando usadas para a produção de novos produtos, ampliam a vida útil da casca, reduzindo o descarte em aterros.

Abaixo serão elencados, ainda, outros trabalhos relevantes quanto à reutilização da casca do coco verde como material cimentício e também como agregado em concreto.

Arimanwa *et al.* (2020) realizaram uma investigação quanto ao desempenho da cinza de fibra de coco empregadas como substituintes de cimento em teores de 10%, 20% e 30% em massa, os mesmos concluíram que para a dosagem, a substituição cimentícia de cinzas apenas reduzia os valores de resistência à compressão, no entanto, ressalta-se que as fibras nesse trabalho foram queimadas em um forno improvisado por dez horas em temperatura não controlada.

Adajar *et al.* (2020) também utilizaram cinza da casca de coco, classificada como pozolana de Classe N, em substituição ao cimento, avaliando o concreto com base na relação da resistência à compressão. A porcentagem ideal de substituição do cimento por cinza foi de 10%, pois apresentava valores aproximados dos corpos de prova de referência.

Enquanto que Ikponmwoza *et al.* (2020) utilizaram a cinza de casca de coco, queimada durante 5 horas, para substituir 10% de cimento em concreto e como ligante ativado por álcalis. Os resultados experimentais mostraram que a resistência à compressão e resistência à tração aumentaram 7,7% e 29,4% com inserção e aumento da concentração do hidróxido de sódio.

Já os autores Ramadhansyah *et al.* (2020) adicionaram a cinza de casca de coco provenientes de carvão a um betume em 0%, 2%, 4%, 6% e 8% em peso. Os autores observaram que a adição dessa cinza no concreto asfáltico proporciona significativo desenvolvimento em estabilidade, módulo de rigidez e de fluência, recomendando que as substituições em teores de 4% e 6% como ligante suplementar podem melhorar as propriedades mecânicas do concreto asfáltico, mesmo em condições de envelhecimento.

Kumar e Kesavan (2019) realizaram testes básicos de resistência, como propriedades de compressão, tração e flexão para adição de fibras de coco em 5% e cinzas de fibra de coco a 15% na mistura de concreto e com a adição desse componente de fibras de coco e cinzas, os autores constataram um aumento otimista nas propriedades de resistência à base da mistura.

Prakash e Thenmozhi (2020) desenvolveram duas misturas diferentes, uma com casca de coco apenas como agregados graúdos e a outra com a combinação de agregados convencionais e casca de coco como agregados graúdos, os autores também substituíram cimento por cinzas volantes classe F em 10%, em peso, nas misturas de concreto, obtendo resultados favoráveis para as misturas de concreto ao adicionar fibras de polipropileno.

Enquanto Memon *et al.* (2019) verificaram a utilização do comportamento estrutural do concreto leve produzido com agregado de casca de coco triturado com o objetivo de investigar o efeito da substituição parcial de agregado graúdo em 5%, 10% e 15%, averiguando que a resistência à compressão também diminuiu com o aumento da porcentagem, mas com valores aceitáveis.

Com base nos trabalhos mostrados acima, verifica-se a empregabilidade das cascas do coco em vários ramos e produtos, sendo possível produzir concretos com qualidade, devendo-se investigar as características que uma região deve ter para se adequar à fabricação do produto.

2.2 CIMENTO PORTLAND

2.2.1 Histórico

A palavra cimento advém do latim *caementu* e era utilizado como desígnio, na velha Roma, para uma espécie de pedra natural de rochedos não esquadrejada (ABCP, 2020). A aplicação de materiais cimentícios remonta de vários anos atrás, quando os antigos Egípcios utilizavam gesso impuro e os Gregos e os Romanos utilizavam calcário calcinado. Com o passar dos anos, ambas civilizações passaram a incrementar nas misturas areia e pedra fragmentada ou fragmentos de tijolos ou telhas ao calcário e à água, dando início ao primeiro concreto da

história. Por conta de a argamassa de cal não endurecer em construções submersas, os Romanos moíam a cal juntamente com cinza vulcânica ou telhas de barro cozido moídas, a reação da sílica e a alumina presentes na cinza e os fragmentos de telha reagiam com a cal produziam o que se tornou, hoje, o chamado cimento pozolânico, graças ao nome da cidade de Pozzuoli, próxima ao monte Vesúvio, onde as cinzas foram, a princípio, identificadas (NEVILLE, 2016).

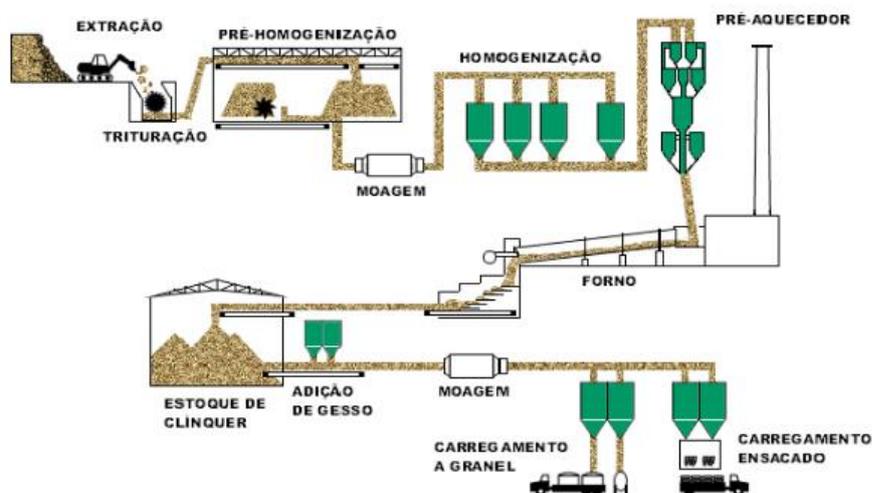
Foi somente em 1824, que o cimento Portland ganhou essa denominação devido ao pedreiro e construtor inglês Joseph Aspdin, que obteve a patente deste material feito a partir da queima, em elevadas temperaturas, de calcário e argila finamente moídos e misturados. Aspdin designou esse aglomerante de cimento Portland graças a sua semelhança em cor e qualidade, quando endurecido, com as rochas calcárias da Península de Portland, situada no sul da Inglaterra (KLEMM, 1989).

2.2.2 Fabricação do Cimento Portland

Conforme foi visto na seção acima, o cimento é constituído sobretudo de material calcário, alumina e sílica encontradas em argilas ou folhelhos. Pode-se utilizar também a marga, que é uma mistura de materiais argilosos e calcários. A produção do cimento constitui-se de moagem da rocha calcária, na sua mistura em determinadas proporções com os outros constituintes e na queima (a temperaturas de até 1450 °C) em grandes fornos rotativos, onde o material é sinterizado e parcialmente fundido, tomando a forma de esferas conhecidas como clínqueres. O clínquer é resfriado e recebe a adição de um pequeno teor de sulfato de cálcio, sendo então moído até se tornar um pó bastante fino. O material resultante é o cimento Portland (NEVILLE, 2016).

Ressalta-se, ainda, que a homogeneização e moagem das matérias-primas podem ser realizadas sob duas condições: (i) em água, sendo denominado de processo “por via úmida”; ou (ii) em condição seca, sendo chamado de processo “por via seca”. O processo por via úmida é mais antigo e, devido ao elevado consumo energético necessário para eliminar a água, encontra-se em desuso (COUTINHO, 1997). Mesmo assim, os métodos de fabricação do cimento estão sujeitos à dureza das matérias-primas bem como seu teor de umidade. Por meio da Figura 2, observa-se o processo de fabricação de cimento.

Figura 2 – Processo de fabricação do cimento Portland



Fonte: RENÓ, 2007

Através da figura acima, notam-se algumas etapas estabelecidas na produção do cimento Portland, a qual se inicia mediante à (i) extração e britagem das matérias-primas, onde são coletados calcário e argila, extraídas de minas que, na maioria dos casos, são localizadas próximas à fábrica de cimento. Em seguida, essas matérias-primas são britadas, intencionando obter uma redução dimensional (UTLU *et al.*, 2006).

Posteriormente há a (ii) preparação das matérias-primas, que após a pré-homogeneização, são secas e depositadas juntas em porções definidas e controladas em um moinho para produzir a farinha, também denominada de “cru”, para o processo via seca. No processo úmido, as matérias-primas são misturadas com água suficiente para produzir uma pasta (NEVILLE, 2016).

A farinha é então pré-aquecida pelos gases do forno, por meio da (iii) preparação dos combustíveis. Neste processo, utilizam-se combustíveis fósseis para a fabricação do clínquer, principalmente, os carvões (vegetal e mineral), o coque de petróleo e óleos pesados. Após esta etapa, tem-se a (iv) queima do clínquer, realizada de maneira controlada e de temperaturas de até 1450 °C, causando diversas reações termoquímicas na farinha, originando o clínquer (UTLU *et al.*, 2006).

A penúltima etapa abrange o processo de (v) moagem do cimento, realizada em um moinho tubular de bolas, composto por 2 compartimentos, separados por uma parede divisória equipada por fendas, de abertura regulável, por onde é arrastado o produto (SELLITTO, 1999). O cimento Portland é produzido pela moagem entre o clínquer, as adições e uma pequena porcentagem de gesso, no moinho de cimento. Os cimentos compostos contêm outros constituintes tais como: escória de alto forno, pozolana natural ou industrial (cinzas vulcânicas

ou cinzas volantes de usinas termelétricas), ou fíler calcário (RENÓ, 2007). Por fim, tem-se a (VI) expedição do cimento, que é transportado em silos (caso a distância seja curta) ou empacotado em sacos e empilhado para despacho.

2.2.3 Composição Química

A composição química do cimento engloba quatro compostos comumente ditos como constituintes essenciais. Na Tabela 3 encontram-se listados esses compostos e suas abreviaturas, onde $\text{CaO} = \text{C}$; $\text{SiO}_2 = \text{S}$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{A}$; e $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{F}$.

Tabela 3 – Principais compostos químicos do cimento Portland

Nome do Composto	Composição em Óxidos	Nome do Mineral	Abreviatura
Silicato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	Alita	C_3S
Silicato dicálcico	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	Belita	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	Aluminato	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	Ferrita	C_4AF

Fonte: NEVILLE, 2016

Dentre os compostos listado na Tabela 3, os silicatos se encontram entre os mais importantes, pois são os responsáveis pela resistência da pasta de cimento hidratada. O C_3S constitui de 50% a 70% do clínquer e reage de forma relativamente rápida com a água, sendo responsável pelo ganho de resistência da mistura até os 28 dias de idade. Enquanto que o C_2S constitui de 15% a 30% do clínquer e reage lentamente com a água, contribuindo pouco com a resistência até os 28 dias, no entanto, em idades posteriores a belita mostra aumento adicional de resistência, que em um ano tornam-se praticamente os mesmos que da alita (TAYLOR, 1997).

Em contrapartida, o C_3A , que representa entre 5% a 10%, é um composto indesejável para o cimento Portland, visto que sua contribuição para a resistência é pouquíssima, exceto nas primeiras idades. Além disso, no caso de a mistura ser atacada por sulfatos, a formação de etringita (sulfoaluminato de cálcio) pode ocasionar a desagregação do concreto. Mesmo assim, o C_3A mostra-se benéfico ao facilitar a combinação do óxido de cálcio com a sílica. Por fim, tem-se o C_4AF , que constitui entre 5% e 15% no cimento, não afetando significativamente o desempenho do cimento, se equiparado aos outros três compostos principais. Em todo caso, ele se mostra desfavorável, pois reage com a gipsita formando sulfoferrito de cálcio, podendo acelerar a hidratação dos silicatos (TAYLOR, 1997; NEVILLE; BROOKS, 2013).

Neville (2016) ressalta que ainda existem outros compostos secundários, além daqueles citados na Tabela 3 como MgO, TiO₂, Mn₂O₃, K₂O e Na₂O, que em geral também fazem parte da massa do cimento, mas em menores percentuais. Dentre eles, dois óxidos possuem especial interesse: os óxidos de sódio e de potássio (Na₂O e K₂O), mais conhecidos como os álcalis, que podem reagir com os agregados do concreto, provocando a desintegração do concreto e afetando na velocidade de ganho de resistência do cimento.

2.2.4 Tipos de Cimento

O cimento Portland é um material que pode ser encontrado “puro” ou na sua forma composta quando outros tipos de materiais são adicionados na sua mistura. Para a NBR 16697 (2018), os cimentos Portland são designados por seu tipo que correspondem a adições e propriedades especiais, sendo identificados por suas siglas, conforme indicado na Tabela 4.

Tabela 4 – Designação, tipos de cimento Portland e limites de composição

Designação	Subtipo	Sigla	Classe de resistência	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
Cimento Portland Comum	Sem adição	CP I		95-100	0-5	0-5	0-5
	Com adição	CP I-S		90-94	0	0	6-10
Cimento Portland Composto	Com escória granulada de alto forno	CP II-E		51-94	6-34	0	0-15
	Com material pozolânico	CP II-Z	25, 32 ou 40	71-94	0	6-14	0-15
	Com material carbonático	CP II-F		75-89	0	0	11-25
Cimento Portland de Alto-forno	-	CP III		25-65	35-75	0	0-10
Cimento Portland Pozolânico	-	CP IV		45-85	0	15-50	0-10
Cimento Portland de Alta Resistência Inicial	-	CP V	ARI	90-100	0	0	0-10
Cimento Portland Branco	Estrutural	CPB	25, 32 ou 40	75-100	-	-	0-25
	Não estrutural	CPB	-	50-74	-	-	26-50

As classes 25, 32 e 40 representam os valores mínimos de resistência à compressão aos 28 dias de idade, em megapascals (MPa), conforme método de ensaio estabelecido pela ABNT NBR 7215.

Cimento Portland de alta resistência inicial, CP V, que apresenta a 1 dia de idade resistência igual ou maior que 14 MPa, quando ensaiado de acordo com a ABNT NBR 7215 e atende aos demais requisitos estabelecidos nesta Norma para esse tipo de cimento.

Fonte: NBR 16697, 2018

Como pode ser visto na tabela acima, cada tipo de cimento Portland possui características próprias de fabricação e são recomendados para o uso a depender do local de aplicação.

2.2.5 Impactos Causados pela Fabricação de Cimento

De acordo com o relatório elaborado em 2020 pelo Sindicato Nacional da Indústria de Cimento (SNIC), no ano de 2019 as vendas de cimento Portland, no Brasil, no mês de dezembro somaram 4 milhões de toneladas, representando um crescimento de 1,6% em relação ao mesmo mês de 2018. Sendo assim, em 2019, foi vendido um total de 54,5 milhões de toneladas de cimento em todo o território nacional, com um aumento de 3,5% sobre o ano anterior.

Não obstante, nem todas as regiões brasileiras apresentaram esse incremento nas vendas, que não foi de maneira homogênea nos estados. As vendas da região Norte tiveram queda de 1,6% em relação ao ano de 2018, ocorrida, principalmente, pelo deslocamento da produção localizada nessa região para o Nordeste e Centro-Oeste, salienta-se que o estado do Amazonas entre janeiro e setembro de 2019 produziu cerca de 240.467 toneladas de cimento, destacando-se como o terceiro maior produtor da região. Enquanto que as vendas no Sudeste apresentaram aumento de 3,6%, provocado principalmente pelo melhor desempenho de São Paulo, que tem 50% de seu consumo com origem em outros estados, principalmente Minas Gerais (SNIC, 2020).

Considerando o aumento das vendas de cimento, observa-se o aumento na demanda anual de concreto, a qual está se aproximando de 30 bilhões de toneladas, destacando-se como principal material utilizado em todo o mundo (MONTEIRO *et al.*, 2017). Além disso, o fato de sua produção exigir muita energia faz com que seja um dos setores críticos em termos de emissões de GEE. Portanto, a implementação de estratégias para reduzir as emissões de carbono ligadas à produção de cimento e concreto é um desafio crítico para o mundo cumprir as ações de mitigação estabelecidas no Acordo de Paris (JOKAR; MOKHTAR, 2018). Essas reduções podem ser canalizadas através de três vias principais. Em primeiro lugar, as reduções de emissões de GEE podem ser obtidas otimizando o uso de energia na produção de cimento ou a implementação de tecnologias de captura e armazenamento de carbono, embora os custos para este último ainda sejam uma restrição importante (HUNTZINGER; EATMON, 2009). Em segundo lugar, estudos identificaram a necessidade de reduzir a relação clínquer / cimento com outros tipos de adições (por exemplo, cimentos misturados) para reduzir as emissões de dióxido de carbono (BOESCH; HELLWEG, 2010). Por fim, a minimização do uso de cimento no concreto em infraestrutura civil e pública, promovendo o uso de materiais de construção alternativos, sendo também uma medida atraente (TEIXEIRA *et al.*, 2016).

Produzir cimento implica no uso de grandes quantidades de matérias-primas e energia (OSS; PADOVANI, 2002), somente essa ação é responsável por 8% das emissões antrópicas

de dióxido de carbono (OLIVIER *et al.*, 2016) e 13% das emissões globais de GEE de fontes industriais (FISHEDICK *et al.*, 2014). Em consequência da vasta urbanização, o uso de cimento aumentou drasticamente (CHEN *et al.*, 2015), influenciando no consumo de recursos naturais limitados como água, seixo, areia ou pedra britada (MEFTEH *et al.*, 2013).

Em 2013, as emissões globais de CO₂ devido ao uso de combustível e à produção de cimento foram de 36 Gt (9,9 Gt de C); sendo 61% maior que em 1990 e 2,3% maior que em 2012. Em 2018, o aumento de 2,0% (1,0 Gt de CO₂) nas emissões globais de GEE ocorreu principalmente devido a um aumento de 2,0% nas emissões globais de dióxido de carbono fóssil (CO₂) da combustão de combustíveis fósseis e de processos industriais de não combustão, incluindo a produção de cimento (OLIVIER; PETERS, 2020).

O aumento anual do CO₂ na atmosfera foi impulsionado principalmente pelas dezenas de gigatoneladas nas emissões de CO₂ da combustão de combustíveis fósseis e na calcinação de carbonatos encontrados no calcário, quando usado para produzir clínquer ou cimento e pelas emissões de CO₂ da floresta em incêndios de larga escala. Ressalta-se que a calcinação na produção de clínquer é responsável por 4% das emissões de CO₂ e que tal valor contribuiu com quase três quartos do aumento total de GEE em 2018, o qual cresceu 11,6% quando comparado a 2010 (OLIVIER; PETERS, 2020).

2.3 ADIÇÕES MINERAIS

Os autores Mehta e Monteiro (2006) definem adições minerais como materiais finamente divididos e adicionados ao cimento. Como já foi visto na seção 2.2.1, elas podem ser de origem natural (cinza vulcânica) ou não, quando precisam passar por um tratamento. Levando em consideração questões econômicas e sustentáveis, tem-se ainda o caso da utilização de resíduos industriais ou agrícolas como fontes primárias de adições, a título de exemplo lodo de estação de tratamento de esgoto e casca de coco verde.

Estes subprodutos agroindustriais dados como sem valor econômico tornam-se utilizáveis para a composição de compósitos à base de cimento, uma vez que reagem com hidróxido de cálcio [Ca(OH)₂] e formam como produto o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), responsável pela resistência da pasta de cimento.

Por via de regra, as adições possibilitam reduzir os custos de produção do cimento ao substituírem parcialmente o clínquer por materiais de menor custo energético, no entanto, deve-se levar em consideração também que esses materiais são capazes de reduzir os impactos ambientais gerados na produção do clínquer Portland, ao minimizar a quantidade de CO₂

emitido e a exploração das jazidas de calcário. De modo geral, as adições minerais podem ser classificadas como pozolana ou fíler.

2.3.1 Fíler

Segundo Neville (2016), o fíler é uma adição mineral moída, com finura aproximada a do cimento Portland, que, devido a suas propriedades físicas, exerce um efeito promissor em propriedades do concreto, melhorando aspectos como trabalhabilidade, massa específica, permeabilidade, capilaridade, exsudação e tendência à fissuração. O fíler é, em geral, um material quimicamente inerte, todavia caso ele possua características hidráulicas ou reaja de maneira não prejudicial com os produtos da pasta de cimento hidratada, mostra-se vantajosa a sua utilização.

O efeito fíler dá-se por conta da maior compacidade da mistura em consequência da inserção de partículas finas e ultrafinas de aditivo mineral. Partículas mais finas de cimento Portland, teoricamente, poderiam proporcionar o mesmo efeito físico, contudo, quando misturados com água, elas se dissolvem rapidamente, tornando ineficiente o efeito de densificação da mistura (MALHOTRA; MEHTA, 1996).

Este aditivo mineral pode ser de origem natural ou obtido a partir do processamento de minerais inorgânicos, cuja propriedade fundamental é a sua finura, que quando adicionado ao cimento Portland também resulta em uma aceleração das reações de hidratação, dado que os fílers se alojam nos interstícios dos cristais de clínquer, aumentando a superfície efetiva de contato (CORDEIRO, 2006). Um efeito desfavorável, entretanto, é a diluição. Quanto menos cimento, menos produtos resistentes são formados na hidratação do cimento (LAWRENCE *et al.*, 2003).

Ressalta-se que a ação dos fílers é predominantemente física, sendo assim, deve haver compatibilidade física com o cimento com que estão misturados. Os fílers são capazes de intensificar a hidratação do cimento Portland, agindo como pontos de nucleação, ou seja, ao inserir o mineral na matriz, esse se deposita em poros gerados na mistura, próximos à superfície dos agregados, proporcionando a desorientação de cristais de hidróxido de cálcio e diminuindo seu tamanho, tal efeito é chamado de microfíler. No entanto, para obtenção desse tipo de efeito, que propicia a densificação da matriz, o diâmetro médio das partículas de adição mineral deve ser semelhante ou menor que o diâmetro médio das partículas de cimento (DAL MOLIN, 2005).

2.3.2 Pozolana

Pozolanas são materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si sós, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finalmente divididos e na presença de água, reagem com hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes (NBR 12653, 2014). Neville (2016) enfatiza que é indispensável que a pozolana esteja finamente moída, visto que é apenas desta forma que a sílica pode ser combinada com o hidróxido de cálcio (produzido pelo cimento Portland em hidratação) na presença de água para formar silicatos de cálcio estáveis com propriedades cimentícias. Destaca-se, ainda, que a sílica seja amorfa (vítrea), dado que a sílica cristalina tem baixa reatividade.

A NBR 11172 (1990) classifica as pozolanas em: (i) naturais, as quais são de origem vulcânica, geralmente de caráter petrográfico ácido (65% de SiO₂) ou de origem sedimentar com atividade pozolânica; e (ii) artificiais, originárias de tratamento térmico ou subprodutos industriais com atividade pozolânica.

Outra categorização das pozolanas dadas pela NBR 12653 (2014) são: (i) Classe N, que compreende pozolanas naturais e artificiais como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, “cherts” silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas; (ii) Classe C, que abrangem cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas; e (iii) Classe E, que são consideradas qualquer pozolana cujos requisitos diferem das classes anteriores. Na Tabela 5 estão elencadas as classes pozolânicas juntamente com seus requisitos químicos.

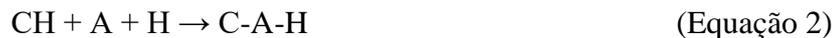
Tabela 5 – Requisitos químicos

Propriedades	Classe de material pozolânico		
	N	C	E
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (%)	≥ 70	≥ 70	≥ 70
SO ₃ (%)	≤ 4	≤ 5	≤ 5
Teor de umidade (%)	≤ 3	≤ 3	≤ 3
Perda ao fogo (%)	≤ 10	≤ 6	≤ 6
Álcalis disponíveis em Na ₂ O (%)	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 1,5

Fonte: NBR 12653, 2014

Através do exposto na tabela acima, verifica-se que a presença de sílica (SiO₂) e alumina (Al₂O₃) em sua forma reativa, amorfa, nas pozolanas são as principais responsáveis pelas reações pozolânicas, as quais necessitam de uma quantidade de hidróxido de cálcio para se

combinar e constituir novos compostos hidratados. A partir dessa aglutinação, forma-se o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que possui baixa cristalinidade e composição variável conforme o tempo de hidratação (DAY, 1990; MASSAZZA, 1998). Nas Equações 1, 2 e 3 são mostrados os compostos que podem ser formados durante a reação pozolânica, dependendo do seu composto químico.



Dentre as vantagens da incorporação de pozolanas ao cimento Portland, destacam-se: (i) o fato da reação entre ambos tornar-se mais lenta, possuindo baixa liberação de calor de hidratação, sucedendo em menos problemas de fissuração por conta da retração; (ii) o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento Portland, que pouco contribuiria para a resistência do mesmo e, ainda, poderia causar problemas na durabilidade, será consumido pela reação pozolânica; e (iii) há a distribuição do tamanho dos poros dos cimentos pozolânicos hidratados. Os produtos da reação pozolânica preenchem os espaços capilares da pasta hidratada, complementando para o aumento da resistência e minimizando a permeabilidade do sistema (CORDEIRO, 2009; MEHTA; MONTEIRO, 2006).

As pozolanas ainda apresentam um efeito físico nas misturas com cimento Portland, no aumento da mistura, em virtude do efeito microfíler, decorrido do preenchimento de vazios pelas finas partículas do material pozolânico, que é menor que o cimento. Sendo assim, há o refinamento da estrutura dos poros e dos produtos da hidratação do cimento, dado que os pequenos cristais formados preenchem os espaços deixados pela hidratação do cimento Portland. Em concretos, ocorre ainda a densificação da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado (DAL MOLIN, 2011).

2.3.3 Caracterização de Cinzas Produzidas a partir de Resíduos Agroindustriais

2.3.3.1 Composição Química

Na Tabela 6 estão elencados alguns trabalhos e a respectiva quantidade, em porcentagem, de elementos químicos encontrados pelos autores que também produziram cinzas a partir da casca do coco verde.

Tabela 6 – Comparação da composição química da casca do coco verde e da cinza da casca do coco

Óxidos (%)	Temperatura de queima / Tempo (h)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	Outros
Cinza da Casca do Coco Verde													
Adajar et al. (2020)	- ; 4h	-	-	17,38	60,91	-	0,50	-	-	0,84	1,72	80,01	18,65
	500 °C; 2h	-	-	0,76	8,09	0,27	3,12	37,28	19,85	27,93	1,09	9,94	1,61
	600 °C; 2h	-	-	0,36	11,65	0,08	2,50	36,85	18,32	29,71	0,40	12,41	0,13
Anuar et al. (2020)	700 °C; 2h	-	-	0,84	9,24	0,06	2,67	36,17	18,40	31,10	0,89	10,97	0,63
	depois de tratamento ácido a 700 °C; 2h	-	-	4,68	91,76	0,99	0,42	-	0,96	0,71	0,25	96,69	0,23
Ashokkumar et al. (2019)	-	0,95	1,98	24,12	35,97	0,43	0,71	-	0,83	-	13,48	73,57	21,53
Hassan et al. (2018)	-	0,62	6,53	10,30	24,60	-	0,526	0,7	17,00	30,8	8,84	43,74	48,10
Ikponmwosa et al. (2020)	- ; 5h	0,68	-	23,49	38,03	-	0,53	-	-	12,68	11,56	73,08	13,03
Joshua et al. (2018)	> 700 °C; 3h	-	0,87	8,79	66,32	0,51	0,69	-	3,26	6,25	5,35	80,46	7,96
Kumar, Pridhar, Sree Balaji (2018)	400 °C; 2h	0,72	12,37	21,84	41,26	-	-	-	-	0,67	18,45	81,55	4,69
Satheesh e Pugazhvadivu (2019)	-	-	-	4,80	65,90	-	-	-	9,00	5,80	14,20	84,90	0,30
Utsev e Taku (2012)	- ; 3h	0,95	1,89	24,12	37,97	0,32	0,71	-	0,83	4,98	15,48	77,57	12,75
Coco in natura													
Agrizzi (2017)	-	3,00	2,58	-	3,19	4,55	6,97	-	63,79	15,00	< 1	15,26	0,92
Ikumapayi e Akinlabi (2020)	-	0,41	19,40	16,76	45,60	-	-	-	0,42	0,78	8,98	71,34	7,65

Verifica-se na Tabela 6 que a temperatura de queima para a produção de cinzas entre os autores varia na faixa de 400 °C a 700 °C, quando em ambiente controlado, e que o tempo de queima também varia conforme cada trabalho executado. Por meio dos trabalhos de Adajar *et al.* (2020); Anuar *et al.* (2010); Ashokkumar *et al.* (2019); Ikponmwoşa *et al.* (2020); Joshua *et al.* (2018); Kumar, Pridhar, Sree Balaji (2018); Satheesh e Pugazhvadivu (2019); e Utsev e Taku (2012) , é possível inferir que o somatório de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ das cinzas produzidas a partir da casca do coco verde mostra-se favorável, uma vez que estes se mostram superiores a 50%, o mínimo exigido pela NBR 12653 (2014). Cabe ressaltar aqui que Anuar *et al.* (2020) obtiveram resultados de composição química com presença elevada de metais alcalinos e cloro, tendo de realizar correção por meio de beneficiamento químico para a obtenção de cinza considerada como pozolânica.

Na Tabela 7 encontram-se os resultados dos ensaios de FRX, realizados por Cordeiro *et al.* (2020), de produção de cinzas agrícolas aplicando beneficiamento químico com ácido cítrico, utilizando concentração de 10%.

Tabela 7 – Composição química das cinzas de resíduos agrícolas após tratamento com ácido cítrico

Óxidos (%)	Cinza da casca do arroz	Cinza do bagaço da cana-de-açúcar	Cinza da palha de milho	Cinza da folha de bambu
Na ₂ O	0,10	-	-	-
Al ₂ O ₃	2,92	-	-	-
SiO ₂	92,25	90,80	89,11	91,00
P ₂ O ₅	-	-	0,90	-
SO ₃	1,33	2,28	2,69	2,55
K ₂ O	-	2,32	2,10	-
CaO	0,10	0,90	1,60	3,95
TiO ₂	-	-	0,10	0,10
Fe ₂ O ₃	0,29	1,60	0,30	0,31
Mn ₂ O ₃	-	0,10	-	-
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	95,46	92,40	89,41	91,31
Outros	3,01	2,00	3,20	2,09

Fonte: Cordeiro *et al.* (2020)

Conforme a tabela acima, nota-se que a utilização do beneficiamento químico aumenta o somatório de óxidos de Si, Al e Fe, comprovação esta feita também por Anuar *et al.* (2020). Vale destacar que a presença de metais alcalinos e cloro são mínimas e até mesmo ausente em algumas cinzas produzidas. Tornando o tratamento químico dos resíduos de grande valia.

As variações das composições químicas, tanto dos resíduos de coco quanto de outras culturas agrícolas, se dão por conta do tipo de adubação e plantio praticado em cada região. No

Amazonas, local de estudo desta pesquisa, são utilizados comumente fertilizante e calcário para a adubação do solo e cultivo do coco verde. Na Tabela 8 estão listados os fertilizantes utilizados juntamente com suas composições químicas. Portanto, espera-se encontrar na composição química da fibra do coco alguns dos elementos listados abaixo.

Tabela 8 – Composição química dos fertilizantes utilizados para o cultivo do coqueiro no Amazonas

Fertilizante	Composição Química (%)										
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	S	B	Cl	Mn	Cu	Zn
Bórax de solo	-	-	-	-	-	-	11,5	-	-	-	-
Calcário dolomítico	-	-	-	25-35	13-21	-	-	-	-	-	-
Cloreto de potássio	-	-	60	-	-	-	-	48	-	-	-
FTE - BR 12	-	-	-	-	-	3	1,8	-	2,1	0,8	9
Sulfato de amônio	20	-	-	-	-	24	-	-	-	-	-
Sulfato de magnésio	-	-	-	-	9,5	13	-	-	-	-	-
Superfosfato simples	-	20	-	20	-	12	-	-	-	-	-
Superfosfato triplo	-	45	-	13	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: SILVA; MENDES (2004); PRIMAVERSI (2004); CUNHA; FRANCO (2017)

2.3.3.2 Tamanho Médio das Cinzas e Área Superficial Específica

Não somente a composição química afeta na pozolanicidade das cinzas como também a sua dimensão. A NBR 12653 (2014) ressalta o fato destes materiais serem finamente moídos. Por conta disso, diversos autores realizaram moagem de cinzas de resíduos agroindustriais a fim de aumentar o potencial pozolânico destes. Na Tabela 9 estão elencados alguns trabalhos realizados, juntamente com o tamanho médio da amostra, tipo de moinho utilizado e tempo de moagem de cada material.

Tabela 9 – Comparação entre os tempos de moagem e tamanho médio de partículas de cinzas de resíduos agroindustriais

Autores	Material Analisado	Tipo de Moinho	Tempo de Moagem (min)	D ₅₀ (µm)
Cordeiro; Vieira; Lopes (2017)	CFCA ¹	Moinho de bolas planetário	15	9,52
	CFCA*		15	11,51
	CFCA**		15	11,64
Basto; Junior; Neto (2019)	CLE ² 600	Moinho de bolas	20	26,889
	CLE 700		20	26,854
	CLE 800		20	33,627
	CLE 900		20	33,691
Cordeiro; Andreão; Tavares (2019)	CBCA ³	Moinho de bolas planetário	-	10,2

Andreão <i>et al.</i> (2020)	CBCA (topo do tanque)	Moinho Attritor	60	9,79
	CBCA (fundo do tanque)		120	10,7
Vieira <i>et al.</i> (2020)	CCA ⁴ 20	Moinho de bolas rotativo	30	20
	CCA 14	Moinho de bolas vibratório	5	14
	CCA 7	Moinho de bolas vibratório	60	7
Barbosa; Cordeiro (2021)	CBCA 1	Moinho Attritor	60	7,2
	CBCA 2		40	7,9
	CBCA 3*		32	9,1
	CCA*		10	8,4
Lima; Cordeiro (2021)	CPM ⁵	Moinho Attritor	30	9,23
	CPM*		30	8,78
	CCA		30	9,17

*A cinza recebeu tratamento térmico/ácido

¹CFCA: Cinza da Folha da Cana-de-Açúcar

²CLE: Cinza do Lodo de Esgoto (600 °C, 700 °C, 800 °C e 900 °C)

³CBCA: Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar

⁴CCA: Cinza da Casca do Arroz

⁵CPM: Cinza da Palha do Milho

Através dos trabalhos apresentados na Tabela 9, observa-se que os autores utilizam diversos tipos de moinho, em diversos tempos, procurando obter valores de diâmetro médio das partículas menores ou próximos a 10 µm, considerado como um parâmetro para o estudo de cinzas pozolânicas devido ao estudo realizado por Cordeiro e Kurtis (2017), onde as cinzas com tamanho médio inferiores a 10 µm, obtiveram resultados satisfatórios de reatividade, com valor de índice de atividade pozolânica de até 106%.

Alicerçado ao tamanho médio das cinzas listadas na Tabela 9, tem-se ainda a área superficial específica BET, que complementa na verificação da atividade pozolânica das cinzas. Na Tabela 10 encontram-se resultados de outras pesquisas realizadas por diversos autores quanto ao BET de cinzas de resíduos agrícolas.

Tabela 10 – Comparação entre as áreas superficiais específicas de cinzas de resíduos agrícolas

Autores	Material Analisado	Área superficial específica BET (m²/kg)
Cordeiro; Sales (2015)		42100
	CCE ¹	44300*
		72600**
Cordeiro; Kurtis (2017)	CBCA ² 1	2970
	CBCA 2	4585
	CBCA 3	8240
	CBCA 4	11350
Cordeiro; Vieira; Lopes (2017)	CBCA	47960
	CBCA*	71160
	CBCA**	433780
Cordeiro; Andreão; Tavares (2019)	CBCA	20960
Andreão <i>et al.</i> (2020)	CBCA (original)	22631
	CBCA (topo do tanque)	29711
	CBCA (fundo do tanque)	13860
Cordeiro <i>et al.</i> (2020)***	CCA ³	63232
	CFB ⁴	199000
	CPM ⁵	91630
	CBCA	13332
Barbosa; Cordeiro (2021)	CBCA 1	5500
Lima; Cordeiro (2021)	CCA	31000
	CPM	13320
	CPM***	171690

* A amostra foi tratada com água quente

** A amostra foi tratada com ácido clorídrico

*** A amostra foi tratada com ácido cítrico

¹CCE: Cinza do Capim Elefante

²CBCA: Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar

³CCA: Cinza da Casca do Arroz

⁴CFB: Cinza da Folha do Bambu

⁵CPM: Cinza da Palha do Milho

Para estes resultados, é válido mencionar a dependência entre o tipo de moinho, tempo de moagem e tratamento físico-químico utilizado, fazendo com que as cinzas tenham resultados diferenciados de BET.

2.3.3.3 Condutividade Elétrica

Em complementação à composição química e à dimensão das cinzas, são realizados ainda ensaios que permitem mensurar a atividade pozolânica das cinzas. Um destes métodos é a avaliação da condutividade elétrica, proposta por Luxán *et al.* (1989). Na Tabela 11

encontram-se elencadas as cinzas dos materiais agrícolas analisados seguindo essa metodologia, juntamente com os resultados obtidos.

Tabela 11 – Comparação entre a variação da condutividade elétrica de cinzas de resíduos agrícolas

Autores	Material Analisado	ΔC (mS/cm)	Classificação
Cordeiro; Vieira; Lopes (2017)	CFCA ¹	1,07	Pozolanicidade moderada
	CFCA*	2,89	Boa pozolanicidade
	CFCA**	5,80	Boa pozolanicidade
Cordeiro <i>et al.</i> (2020)***	CCA ²	5,78	Boa pozolanicidade
	CFB ³	5,91	Boa pozolanicidade
	CPM ⁴	3,73	Boa pozolanicidade
	CBCA ⁵	0,74	Pozolanicidade moderada
Andreão <i>et al.</i> (2020)	CBCA (original)	0,88	Pozolanicidade moderada
	CBCA (topo do tanque)	0,94	Pozolanicidade moderada
	CBCA (fundo do tanque)	0,86	Pozolanicidade moderada
Barbosa; Cordeiro (2021)	CBCA 1	0,68	Pozolanicidade moderada
	CBCA 2	1,35	Boa pozolanicidade
	CBCA 3**	1,99	Boa pozolanicidade
	CCA	4,73	Boa pozolanicidade

* A cinza foi tratada com água quente

** A cinza foi tratada com ácido clorídrico

*** Os autores utilizaram ácido cítrico como pré-tratamento dos materiais

¹CFCA: Cinza da Folha da Cana-de-Açúcar

²CCA: Cinza da Casca do Arroz

³CFB: Cinza da Folha do Bambu

⁴CPM: Cinza da Palha do Milho

⁵CBCA: Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar

A Tabela 11 mostra que as cinzas agrícolas possuem atividade pozolânica variando entre moderada e boa. Através dela, é possível perceber que as cinzas que tiveram beneficiamento químico classificaram-se como cinzas de boa pozolanicidade, corroborando com os resultados previamente mostrados para este tipo de tratamento.

Em adição aos estudos supramencionados, tem-se outras pesquisas, mostradas na Tabela 12, onde os autores realizaram o ensaio de condutividade elétrica no pó do coco verde. No entanto, salienta-se que nestes experimentos a metodologia utilizada foi outra, além de que o ensaio não foi realizado na cinza do coco. Mesmo assim, considera-se proveitosa a verificação da condutividade da matéria-prima antes de qualquer beneficiamento físico-químico.

Tabela 12 – Comparação entre as condutividades elétricas medidas para o pó do coco

Autores	Material analisado	Condutividade Elétrica (mS/cm)
Rosa <i>et al.</i> (2001)	Pó de coco	4,74
	Pó de coco lavado	1,5
Lacerda (2004)	Pó de coco	0,26
Sanches (1999)	Pó de coco	1,8
Oliveira; Hernandez; Junior (2008)	Pó de coco	1,65
	Pó de coco lavado	0,79

2.3.3.4 Método Chapelle Modificado

Em conjunto com a condutividade elétrica, outro ensaio utilizado para avaliar a atividade pozolânica das cinzas é o Chapelle modificado. Na Tabela 13 estão elencados trabalhos que realizaram este estudo de atividade pozolânica para cinzas de resíduos agroindustriais, com diferentes dimensões e tratamentos.

Tabela 13 – Comparação entre os índices de atividade pozolânica Chapelle medidos para cinzas de resíduos agroindustriais

Autores	Material Analisado	Índice de Atividade Pozolânica [mg Ca(OH)₂/g]	
Cordeiro; Sales (2015)	CCE ¹	883	
		888*	
		998**	
Cordeiro; Vieira; Lopes (2017)	CBCA ²	1071	
		CBCA*	1172
		CBCA**	1330
Hoppe Filho <i>et al.</i> (2017)	CCA ³	1336	
		Metacaulim	1193
Memon e Khan (2018)***	CEM ⁴	400 °C	277,4
		500 °C	438
		600 °C	379,6
		700 °C	175,2
		800 °C	73
Cordeiro; Andreão; Tavares (2019)	CBCA	706	
		CBCA (original)	784
Andreão <i>et al.</i> (2020)	CBCA (topo do tanque)	900	
		CBCA (fundo do tanque)	628
Tang <i>et al.</i> (2020)	CIRSU ⁵	< 350	
Andrade Neto <i>et al.</i> (2021)	CBCA	1023,96	
Hasnain <i>et al.</i> (2021)	CCA	480,10	
		CBCA	412,05
Mali e Nanthagopalan (2021)	CBCA	464-1358	

* A amostra foi tratada com água quente

** A amostra foi tratada com ácido clorídrico

*** As cinzas utilizadas foram as retidas na peneira #12

¹CCE: Cinza do Capim Elefante

²CBCA: Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar

³CCA: Cinza da Casca do Arroz

⁴CEM: Cinza da Espiga de Milho

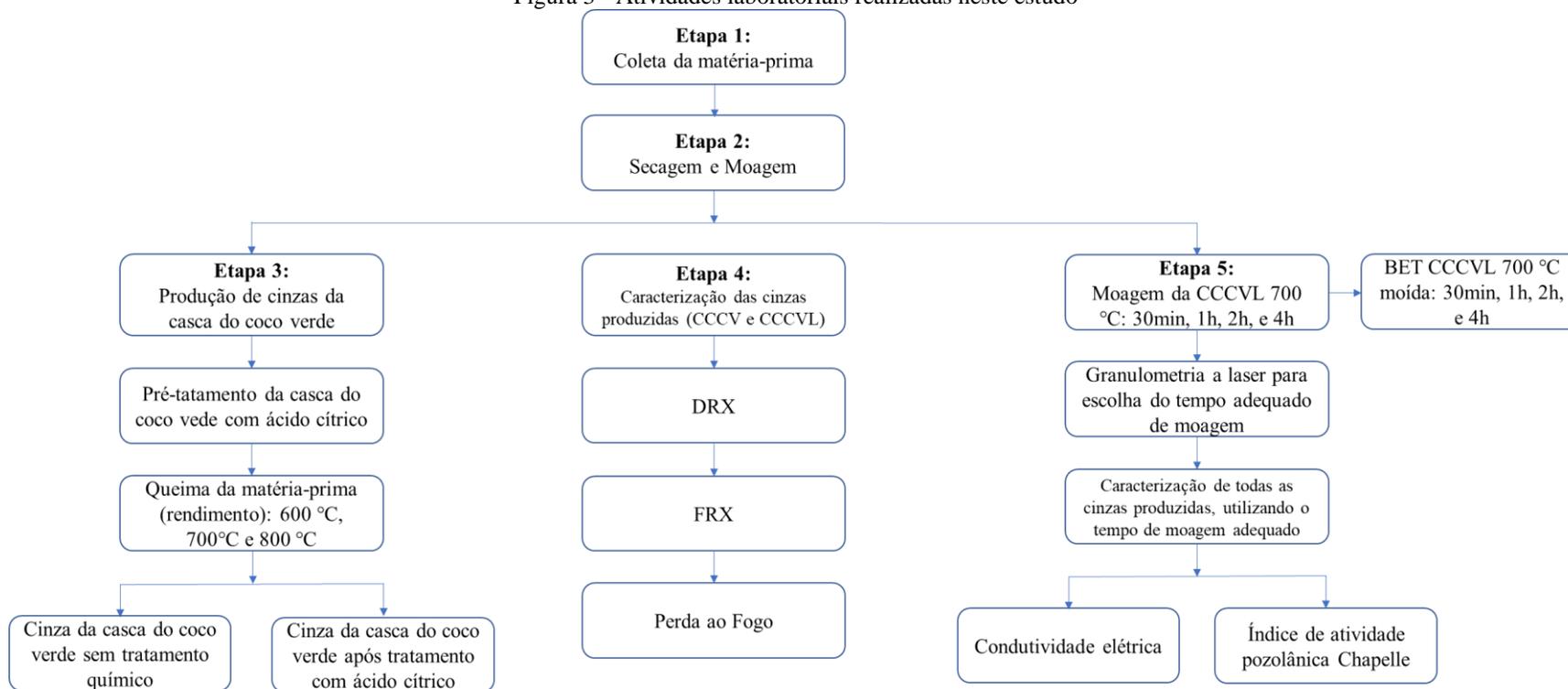
⁵CIRSU: Cinza de Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos

A Tabela 13 mostra que as cinzas apresentaram diversos valores de índice de atividade pozolânica Chapelle, os quais variam de acordo com a composição química e mineralógica de cada amostra. Através desta tabela, verifica-se mais uma vez que as cinzas tratadas com ácido tiveram os maiores valores de atividade pozolânica, uma vez que este tratamento elimina metais indesejados à amostra.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Na Figura 3 é descrita a sequência de atividades laboratoriais, compreendendo 4 etapas de trabalho: (i) coleta da matéria-prima; (ii) secagem e moagem da matéria-prima; (iii) produção de cinzas a partir desta matéria-prima; (iv) caracterização das cinzas produzidas; e (v) moagem e caracterização das cinzas moídas.

Figura 3 - Atividades laboratoriais realizadas neste estudo



3.1 OBTENÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA

As cascas de coco foram coletadas no comércio varejista da cidade de Manaus. Inicialmente, os cocos coletados tiveram seus tegumentos e albúmen sólido separados, visto que serão utilizados apenas o endocarpo, mesocarpo e o epicarpo dos mesmos (Figura 4).

Figura 4 – Limpeza dos cocos para a posterior utilização destes



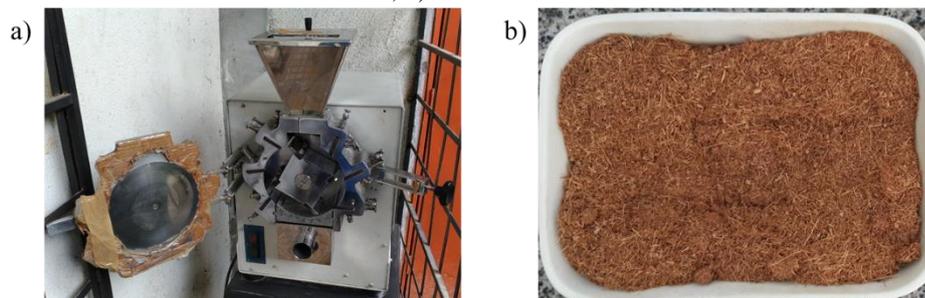
3.2 PROCESSAMENTO DAS CINZA DA CASCA DO COCO VERDE

Após a casca do coco verde ser colocada para secar ao ar por pelo menos 2 dias a fim de que sua umidade fosse reduzida, esta foi colocada em estufa a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ até constância de massa. Por fim, realizou-se o processo de moagem dos frutos em duas etapas: primeiramente em um moedor de galhos (Figura 5), a fim de desfibrar a casca do coco, e depois em um moedor de facas da UFAM até obter-se um pó de granulometria reduzida (Figura 6).

Figura 5 – Casca de coco verde triturada



Figura 6 – Moagem da casca do coco verde: a) Moinho de facas utilizado para a moagem da casca de coco triturada; b) Coco verde moído



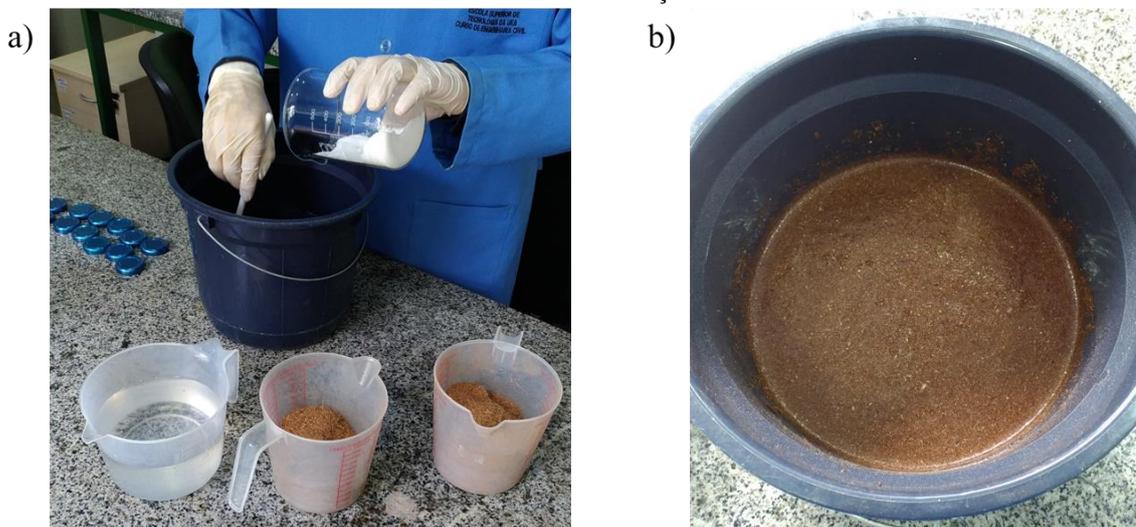
A produção da cinza da casca do coco verde foi realizada em um forno mufla em três temperaturas diferentes com taxa de aquecimento de 10 °C/min. A escolha das temperaturas e tempo de permanência de queima foram embasadas no trabalho de Joshua *et al.* (2018), sendo as temperaturas: 600 °C, 700 °C e 800 °C. Levou-se em consideração que a proporção da amostra para os volumes da câmara interna fosse de 0,036 durante todos os processos de queima (CORDEIRO *et al.*, 2009).

Ressalta-se que foram utilizadas duas metodologias de queima diferentes dado que ao utilizar a metodologia (i), com permanência de 3 h em cada temperatura de queima, obtiveram-

se valores de perda ao fogo elevados, além de resultados de composição química insatisfatórios. Por conta disso, optou-se por realizar o tratamento químico da amostra com a intenção de lixiviar os metais alcalinos presentes nestas.

Para a realização do tratamento químico, com ácido cítrico anidro ($C_6H_8O_7$), seguiu-se a metodologia proposta no trabalho de Cordeiro *et al.* (2020), no entanto, neste trabalho, utilizou-se uma concentração duas vezes menor que a dos autores, uma vez que estes não avaliaram outras concentrações, ressaltando a necessidade deste estudo. Além disso, não havia a disponibilidade de ácido que fosse suficiente para realizar a análise da mesma forma que Cordeiro *et al.* (2020). Sendo assim, as matérias-primas foram submetidas ao tratamento químico via lixiviação com solução de ácido cítrico anidro a 5%. A lixiviação dos materiais foi realizada por 72 h em temperatura ambiente na proporção de 60 g de pó de coco para 1 L de solução ácida (Figura 7). Após este período, a biomassa foi enxaguada continuamente com água deionizada e, em seguida, filtrada com o auxílio de uma peneira até a neutralização do pH. Por fim, o pó de coco lixiviado foi seco ao ar, até diminuir sua umidade, e em estufa a $105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ até constância de massa.

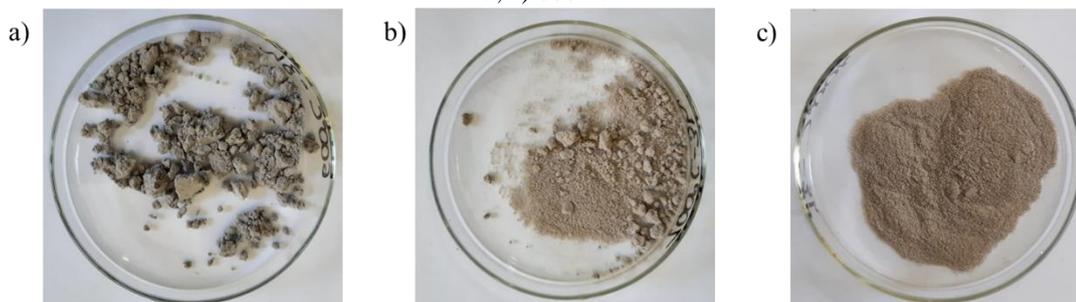
Figura 7 – Tratamento químico do pó de coco com ácido cítrico anidro: a) Preparo da solução; b) Pó da casca do coco verde imerso na solução ácida



As metodologias de queima, utilizadas nesta pesquisa, se deram da seguinte maneira:

- **(i) sem tratamento químico:** com permanência de queima de 3 h em cada temperatura, conforme Joshua *et al.* (2018) (Figura 8); e
- **(ii) após a lixiviação por meio de ácido cítrico:** as amostras foram queimadas primeiro a $350 \text{ }^\circ\text{C}$, por 3 h, e depois em $600 \text{ }^\circ\text{C}$, $700 \text{ }^\circ\text{C}$ e $800 \text{ }^\circ\text{C}$, por mais 3 h em cada faixa de temperatura, conforme Cordeiro *et al.* (2009).

Figura 8 – Cinzas produzidas, sem tratamento químico, conforme a metodologia de queima (i): a) 600 °C; b) 700 °C; c) 800 °C



Depois de realizar o tratamento ácido, aplicou-se no pó de coco a metodologia de queima (i), descrita anteriormente, no entanto, com apenas 3 horas de permanência nas temperaturas estabelecidas para este estudo. Após a queima, as amostras estavam com aparência de carbonizada, assim como mostrado na Figura 9. Sendo assim, decidiu-se utilizar a metodologia de queima (ii), sugerida por Cordeiro *et al.* (2009), produzindo-se, assim, as cinzas da casca do coco verde lixiviadas (CCCVL) mostradas na Figura 10.

Figura 9 – Cinza da casca do coco verde após tratamento químico, utilizando a metodologia de queima (i)



Figura 10 – Cinzas produzidas, após tratamento químico, conforme a metodologia de queima (ii): a) 600 °C; b) 700 °C; c) 800 °C



Portanto, para as CCCV aplicou-se a metodologia de queima (i) e para as CCCVL a metodologia de queima (ii). Para a escolha de qual das temperaturas foi considerada a mais reativa, tomaram-se como critérios a composição química e mineralógica das mesmas em conjunto com análise granulométrica, perda ao fogo, condutividade elétrica, índice de atividade pozolânica Chapelle e BET.

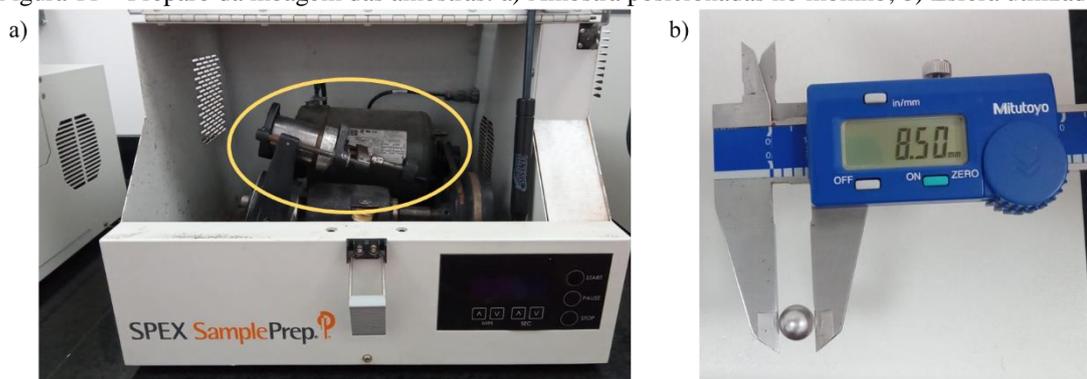
3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS CINZAS

3.3.1 Moagem das Cinzas

No presente trabalho foram realizadas quatro moagens, apenas da CCCVL 700 °C, uma vez que esta obteve o melhor somatório de óxidos de Si, Fe e Al, em quatro tempos distintos (30 min, 60 min, 120 min e 240 min) para a obtenção das distribuições granulométricas. A partir da observação da curva granulométrica, em que não houve mudanças significativas, foi verificado o tempo de moagem ideal para as cinzas.

As moagens foram realizadas em um moinho de bolas de alta energia (8000M Mixer/Mill[®]) do Laboratório de Síntese e Caracterização de Nanomateriais (LSCN/IFAM). O moinho possui recipiente cilíndrico, em aço, com 67 mL de volume e capacidade de portar até 10 g de amostra. As esferas utilizadas na moagem foram também de aço e com diâmetro de aproximadamente 8,5 mm (Figura 11).

Figura 11 – Preparo da moagem das amostras: a) Amostra posicionadas no moinho; b) Esfera utilizada



A fim de determinar o volume de material a ser utilizado no processo de moagem, seguiu-se o estabelecido por Beraldo (1987), o qual define que moinhos podem trabalhar com carga de bolas até 50%. Ressalta-se que o moinho utilizado por Beraldo diferia deste, todavia, optou-se por este método devido a sua difusão. Por se tratar de três temperaturas distintas

produzidas para as cinzas sem lixiviação e com lixiviação com ácido cítrico, a moagem destas cinzas teve a seguinte relação: (i) utilização de 40% de esferas de aço, em massa, em relação ao volume do cilindro; e (ii) 50% de amostra adicionada em relação à massa das esferas. Esta mesma metodologia também foi utilizada por Pinheiro (2015) e Paiva (2016) ao moerem a cinza da casca do arroz e cinza do bagaço da cana de açúcar, respectivamente.

As amostras foram submetidas ao processo de moagem durante 30, 60, 120 e 240 minutos, levando em consideração que cada moagem foi realizada de forma contínua, ou seja, para cada tempo de moagem uma nova amostra (macerada e peneirada na peneira de abertura de malha 0,15 mm) foi utilizada.

A moagem se faz necessária dado que ela possibilita o controle da distribuição granulométrica das cinzas de biomassa, atenuando o efeito negativo causado pelos compostos cristalinos em sua reatividade, possibilitando o emprego de cinzas em larga escala como material cimentício substituinte (CORDEIRO; TAVARES; FILHO, 2016; CORDEIRO; KURTIS, 2017). Além disso, a moagem ultrafina permite o consequente aumento da área de superfície específica, permitindo que a cinza tenha mais área de superfície e, por conseguinte, maior reação pozolânica (KOLAWOLE *et al.*, 2021).

3.3.2 Granulometria a Laser

Seguido do término do processo de moagem ultrafina, foi realizada a granulometria a laser, somente da CCCVL 700 °C, para cada tempo de moagem (30 min, 1 h, 2 h e 4 h), com a intenção de plotar e analisar as curvas granulométricas, definindo-se o tempo de moagem adequado conforme as e constâncias das dimensões das partículas.

A granulometria a laser foi realizada no laboratório de Estruturas (LabEST) da COPPE/UFRJ. As distribuições granulométricas foram executadas com um analisador de partículas a laser Malvern Mastersizer, com unidade de leitura a úmido Hydro 2000MU. A cinza a ser ensaiada foi adicionada ao sistema mantendo a faixa de obscuração, uma medida de turbidez, entre 10% e 20%. Para as condições de ensaio da amostra foi utilizado o modelo de Fraunhofer, devido à falta do índice de refração do material. A velocidade da bomba foi fixada em 2500 rpm e ultrassom no nível 3,0 durante os 30 s iniciais para desagregação e 60 s após a leitura final para verificar se o material apresentava dispersão adequada.

3.3.3 Espectroscopia de Fluorescência de Raios-X

A espectroscopia de fluorescência de raios-X (FRX) possui princípios conhecidos, por meio dos quais são realizadas transições eletrônicas entre os orbitais mais internos dos átomos ao utilizar radiações eletromagnéticas (raios-X ou raios gama) (JENKINS *et al.*, 1995). Os átomos ao absorverem fótons da radiação emitida são capazes de irradiar radiações-x de energias características, permitindo o reconhecimento dos elementos químicos contidos no processo e a mensuração destes. Belmonte (2005) consolida o fato desta técnica de análise ser não-destrutiva, além de qualitativa e quantitativa da composição química de amostras.

Por conta das suas vantagens como a sensibilidade, a alta resolução espacial e os limites de detecção, em relação aos outros tipos de análise, a técnica de FRX será utilizada nesta pesquisa com o intuito de verificar quais elementos inorgânicos, e em que proporções eles são encontrados na amostra nas cinzas formadas após o processo de queima da casca do coco verde.

Para determinar a composição química da CCCV, empregou-se a técnica de Espectrometria de Fluorescência de Raios-X por dispersão de ondas. A análise foi realizada com o equipamento FRX-DO da Rigaku, modelo Supermini com fonte geradora de raios-X de paládio, pertencente ao Laboratório de Tecnologias do Hidrogênio (LabTech), da Universidade do Federal do Rio de Janeiro.

3.3.4 Difração de Raios-X

O fenômeno de difração acontece quando ondas são emitidas e ao se propagarem se deparam com uma série obstáculos ou aberturas regularmente separadas, cujas dimensões ou espaçamentos são próximos ao comprimento das ondas, sendo capazes de dispersá-las (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

Desde o momento em que foi descoberto, 1912, o fenômeno da difração de raios-X pelos cristais comprovou simultaneamente a natureza das ondas dos raios-X e forneceu um novo método para investigar a estrutura fina da matéria. Embora a radiografia seja uma ferramenta muito importante e tenha amplo campo de aplicabilidade, ela é geralmente limitada nos detalhes internos que podem resolver ou divulgar, em tamanhos da ordem de 10^{-3} mm. Já a difração, por outro lado, pode revelar indiretamente detalhes da estrutura interna da ordem de 10^{-7} mm de tamanho (CULLITY, 2014).

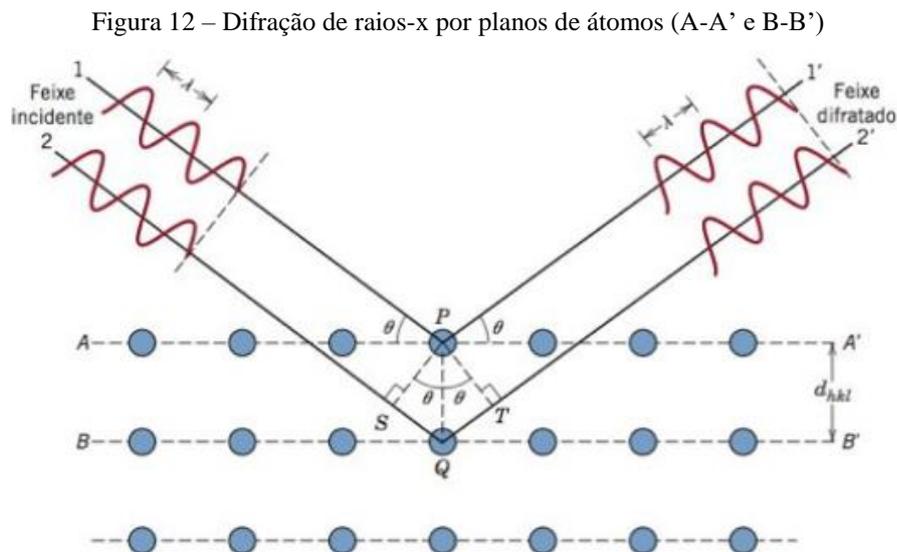
Sabe-se ainda que os sólidos cristalinos dos átomos tendem a se organizar em planos cristalinos separados entre si com distâncias cuja ordem de grandeza é da mesma dos

comprimentos de onda dos raios-X. Desta maneira, ao incidir em um cristal, o raio-x interage com os átomos presentes, sofrendo difração (HALLIDAY, 1996). Dal Molin (2007) consolida que em um material cristalino de átomos arranjados no espaço periodicamente, a difração de raios-X ocorre nas direções de espalhamento que satisfazem a Lei de Bragg, conforme a Equação 4 e Figura 12, característica para cada fase cristalina.

$$n\lambda = 2d \cdot \text{sen}\theta \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

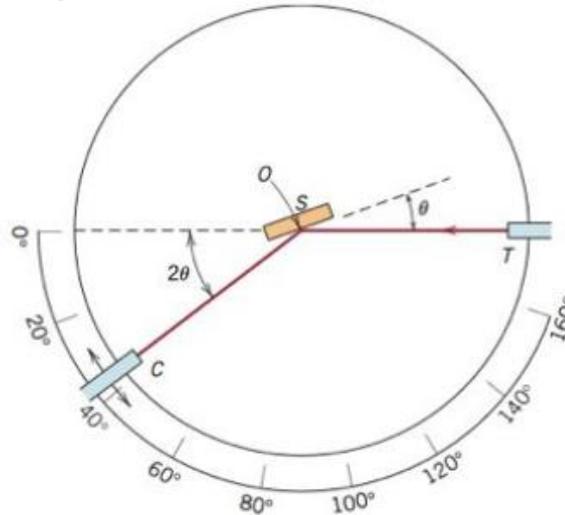
- n: número inteiro que indica ordem de difração;
- λ : comprimento de onda dos raios incidentes;
- d: distância interplanar; e
- θ : ângulo de difração.



Fonte: CALLISTER; RETHWISCH, 2012

Sendo assim, para a realização da difração de raios-X (DRX), é utilizado um difratômetro com a finalidade de determinar em quais ângulos ocorre a difração nas amostras analisadas conforme ilustra a Figura 13. Para isso uma amostra S é posicionada no aparelho, onde poderá rotacionar em torno de O, a partir de um feixe monocromático de raios-X gerado em T as intensidades podem ser lidas em um contador C, o qual está em uma plataforma rotacionará em termos de 2θ . Tanto o contador quanto a amostra estão conectados mecanicamente, tal que ao girar um ângulo θ ocorre uma rotação 2θ , garantindo que o ângulo de incidência e reflexão sejam iguais.

Figura 13 – Diagrama sobre o funcionamento de um difratômetro de raios-X



Fonte: CALLISTER; RETHWISCH, 2012

O DRX, portanto, pode determinar a estrutura cristalina presente em uma amostra analisada, além do seu tamanho, geometria da célula unitária e o arranjo dos átomos. Neste trabalho, esta técnica foi empregada com o intuito de detectar as fases cristalinas presentes nas CCCV, juntamente com os compostos químicos a fim de verificar a pozolanicidade das mesmas.

A identificação das fases cristalinas presentes na CCCV foi realizada utilizando o difratômetro da Bruker, modelo D2 Phaser, pertencente ao Laboratório de Síntese e Caracterização de Nanomateriais (LSCN), do Instituto Federal do Amazonas. A radiação empregada era monocromática de cobre ($\text{Cu K}\alpha$, $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$), operando a 40 kV e 30 mA, com varreduras de velocidade angular de $0,02^\circ$ e intervalo de medida entre os ângulos de Bragg (2θ) de 10° e 80° . Nas análises, utilizou-se os padrões de difração fornecidos pelo *Inorganic Crystal Structure Database (ICSD)*.

3.3.5 Perda Ao Fogo

O ensaio de perda ao fogo foi embasado na NBR NM 18 (2012), por meio do qual foi pesado $1,000 \text{ g} \pm 0,001 \text{ g}$ de amostra das CCCV e CCCVL, calcinadas a uma taxa de $10^\circ\text{C}/\text{min}$ em forno mufla, à temperatura de $950 \pm 50^\circ\text{C}$ por cerca de 50 min (Figura 14). Ao término deste experimento, a amostra foi pesada a fim de obter o valor da perda ao fogo expresso pela Equação 5.

$$PF = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

- PF: Perda ao Fogo;
- m_1 : massa da amostra ensaiada seca a $110 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, em gramas; e
- m_2 : massa da amostra após a calcinação a $950 \text{ }^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$, em gramas.

O ensaio de perda ao fogo se faz necessário por traduzir o percentual de matéria orgânica, principalmente carbono, presente na CCCV para as temperaturas calcinadas. O carbono residual prejudica a qualidade das cinzas, dado que a presença desse elemento está conectada ao aumento da demanda de água devido à sua elevada superfície específica. Além disso, a atividade pozolânica pode ser reduzida conforme o valor de perda ao fogo aumenta, visto que quanto maior for o teor de carbono, menor será o percentual de sílica na cinza (CORDEIRO, 2006).

Figura 14 – Amostras após o ensaio de perda ao fogo ($600 \text{ }^\circ\text{C}$, $700 \text{ }^\circ\text{C}$ e $800 \text{ }^\circ\text{C}$, respectivamente)

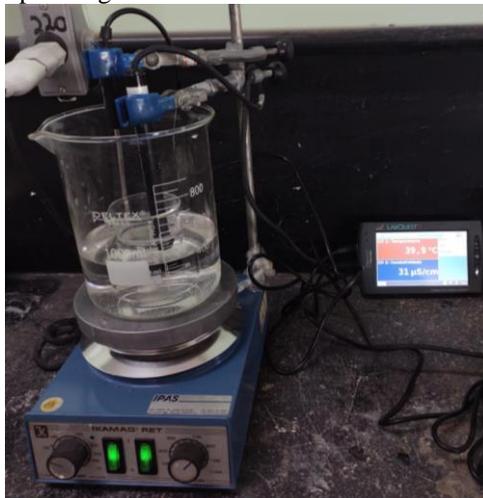


3.3.6 Condutividade Elétrica

O ensaio de condutividade elétrica foi fundamentado no trabalho realizado por Luxán *et al.* (1989), os quais preconizam que é possível medir a atividade pozolânica com base na variação da condutividade elétrica. Para a realização do experimento, seguiu-se os passos: (i) inseriu-se 98,7 mg de hidróxido de cálcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ em 70 g de água deionizada a uma temperatura de $40 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$; (ii) utilizou-se uma barra magnética para estabilizar a solução em um tempo de 20 minutos; (iii) adicionou-se 1,75 g da cinza a ser ensaiada; e (iv) realizaram-se

leituras sucessivas com um condutivímetro, modelo LabQuest 2, a cada 20 segundos durante 20 minutos (Figura 15).

Figura 15 – Aparelhagem utilizada no ensaio de condutividade elétrica



Ao adicionar o material, a condutividade elétrica diminui devido a menor quantidade de íons de cálcio Ca^{+2} e hidroxilas $(\text{OH})^-$ na solução (BARROSO, 2011). Portanto, Luxán *et al.* (1989) propõem que o tempo mínimo necessário para verificar a atividade pozolânica é de 2 minutos. Na Tabela 14 estão listadas as classificações estabelecidas por Lúxan *et al.* (1989) em relação ao material e suas propriedades pozolânicas.

Tabela 14 - Avaliação da atividade pozolânica por medição de condutividade

Classificação do material	Varição da condutividade conforme o método proposto (mS/cm)
Não pozolânico	$\Delta C < 0,4$
Pozolanicidade moderada	$0,4 < \Delta C < 1,2$
Boa pozolanicidade	$\Delta C > 1,2$

Fonte: Luxán *et al.*, 1989

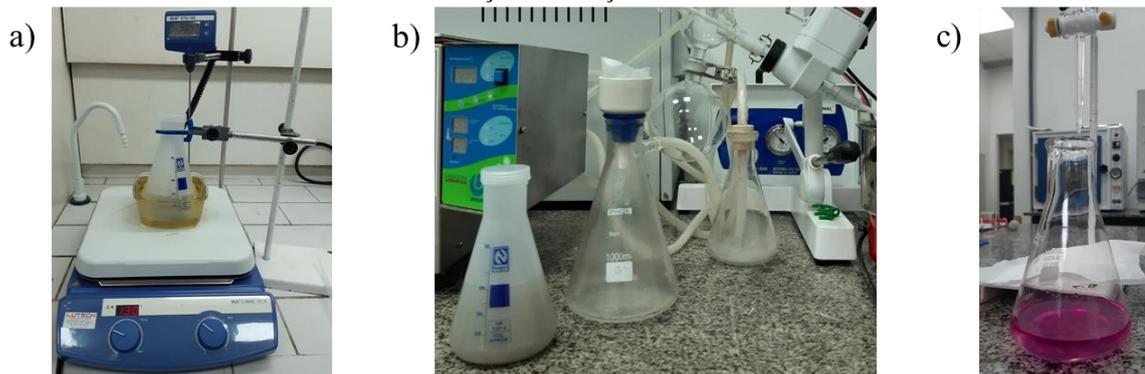
Com base nos resultados que serão obtidos nesse ensaio, pretende-se avaliar os valores atingidos para a verificação do grau de pozolanicidade das amostras da CCCV e CCCVL supramencionados.

3.3.7 Método Chapelle Modificado

A atividade pozolânica das CCCV e CCCVL produzidas foram avaliadas pelo método de Chapelle modificado, conforme a NBR 15895 (2010), que foi conduzido no LSCN/IFAM.

O ensaio consistiu na adição de 2,000 g de CaO e 1,000 g da cinza a ser ensaiada em 250 g de água deionizada, a uma temperatura constante de $90\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ por um período de $16 \pm 1\text{ h}$ (Figura 16). Depois desse período, foi adicionada à mistura uma solução de sacarose e, por fim, realizada a titulação da solução com HCl.

Figura 16 – Ensaio de Chapelle modificado: a) Amostra em agitação a $90\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$; b) Filtração da solução; e c) Titulação da solução filtrada



Esta análise permite determinar o índice de atividade pozolânica Chapelle, calculada por meio da Equação 6, que corresponde ao teor de hidróxido de cálcio, em mg de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ por g, que um material pozolânico pode fixar em um tempo pré-determinado, à elevada temperatura. A quantidade em miligramas de hidróxido de cálcio fixo ou reagido por grama de cinza representa a reatividade do material.

$$I_{\text{Ca}(\text{OH})_2} = \frac{28 \cdot (V_3 - V_2) \cdot F_c}{m_2} \times 1,32 \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

- $I_{\text{Ca}(\text{OH})_2}$: índice de atividade pozolânica Chapelle. Corresponde ao teor de hidróxido de cálcio fixado, em mg de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ por g de material;
- m_2 : massa de material pozolânico, em gramas;
- V_2 : volume de HCl 0,1 M consumido no ensaio, em mililitros;
- V_3 : volume de HCl 0,1 M consumido no ensaio em branco, em mililitros;
- F_c : fator de correção do HCl para uma concentração de 0,1 M; e
- 1,32: relação molecular $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{CaO}$.

3.3.8 Área Superficial Específica (BET)

Para este ensaio foram utilizados os mesmos critérios de decisão da amostra a ser ensaiada na moagem e granulometria a laser, que foi a CCCV 700 °C, moída em 4 tempos distintos. Neste experimento foi utilizado um analisador de nitrogênio da Micromeritics, ASAP 2020 do Laboratório para Estudos de Processos de Adsorção e Catálise (LEPAC/FEQ/UNICAMP), ilustrado na Figura 17. As amostras de cinza foram pré-tratadas por 24 horas a 150 °C sob vácuo. As análises de adsorção e dessorção foram feitas a -196 °C, com pressões relativas de 0,01 a 0,99 e massa de amostras de aproximadamente 0,3 g. A área superficial específica foi calculada segundo o método BET (Brunauer-Emmett-Teller), enquanto volume de poro (V_p) e diâmetro de poro (D_p), segundo o método BJH (Barrett, Joyner, and Halenda) de dessorção.

Figura 17 – Equipamento Micromeritics, ASAP 2020 para a realização da fisissorção de nitrogênio



4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A produção da cinza da casca do coco verde foi realizada conforme descrito no item 3.2. Abaixo se encontram alguns resultados relacionados aos ensaios de FRX, DRX, perda ao fogo, condutividade elétrica, Chapelle modificado e BET das CCCV e CCCVL.

4.1 RENDIMENTO DAS CINZAS

Os resultados de rendimento médio obtidos para as diferentes temperaturas de queima e para as cinzas produzidas antes e após o tratamento químicos estão elencados na Tabela 15. Estes resultados indicam que ao realizar o tratamento químico com o pó do coco, o rendimento das cinzas reduz de maneira considerável devido à lavagem dos elementos alcalinos. Os rendimentos também variam conforme a quantidade de vezes que é queimada a matéria-prima naquela temperatura, depende também da finura em que a amostra se encontra e umidade, logo, é um resultado mutável.

Tabela 15 – Rendimento médio das cinzas da casca do coco em diferentes temperaturas

Amostras	Rendimento Médio (%)
CCCV 600 °C	4,57
CCCV 700 °C	4,95
CCCV 800 °C	3,71
CCCVL 600 °C	0,90
CCCVL 700 °C	0,86
CCCVL 800 °C	0,88

Cordeiro *et al.* (2020) ao realizarem a lixiviação do bagaço da cana-de-açúcar, com ácido cítrico, obtiveram resultados insatisfatórios em relação ao rendimento. Por conta disso, os autores optaram por realizar uma etapa de pré-queima do bagaço, simulando, em laboratório, a queima realizada no coletor de particulados em usinas de açúcar e álcool. Depois desta etapa, eles realizaram a lixiviação da cinza obtida e, em seguida, terminaram de calcinar o material. O rendimento médio alcançado após este processo foi de 2,3% em massa. Salienta-se que os autores não mencionaram qual havia sido o rendimento antes da mudança de procedimento, apenas que ao lixiviar o bagaço antes da queima reduzia consideravelmente o rendimento do material.

4.2 AVALIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Conforme a análise quantitativa dos elementos, realizada por FRX, encontrou-se a composição elementar das CCCV para as três temperaturas (Tabela 16). Vale salientar que o método de queima utilizado para as cinzas elencadas abaixo foi o método 1, sem tratamento ácido (taxa de aquecimento de 10 °C/min e tempo de permanência de 3h em cada temperatura). Constatou-se que elas apresentaram diversos elementos químicos como o Si, Al, Fe e Ca, além de elementos que são formados naturalmente no solo. Ressalta-se que neste trabalho encontraram-se valores elevados de K e Cl, que podem ser explicados devido ao tipo de adubação que é recomendado pela Embrapa no Amazonas, com aplicações três vezes ao ano de cloreto de potássio, além de sulfato de amônia, superfosfato triplo e sulfato de magnésio (MACEDO, 2002).

Tabela 16 – Composição química da CCCV

Compostos Químicos	Coco in natura (%)	600 °C (%)	700 °C (%)	800 °C (%)
K ₂ O	40,76	32,15	27,27	19,16
Cl	10,9	13,27	10,69	6,22
SiO ₂	7,64	9,29	9,47	32,74
Na ₂ O	2,81	7,75	12,76	7,38
CaO	14,31	5,97	6,41	6,20
P ₂ O ₅	3,98	4,58	6,60	5,28
MgO	3,08	4,55	4,67	3,74
Fe ₂ O ₃	8,6	2,33	2,32	7,24
SO ₃	3,61	1,99	2,15	3,10
Al ₂ O ₃	2,55	1,16	1,35	2,69
ZnO	0,61	0,27	0,26	0,27
TiO ₂	0,49	0,12	0,07	0,19
MnO	0,27	0,07	0,05	0,10
CuO	0,18	0,04	0,03	0,03
Cr ₂ O ₃	0,22	0,04	0,03	0,05
SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃	18,78	12,78	13,14	42,67
Perda ao Fogo	-	16,21	15,68	5,51

Na tabela acima tem-se as quantidades dos compostos químicos, juntamente com suas variações em relação às temperaturas de queima. Salienta-se que os valores de MgO e CaO apresentaram certa consistência com o aumento da temperatura e que Al₂O₃, SiO₂ e Fe₂O₃ mostraram aumento de mais de 100%, os quais são favoráveis para que a cinza possa substituir parcialmente o cimento em massa, atuando como adição mineral. No entanto, a quantidade

desses elementos não é considerada suficiente para que a cinza da casca do coco verde possa ser utilizada como adição pozolânica

Através do FRX detectaram-se também alguns metais alcalinos, na forma de óxidos e que são considerados prejudiciais ao concreto, como o Na_2O e o K_2O , os quais tiveram redução de 4,78% e 40,40%, respectivamente, ao elevar a temperatura de queima. Tais compostos são responsáveis pela reação álcali-agregado no concreto, resultando na geração de um gel capaz de degradar o concreto devido à expansão que será gerada, originando fissuras que podem comprometer a estrutura (BARRETO, 2019).

Foram encontrados ainda íons cloreto, os quais diminuíram as concentrações em até 53% ao elevar a temperatura de queima. No entanto, mesmo com quantia reduzida, esse elemento quando presente em blendas no concreto é responsável pela quebra da camada de proteção do aço, desencadeando o início do mecanismo de corrosão (CASCUDO, 1997; HELENE, 1993).

Comparando-se as composições químicas, em óxidos, listadas nas Tabelas 6 e 16, tem-se que as CCCVs produzidas pelos autores Anuar *et al.* (2020), sem tratamento com ácido, possuem composições similares às encontradas na queima inicial deste trabalho, apresentando algumas diferenças no que tange às porcentagens de Na_2O e MgO , os quais os autores não elencaram em seu estudo. Em relação aos outros autores, tem-se composições variadas, com altos teores de SiO_2 , por exemplo, se equiparados a este trabalho, todavia, sabe-se que os valores das composições variam conforme o solo e tipo de plantio que é realizado em cada local. Em relação ao coco *in natura*, as composições encontradas nas fibras de coco de Agrizzi (2017) são similares às do coco utilizado nesta pesquisa, com altos teores de potássio e valores relativamente baixos quanto aos somatórios dos óxidos SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 .

Devido às baixas concentrações de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 encontradas na Tabela 16, decidiu-se realizar a lavagem das fibras de coco com ácido cítrico com o intuito de que esse tratamento atingisse à mesma eficiência que a encontrada por Anuar *et al.* (2020) ao tratar o material com ácido sulfúrico. Por meio da Tabela 6, pode-se perceber que o tratamento dos autores mencionados reduziu consideravelmente os íons de cloro, além do K, Ca e S presentes. Na Tabela 17 é mostrado o resultado encontrado para a composição da CCCV após lixiviação com ácido cítrico.

Tabela 17 – Composição química da CCCVL

Compostos Químicos	600 °C (%)	700 °C (%)	800 °C (%)
SiO ₂	44,83	48,91	46,13
CaO	19,66	17,00	21,09
P ₂ O ₅	8,37	9,32	7,71
SO ₃	7,52	7,39	7,49
Fe ₂ O ₃	3,91	4,05	4,23
MgO	3,48	3,17	4,27
Al ₂ O ₃	3,18	2,81	3,34
K ₂ O	2,65	2,51	2,86
Cl	0,34	0,06	0,62
Cr ₂ O ₃	-	-	-
CuO	-	-	-
MnO	-	-	-
Na ₂ O	-	-	-
TiO ₂	-	-	-
ZnO	-	-	-
Outros	0,73	0,93	0,85
SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃	51,92	55,77	53,71
Perda ao Fogo	5,33	3,85	1,4

Em comparação à Tabela 16, na Tabela 17 pode-se verificar a redução total de alguns compostos químicos após o tratamento com ácido cítrico tais como o Cr₂O₃, CuO, MnO, Na₂O, TiO₂ e ZnO. Observa-se ainda que as composições químicas encontradas para as cinzas, após o tratamento químico, apresentam a predominância de SiO₂, valores acima de 40% e ausência de óxidos alcalinos contaminantes como Na₂O e redução de K₂O. Ao equiparar os valores obtidos dos compostos para as cinzas queimadas sem o tratamento e após o tratamento, percebe-se que houve ainda redução de até 99% dos íons de Cl e de mais de 90% de K₂O, influenciando no aumento do SiO₂ e do Fe₂O₃ em mais de 100%.

Ao confrontar os resultados da tabela acima com as recomendações da NBR 12653 (2014), Tabela 5, evidencia-se que as cinzas produzidas para as 3 temperaturas, conforme a classificação E, possuem: (i) soma de SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ maiores que 50%; (ii) valores de SO₃ acima dos limites estabelecidos que é de 5%; e (iii) Perda ao Fogo menor que 6%. Exceto pelo valor de SO₃, pode-se inferir que a cinza seria considerada como Classe E.

Por meio da Tabela 7, Seção 2.3.3.1, tem-se que os autores, ao realizarem o tratamento com ácido cítrico nos resíduos agrícolas e calciná-los, a 600 °C, encontraram ausência de óxidos alcalinos contaminantes como Na₂O (incidente apenas na cinza da casca do arroz), K₂O e CaO, além de SiO₂ como componente majoritário, cerca de 90%. Essa concentração de sílica, presente tanto nas cinzas de Cordeiro *et al.* (2020) quanto nas encontradas nesta pesquisa,

revelam a ação positiva no que tange à lixiviação ácida no processo de purificação dos materiais estudados.

Outros autores também estudaram o efeito da produção de cinzas de resíduos agrícolas com tratamento ácido, para os casos a seguir, utilizou-se ácido clorídrico no pré-tratamento dos resíduos. Krishnarao, Subrahmanyam e Jagadish Kumar (2001) estudaram o tratamento com ácido na retirada de partículas pretas fixadas na sílica contida na cinza da casca de arroz devido ao carbono e impurezas de K_2O . Nas amostras tratadas com ácido, a impureza foi removida e, portanto, nenhum carbono apareceu na sílica contida na cinza. Os autores ainda constataram que à medida que a temperatura de queima era elevada (400 °C, 500 °C, 600 °C e 700 °C), as cinzas perdiam o aspecto carbonizado, passando a ter um aspecto esbranquiçado e brilhante.

Vayghan, Khaloo e Rajabipour (2013) também investigaram os efeitos das propriedades pozolânicas da cinza da casca de arroz tratada com ácido clorídrico antes da combustão. Os autores calcinaram a casca do arroz utilizando taxa de aquecimento de 10 °C/min e temperatura final de 700 °C. Eles observaram que o tratamento ácido resulta em cinzas com maior teor de SiO_2 , menor teor de álcalis e carbono não queimado, além de melhor moagem e menor tamanho de partícula, em comparação a cinzas de cascas não tratadas com ácido.

Enquanto que Cordeiro e Sales (2015) caracterizaram a cinza da grama elefante, a 600 °C utilizando a metodologia de queima (ii) aqui apresentada, com tratamento via ácido clorídrico, obtendo resultados que indicam que o tratamento prévio do capim elefante pode melhorar o teor de SiO_2 e diminuir a perda ao fogo devido à lixiviação de óxidos metálicos.

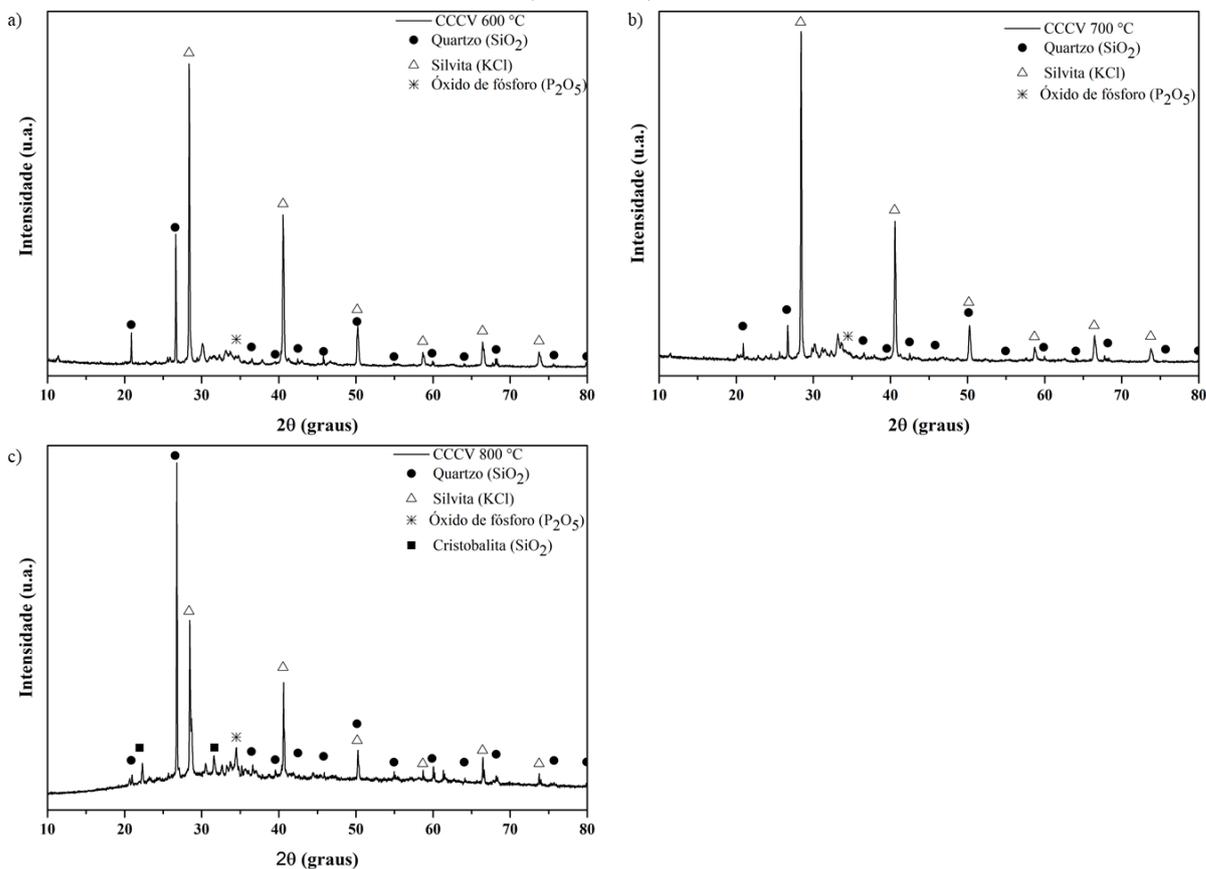
Cordeiro, Vieira e Lopes (2017) ao estudarem diferentes pré-tratamentos do bagaço da cana-de-açúcar para a produção de cinza pozolânica, utilizaram lavagem com água quente e lixiviação com ácido clorídrico. A calcinação da matéria-prima se deu a 700 °C, utilizando a metodologia de queima (ii) aqui apresentada. Os autores obtiveram que mesmo com os pré-tratamentos, obtiveram-se cinzas com alto teor de sílica amorfa, além do aumento da atividade pozolânica, com a remoção de impurezas, principalmente CaO , SO_3 , K_2O e compostos de carbono.

4.3 COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA (DRX)

Na Figura 18 podem ser observados os DRX para as cinzas produzidas nas temperaturas de queima 600 °C, 700 °C e 800 °C, sem tratamento químico. Os resultados indicam que os picos correspondentes à sílica (SiO_2) puderam ser encontrados em cada espectro, entretanto, estes não foram os principais picos encontrados na amostra, devido a menor porcentagem de

SiO₂ presente na CCCV quando comparado ao KCl, corroborando os resultados apresentados pela composição química na Tabela 16.

Figura 18 – Difratogramas de raios X das cinzas produzidas sem tratamento ácido para as temperaturas de: a) 600 °C, b) 700 °C, c) 800 °C



Conforme a imagem acima, nota-se a presença de sílica cristalina, na forma de quartzo (ICSD 26429) e cristobalita (ICSD 75484), sendo que os picos desta última são mais bem definidos e formados no difratograma de 800 °C. Ressalta-se que há um sensível desvio da linha de base, verificado entre os ângulos de Bragg de 15° e 35°, designando a presença de sílica no estado amorfo. Além disso, nos difratogramas acima, verifica-se ainda pico de P₂O₅ (ICSD 82688) presente nas amostras. Tais resultados também foram verificados por Anuar *et al.* (2020) ao analisarem a cinza da casca do coco verde, calcinados a 500 °C, 600 °C e 700 °C para a extração de sílica.

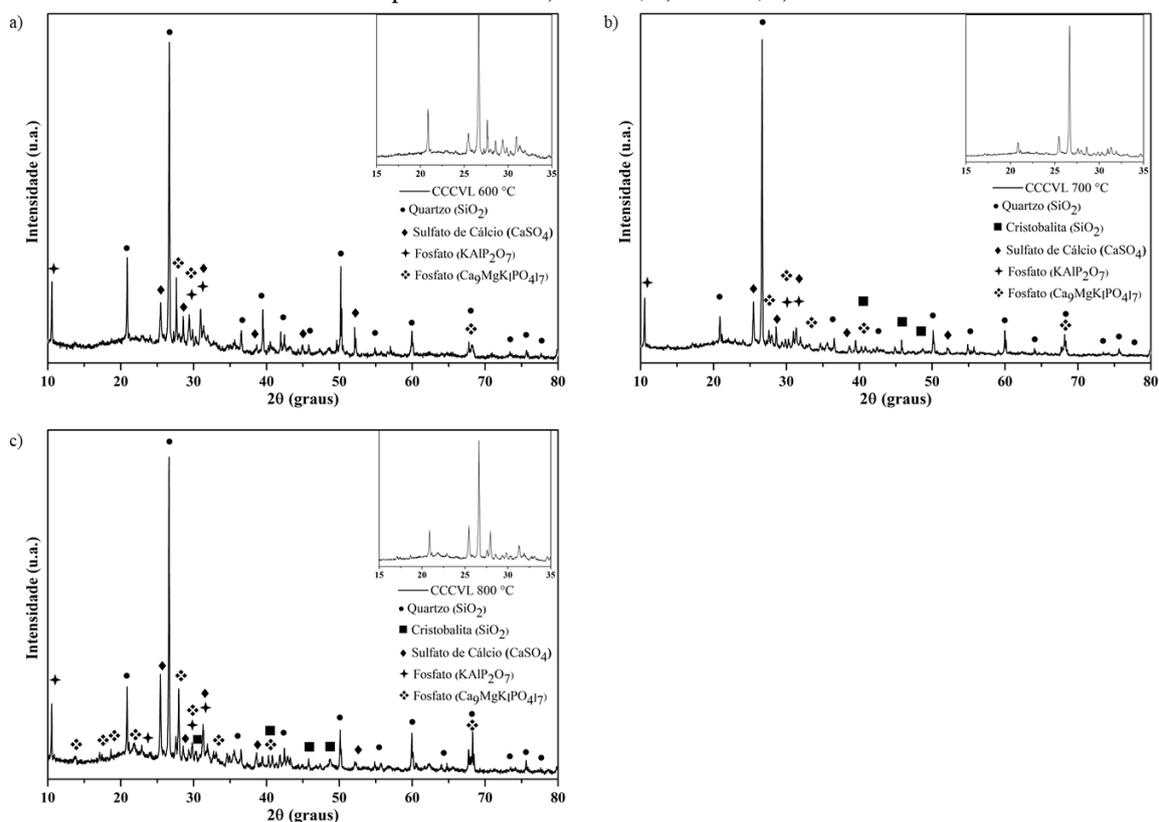
Através da Figura 18 é validado o resultado encontrado pela Tabela 16, que mostra a abundância de K e Cl como elementos encontrados em abundância nas amostras. Nas imagens acima, estes elementos aparecem como KCl (ICSD 165593 - silvita), mineral também encontrado por Dizaji *et al.* (2022) ao analisarem as CCA e Saloni *et al.*, (2021) ao analisarem

a cinza da espiga do milho. O mesmo mineral também foi encontrado por Yao *et al.* (2020) ao analisarem espectros de DRX das cinzas da palha do arroz, do milho e do trigo, tais autores ressaltaram o fato dessas três cinzas de palha exibirem picos bastante acentuados para a estrutura cristalina com potássio nas formas de arcanita (K_2SO_4) e silvita (KCl), este último formado pela combinação de radicais K^+ e Cl^- liberados da biomassa durante o processo de combustão.

A presença do K combinado ao Cl se dá porque durante a combustão, o potássio na biomassa pode ser liberado e transformado em fase gasosa ou aerossol (por exemplo, como KCl, K_2SO_4 , K_2CO_3) ou mesmo pode ficar retido nas cinzas (ANICIC *et al.*, 2018). Knudsen *et al.* revelaram ainda que uma fração de 20 a 45% do potássio na biomassa é liberada para a fase gasosa via vaporização de KCl durante a combustão abaixo de 800 °C, corroborando com o que foi mostrado no DRX da Figura 18, onde a medida que a temperatura aumenta, a intensidade dos picos de KCl são reduzidos. Isto confirma a diminuição da porcentagem de K_2O e Cl na Tabela 16.

Para mais, foi realizada a análise dos difratogramas das cinzas produzidas após a lixiviação com ácido cítrico. Por meio da Figura 19, observam-se os difratogramas de raios X para as cinzas produzidas nas temperaturas de queima 600 °C, 700 °C e 800 °C. Diferentemente da composição mineralógica apresentada na Figura 18, resultados indicam a presença, predominante, de sílica cristalina, na forma de quartzo (ICSD 83849) e cristobalita (ICSD 36226), sendo que os picos desta última são mais bem definidos nos difratogramas de 700 °C e 800 °C. Ressalta-se que da mesma forma que na Figura 18 há um leve desvio da linha de base, verificado entre os ângulos de Bragg de 15° e 35°, indicando a presença de sílica amorfa.

Figura 19 – Difratogramas de raios X das cinzas produzidas após a lixiviação com ácido cítrico para as temperaturas de: a) 600 °C, b) 700 °C, c) 800 °C



Após o tratamento com ácido cítrico, os principais picos de difração de SiO₂, na forma de quartzo, puderam ser observados mais claramente e com maiores intensidades em $2\theta = 20,86^\circ; 26,64^\circ; 39,48^\circ; 50,16^\circ$ e $59,92^\circ$. Isso se deve, por conta da sílica ter se tornado mais aparente no espectro após os outros compostos presentes na amostra terem sido lixiviados durante a reação com o ácido cítrico, validando os dados obtidos na Tabela 17, que mostrou o SiO₂ como o principal constituinte da CCCV após o tratamento com ácido.

Sabe-se, ainda, que a presença de sílica amorfa ou parcialmente cristalina são fundamentais para que haja reações pozolânicas com o hidróxido de cálcio (GREENBERG, 1958). Conforme Cordeiro, Filho e Fairbairn (2009), a sílica como cristobalita é eventualmente gerada em processos de queima em temperaturas acima de 800 °C ou longos períodos de queima, confirmando a aparição deste mineral na CCCV 800°C. No caso da CCCVL, a cristobalita pode ser visualizada a partir da queima a 700 °C, tal fato se deve à presença de outros compostos químicos que podem ter tido influência nessa formação, além da presença de impurezas de cátions alcalinos, possibilitando a aparição da cristobalita como fase metaestável em temperaturas mais baixas (VENEZIA *et al.*, 2001; MILONJIC *et al.*, 2007). A formação da cristobalita em 700 °C também foi relatado no estudo realizado por Dizaji *et al.* (2022) em um

estudo para a produção de cinzas da palha do arroz. Cordeiro, Filho e Fairbarn (2009) também observaram a formação de cristobalita a 800 °C em estudo de queima controlada de bagaço de cana-de-açúcar em forno mufla. A ocorrência de cristobalita, na produção de CBCA foi relatada ainda em vários estudos, devido a um prolongado período de queima em alta temperatura, que fez com a sílica amorfa passasse por processo de cristalização (CORDEIRO; TAVARES; FILHO, 2016; CORDEIRO; KURTIS, 2017; BAHURUDEEN *et al.*, 2015; PATIL *et al.*, 2021). A mesma constatação deu-se no estudo da cinza da casca do arroz realizada por Cordeiro *et al.* (2011), calcinada em indústrias, em caldeiras em temperaturas entre 600 °C e 850 °C.

Nos difratogramas apresentados na Figura 19 verifica-se também a presença de sulfato de cálcio (CaSO₄ – ICSD 68592), com picos bem definidos nas posições $2\theta = 25,47^\circ$; $28,55^\circ$; $30,95^\circ$ e $52,10^\circ$. O mesmo composto foi encontrado por Barbosa e Cordeiro (2021) durante a caracterização da CBCA, e por Beidaghy Dizaji *et al.*, (2022) ao tratar a casca e a palha do arroz com água e ácido cítrico para a produção de cinzas. Ainda foram encontrados no DRX da CCCVL fosfatos (Ca₉MgK[PO₄]₇ - ICSD 85109; KAIP₂O₇ - ICSD 260827), mesmos compostos encontrados na CBCA no estudo de Cordeiro, Filho e Fairbarn (2009). Estes grupos fosfatos combinados ao potássio, ocorrem devido ao fato de que o fósforo é mais favorável para o potássio do que para o silício (MAGDZIARG *et al.*, 2018).

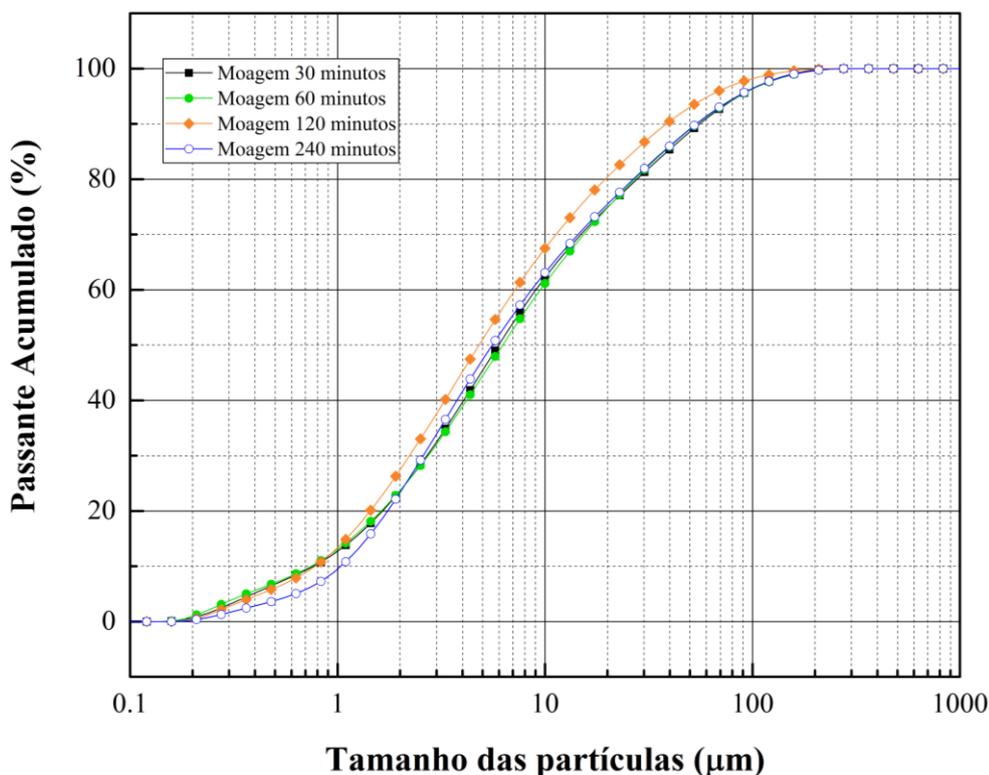
Salienta-se que nos difratogramas acima, apesar do teor significativo silício na forma cristalina detectados e de alguns metais vistos na composição química das Tabelas 16 e 17, silicatos mais complexos não foram identificados. Silicatos amorfos com baixas temperaturas de fusão podem ser formados em tais processos, os quais não são possíveis de serem identificados com DRX. Da mesma maneira, aluminossilicatos não foram capazes de serem detectados neste ensaio dado que durante o processo de combustão os minerais sofrem reações térmicas e mudanças estruturais, o que faz com que o conteúdo de determinadas fases seja pequeno e difícil de analisar (MAGDZIARG *et al.*, 2018).

A presença dos compostos descritos acima e visualizados nos padrões de DRX se dá devido ao tipo de adubo praticado no Amazonas. Para a cultura do coco, é utilizado durante a adubação da cova: (i) calcário dolomítico; (ii) superfosfato simples; (iii) superfosfato triplo; (iv) FTE-BR 12. Além disso, ainda há uma adubação básica, que se recomenda para coqueiros e que deve ser realizada durante os quatro primeiros anos de plantio, com sulfato de amônia, sulfato de magnésio, cloreto de potássio, superfosfato triplo, bórax de solo e FTE BR-12, conforme elencados na Seção 2.3.3.1, Tabela 8 (MACEDO, 2002; IDAM, 2020).

4.4 CARACTERÍSTICAS DA MOAGEM ULTRAFINA DAS CINZAS DA CASCA DO COCO VERDE

Na Figura 20 estão representadas as curvas granulométricas da CCCVL 700 °C após moagem nos tempos de 30, 60, 120 e 240 min. Para o estudo da moagem foi escolhida a CCCVL 700 °C, dado que ela apresentou a maior soma de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃. A moagem da cinza, em diferentes tempos, objetivava reduzir a dimensão das partículas, observando o momento em que o tamanho dessas não diminuiria de maneira expressiva. Por meio da Figura 20 é evidente que a moagem resultou em uma mudança razoavelmente suave e contínua das distribuições de tamanho de partícula para tamanhos mais finos com o tempo de moagem.

Figura 20 – Curvas granulométricas obtidas em diferentes tempos de moagem



Na Tabela 18 encontram-se os valores de D₁₀, D₅₀ e D₉₀ obtidos por meio da granulometria a laser. Através destes valores e da Figura 20, nota-se que à medida que o tempo de moagem aumentou, as partículas tiveram suas dimensões reduzidas. No entanto, para o tempo de moagem de 240 minutos, a cinza teve suas dimensões situadas entre o C60 e o C120, o que pode ter se dado devido à vibração dentro do cilindro de moagem, concentrando a amostra em apenas um lado do corpo moedor. O tamanho médio (D₅₀) das partículas durante os 4 tempos

de moagem variou entre 16 e 20 μm , sendo assim, o tempo de moagem de 30 minutos foi o mais viável dentre eles, dado que ao dobrar o tempo de moagem, não houve redução acentuada da dimensão da amostra, além da curva granulométrica referente ao tempo de 30 minutos estar similar às outras curvas com tempos de moagem maiores. Portanto, para a realização dos ensaios das seções seguintes, utilizaram-se amostras moídas a 30 minutos.

Tabela 18 – Características das distribuições de tamanho das partículas

Amostras/variáveis	C30 ¹	C60 ²	C120 ³	C240 ⁴
D ₁₀ (μm)	1,797	1,848	2,601	1,865
D ₅₀ (μm)	16,731	16,002	20,79	17,963
D ₉₀ (μm)	130,374	134,069	128,064	96,215

¹C30: Cinza moída durante 30 minutos

²C60: Cinza moída durante 60 minutos

³C120: Cinza moída durante 120 minutos

⁴C240: Cinza moída durante 240 minutos

Conforme a Tabela 9, Seção 2.3.3.2, verifica-se que autores como Andreão *et al.* (2020) ao moerem a CBCA (fundo do tanque) por 120 minutos obtiveram valor de D₅₀ de 10,7 μm , utilizando o moinho Attritor por um tempo quatro vezes maior que o escolhido por essa pesquisa, reduzindo o tamanho médio da CBCA em comparação à CCCVL 700 °C, moída em 30 minutos, em 6 μm .

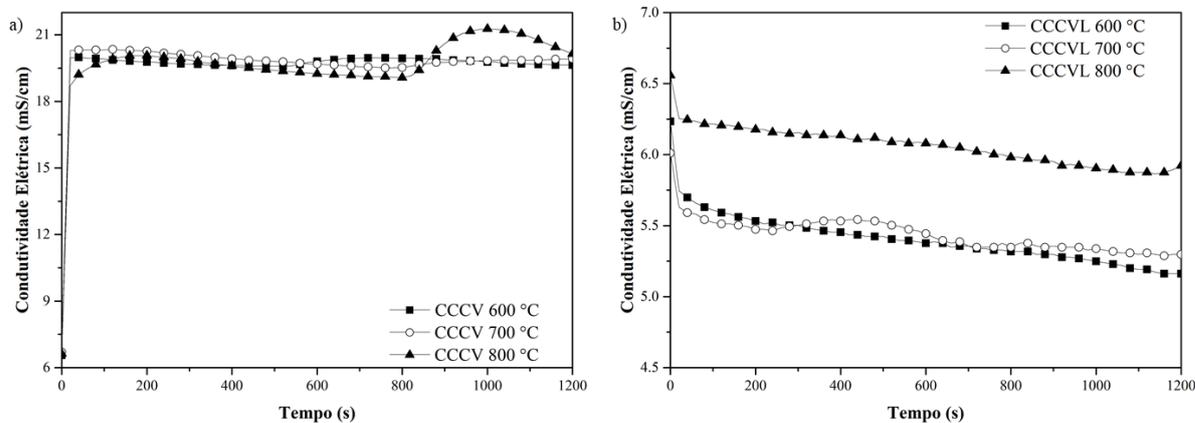
Vieira *et al.* (2020) ao moerem a CCA por 30 minutos em um moinho de bolas rotativo obtiveram valor de D₅₀ de 20 μm (CCA 20) e ao moerem a CCA em um moinho de bolas vibratório por 5 e 60 minutos, obtiveram valores de D₅₀ de 14 μm e 7 μm , respectivamente. Embora tenha havido a diminuição do tamanho médio das cinzas, o valor da área de superfície específica da CCA 20 foi maior que o das outras cinzas moídas, além de ter a maior variação de condutividade elétrica, indicando melhor pozolanicidade e maior resistência à compressão dentre elas. Sendo assim, mesmo que o D₅₀ não atinja valor inferior a 10 μm , deve-se realizar outras análises, as quais complementarão o resultado obtido.

4.5 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

Esta análise foi realizada para todas as cinzas, sendo elas moídas durante 30 minutos, conforme visto na análise granulométrica. Através das Figura 21a, pode-se verificar que as cinzas não lixiviadas apresentaram aumento da condutividade durante a faixa de 0 – 100 s, tendo apresentado certa estabilidade ou ligeira redução. Conforme Lima e Cordeiro (2021), esse aumento inicial nos valores de condutividade se dá por conta da presença dos metais alcalinos

presentes na amostra. Ressalta-se que a CCCV 800 °C apresentou aumento de condutividade elétrica a partir de 13min 40s, que tendeu a reduzir com o passar da contagem.

Figura 21 – Curvas de condutividade elétrica: a) Cinza da casca do coco verde b) Cinza da casca do coco verde lixiviada



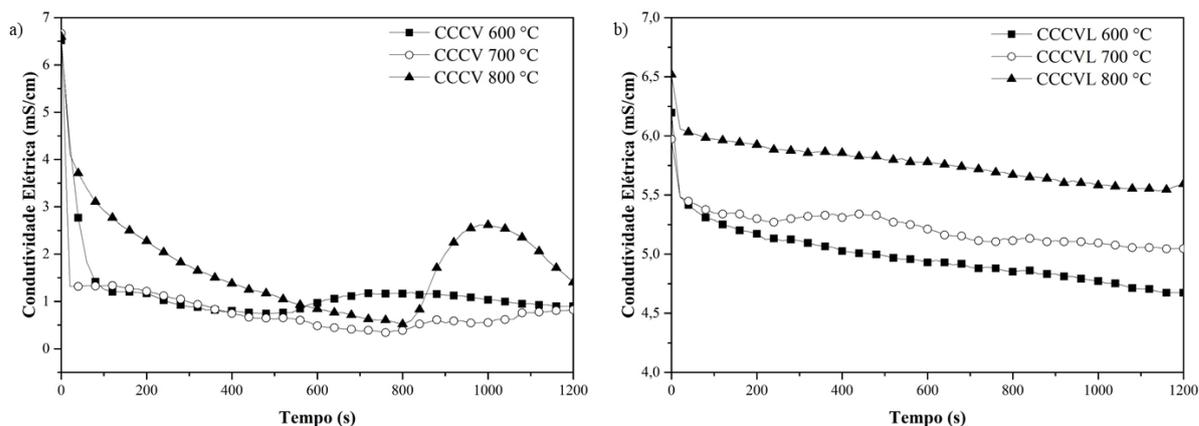
Ao visualizar a Figura 21b, é possível inferir que as curvas de condutividade das amostras lixiviadas apresentaram queda mais acentuada entre a faixa de 0-20 s e que continuaram a decrescer de valor no decorrer dos 20 minutos analisados. Por meio da Tabela 19, é constatado que a variação da condutividade elétrica (ΔC) das cinzas não-lixiviadas, até 2 min, foi negativa. Valor negativo, de ΔC , também foi encontrado por Lima e Cordeiro (2021) ao analisar a cinza da folha do milho sem tratamento com ácido cítrico. As cinzas lixiviadas apresentaram média pozolanicidade, com valores decrescendo conforme a temperatura de queima da biomassa era elevada.

Tabela 19 – Variação de condutividade elétrica medida para as cinzas da casca do coco verde

Cinza Analisada	ΔC (mS/cm)	Classificação
CCCV 600 °C	-13,311	-
CCCV 700 °C	-13,634	-
CCCV 800 °C	-13,273	-
CCCVL 600 °C	0,643	Média Pozolanicidade
CCCVL 700 °C	0,497	Média Pozolanicidade
CCCVL 800 °C	0,352	Média Pozolanicidade

Portanto, para a correção dos valores listados na tabela acima, foi medida a condutividade elétrica das cinzas imersas somente em água deionizada. De posse destes valores, foi realizada a subtração das condutividades elétricas medidas na solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e em água deionizada, respectivamente, obtendo-se os valores retificados ilustrados na Figura 22.

Figura 22 – Curvas de condutividade elétrica corrigidas: a) Cinza da casca do coco verde b) Cinza da casca do coco verde lixiviada



De acordo com os resultados do ensaio de condutividade elétrica exibidos na Figura 21a, tem-se que a CCCV 700 °C apresentou resultado de condutividade elétrica mais expressivo se comparado às outras cinzas, $\Delta C = 5,334$ mS/cm, além de queda significativa de condutividade durante a primeira faixa de tempo do ensaio (0-20 s). Percebe-se que as CCCV 600 °C e 800 °C também apresentaram essa queda durante os segundos iniciais, além de valores de condutividade elétrica de 5,319 e 3,825 mS/cm, respectivamente. Portanto, consoante à Seção 3.3.5, todas as CCCVs sem o tratamento ácido mostraram valores referentes ao intervalo de boa pozolanicidade.

Em relação às curvas de condutividade elétrica corrigidas apresentadas, tem-se que os valores de ΔC diminuem com o tempo, dado que à medida que a cinza tem atividade pozolânica e reage com o hidróxido de cálcio, ocorre uma diminuição na concentração de íons (BASTO; JUNIOR; NETO, 2019; BARBOSA; CORDEIRO, 2021).

Realizaram-se ainda as correções dos ensaios de condutividade elétrica para avaliar a atividade pozolânica das cinzas da casca do coco verde lixiviado com ácido cítrico. Os resultados encontrados estão ilustrados na Figura 22b, onde por meio das curvas, pode-se inferir que ao tratar o pó do coco com ácido cítrico, houve queda da condutividade entre 0-20 s na solução alcalina, no entanto, diferentemente da Figura 21b, a diminuição da condutividade foi ligeiramente menos pronunciada para as CCCV não tratadas com ácido cítrico.

Na Tabela 20 pode-se verificar os valores da variação de condutividade aos 2 min das cinzas analisadas, juntamente com suas classificações conforme os critérios estabelecidos por Luxán *et al.*, (1989). Ressaltando-se que apenas a CCCVL 800 °C apresentou pozolanicidade moderada.

Tabela 20 – Variação de condutividade elétrica medida para as cinzas da casca do coco verde após a correção

Cinza Analisada	ΔC (mS/cm)	Classificação
CCCV 600 °C	5,319	Boa pozolanicidade
CCCV 700 °C	5,334	
CCCV 800 °C	3,825	
CCCVL 600 °C	0,945	Pozolanicidade moderada
CCCVL 700 °C	0,633	
CCCVL 800 °C	0,557	

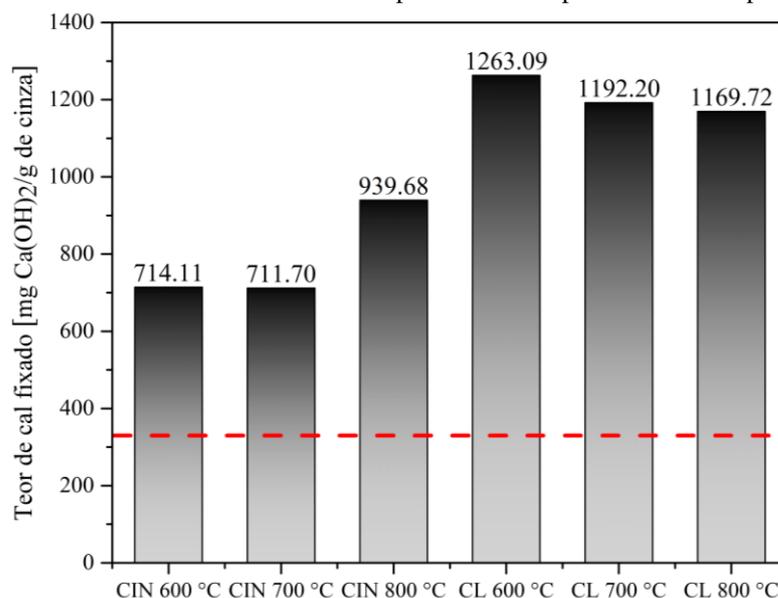
Conforme a Tabela 11, Seção 2.3.3.3, pode-se verificar que a classificação encontrada pelos autores se assemelha aos resultados de condutividade elétrica relatadas neste estudo. Destaca-se que Cordeiro *et al.* (2020) realizaram o pré-tratamento dos produtos agrícolas com ácido cítrico e obtiveram resultados favoráveis no que tange à atividade pozolânica. Se comparados aos valores encontrados para a CCCV tratada com ácido cítrico, ambos os estudos possuem cinzas com moderada e boa pozolanicidade. Além disso, Andreão *et al.* (2020), Barbosa e Cordeiro (2021) também encontraram valores de variação de condutividade elétrica similares aos da CCCVL ao estudarem a CBCA, que é largamente aplicada como pozolana.

Em relação às análises de condutividade elétrica realizadas para o pó do coco verde, Tabela 12, os autores inferiram que resultados mais elevados como 4,74 mS/cm e 1,65 mS/cm foram encontrados para amostras cuja composição química apresentou concentrações de sódio e potássio mais elevadas. Sendo assim, eles empregaram métodos de lavagem da fibra de coco em tanques intencionado minimizar a quantidade de sais presentes nas amostras, reduzindo os níveis de condutividade elétrica, conseqüentemente.

4.6 CHAPELLE MODIFICADO

Na Figura 23 estão ilustrados os consumos de cal, em mg $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$ de cinzas, em cada uma das amostras moídas após 30 minutos, CIN (cinza da casca do coco *in natura*) e CL (cinza da casca do coco lixiviado).

Figura 23 – Resultados de índice de atividade pozolânica Chapelle encontrado para as cinzas



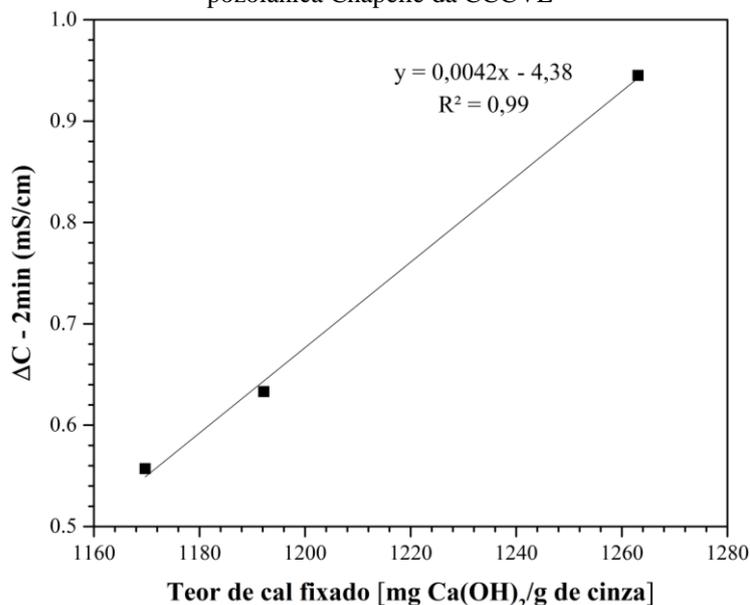
Por meio da figura acima, constatam-se que os valores de índice de atividade pozolânica Chapelle para as cinzas que tiveram tratamento ácido foram maiores, resultado esperado dado que estas amostras possuíam perda ao fogo elevado e continham maiores porcentagens de metais alcalinos, conforme visto na Tabela 16. Ressalta-se que todas as amostras tiveram valor de atividade pozolânica superior a 330 mg Ca(OH)₂/g (Figura 23 - linha tracejada vermelha), que representa o valor mínimo estipulado por Raverdy *et al.* (1980) para que uma amostra seja considerada como pozolânica.

Dentre os resultados apresentados, tem-se que a CCCV 700 °C apresentou a menor reatividade, 711,70 mg Ca(OH)₂/g, corroborando com os resultados do FRX, dado que esta amostra foi a que apresentou menor somatório de óxidos de Si, Al, e Fe. Enquanto a CCCV 600 °C e a CCCV 800 °C apresentaram resultados de Chapelle de 714,11 mg Ca(OH)₂/g e 939,68 mg Ca(OH)₂/g, respectivamente, ratificando o que já fora mostrado na Tabela 16, onde estas cinzas apresentaram os maiores somatórios de óxidos de Si, Al e Fe.

Após o tratamento realizado com ácido cítrico, as amostras tiveram seus metais alcalinos lixiviados, portanto, isto fez com que o teor de cal fixado pela amostra aumentasse, apresentando assim, resultados pozolânicos mais elevados, como pode ser constatado pela Figura 23. A CCCVL 600 °C apresentou o melhor resultado, com 1263,09 mg Ca(OH)₂/g, seguido das outras cinzas, CCCVL 700 °C e CCCVL 800 °C com 1192,20 mg Ca(OH)₂/g e 1169,72 mg Ca(OH)₂/g, respectivamente. Neste caso, à medida que a temperatura foi sendo elevada, formaram-se fases mais cristalinas como foi visto na Figura 19 e, por conta disso, a reatividade tendeu a decrescer de maneira gradativa.

Ao observar os resultados encontrados na Seção 4.5 e os resultados mostrados na Figura 23, nota-se que esses podem ser correlacionados. Embora as cinzas da casca do coco, produzidas sem tratamento químico, tenham mostrado resultados de boa pozzolanicidade, os resultados de índice de atividade pozzolânica Chapelle não foram maiores que os da cinza produzidas após tratamento da casca do coco com ácido cítrico. Mesmo assim, verifica-se que tanto os resultados da variação da condutividade elétrica quanto o Chapelle para as CCCV 600 °C e CCCV 700 °C apresentaram valores próximos, diferindo apenas na CCCV 800 °C, onde a ΔC decresce e o valor de Chapelle aumenta. Por meio da correlação exibida na Figura 24, nota-se que todos os valores de ΔC e Chapelle para as cinzas produzidas após tratamento ácido apresentaram valores com relação linear direta, uma vez que exibiram coeficiente de erro quadrático (R^2) igual superior a 0,99. Em outras palavras, a CCCVL 600 °C se mostrou com maior valor de condutividade elétrica e índice de atividade pozzolânica Chapelle, enquanto que a CCCVL 800 °C apresentou menor valor de ΔC e índice de atividade pozzolânica Chapelle.

Figura 24 – Correlação entre a variação da condutividade elétrica aos 2 minutos e o de índice de atividade pozzolânica Chapelle da CCCVL



Conforme a Tabela 13, Seção 2.3.3.4, pode-se inferir que Cordeiro e Sales ao estudarem a CCE após tratamento com ácido clorídrico, obtiveram valores de Chapelle de até 998 mg Ca(OH)₂/g. Segundo o trabalho realizado pelos autores, a soma dos óxidos de Si, Al e Fe foi de 94,90%, sendo considerada uma cinza com boa pozzolanicidade. Ao comparar os valores obtidos pelos autores com os deste trabalho, nota-se que a as cinzas tratadas com ácido cítrico, embora tenham apresentado a soma destes mesmos óxidos entre 50% e 55%, obtiveram-se valores de

índice de atividade Chapelle superiores a 1000 mg Ca(OH)₂/g, indicando reatividade tão alta quanto à da CBCA e à da CCA, pozolanas que são amplamente difundidas e que apresentaram valores superiores a 330 mg Ca(OH)₂/g, sendo os maiores valores encontrados para as cinzas tratadas com HCl, conforme mostrado na Tabela 13.

Evidencia-se que Memon e Khan (2018) ao estudarem a CEM em diferentes temperaturas, obtiveram valores de Chapelle inferiores a 330 mg Ca(OH)₂/g para a cinza produzida a 400 °C, por conta da amostra possuir alto teor de carbono. Obteve-se também valor inferior para as CEM produzidas a 700 °C e 800 °C, devido a estas cinzas apresentarem picos cristalinos de cristobalita e stishovita, mineral polimorfo do quartzo. Com base nestes resultados, infere-se que os picos de cristobalita encontrados para a CCCVL 700 °C e CCCVL 800 °C não interferiram na obtenção de resultados favoráveis de pozolanicidade para as amostras, uma vez que este mineral não era predominante.

4.7 ÁREA SUPERFICIAL ESPECÍFICA (BET)

As amostras que foram submetidas à análise de granulometria a laser também foram sujeitadas à fisissorção de nitrogênio. Portanto, mostram-se aqui, os resultados obtidos para a CCCVL 700 °C após moagem nos tempos de 30, 60, 120 e 240 minutos.

Na Tabela 21 estão apresentados os valores de área superficial específica pelo método de BET e volume de poro (Vp) e diâmetro de poro (Dp), segundo o método BJH. De acordo com o que foi constatado na Tabela 18, a moagem da CCCVL 700 °C em 30 minutos resultou, não somente em tamanho médio menor, como influenciou para que a área superficial específica BET fosse a maior dentre os tempos de moagem, com um valor de 5290,60 m²/kg, Dp de 22,79 nm e Vp de 0,037 cm³/g.

Tabela 21 – Características obtidas para a CCCVL 700 °C após a fisissorção de nitrogênio

Amostras	Área superficial específica BET (m ² /kg)	Diâmetro de poro (nm)	Volume de poro (cm ³ /g)
C30	5292,60 ± 33,7	22,79	0,037
C60	3254,90 ± 46,8	31,82	0,024
C120	3430,3 ± 35,7	29,88	0,023
C240	3321,7 ± 26,4	31,64	0,021

Consoante à Tabela 18, os tamanhos médios das cinzas moídas nos diversos tempos foram variáveis. O mesmo se deu na análise de BET, onde a maior área superficial encontrada foi na amostra moída a 30 minutos, com os outros tempos de moagem variando na faixa entre

3200 e 3500 m²/kg, apresentando não só valores aproximados de BET quanto também de diâmetro e volume de poros. Estes valores variáveis de BET não são expressivos se devem por conta do alto teor de quartzo encontrado na amostra lixiviada (BARBOSA; CORDEIRO, 2021). Ainda, ao visualizar os valores de diâmetro de poro, verificam-se que estes se situam na faixa entre 2 e 50 nm, classificando-os como mesoporosos de acordo com a IUPAC (1982).

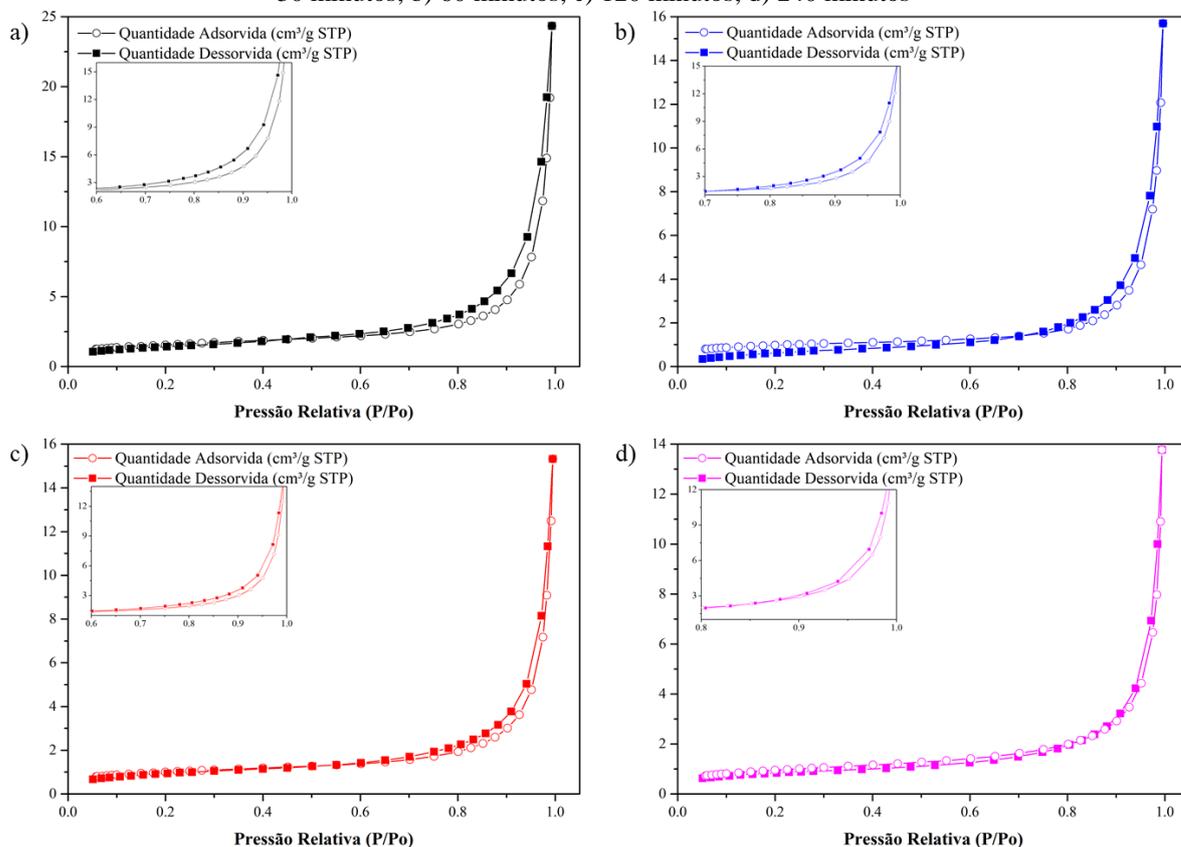
Ao comparar os resultados listados na Tabela 21 com os da Tabela 10, Seção 2.3.3.2, nota-se que Cordeiro e Sales (2015) ao analisarem a CCE, encontraram efeitos positivos para o tratamento do capim elefante com solução de HCl, obtendo elevado valor de BET, devido à remoção dos óxidos metálicos e compostos orgânicos durante a queima. Observou-se particularmente que um aumento da área superficial específica BET implicou em um aumento considerável da reatividade devido à maior superfície exposta às reações pozolânicas. Estes mesmos resultados favoráveis devido ao pré-tratamento dos resíduos agrícolas também foram encontrados por Cordeiro, Vieira e Lopes (2017), Cordeiro *et al.* (2020) e Lima e Cordeiro (2021), conforme mostrado na Tabela 10. Vale ressaltar que estas amostras, se comparadas com a CCCVL 700 °C mostrada neste trabalho, eram predominantemente amorfas, o que contribuiu também para o aumento dos valores de BET.

Cordeiro e Kurtis (2017) ao analisarem a CBCA moída em 4 tempos diferentes (CBCA 1 – 8 minutos, CBCA 2 - 30 minutos, CBCA 3 - 120 minutos, CBCA 4 - 960 minutos), obtiveram BET crescente à medida que a cinza foi tendo seu tamanho reduzido. Para a CBCA 2, obteve-se um valor de BET de 4585 m²/kg e tamanho médio de 14,7 µm, valores inferiores aos obtidos para a CCCVL 700 °C moída em 30 minutos. Ao investigarem a porcentagem amorfa de sílica solúvel na cinza, os autores encontraram que 10% desta possuía material solúvel, sendo assim, este valor corroboraria para o baixo valor de BET da CBCA 2, se comparado por exemplo à CBCA 4, a qual teve um valor de área superficial de 11340 m²/kg e fração solúvel de 20,4%, devido ao elevado tempo de moagem. Este fato foi confirmado por Mali e Nathangopalan (2021) ao investigarem a CBCA. Os autores encontraram área superficial BET de 6830 m²/kg e volume de poros de 0,0136 cm³/g por conta da cristalinidade da amostra.

Através da fisissorção de nitrogênio, da CCCVL 700 °C, foi possível ainda obter as isotermas de adsorção-dessorção de nitrogênio de todos os tempos de moagem, mostrados na Figura 25. Conforme os gráficos abaixo, constatou-se que as amostras apresentaram uma tendência semelhante. Em concordância com a classificação IUPAC (1982), todas as isotermas das cinzas foram ditas como pertencentes ao tipo V com material de histerese H3, caracterizando-as como sólidos mesoporosos, com presença de poros uniformes e não-

uniformes. Sing *et al.* (1985) complementam estes resultados ao mencionarem que histerese H3 é típica de poros estreitos e em formas de fendas.

Figura 25 – Isotermas de adsorção-dessorção de nitrogênio para as CCCVL 700 °C nos tempos de moagem: a) 30 minutos; b) 60 minutos; c) 120 minutos; d) 240 minutos



Por meio da Figura 25, observa-se que as histereses podem ser visualizadas nos valores de pressão relativa (P/P_o) variando entre 0,6 e 1,0. Curvas com histereses tipo H3 também foram relatadas por Barbosa e Cordeiro (2021) e Vieira *et al.* (2020) ao estudarem a CBCA e a CCA, respectivamente. Referente ao estudo realizado por Barbosa e Cordeiro (2021), para a CBCA 1, os autores encontraram área superficial de 5500 m²/kg e volume de poro de 0,013 cm³/g. Tal fato se deu por conta da CBCA 1 possuir quantidade significativa de sílica cristalina, na forma de quartzo, o que contribuiu também para reduzir o volume de poro.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÃO

Diante do exposto nesta pesquisa e levando em consideração que ela objetivou estudar a viabilidade da produção de cinza pozolânica a partir da queima da biomassa da casca do coco verde, inferiu-se a partir dos resultados:

- O rendimento das cinzas varia de acordo com o tipo de tratamento e temperatura aplicados a ela. No entanto, ao realizar o tratamento químico do coco moído, o rendimento da CCCVL decresceu em todas as temperaturas de calcinação, mesmo assim, a variação deste não se mostra expressiva ao comparar os rendimentos para as CCCVL produzidas.
- As cinzas produzidas, sem beneficiamento químico, e através do método de queima (i) (permanência de 3 h na temperatura estabelecida) apresentaram características não pozolânicas, além da presença de metais alcalinos e cloro, que são prejudiciais à resistência da pasta cimentícia. Por consequência, foi necessário realizar o tratamento químico da matéria-prima com ácido cítrico, optando pelo método de queima (ii) (3 h de permanência a 350 °C e 3 h de permanência na temperatura de queima estabelecida). As cinzas da casca do coco verde que tiveram este tratamento apresentaram características pozolânicas conforme um dos requisitos mínimos exigidos pela NBR 12653 (2014), como somatório de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 maiores que 50% e perda ao fogo menor que 6%. No entanto, a quantidade de SO_3 ultrapassou o limite máximo em cerca de 2,5%. Contudo, as cinzas da casca do coco verde lixiviadas manifestaram desempenho pozolânico da mesma maneira que outras cinzas já estudadas e aplicadas na indústria cimentícia, como a do bagaço da cana-de-açúcar e da casca do arroz. Sendo assim, as cinzas que tiveram beneficiamento químico encontram-se em concordância com um dos requisitos mínimos para serem consideradas como pozolânicas.
- O método de queima (ii), mostrou-se eficiente para a produção de cinzas da casca do coco verde com beneficiamento químico. Ademais, o pré-tratamento do pó de coco antes da etapa de calcinação propiciou à CCCVL: ampliação do teor de SiO_2 e índice de atividade pozolânica Chapelle e diminuição da concentração de metais alcalinos contaminantes e da perda ao fogo.

- Ao observar a composição mineralógica das amostras, nota-se que os padrões de DRX das cinzas sem tratamento ácido não possuem desvios na linha de base da sílica, além de que são observados picos cristalinos intensos de silvita, corroborando o que foi mostrado no FRX e confirmando a necessidade da lixiviação da matéria-prima com ácido cítrico. Os padrões de DRX das cinzas indicaram que o ácido cítrico permitiu ainda a remoção dos metais alcalinos e íons de cloro, intensificando os picos de sílica, na forma de quartzo, além de um halo amorfo entre as posições de 15° e 35°, indicando a presença de sílica amorfa, o que aumentaria a reatividade das cinzas lixiviadas. A CCCVL 800 °C indicou a formação de outros compostos cristalinos, tornando-a menos reativa que as outras.
- O procedimento de moagem aplicado não foi o suficiente para reduzir o tamanho médio das cinzas abaixo de 10 µm, mesmo assim, ao utilizar o tempo de moagem de 30 minutos e tamanho médio de cerca de 16 µm foram alcançados resultados satisfatórios de atividade pozolânica, indicando que a moagem influenciou na reatividade das cinzas.
- A fisissorção de nitrogênio dos tempos de moagem das cinzas comprovou que a presença de sílica cristalina, na forma de quartzo, afeta não somente no tamanho médio das partículas, com valores variando entre 16 e 20 µm como na área superficial BET. O maior valor de área superficial BET foi obtido para a CCCVL 700 °C moída a 30 min ($D_{50} = 16,731 \mu\text{m}$), resultando em um valor de 5292,60 m²/kg, volume de poro de 0,037 cm³/g e diâmetro de poros de 22,79 nm.
- A atividade pozolânica medida pela variação da condutividade elétrica e pelo índice Chappelle indicou que as cinzas produzidas possuem pozolanicidade. Com isso, atenta-se ao fato de que ao aumentar o teor de sílica por meio do beneficiamento químico, houve o aumento da atividade pozolânica nas cinzas. Todavia, o índice de atividade pozolânica Chappelle diminuiu ao elevar a temperatura de calcinação da CCCVL 600 °C para a CCCVL 800 °C, variando de 1263,09 mg Ca(OH)₂/g para 1169,72 Ca(OH)₂/g. Esta redução dos valores se deu por conta da formação de novos picos cristalinos, verificados através do difratograma de raios-X, na CCCVL 700 °C e CCCVL 800 °C, onde notou-se o aparecimento mais de picos de cristobalita e grupos fosfatos. Ainda assim, todas as amostras, incluindo as não tratadas quimicamente, apresentaram atividade pozolânica acima do mínimo estipulado na literatura.

5.2 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Conforme foi verificado neste trabalho, a cinza da casca do coco verde produzida sem tratamento com ácido cítrico possui composição química inadequada para ser empregada como pozolana. No entanto, este fato foi alterado ao realizar o pré-tratamento da casca do coco verde com ácido cítrico, lixiviando metais alcalinos indesejáveis e íons de cloro. Devido ao estudo da cinza da casca do coco verde ainda estar em fase inicial, para trabalhos futuros, sugere-se:

- Realizar o teste de índice de atividade pozolânica em argamassas, preconizado pela NBR 5752 (2014), o qual investigaria a resistência à compressão desta matriz ao aplicar a cinza.
- Realizar a aplicação da CCCVL em artefatos de concreto, analisando as propriedades deste no estado fresco e endurecido. Verificando se a reação dos metais alcalinos remanescentes na amostra afetaria as características do concreto moldado, uma vez que há a possibilidade de reação álcali-agregado, reduzindo o ganho de resistência do concreto ao formar um gel álcali-silicato de característica expansiva, alterando a aderência entre agregado e pasta de cimento.
- Realizar a moagem da cinza em tempos inferiores a 30 minutos, intencionando verificar se redução do tempo de processo afetaria ou não os efeitos pozolânicos da amostra, possibilitando minimizar o consumo energético desta etapa.
- Para este estudo, obteve-se resultados satisfatórios ao realizar o beneficiamento químico com ácido cítrico com concentração 5%, por conta disso, propõe-se a utilização de concentrações inferiores a esta para conferir um teor de concentração ideal para a lixiviação.

REFERÊNCIAS

A

ADAJAR, M. A.; GALUPINO, J.; FRIANEZA, C.; AGUILON, J. F.; SY, A. B.; TAN, P. A. Compressive Strength and Durability of Concrete with Coconut Shell Ash as Cement Replacement. **International Journal of GEOMATE**, v. 18, n. 70, p. 183–190, 2020.

ADKINS, S. W.; BIDDLE, J.; NGUYEN, Q. T.; FOALE, M. *Cocos nucifera* Coconut. In: LITZ, R. E.; PLIEGO-ALFARO, F.; HORMAZA, J. I. **Biotechnology of Fruit and Nut Crops**. 2. ed. London: CABI, 2020.

AGRIZZI, T. **Pirólise da casca de coco**: estudo da cinética de devolatilização e identificação de produtos. 2017. 101p. Dissertação (Mestrado em Energia), Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, 2017.

AKU, S. Y.; YAWAS, D. S.; APASI, A. Evaluation of Cast Al-Si-Fe alloy/Coconut Shell Ash Particulate Composites. **Gazi University Journal of Science**, v. 26, n. 3, p. 449-457, maio 2013.

ALI, M.; LIU A.; SOU, H.; CHOUW, N. Mechanical and dynamic properties of coconut fiber reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 814–825, jan. 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C618-08A**. Standard Specification for Cool and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA: 2008.

ANDRADE NETO, J. S.; FRANÇA, M. J. S.; AMORIM JÚNIOR, N. S.; RIBEIRO, D. V. Effects of adding sugarcane bagasse ash on the properties and durability of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 266, 2021.

ANDRADE, A. M.; PASSOS, P. R. A.; MARQUES, L. G. C.; OLIVEIRA, L. B.; VIDAURRE, G. B.; ROCHA, J. D. S. Pirólise de Resíduos do Coco-da-Baía (*Cocos Nucifera* Linn) e Análise do Carvão Vegetal. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 5, p. 707-714, ago. 2004.

ANDREÃO, P. V.; SULEIMAN, A. R.; CORDEIRO, G. C.; NEHDI, M. L. Beneficiation of Sugarcane Bagasse Ash: Pozzolanic Activity and Leaching Behavior. **Waste and Biomass Valorization**, v. 11, n. 8, p. 4393–4402, 2020.

ANDREW, R. M. Global CO₂ emissions from cement production. **Earth System Science Data**, v. 10, p. 195-217, jan. 2018.

ANICIC, B.; LIN, W.; DAM-JOHANSEN, K.; WU, H. Agglomeration mechanism in biomass fluidized bed combustion – Reaction between potassium carbonate and silica sand. **Fuel Processing Technology**, v. 173, n. October 2017, p. 182–190, 2018.

ANUAR, M. F.; FEN, Y. W.; ZAID, M. H. M.; MATORI, K. A.; KHAIDIR, R. E. M. Synthesis and structural properties of coconut husk as potential silica source. **Results in Physics**, v. 11, p. 1-4, ago. 2018.

_____. The Physical and Optical Studies of Crystalline Silica Derived from the Green Synthesis of Coconut Husk Ash. **Applied Sciences**, v. 10, n. 6, p. 2128-2138, mar. 2020.

ARAGÃO, W. M. **COCO**: Pós-Colheita. Série Frutas do Brasil. Brasília: EMBRAPA Informação Tecnológica; 2002.

ARAÚJO, P. M. M.; FELIX FILHO, L. F.; BARBOSA, J. Estudo das Propriedades Termofísicas da Fibra de Coco Minimamente Processada Visando Aplicação como Isolante Térmico. **Revista Interdisciplinar de Pesquisa e Inovação**, v. 1, n. 1, p. 134- 142, 2015.

ARENA, N.; LEE, J.; CLIFT, R. Life Cycle Assessment of activated carbon production from coconut shells. **Journal of Cleaner Production**, v. 125, p. 68-77, mar. 2016.

ARIMANWA, M. C.; ANYADIEGWU, P. C.; OGBONNA, N. P. The Potential Use Of Coconut Fibre Ash (CFA) In Concrete. **The International Journal of Engineering and Science (IJES)**, v. 9, n. 1, p. 68–74, 2020.

ASASUTJARIT, C.; HIRUNLABH, J.; KHEDARI, J.; CHAROENVAI, B. Z.; SHIN, U. C. Development of coconut coir-based lightweight cement board. **Construction and Building Materials**, v. 21, p. 277–288, 2007.

ASHOKKUMAR, P.; KEERTHIVAS, M. S.; NAVEENBOOBALAN, D.; PRAVIN, R. An Experimental Study on Strength of Concrete by using Partial Replacement of Cement with Coconut Shell Ash and Coarse Aggregate with Coconut Shell. **International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)**, v. 6, n. 3, p. 8020-8026, mar. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **História**. Disponível em: <<https://abcp.org.br/cimento/historia/>>. Acesso em: 13 maio 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11172**: Aglomerantes de origem mineral - Terminologia. Rio de Janeiro: 1990.

_____. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro: 2014.

_____. **NBR 15895**: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado. Rio de Janeiro: 2010.

_____. **NBR 16697**: Cimento Portland — Requisitos. Rio de Janeiro: 2018.

_____. **NBR NM 18**: Cimento Portland – Análise química – Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro: 2012.

AYRILMIS, N.; JARUSOMBUTI, S.; FUEANGVIVAT, V.; BAUCHONGKOL, P.; WHITE, R. Coir Fiber Reinforced Polypropylene Composite Panel for Automotive Interior Applications. **Fibers and Polymers**, v. 12, n. 7, p. 919-926, jun. 2011.

B

BABU, G. L. S.; VASUDEVAN, A. K. Strength and Stiffness Response of Coir Fiber-Reinforced Tropical Soil. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 20, n. 9, p. 571-577, 2008.

BAHURUDEEN, A.; KANRAJ, D.; GOKUL DEV, V.; SANTHANAM, M.. Performance evaluation of sugarcane bagasse ash blended cement in concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 59, p. 77–88, 2015

BANERJEE, S.; ADITYA, G.; SAHA, G. K. Household disposables as breeding habitats of dengue vectors: linking wastes and public health. **Waste Management**, v. 33, p. 233-239, 2013.

BAPAT, D. W.; KULKARNI S. V.; BHANDARKAR V. P. Design and operating experience on fluidized bed boiler burning biomass fuels with high alkali ash. In: Preto FDS, editor. **Proceedings of the 14th International Conference on Fluidized Bed Combustion**, Vancouver, New York, NY: ASME, 1997, p. 165–174.

BARBOSA, F. L.; CORDEIRO, G. C. Partial cement replacement by different sugar cane bagasse ashes: Hydration-related properties, compressive strength and autogenous shrinkage. **Construction and Building Materials**, v. 272, p. 8–11, 2021.

BARBOSA, F. L.; CORDEIRO, G. C. Partial cement replacement by different sugar cane bagasse ashes: Hydration-related properties, compressive strength and autogenous shrinkage. **Construction and Building Materials**, v. 272, p. 8–11, 2021.

BARCELOS, K. M. **Análise do Potencial do Leito de Jorro como Reator para Pirólise da Casca De Coco: Estudo Experimental e Simulação Via CFD**. 2016. 115 p. Dissertação (Mestrado em Energia), Centro Universitário Norte do Espírito Santo, Universidade Federal do Espírito Santo, 2016.

BARRETO, A. M. **Técnicas não destrutivas para detecção da reação álcali-agregado em prismas de concreto**. 2019. 105 p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais), Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.

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**. 2011. 146p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2011.

BASTO, P A.; SAVASTANO JUNIOR, H.; DE MELO NETO, A. A. Characterization and pozzolanic properties of sewage sludge ashes (SSA) by electrical conductivity. **Cement and Concrete Composites**, v. 104, n. September, p. 1034-10, 2019

BEIDAGHY DIZAJI, H.; ZENG, T.; HÖLZIG, H.; BAUER, J.; KLÖB, G.; ENKE, D. Ash transformation mechanism during combustion of rice husk and rice straw. **Fuel**, v. 307, n. July 2021, 2022.

BELMONTE, E. P. **Espectroscopia por fluorescência de raios x por reflexão total: um estudo simulado utilizando o método de Monte Carlo**. 2005. Dissertação (Mestrado em

Ciências de Energia Nuclear), Universidade federal do Rio de Janeiro, COOPE, Rio de Janeiro, 2005.

BENHELAL, E.; ZAHEDI, G.; SHAMSAEI, E.; BAHADORI, A. Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry. **Journal of Cleaner Production**, Lismore, n. 51, p. 142-161, 2013.

BERALDO, J. L. **Moagem de Minérios em Moinhos Tubulares**, São Paulo: Edgard Blücher, 1987.

BIGGS, E. M.; BRUCE, E.; BORUFF, B.; DUNCANA, J. A.; HORSLEY, J.; PAULI, N.; MCNEILL, K.; NEEF, A.; OGTROP, F.V.; CURNOW, J.; HAWORTH, B.; DUCE, S.; IMANARI, Y. Sustainable development and the water–energy–food nexus: A perspective on livelihoods. **Environmental Science & Policy**, v. 54, p. 389–397, ago. 2015.

BODEN, T. A.; ANDRES, R. J.; MARLAND, G. **Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions**. 2017. Disponível em: <http://cdiac.ess-dive.lbl.gov/trends/emis/meth_reg.html>. Acesso em: 23 jan. 2020.

BOESCH, M.E.; HELLWEG, S. Identifying improvement potentials in cement production with life cycle assessment. **Environmental Science & Technology**, v. 44, n. 23, p. 9143–9149, out. 2010.

C

CALLISTER, W. D., RETHWISCH, D, G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 8.ed. John Wiley & Sons, Inc., 2012.

CARRIJO, O. A.; LIZ, R. D. S.; MAKISHIMA, N. Fibra da casca do coco verde como substrato agrícola. **Horticultura brasileira**, v. 20, n. 4, p. 533-535, dez. 2002.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: Inspeção e técnicas eletroquímicas**. Goiânia: UFG, 1997.

CESAR, F.; SILVEIRA, M.; CUNHA, R. Aproveitamento das Cascas de Coco Verde para Produção de Briquete em Salvador - uma Alternativa Sustentável para a Destinação de Resíduos do Coco In Natura. In: **ELECS, III Encontro Latino-Americano sobre Edificações**, Recife, 2009.

CHEN, W.; HONG, J.; XU, C. Pollutants generated by cement production in China, their impacts, and the potential for environmental improvement. **Journal of Cleaner Production**, v. 103, p. 61-69, 2015.

CINTRA, F. L. D.; FONTES, H. R.; PASSOS, E. E. M.; FERREIRA, J. M. S. **Fundamentos tecnológicos para a revitalização das áreas cultivadas com coqueiro gigante no nordeste do Brasil**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2009.

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concretos**. 2006. 485 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

CORDEIRO, G. C.; ANDREÃO, P. V.; TAVARES, L. M. Pozzolanic properties of ultrafine sugar cane bagasse ash produced by controlled burning. **Heliyon**, v. 5, n. 10, p. 0–5, 2019.

CORDEIRO, G. C.; FILHO, R. D. F.; FAIRBAIRN, E. M. R. Effect of calcination temperature on the pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 3301-3303, jul. 2009.

CORDEIRO, G. C.; KURTIS, K. E. Effect of mechanical processing on sugar cane bagasse ash pozzolanicity. **Cement and Concrete Research**, v. 97, p. 41–49, 2017.

CORDEIRO, G. C.; LEMOS, M. N.; XAVIER, K. V.; LIMA, C. P. F. Production of agroindustrial ashes with pozzolanic activity via acid leaching, conjugated burning and ultrafine grinding. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 4, p. 189–203, 2020.

CORDEIRO, G. C.; SALES, C. P. Pozzolanic activity of elephant grass ash and its influence on the mechanical properties of concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 55, p. 331–336, 2015.

CORDEIRO, G. C.; TAVARES, L. M.; TOLEDO FILHO, R. D. Improved pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash by selective grinding and classification. **Cement and Concrete Research**, v. 89, p. 269–275, 2016.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Use of ultrafine rice husk ash with high-carbon content as pozzolan in high performance concrete. **Materials and Structures**, v. 42, p. 983–992, 2009.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; TAVARES, L. M.; FAIRBAIRN, E. M. R.; HEMPEL, S. Influence of particle size and specific surface area on the pozzolanic activity of residual rice husk ash. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 5, p. 529–534, 2011.

CORDEIRO, G. C.; VIEIRA, A. P.; LOPES, S. Study on the pozzolanic activity of sugar cane straw ash produced using different pretreatments. **Química Nova**, v. 40, n. 3, p. 264–269, 2017.

CORDEIRO, L. N. P. **Análise da variação do índice de amorfismo da cinza da casca de arroz sobre a atividade pozolânica**. 2009. 98 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

CORRADINI, E.; ROSA, M.; MACEDO, B.; PALADIN, P.; MATTOSO, L. Composição química, propriedades mecânicas e térmicas da fibra de frutos de cultivares de coco verde. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 31, n. 3, p. 837-846, set. 2009.

COUTINHO, A. S. **Fabrico e propriedades do betão** – Volume I, 3 ed. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, p.401, 1997.

CULLITY, Bernard Dennis; STOCK, Stuart R. **Elements of X-ray Diffraction**. Pearson Education, 2014.

CUNHA, M.K.; FRANCO, M. S. **Efeito do FTE BR12 na produtividade inicial de Brachiaria brizantha cv. Xaraés**. Palmas, TO: Embrapa Pesca e Aquicultura, 2017. 19 p.

(Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 16). Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/162822/1/CNPASA-2017-bpd16.pdf>>. Acesso em: 10 jul. 2021.

CURRY, C. K. **Cement Data Sheet – Mineral Commodities 2020**. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, p. 42-43, 2020.

D

DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais. In: ISAIA, G. C. (ed). **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. p.261-309.

DAL MOLIN, D. C. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 1. ed. São Paulo: Editora G. C. Isaia, Instituto Brasileiro de Concreto (IBRACON), 2007.

DAL MOLIN, D.C.C. Adições Minerais para Concreto Estrutural. In: ISAIA, G. C. (ed). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 345-379.

DAS, G., BISWAS, S. Effect of fiber parameters on physical, mechanical and water absorption behaviour of coir fiber–epoxy composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, p. 1-10, jan. 2016.

DAY, R. L. Pozzolans for use in low-cost housing: a state-of-the-art report. **International Development Research Centre**, 1990. 157 p.

DAYRIT, C. S.; DAYRIT, E. M. **Coconut oil: From Diet to Therapy**. Anvil Publishing Inc.: Manila, 2013.

DE TAFFIN, G. **Coconut**. MacMillan Education: Ithaca, New York, 1998.

DIAS, N. S.; OLIVEIRA, A. M.; SOUZA NETO, O.; BLANCO, F.; REBOUCAS, J. Concentração salina e fases de exposição a salinidade do meloeiro cultivado em substrato de fibra de coco. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 33, n. 3, p. 915-921, set. 2011.

E

EMPRESA BRASILEIRA DE AGROPECUÁRIA (Embrapa). Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. **Beneficiamento da casca do coco verde**. Disponível em: <http://www.ceinfo.cnpat.embrapa.br/arquivos/artigo_3830.pdf>. Acesso em: 22 abr. 2020.

F

FERRI, M. G. **Botânica: morfologia externa das plantas (organografia)**. 15. ed. São Paulo: Nobel, 1990.

FISCHEDICK, M.; ROY, J.; ABDEL-AZIZ, A.; ACQUAYE, A.; ALLWOOD, J. M.; CERON, J.-P.; GENG, Y.; KHESHGI, H.; LANZA, A.; PERCZYK, D.; PRICE, L.; SANTALLA, E.; SHEINBAUM, C.; TANAKA, K. Industry. In: EDENHOFER, O.; PICHS-MADRUGA, R.;

SOKONA, Y.; FARAHANI, E.; KADNER, S.; SEYBOTH, K.; ADLER, A.; BAUM, I.; BRUNNER, S.; EICKEMEIER, P.; KRIEMANN, B.; SAVOLAINEN, J.; SCHLÖMER, S.; STECHOW, C.; ZWICKEL, T.; MINX, J. C. **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change**. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate. Cambridge: Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, 2014.

FOALE, M. M. **The coconut odyssey**: The bounteous possibilities of the tree of life. Australian Centre for International Agricultural Research, Monograph: Canberra, 2003. n. 101. 132 p.

FONTES, H. R. **Caracterização do quadro atual e principais ameaças à produção de coco seco no nordeste do Brasil**. 2010. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/>>. Acesso em: 29 abr. 2020.

_____. **Produção e Comercialização de Coco no Brasil Frente ao Comércio Internacional**: Panorama 2014. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2014. 51 p.

FONTES, H. R.; FERREIRA, J. M. S. **A cultura do coqueiro**. Distrito Federal: Embrapa Informação Tecnológica, 2006. 101 p.

FONTES, H. R.; WANDERLEY, M. **Situação atual e perspectivas para a cultura do coqueiro no Brasil**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2006. 16 p.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). 2018. Production of Coconuts: top 10 producers. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize>>. Acesso em: 15 jan. 2020.

G

GALVÃO, J. C. A. **Estudo das propriedades dos concretos confeccionados com cimento CP V –ARI e CP II-F-32, sob diferentes temperaturas de mistura e métodos de cura**. 2003. 112 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e Processos), Universidade Federal do Paraná, 2003.

GREENBERG, S. A. Kinetics of hydrothermal reactions, I: reaction between silica and calcium hydroxide. **Bull. Geol. Soc. Am**, v. 69, p. 1573–1576, 1958.

H

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos da Física Moderna – Ótica e Física Moderna**. 4. ed. Rio de Janeiro: Editora S.A., 1996.

HARRIES, H. C. Evolution, dissemination and classification of *Cocos nucifera* L. **Botanical Reviews**, v. 44, n. 3, p. 265–320, jul./set. 1978.

HARRIES, H. C.; CLEMENT, C. R. Long-distance dispersal of the coconut palm by migration within the coral atoll ecosystem. **Annals of Botany**, v. 113, p. 565–570, 2014.

HASNAIN, M. H.; JAVED, U.; ALI, A.; SAEED ZAFAR, M. Eco-friendly utilization of rice husk ash and bagasse ash blend as partial sand replacement in self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 273, p. 121753, 2021.

HASSAN, H. S.; ABDEL-GAWWAD, H. A.; GARCÍA, S. R. V.; ISRADE-ALCÁNTARA, I. Fabrication and characterization of thermally-insulating coconut ash-based geopolymer foam. **Waste Management**, v. 80, p. 235-240, set. 2018.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. Universidade de São Paulo, 1993.

HUNTZINGER, D.N.; EATMON, T.D. A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, n. 7, p. 668–675, 2009.

I

IACKS, J. A.; OLIVEIRA, L. J.; PADILHA, S. A.; GONÇALVES, M. R. F. Propriedades Tecnológicas de Blocos de Concreto com Cinza da Casca de Arroz Destinados a Pavimentos. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v. 6, n. 1, p. 22-28, jul. 2019.

IDAM. **Cultura do coco**. Disponível em: <<http://www.idam.am.gov.br/cultura-do-coco/>>. Acesso em: 15 jul. 2021

IEA. **Energy Technology Perspectives 2016: Towards Sustainable Urban Energy Systems**, International Energy Agency. Disponível em: <www.iea.org/etp2016>. Acesso em: 30 jan. 2020.

IGWE, J. C.; ABIA, A. A.; IBEH, C. A. Adsorption kinetics and intraparticulate diffusivities of Hg, As and Pb ions on unmodified and thiolated coconut fiber. **International journal of Environmental Science and Technology**, v. 5, n. 1, p. 83-92, 2008.

IKPONMWOSA, E. E.; EHIKHUENMEN, S; EMESHIE, J.; ADESINA, A. Performance of Coconut Shell Alkali-Activated Concrete: Experimental Investigation and Statistical Modelling. **Silicon**, 2020.

IKUMAPAYI, O. M.; AKINLABI, E. T.; MAJUMDAR, J. D.; AKINLABI, S. A. **Applications of coconut shell ash/particles in modern manufacturing: a case study of friction stir processing**. [s.l.] LTD, p. 69-95, 2020.

ILER, R. K. **The chemistry of Sílica - Solubility, polymerization, colloid and surface properties, and Biochemistry**. New York: John Wiley & Sons, 1976.

ISAH, B. W. Effect of Coconut Shell Ash on Properties of Fired Clay Brick. **Journal of Civil Engineering and Environmental Technology**, v. 1, n. 6, p. 7-11, ago. 2014.

IUPAC. **Manual of Symbols and Terminology of Colloid Surface**, Butterworths, London, 1982.

IYA, V.; GANJIAN, E.; CLAISSE, P. Strength, durability, and leaching properties of concrete paving blocks incorporating GGBS and SF. **Construction and Building Materials**, v. 113, p. 273–279, 2016.

J

JEGAN, J.; SRIRAM, B. Replacement of cement by granite powder in paver block. **International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)**, v. 5, n. 6, p. 1680–1683. jun. 2018.

JENKINS, R.; GOULD, R.W.; GEDCKE, D. **Quantitative X-ray Spectrometry**. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 1995.

JOKAR, Z.; MOKHTAR, A., 2018. Policy making in the cement industry for CO₂ mitigation on the pathway of sustainable development-a system dynamics approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 201, p. 142–155, 2018.

JOSHUA, O; OLUSOLA, K. O.; BUSARI, A. A.; OMUH, I. O.; OGUNDE, A. O.; AMUSAN, L. M.; EZENDUKA, C. J. Data on the pozzolanic activity in coconut shell ash (CSA) for use in sustainable construction. **Data in Brief**, v. 18, p. 1142-1145, 2018.

K

KLEMM, W. A. Cementitious materials: historical notes. In: SKALNY, J., MINDESS, S. **Materials science of concrete I**. Westerville: The American Ceramic Society, 1989. p. 1-26.

KOLAWOLE, J. T.; BABAFEMI, A. J.; FANIJO, E.; CHANDRA PAUL, S.; COMBRINCK, R. State-of-the-art review on the use of sugarcane bagasse ash in cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 118, n. February, p. 103975, 2021.

KRISHNARAO, R. V.; SUBRAHMANYAM, J.; JAGADISH KUMAR, T. Studies on the formation of black particles in rice husk silica ash. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 21, p. 99-104, 2001.

KUMAR, G. B. R.; KESAVAN, V. Materials Today : Proceedings Study of structural properties evaluation on coconut fiber ash mixed concrete. **Materials Today: Proceedings**, v. 22, 2019.

KUMAR, K. R.; PRIDHAR, T.; BALAJI, V. S. S. Mechanical properties and characterization of zirconium oxide (ZrO₂) and coconut shell ash (CSA) reinforced aluminium (Al 6082) matrix hybrid composite. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 765, p. 171-179, out. 2018.

L

LACERDA, M. R. B. **Características físicas e químicas de substratos à base de pó de coco e resíduo de sisal para a produção de mudas de sabiá (Mimosa caesalpiniaefolia Benth)**. 2004. 282 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Universidade Federal Rural de Pernambuco, Pernambuco, 2004.

LAWRENCE, P.; CYR, M.; RINGOT, E. Mineral admixtures in mortars: Effect of inert materials on short-term hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 12, p. 1939-1947, 2003.

LIMA, C. P. F.; CORDEIRO, G. C. Evaluation of corn straw ash as supplementary cementitious material: Effect of acid leaching on its pozzolanic activity. **Cement**, v. 4, n. July 2020, p. 100007, 2021.

LUXÁN, M. P.; MADRUGA, F.; SAAVEDRA, J. Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. **Cement and Concrete Research**, v. 19, p. 63-68, 1989.

M

MACEDO, J. L. V. de. **Fruticultura: coqueiro**. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2002.

MAGDZIARZ, A.; GAJEK, M.; NOWAK-WOŹNY, D.; WILK, M. Mineral phase transformation of biomass ashes – Experimental and thermochemical calculations. **Renewable Energy**, v. 128, p. 446–459, 2018.

MALHOTRA, V. M., MEHTA, P. K. **Pozzolanic and cementitious materials**. Amsterdam: Gordon and Breach Publishers, 1996.

MALI, A. K.; NANTHAGOPALAN, P. Development of a framework for the selection of best sugarcane bagasse ash from different sources for use in the cement-based system: A rapid and reliable path. **Construction and Building Materials**, v. 293, 2021.

MARINHO, J. L. M.; GHEYI, H. R.; FERNANDES, P. D. *et al.* Cultivo do coco “Anão Verde” irrigado com águas salinas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, DF, v. 41, n. 8, p. 1277-1284, ago. 2006.

MARTINS, C. R.; JESUS JUNIOR, L. A. **Evolução da produção de coco no Brasil e o comércio internacional: panorama 2010**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2011. 28 p. (Embrapa Tabuleiros Costeiros. Documentos, 164). BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio; Secretaria de Comércio Exterior.

MARTINS, C. R.; JESUS JUNIOR, L. A. **Evolução da produção de coco no Brasil e o comércio internacional: panorama 2010**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2011. 28 p.

MASSAZZA, F. Pozzolana and pozzolanic cements. In: HEWLETT, P. C. **Lea’s chemistry of cement and concrete**. 4 ed. New York: J. Wiley, 1998. p. 471-631.

MATOS, S. R. C.; GUIMARÃES, C. C. Utilização da Cinza da Casca do Coco Verde como Substituição Parcial do Cimento Portland em Argamassas. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 13, n. 1, p. 251-269, jan./jun. 2017.

MEFTEH, H.; KEBÄILI, O.; OUCIEF, H.; BERREDJEM, L.; ARABI, N. Influence of moisture conditioning of recycled aggregates on the properties of fresh and hardened concrete. **Journal of Cleaner Production**. v. 54, p. 282–288, 2013.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. 3. ed. Berkeley: McGraw-Hill, 2006.

MEMON, A.; SHAIKH, F. A.; RAZA, A.; AWAIS, M.; ABUBAKAR, M. Comparative Study of the Compressive Strength of concrete by Partially Replacing Coarse Aggregate with Coconut Shell Aggregate. **International Conference on Sustainable Development in Civil Engineering**, 2019.

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

MILONJIĆ, S. K.; ČEROVIĆ, L. S.; ČOKEŠA, D. M.; ZEC, S. **The influence of cationic impurities in silica on its crystallization and point of zero charge**. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 309, n. 1, p. 155-159, 2007.

MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; HINRINCHSEN, G. Biofibers, biodegradable polymers and biocomposites: An overview. **Macromolecular Materials and Engineering**, v. 276, p.1-24, 2000.

MONACO, P. A.; MATOS, A. T.; LOPES JUNIOR, A. P.; LIMA, J. T. Desempenho de filtros constituídos por fibras de coco no tratamento de águas residuárias de suinocultura. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 17, n. 6, p. 473-480, dez. 2009.

MONTEIRO, P. J. M.; MILLER, S. A.; HORVATH, A. Towards sustainable concrete. **Nature**, v. 16, 698–699, jul. 2017.

MOREIRA, M. A.; DANTAS, F. M.; BIANCHINI, F. G.; VIEGAS, P. R. A. Produção de mudas de berinjela com uso de pó de coco. **Revista brasileira de produtos agroindustriais**, Campina Grande, v. 12, n. 2, p. 163–170, 2010.

MORITZ, G. L.; GIANNETTI, B. F.; PIRES, C. E. Confecção de produtos com o aproveitamento da casca do coco verde. **XIV International Conference on Engineering and Technology Education**, Salvador, 2016.

MULLER, R. M. **Avaliação de Transmissão de Esforços em Pavimentos Intertravados de Blocos de Concreto**. 2005. 234 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

N

NAGARAJAN, V. K.; DEVI, S. A.; MANOHARI, S. P.; SANTHA, M. M. Experimental Study on Partial Replacement of Cement with Coconut Shell Ash in Concrete. **International Journal of Science and Research (IJSR)**, v. 3, n. 3, p. 651-661, mar. 2014.

NATION MASTER - Global Industry Market Sizing. **Coconuts Production**. Acesso em: <<https://www.nationmaster.com/nmx/timeseries/indonesia-coconuts-production>>. Disponível em: 26 dez. 2021

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5.ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2. ed. São Paulo: Bookman, 2013.

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. **Dendroenergia**: fundamentos e aplicações. Brasília, DF: ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, 2000. 144 p.

O

OHLER, J.G. **Modern Coconut Management**: Palm cultivation and products. Rome: FAO, 1998.

OLIVEIRA, A. B.; HERNANDEZ, F. F. F.; JUNIOR, R. N. A. Pó de coco verde, uma alternativa de substrato na produção de mudas de berinjela. **Rev. Ciên. Agron**, v. 39, n. 1, 2008.

OLIVIER, J. G. J.; JANSSENS-MAENHOUT, G.; MUNTEAN, M.; PETERS, J. A. H. W. **Trends in global CO₂ emissions**: 2016 Report. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, The Hague; European Commission, Joint Research Centre (JRC), Institute for Environment and Sustainability (IES), 2016.

OLIVIER, J. G. J.; JANSSENS-MAENHOUT, G.; MUNTEAN, M.; PETERS, J. A. H. W. **Trends in Global CO₂ emissions**: 2016 report. Netherlands: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 2016.

OSS, H. G.; PADOVANI, A. C. Cement Manufacture and the Environment: Part I: Chemistry and Technology. **Journal of Industrial Ecology**, v. 6, n. 1, p. 89–105, 2002.

P

PAIVA, O. A. **Durabilidade de concretos contendo cinza do bagaço da cana-de-açúcar. Industrial de Vidro Moído em Argamassa de Cimento Portland**. 2016. 282 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

PANTOJA, S. C. S. **Sistemática Vegetal II**. UCB, v. 2, 2010. 36 p.

PASSOS, P. R. A. **Destinação sustentável de cascas de coco (*Cocos nucifera*) verde: obtenção de telhas e chapas de partículas**. 2005. 166 p. Tese (Doutorado em Ciências em Planejamento Energético), COPPE, Universidade Federal do Rio De Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

PATIL, C.; MANJUNATH, M.; HOSAMANE, S.; BANDEKAR, S.; ATHANI, R. Pozzolonic activity and strength activity index of bagasse ash and fly ash blended cement mortar. **Materials Today: Proceedings**, v. 42, p. 1456–1461, 2020.

PRAKASH, R.; THENMOZHI, R.; RAMAN, S. N.; SUBRAMANIAN, C. Fibre reinforced concrete containing waste coconut shell aggregate, fly ash and polypropylene fibre. **Revista Facultad de Ingeniería**, n. 94, p. 33–42, jan./mar., 2020.

PRIMAVESI, A.C. **Características de corretivos agrícolas**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2004. 28p. Embrapa Pecuária Sudeste. Documentos, 37

PRODUÇÃO AGRÍCOLA MUNICIPAL (PAM). **Lavouras Temporárias e Lavouras Permanentes**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?=&t=resultados>>. Acesso em: 10 jun. 2020.

R

RAMADHANSYAH, P. J.; MASRI, K. A.; AWANG, H.; SATAR, M. K. I. M.; HAININ, M. R. R.; NORHIDAYAH, A. H.; MOHD WARID, M. N.; YAACOB, H. JURAIDAH, H.. Short Term Aging Effect of Asphaltic Concrete Incorporating Charcoal Ash from Coconut Shell, **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 712, 2020.

RAMOS, S. J.; GUILHERME, D.; CALDEIRA JR., C., SAMPAIO, R., COSTA, C., FERNANDES, L. A. Produção de mudas de tomate em substrato contendo fibra de coco e resíduo de cultivo de cogumelo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 3, n. 3, p. 237-241, jul-set 2008.

RAVERDY M., BRIVOT F., PAILLERE A.M., DRON, R. Appreciation de l'activite pouzzolanique des constituants secondaires. **In: 7th Int. Congr. Chem. Cem. Paris**, 1980.

RENÓ, M. **Uso de Técnicas de Otimização Robusta Multi-Objetivos na Produção de Cimento**. 2007. 141 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Instituto de Engenharia Mecânica, UFI, Itajubá, 2007.

ROSA, M. F., SOUZA FILHO, M. S. M., FIGUEIREDO, M. C. B., MORAIS, J. P. S., SANTAELLA, S. T., LEITAO, R. C. Valorização de resíduos da agroindústria. **II Simpósio internacional sobre gerenciamento de resíduos agropecuários e agroindustriais - II SIGERA**, Foz do Iguaçu, 2011.

ROSA, M. F.; ABREU, F. A. P.; FURTADO, A. A. L.; BRÍGIDO, A. K. L.; NORÕES, E. R. V. **Processo agroindustrial**: obtenção de pó de casca de coco verde. Fortaleza: Embrapa, 2001.

ROSA, M. F.; MATTOS, A. L. A.; CRISSOSTOMO, L. A.; FIGUEIREDO, M. C. L.; BEZERRA, F. C.; VERAS, L. G.; CORREIA, D. **Aproveitamento da casca de coco verde**. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2009.

S

SALAMAI, A.; HUSSAIN, O. K.; SABERI, M.; CHANG, E.; HUSSAIN, F. K. Highlighting the importance of considering the impacts of both external and internal risk factors on operational parameters to improve Supply Chain Risk Management. **IEEE Access**, v. 7, 2019.

SALONI; PARVEEN; PHAM, T. M.; LIM, Y. Y.; PRADHAN, S. S.; JATIN; KUMAR, J. Performance of rice husk Ash-Based sustainable geopolymer concrete with Ultra-Fine slag and Corn cob ash. **Construction and Building Materials**, v. 279, p. 122526, 2021.

SAMADHI, T. W.; WUMLANDARI, W; PRASETYO, M. I.; FERNANDO, M. R. Reuse of Coconut Shell, Rice Husk, and Coal Ash Blends in Geopolymer Synthesis. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 248, out. 2017.

SÁNCHEZ, F.P. Propriedades y características de los substratos: turba y fibra de coco. In: FERNÁNDEZ, M. F.; GÓMEZ, I. M. C. (Ed). **Cultivo sem suelo II: Curso superior de especialización**. p. 65-92. Almería, Espanha: Dirección Gen. de Investigación y Formación Agraria de la Junta de Andalucía/FIAPA/Caja Rural de Almería, 1999. 590 p.

SANTANA, P. H. R.; GERBER, J. Z.; FONSECA, F. D. S.; SILVA JUNIOR, J. C. P. Estratégia de produção auxiliando no desenvolvimento de um produto a partir de resíduos do coco verde. **XXI Simpósio de Engenharia de Produção - XXI SIMPEP**, Bauru, 2014.

SANTOS, D. E.; MARTINEZ, F. C. C.; JUIZ, P. J. L. A Fibra de Coco como Matéria-prima para o Desenvolvimento de Produtos: uma prospecção tecnológica em bancos de patentes. **Cadernos de Prospecção**, v. 12, n. 1, p. 153-164, mar. 2019.

SANTOS, V. R. F. **Análise do desempenho de pisos táteis, intertravados, produzidos com agregados de resíduo de construção civil – RCC e fibras de aço**. 2014. 117 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia), Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2014.

SARKI, J.; HASSAN, S. B.; AIGBODION, V. S.; OGHENEVWETAM J. E. Potential of using coconut shell particle fillers in eco-composite materials. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 509, n. 5, p. 2381-2385, 2011.

SATHEESH, M.; PUGAZHVADIVU, M. Investigation on physical and mechanical properties of Al6061-Silicon Carbide (SiC)/Coconut shell ash (CSA) hybrid composites. **Physica B: Condensed Matter**, v. 572, n. May, p. 70–75, 2019.

SELLITTO, M. A. **Sistemas de Produção Sincronizado: Uma Aplicação em Processos Produtivos de Propriedade Contínuos Segundo a Teoria das Restrições**. 1999. 174 p. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1999.

SENHORAS, E. M. Oportunidades da Cadeia Agroindustrial do Coco Verde: do coco verde nada se perde, tudo se desfruta. **Revista Urutágua**, Maringá, n. 5, dez./mar. 2004.

SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS (Sebrae). **Como Montar uma Fábrica de Briquetes**. Disponível em: <<https://atendimento.sebraemg.com.br/biblioteca-digital/content/como-montar-uma-fabrica-de-briquetes>>. Acesso em: 18 maio 2020.

SILVA, D. J.; MENDES, A. M. S. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia22/AG01/arvore/AG01_68_24112005115223.html>. Acesso em: 07 jul. 2021.

SILVEIRA, M. S. **Aproveitamento das cascas de coco verde para produção de briquete**. 2008. 163 p. Dissertação (Mestrado em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo), Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2008.

SIMON, R. G. C.; DA SILVA, M. P.; DE SOUZA, C. C. Reconsidere-Applicativo que auxilia no processo da coleta seletiva. **Revista UNIPLAC**, v. 6, n. 1, 2018.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **Números da Indústria**. Disponível em: <<http://snic.org.br/numeros-industria.php>>. Acesso em: 14 maio 2020.

SING, K. S. W.; EVERETT, D. H.; HAUL, R. A. W.; MOSCOU, L.; PIEROTTI, R. A.; ROUQUEROL, J.; SIEMIENIEWSKA, T. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity. **Pure Appl. Chem.**, v.57, p. 603–619, 1985.

STARON, P.; CHWASTOWSKI, J.; BANACH, M. Sorption and desorption studies on silver ions from aqueous solution by coconut fiber. **Journal of Cleaner Production**, v. 149, p. 290-301, jan. 2017.

T

TANG, P. CHEN, W.; XUAN, D.; ZUO, Y.; POON, C. S. Investigation of cementitious properties of different constituents in municipal solid waste incineration bottom ash as supplementary cementitious materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 258, p. 120675, 2020.

TASHIMA, M. M. **Cinza de casca de arroz altamente reativa**: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland. 2006. 243 p. Tese (Doutorado. Universidade do Estado de São Paulo, São Paulo, SP.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. 2. ed. London: Thomas Telford, 1997.

TEIXEIRA, E. R.; MATEUS, R.; CAMOES, A. F.; BRAGANÇA, L.; BRANCO, F. G. Comparative environmental life-cycle analysis of concretes using biomass and coal fly ashes as partial cement replacement material. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 2221–2230, 2016.

U

UTLU, Z.; SOGUT, Z.; HEPBASLI, A.; OKTAY, Z. Energy and Exergy Analyses of Raw Mill in a Cement Production. **Applied Thermal Engineering**, v 26, p. 2479-2489, 2006.

UTSEV, J. T.; TAKU, J. K. Coconut Shell Ash as Partial Replacement of Ordinary Portland Cement In Concrete Production. **International Journal of Scientific & Technology Research**, v. 1, n. 8, p. 8689, set. 2012.

V

VAYGHAN, A. G.; KHALOO, A. R.; RAJABIPOUR, F. The effects of a hydrochloric acid pre-treatment on the physicochemical properties and pozzolanic performance of rice husk ash. **Cement and Concrete Composites**, v. 39, p. 131-140, 2013.

VENEZIA, A. M.; LA PAROLA, V.; LONGO, A.; MARTORANA, A. Effect of alkali ions on the amorphous to crystalline phase transition of silica. **J. Solid State Chem.** v. 161, p. 373–378, 2001.

VIEIRA, A. P.; TOLEDO FILHO, R. D.; TAVARES, L. M.; CORDEIRO, G. C. Effect of particle size, porous structure and content of rice husk ash on the hydration process and compressive strength evolution of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 236, p. 1–9, 2020.

Y

YAO, X.; ZHAO, Z.; LI, J.; ZHANG, B.; ZHOU, H.; XU, K. Experimental investigation of physicochemical and slagging characteristics of inorganic constituents in ash residues from gasification of different herbaceous biomass. **Energy**, v. 198, p. 117367, 2020.

Z

ZANOTTI, R. F.; MOTTA, L. B.; LOPES, J. C.; MENGARDA, L. H. G.; PAIVA, C. E. C. Propagação de *Schlumbergera truncata* (Haw): alternativas ao uso do xaxim. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 9, n. 3, p. 337-341, jul./set. 2015.